



DEMİRYOLU GÜVENLİĞİ İÇİN FİBER OPTİK SENSÖR TASARIMI

Nail Ferhat ÖZTÜRK

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2018

Nail Ferhat ÖZTÜRK tarafından hazırlanan “DEMİRYOLU GÜVENLİĞİ İÇİN FİBER OPTİK SENSÖR TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Murat YÜCEL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Başkan: Prof. Dr. H. Haldun GÖKTAŞ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Ankara Yıldırım Beyazıt

Üniversitesi

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

Üye: Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Üye: Doç. Dr. İsa NAVRUZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi

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

Üye: Doç. Dr. Mustafa BURUNKAYA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 20 / 06 /2018

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Nail Ferhat ÖZTÜRK

20 / 06 /2018

DEMİRYOLU GÜVENLİĞİ İÇİN FİBER OPTİK SENSÖR TASARIMI
(Doktora Tezi)

Nail Ferhat ÖZTÜRK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2018

ÖZET

Optik fiber haberleşme ve güvenlik sistemleri, teknolojik gelişmelerde önemli bir yer tutmaktadır. Optik fiber haberleşme teknolojisindeki hızlı ve belirgin gelişme ile birlikte elektronik sensörlerin yerine kullanılan optik sensör sistemleri de yaygınlaşmaktadır. Endüstriyel açıdan bakıldığında fiber optik sensörler, elektromanyetik girişimden etkilenmemeleri, ilave enerji kaynağına ihtiyaç duymamaları, su ve korozyona karşı dirençli olmaları, paralel ve seri olarak çoklanabilmeleri, maliyetlerinin düşük olması gibi avantajlarından dolayı konvansiyonel sensörlere göre çok daha cazip hale gelmeye başlamışlardır. Fiber optik sensörler temel olarak optik saçılmaya dayalı olmakla birlikte, algılama teknikleri ve yapılarına göre farklılık göstermektedir. Bu tez çalışmasında, fiber Bragg ızgara (FBI) tabanlı sensör sistemi benzetimi yapılarak ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Benzetim için OptSim 12.0 programı kullanılmıştır. Geliştirilen sensör sistemleri ile gerilme ve sıcaklık ölçümü için farklı uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bu sensör sistemleri ile geliştirilebilecek demiryolu güvenlik sistemleri incelenmiştir. FBI ile sıcaklık ölçümü için gerçekleştirilen benzetimde dalgaboyu ve sıcaklık değişimi arasında $10 \text{ pm}/1^\circ\text{C}$ 'lik değişim gözlemlenmiştir. Sıcaklık ölçümü için yapılan deneysel çalışmalarda farklı hassasiyetlere sahip FBI'lar kullanılmış ve maksimum 0.5°C 'lik sapma ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Gerilme ölçümü için gerçekleştirilen deneysel çalışmada ise kullanılan metal kaplamalı FBI ile dalgaboyu değişimi ve gerilme ölçümü arasında $1.38 \text{ pm}/\mu\epsilon$ gibi bir değişim olduğu hesaplanmıştır. Gerilme ölçümünde uygulanan kuvvet ve malzeme özelliklerine göre hesaplanan teorik değerler ile ölçülen değerler arasında maksimum % 2.5 sapma olduğu gözlemlenmiştir. Bu uygulamalarda FBI ile alınan ölçümlerin gerçek zamanlı takibi için özgün bir kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır. Geliştirilen sinyal işleme yazılımı ve tasarlanan arayüz ile kararlı ölçümler almak mümkün olmuştur.

Bilim Kodu : 90533
Anahtar Kelimeler : Fiber optik sensör, fiber Bragg ızgara, FBI sensör sorgulama sistemi, sıcaklık ölçümü, gerilme ölçümü, demiryolu güvenliği
Sayfa Adedi : 110
Danışman : Doç. Dr. Murat YÜCEL

FIBER OPTICAL SENSOR DESIGN FOR RAILWAY SAFETY

(Ph.D. Thesis)

Nail Ferhat OZTURK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2018

ABSTRACT

Optical fiber communication and security systems have an important place in technological developments. Along with the rapid and prominent development in optical fiber communication technology, optical sensors used in place of electronic sensors are becoming widespread. From an industrial point of view, fiber optic sensors are becoming much more attractive than conventional sensors due to their advantages like immune to electromagnetic interference, not to need additional energy source, resistance to water and corrosion, and their ability to be parallel or serialized. Fiber optic sensors are basically based on optical scattering, but they differ with respect to detection techniques and structures. The study has been realized by performing the fiber Bragg grating (FBG) based sensor system simulations and experiments. For the simulation OptSim 12.0 program has been used. Different applications have been realized for strain and temperature measurement by using developed sensor systems. Railway safety systems that can be developed with these sensor systems have been examined. The simulation results demonstrate that, a wavelength / temperature change of 10 pm / 1 °C was observed due to temperature measurement with FBG. Experimental studies for temperature measurement have used FBGs with different sensitivities and temperature measurements were carried out with a maximum deviation of 0.5 °C. The strain measurement which was held during the experimental study proves that, there is 1.38 pm/ $\mu\epsilon$ change between wavelength and strain measurement for metal coated FBG. It has been observed that there is a maximum deviation of 2.5% between the calculated theoretical values and the measured values according to the applied force and material properties in the tensile test. In these case studies, a user-friendly and unique graphical user interface has been designed for real-time monitoring of measurements taken with FBG. With the improved signal processing software and the designed interface, it is possible to get stable measurements.

Science Code : 90533

Key Words : Optical fiber sensor, fiber Bragg grating, FBG sensor interrogation, temperature measurement, strain measurement, railway safety

Page Number : 110

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim sürecinde ve tezimin hazırlanmasında yardımını ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle her zaman yol gösteren, yaptığım tüm akademik çalışmalarda emeği geçen çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Murat YÜCEL'e, bu tez çalışmasına 5130044 nolu "Fiber Optik Algılama Sistemi Tasarımı ve Geliştirilmesi" isimli proje ile destek sağlayan TÜBİTAK'a ve 07/2017-03 nolu "Fiber Bragg Izgara Tabanlı Hassas Sıcaklık Ölçüm Sistemi" isimli proje ile destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine, laboratuvarlarında çalışma imkanı tanıyan TCDD Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezine, hayatımın her anında bana desteklerini esirgemeyen, sabır ve hoşgörü gösteren aileme, iş hayatımda beraber vakit geçirdiğimiz, bilgi paylaşımında bulunduğumuz ve bana destek olan tüm arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. FİBER TEKNOLOJİSİ VE FİBER OPTİK SENSÖRLER.....	21
3.1. Dağıtık Algılamalı Fiber Optik Sensörler	27
3.2. Fiber Bragg Izgaralar ve FBI Tabanlı Sensörler	29
3.2.1. FBI teorisi ve üretim yöntemleri	30
3.2.2. FBI sensörler	36
3.2.3. FBI sensörlerde çoğullama.....	39
4. FBI GERİLME VE SICAKLIK SENSÖRLERİ İLE DEMİRYOLU UYGULAMALARI	41
4.1. Gerilme Kavramı ve FBI Sensör ile Gerilmenin Algılanması	41
4.2. FBI Sensör ile Sıcaklık Algılama.....	46
4.3. Demiryollarında FBI Sensör Uygulamaları	48
4.3.1. Raylar ile trenler arasındaki etkileşimin algılanması	49
4.3.2. Aks sayma ile tren dedeksiyonu ve hız tespiti	51

	Sayfa
4.3.3. Tünel ve viyadük güvenliği.....	52
4.3.4. Katener-pantograf ilişkisinin izlenmesi	53
5. FBI SENSÖR SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE DENEYSEL OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	55
5.1. FBI Sensör Sistemi Benzetimi	56
5.1.1. Tekli FBI sensör sistemi benzetimi.....	56
5.1.2. FBI sensör dizisinin benzetimi.....	58
5.2. Geniş Bantlı Lazer Kaynağı (GBLK) ile FBI Sıcaklık Sensör Dizisi Tasarımı..	64
5.3. Ayarlanabilir Lazer Kaynağı (ALK) Kullanılarak FBI Sıcaklık Sensörü ve Sensör Dizisi Tasarımı	69
5.3.1. Seramik kaplamalı FBI1 ile ALK kullanılarak sıcaklık algılama.....	70
5.3.2. Metal kaplamalı FBI2 ile ALK kullanılarak sıcaklık algılama.....	72
5.3.3. ALK ile FBI sıcaklık sensör dizisinin gerçekleştirilmesi	75
5.4. ALK ile FBI Gerilme Sensörünün Gerçekleştirilmesi	78
5.4.1. Teorik analiz.....	79
5.4.2. Deneysel analiz	81
6. FBI SENSÖR SİSTEMİ TASARIMINDA SİNYAL İŞLEME ADIMLARI.....	85
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	109

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. FBI1 ile FBI2 için 30 °C-100 °C aralığında yansıyan optik sinyal değerleri	76



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Fiber optik kablonun fiziksel yapısı	21
Şekil 3.2. Optik fiber türleri	22
Şekil 3.3. Fiber kuplörün yapısı	22
Şekil 3.4. Optik sirkülatörün yapısı	23
Şekil 3.5. Dıştan etkileşimli ve içten etkileşimli optik sensör yapıları	24
Şekil 3.6. Işık yoğunluğu modülasyonlu fiber optik sensörlerin çalışma prensibi	25
Şekil 3.7. Faz modülasyonlu optik sensörlerde kullanılan interferometreler	25
Şekil 3.8. Dalgaboyu modülasyonlu fiber optik sensör kurulumu.....	26
Şekil 3.9. Polarizasyon modülasyonlu fiber optik sensörler.....	26
Şekil 3.10. Tek modlu fiberin dalga boyuna bağlı zayıflama eğrisi	28
Şekil 3.11. 1550 nm dalga boyunda fiberde oluşan kendiliğinden Rayleigh, Brillouin ve Raman saçılım spektrumları	29
Şekil 3.12. Fiber Bragg ızgara yapısı.....	30
Şekil 3.13. FBI yan yazma tekniği.....	31
Şekil 3.14. Faz maskesi kullanılarak FBI üretme yöntemi	32
Şekil 3.15. Nokta tekniği ile FBI üretme yöntemi	32
Şekil 3.16. Tekdüze FBI'nın indis modülasyon genliği ve periyodu ile birlikte gösterimi	34
Şekil 3.17. Tekdüze FBI'nın kırılma indis gösterimi	35
Şekil 3.18. FBI'daki kırılma indis değişim yapıları	36
Şekil 3.19. Kenar filtre tekniğine dayalı FBI sensör hassasiyeti	37
Şekil 3.20. Sensör dizisinde FBI spektral aralıkları.....	36
Şekil 4.1. Boylamsal gerilme ölçümünde gözlenen uzunluk değişimi	41

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. Stres ile gerilme arasındaki genel ilişki	42
Şekil 4.3. FBI gerilme sensörünün genel şematik deney düzeneği.....	43
Şekil 4.4. FBI'ya gerilme uygulanmadan önceki ve sonraki durumlar	44
Şekil 4.5. FBI sıcaklık sensörünün genel şematik deney düzeneği	47
Şekil 4.6. Tren ile ray ana bileşenleri	49
Şekil 4.7. Trenin geçişi ile raydaki FBI'da zamanla oluşan dalgaboyu değişim grafiği	50
Şekil 4.8. FBI sensör ile demiryolunda aks sayma şematik gösterimi.....	51
Şekil 4.9. FBI Sensör ile viyadüklerin yapısal bütünlüğünün izlenmesi	52
Şekil 4.10. Tünellerin yapısal bütünlüğünün izlenmesi için fiber optik sensör uygulaması	53
Şekil 4.11. Katener-pantograf ilişkisinin FBI algılayıcılar ile izlenmesi.....	54
Şekil 5.1. Tekli FBI sensör sistemi için Optsim ile oluşturulan benzetim devresi	56
Şekil 5.2. 0 °C'de iletilen (a) ve yansıyan (b) optik sinyallerin dalgaboyu spektrumu .	57
Şekil 5.3. 0 °C'de iletilen (a) ve yansıyan (b) sinyallerin frekans spektrumu	57
Şekil 5.4. 60°C'de iletilen (a) ve yansıyan (b) optik sinyallerin dalgaboyu spektrumu	57
Şekil 5.5. 60°C'de iletilen (a) ve yansıyan (b) optik sinyallerin frekans spektrumu	57
Şekil 5.6. FBI sensör dizisi için tasarım şeması	58
Şekil 5.7. FBI sensör dizisi için OptSim ile oluşturulan benzetim devresi	59
Şekil 5.8. 0 °C'de 5 FBI için iletilen (a) ve yansıyan (b) optik sinyallerin dalgaboyu spektrumu	60
Şekil 5.9. 0 °C'de 5 FBI için iletilen (a) ve yansıyan (b) sinyallerin frekans spektrumu	60
Şekil 5.10. 60 °C'de 5 FBI için iletilen (a) ve yansıyan (b) optik sinyallerin dalgaboyu spektrumu	61
Şekil 5.11. 60 °C'de 5 FBI için iletilen (a) ve yansıyan (b) sinyallerin frekans spektrumu	61

Şekil	Sayfa
Şekil 5.12. 5 FBI için sırasıyla 0-20-40-60-0 °C’de iletilen (a) ve yansıyan (b) optik sinyallerin dalgaboyu spektrumu	61
Şekil 5.13. 5 FBI için sırasıyla 0-20-40-60-0 °C’de iletilen (a) ve yansıyan (b) sinyallerin frekans spektrumu	62
Şekil 5.14. FBI sensörlerde sıcaklık değişimi ile dalgaboyu spektrumunda gözlenen değişim	62
Şekil 5.15. FBI sensörlerde sıcaklık değişimi ile frekans spektrumunda gözlenen değişim	63
Şekil 5.16. FBI ile sıcaklık ölçümünde kullanılan termal ortam	65
Şekil 5.17. GBLK ile oluşturulan FBI sensör dizisi	65
Şekil 5.18. 30°C de FBI’lardan yansıyan optik sinyal spektrumları	66
Şekil 5.19. 60°C de FBI’lardan yansıyan optik sinyal spektrumları	66
Şekil 5.20. 90 °C’de FBI’lardan yansıyan optik sinyal spektrumları	66
Şekil 5.21. FBI1 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında elde edilen optik sinyal değişimleri	67
Şekil 5.22. FBI2 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında elde edilen optik sinyal değişimleri	67
Şekil 5.23. FBI3 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında elde edilen optik sinyal değişimleri	68
Şekil 5.24. FBI4 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında elde edilen optik sinyal değişimleri	68
Şekil 5.25. Tekli FBI sıcaklık sensörü için deney düzeneği	70
Şekil 5.26. FBI sensör dizisi için ALK ile lazer tarama tekniği	70
Şekil 5.27. Seramik kaplamalı FBI.....	71
Şekil 5.28. FBI1 ile 30-60-90 °C sıcaklıklarda alınan ölçüm sonuçları	71
Şekil 5.29. FBI1 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında yansıyan optik sinyaldeki değişimler	72
Şekil 5.30. Metal kaplamalı FBI.....	72
Şekil 5.31. FBI2 ile sıcaklık değişimlerine karşılık gelen sinyal güç değerleri	73

Şekil	Sayfa
Şekil 5.32. FBI2 ile 99 °C’de alınan ölçüme karşılık gelen dalgaboyu spektrumu	74
Şekil 5.33. FBI2 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında yansıyan optik sinyaldeki değişimler.....	74
Şekil 5.34. ALK ile FBI sensör dizisi için deney düzeneği	75
Şekil 5.35. FBI sensör dizisi ile sıcaklık ölçümü	76
Şekil 5.36. FBI ile gerilme ölçüm düzeneği	78
Şekil 5.37. a) Tren/ray arasındaki dikey ve yatay kuvvetler, b) raya uygulanan dikey kuvvetin FBI sensör ile ölçümü	79
Şekil 5.38. EN 13674-1 standardına göre 49E1 ray profiline ait ölçüler.....	80
Şekil 5.39. FBI ile gerilme sensörü tasarımı için fiziksel kurulum	81
Şekil 5.40. Rayın merkezine uygulanan kuvvet-zaman grafiği	81
Şekil 5.41. (a) Kuvvet uygulama kontrol bilgisayar, (b) FBI sorgulama sistemi	82
Şekil 5.42. ALK ile FBI gerilme sensörü tasarımı için deneysel kurulum düzeneği.....	82
Şekil 5.43. Uygulanan kuvvete karşılık teorik olarak hesaplanan ve ölçülen gerilme değerleri	83
Şekil 6.1. Tipik Bragg yansıma sinyali	86
Şekil 6.2. Gaussian uyarılama ile merkez dalgaboyunun belirlenmesi.....	88
Şekil 6.3. Gaussian uyarılama tekniği ile sıcaklık ölçüm prensibi	89
Şekil 6.4. ALK ile lazer tarama tekniği	89
Şekil 6.5. Dalgaboyu tarama yönteminde FBI sensör sisteminin akış diyagramı	91
Şekil 6.6. FBI sensör sistemi için tasarlanan kullanıcı arayüzü.....	93
Şekil 6.7. Bilgisayar kullanıcı arayüzü gerilme ölçümü	94

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Λ	Izgara saçak aralığı
λ	Dalgaboyu
n	Kırılma indisi
λ_B	Bragg dalgaboyu
σ	Stres
ε	Gerilme
E	Young modülü
ν	Poisson oranı
L	Uzunluk
ΔL	Uzunluk değişimi
F_n	Uygulanan kuvvet
α	Isıl genleşme katsayısı
η	Termo-optik katsayı
L_{FBI}	FBI uzunluğu
m	Metre
MHz	Megahertz
cm	Santimetre
kHz	Kilohertz
Hz	Hertz
km	Kilometre
$\mu\varepsilon$	Mikrostrain
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
ns	Nanosaniye
ps	Pikosaniye
pm	Pikometre
t	Zaman

Simgeler**Açıklamalar**

c	Işık hızı
mW	Miliwatt
mA	Miliamper
gr	Gram

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ADD	Analog dijital dönüştürücü
ALK	Ayarlanabilir ışık kaynağı
AOAF	Akustik-optik ayarlanabilir filtre
AOM	Akusto optik modülatör
BİF	Basamak indisli fiber
ÇMF	Çok modlu fiber
DBÇ	Dalgaboyu bölmeli çoğullama
DİF	Derece indisli fiber
EKFY	Erbiyum katkılı fiber yükselteç
EMG	Elektromanyetik girişim
EOM	Elektro optik modülatör
FBI	Fiber Bragg ızgara
FBG	Fiber Bragg grating
FD	Foto diyot
FPG	Fabry-perot girişimölçer
GBLK	Geniş bantlı lazer kaynağı
MATLAB	Matrix laboratuvarı
MI	Michelson girişimölçer
MZI	Mach-Zehnder girişimölçer
OFDR	Optik frekans domeni reflektometrisi
OZDR	Optik zaman domeni reflektometrisi
OSA	Optik spektrum analizörü
POF	Plastik optik fiber
RF	Radyo frekansı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

RFG	Radyo frekans girişimi
SD	Sürekli dalga
SG	Sagnac girişimölçer
SGO	Sinyal gürültü oranı
SSİ	Sayısal sinyal işleme
TMF	Tek modlu fiber
VİK	Veri işleme kartı
YMTG	Yarı maksimumda tam genişlik
YSA	Yapay sinir ağları
UPI	Uzun periyotlu ızgara
ZBÇ	Zaman bölmeli çoğullama
ZDR	Zaman domeni reflektrometrisi

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde birçok alanda sensörler önemli bir yere sahiptir. Fiber optik sensörler önemli bazı avantajları nedeniyle yaygınlaşmakta, elektronik ve konvansiyonel sensörlerin yerini almaktadır. Endüstriyel açıdan bakıldığında fiber optik sensörler, elektromanyetik girişimden etkilenmemeleri, ilave enerji kaynağına ihtiyaç duymamaları, su ve korozyona karşı dirençli olmaları, paralel ve seri olarak çoklanabilmeleri, maliyetlerinin düşük olması gibi avantajları ve optik fiber haberleşme teknolojisindeki gelişmeler nedeniyle konvansiyonel sensörlere göre çok daha cazip hale gelmektedir [1-4].

Fiber optik sensörleri fonksiyonelliğine göre noktasal algılamalı ve dağıtık algılamalı sensörler olarak sınıflandırmak mümkündür. Fiber içerisinde ışık ilerlerken silikanın saf olmamasından kaynaklanan doğrusal veya doğrusal olmayan saçılmalar oluşmaktadır. Dağıtık algılamalı fiber optik sensör sistemlerinde genellikle Raman, Brillouin ve Rayleigh saçılmaları kullanılmaktadır. Temel olarak, bir fiber optik sensör, yansıyan ışık dalgasının faz, polarizasyon, frekans gibi özelliklerinden bir veya birkaçını modüle ederek çalışmaktadır. Saçılma tabanlı bu fiber optik sensör dağıtık sensör olarak sınıflandırılmakta ve gerilme, sıcaklık, basınç, v.b. çevresel etkenleri ölçmek mümkün olmaktadır. Noktasal algılamalı fiber optik sensörlerin en bilinen ve yaygın olarak kullanılanları FBI tabanlı sensörlerdir. Bu sensör ile sıcaklık ve gerilmedeki değişimleri, yansıyan ışığın dalgaboyundaki kayma ile yaklaşık olarak tespit etmek mümkün olmaktadır [3-9].

Fiber optik sensörler; inşaat [10], sağlık [11], havacılık [12], denizcilik [13], petrol [14] ve akıllı ulaşım sistemlerinde [15] geniş kullanım alanı bulmaktadır. Demiryolları da fiber optik sensör sistemleri için uygun bir kullanım alanı olmaktadır [16-20].

Son yıllarda demiryolları ile yük ve yolcu taşımacılığında artış gözlenmekte, demiryolu altyapılarına yapılan yatırımlar önemli ölçüde artmaktadır. Yapılan istatistiklere göre gelecek 10 yıl içinde demiryolu taşımacılığının en az iki kat artacağı öngörülmektedir. Böylece dingil yükünün ve tren işletme hızlarının da artması beklenmektedir. Bu yeni işletme şartlarına uygun olarak, yenilikçi güvenlik önlemleri almak da gerekecektir. Günümüz demiryolu teknolojisinde sensörler birçok alanda kullanılmaktadır. Fiber optik sensörler önemli bazı avantajları nedeniyle demiryollarında yaygınlaşmakta, elektronik ve konvansiyonel sensörlerin yerini almaktadır.

Demiryollarında hizmetin aksamaması ve kaliteli-güvenli yolculuğun sağlanabilmesi için, hat ve tren güvenliği önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle kırılan ve burkulmuş raylar ile trenlerin tekerleklerindeki ve yapısal bütünlüğündeki bozulmalar hizmetin aksammasına neden olabilmekte, güvenliği etkilemekte, büyük kazalara ve hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenle ray bozulmalarının noktasal tespiti ile trenlerin yapısal bütünlüğü, hızı ve yerinin tespit edilmesi konuları demiryolu güvenliği için önemli konulardır. Fiber optik sensör sistemleri demiryollarındaki bu bileşenlerin durumlarını izlemek için kullanılacak uygun maliyetli sistemlerdir. Fiber optik sensör teknolojisi sayesinde, demiryollarındaki tren trafiğini izlemek, ray ve tren vibrasyonlarını ölçmek, boji durumlarını, tren gövdesinin yapısal bütünlüğünü, katener sistemleri ile pantograflar arasındaki ilişkileri, tünel ve viyadüklerdeki yapısal bozuklukları, tünellerdeki sıcaklık artışını izlemek, demiryollarına düşen kaya ve benzeri cisimleri tespit etmek, hemzemin geçitlerin güvenliğini sağlamak mümkün olmaktadır.

Demiryollarında konvansiyonel sensör yerine fiber optik sensör kullanmanın önemli bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi demiryolu hattı boyunca bir fiber öz üzerinden, birçok noktadan algılama yapabilmektir. Fiber optik sensörlerin veri iletimine ek olarak güç kaynağına ihtiyaç duymuyor olmaları da önemli bir avantaj olmaktadır. Ayrıca bir tek sorgulama devresi ile tüm demiryolu hattı boyunca algılama yapabilmek mümkün olduğundan, kurulum maliyeti de düşük olmaktadır. Bununla birlikte fiber optik sensörlerin bakım maliyetleri de konvansiyonel sensörlere göre daha düşük olmaktadır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde literatür araştırması, üçüncü bölümünde fiber teknolojisi ve fiber optik algılama sistemleri, dördüncü bölümünde fiber Bragg ızgara (FBI) sensörlerle gerçekleştirilebilen gerilme ve sıcaklık sensörleri ile demiryolu uygulamaları, beşinci bölümünde FBI sensör ve sensör dizileri için yapılan tasarımlar, benzetim ve deneysel çalışmalar, altıncı bölümünde ise kullanılan sinyal işleme adımları anlatılmıştır.

Araştırmanın amacı ve kapsamı

Bu tez çalışmasında, FBI tabanlı sıcaklık ve gerilme sensörü ve sensör dizileri ile bunlara ait sorgulama sistemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla FBI sensör sistemi tek ve dizi olarak OptSim 12.0 yazılımı ile benzetimi yapılmıştır. Laboratuvar ortamında ise sıcaklık ve gerilme ölçümleri için farklı düzenekler geliştirilmiştir. Bu uygulamalarda FBI ile alınan ölçümlerin gerçek zamanlı izlenebilmesi için özgün bir arayüz tasarlanmıştır.

Araştırmanın önemi

FBI algılayıcılar, sensör teknolojisi için yeni ve ilgi çeken bir alan haline gelmiştir. Yurtdışında bilinen uygulamaları olmakla birlikte, yapılan literatür araştırmaları sonucunda ülkemizde bu konuda sınırlı sayıda akademik çalışmaya rastlanılmıştır. Ülkemizde ürüne dönüşen ticari FBI sensör sistemlerine ise henüz rastlanılmamıştır.

Optik sensör teknolojisi günümüzde sınırlı sayıda ülkede ürüne dönüştüğünden, tedarik maliyeti yüksek olmakta, kurulum sonrası işletme döneminde ise teknik destek almak kolay olmamaktadır.

Bu tez konusu çalışma ile hassas sıcaklık ve gerilme ölçebilecek yerli ve bilimsel algoritma ile desteklenen bir FBI sensör sistemi tasarımı yapılarak, ülke teknolojisi ve bilimsel çalışmalara katkıda bulunulması hedeflenmiştir. Geliştirilen FBI sensör sistemleri ile demiryollarında çözüm üretilebilecek bazı güvenlik konuları incelenmiş ve çözüm önerileri ele alınmıştır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

FBI tabanlı algılama sistemleri, temel olarak optik saçılmaya dayalı olmakla birlikte, birçok farklı algılama ve sorgulama tekniği ile gerçekleştirilmektedirler. Bu farklı FBI sensör sistemlerine ait literatür araştırması bu bölümde örnekleriyle verilmiştir.

Erdoğan'ın yaptığı çalışmada, fiber yansıma ve iletim ızgaralarındaki spektral karakteristikleri açıklanmıştır. Fiber ızgara içindeki muhtemel optik özellikleri göstermek için örnekler verilmiştir. Tekdüze (uniform), apodize, cıvıltılı (chirped), ayırık faz kaydırmalı (discrete phase-shifted), süper yapı (superstructure); kısa periyot ve uzun periyotlu ızgaralar; simetrik ve eğimli (tilted) ızgaralar; kılıf modu ve ışınım modu gibi çok sayıdaki FBI çeşidi incelenmiştir [4].

Ye ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada demiryollarının inşaat altyapısının bilgisayar kontrollü uzaktan izleme sistemleri ile izlenmesi için fiber optik sensörlerin kullanılabilirliği ve uygulamaları incelenmiştir [10].

Poeggel ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, tıbbi uygulamalar için optik fiber basınç sensörleri incelenmiştir. Bazı özel tıbbi yöntemler için bu sensörlerin avantajları araştırılmış ve bu alandaki son gelişmeler incelenmiştir [11].

Qiao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, FBI sensörlerin petrol sektöründe, özellikle de kuyu içi algılamalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, petrol ve doğalgaz sektöründe sismik araştırmalar için FBI sensörleri sıcaklık, basınç ve akustik dalga algılamalarında kullanılmıştır. FBI sensörlerinin fiziksel sismik modellerde, ultrasonik görüntüleme için kullanılabilirliği de incelenmiştir [14].

Liang ve Fang'ın yaptığı çalışmada, yol cıvatalarının kuvvetini izleyen FBI temelli bir cıvata kuvvet sensörü incelenmiştir. Bu sensör için elastik eleman olarak dirsek ve diyafram kullanılmış, algılama elemanı olarak da biri dirseğin tepesine diğeri altına olmak üzere iki adet FBI sensör kullanılmıştır. Deney sonuçları ile iki FBI arasındaki orta dalga boyu farkı kullanılarak ölçüm hassasiyetinin arttığı gözlemlenmiştir [15].

Ou tarafından yapılan tez çalışmasında, FBI sensör, raylardaki normal ve yanal yükleri ölçmek için gerilme sensörü olarak kullanılmıştır. Bu uygulamada FBI sensör erbiyum katkılı fiber yükselteç (EKFY) ile birlikte kullanılarak uygulama yapılmıştır. FBI'nın merkez frekansında $50 \mu\epsilon$ 'luk bir kuvvetin 0.05nm , $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin ise 0.094nm 'lik bir değişime neden olduğu gözlemlenmiştir [16].

Filigrano ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada fiber Bragg ızgara (FBI) tabanlı sensörler demiryolu trafiğini izlemek için kullanılmıştır. FBI sorgulama sistemi 4 sensörden oluşturulmuş saniyede 8000 örnek alınmıştır. Bu çalışmada FBI sensörler ile tren tanıma, aks sayma, hız algılama, tekerleklerdeki bozulmaları izleme gibi çalışmalar da yapılmıştır [17].

Bocciolone ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, fiber Bragg ızgara sensörler pantograflardaki kontak yükü ve pantograf tepesindeki dikey hızlanmayı ölçmek için kullanılmıştır. Aynı ölçümler elektriksel sensörlerle de yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elektriksel ve optik sensör ölçümlerinin uyumlu olduğu görülmüştür [18].

Wei ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, FBI sensörler aks sayma için kullanılmış, tren güvenliği ve kontrolünü sağlayan demiryolu sinyalizasyon sistemlerindeki ray devreleri gibi kullanılmıştır. Fiber sensörlerin elektromanyetik girişimden etkilenmemeleri nedeniyle konvansiyonel aks sayma sensörlerinden daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir [19].

Kang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, değişken ekartmanlı demiryolları için, ekartman geçişlerinde güvenlik ölçümleri için fiber optik sensörler bir grafik arayüz ile birlikte kullanılmıştır. Sistem ekartmandaki değişikliği ölçerek herhangi bir hata oluşup oluşmadığını operatöre bildirmek üzere tasarlanmıştır. FBI sensör teknolojisi kullanılarak tasarlanan sistemin testi gerçekleştirilmiştir [20].

Chung ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, yarı iletken optik yükselteç ile bir fiber Bragg ızgara sensör tasarlanmıştır. Tasarlanan bu konfigürasyon ile FBI'lar için yaklaşık %1 yansıma ile yüksek sinyal gücü üretilmektedir. Bir sensör sistemi, farklı dalgaboylarındaki dört gruptan oluşmaktadır ve her grup üç adet FBI'dan meydana gelmektedir. Bu sensör sistemi için zaman ve dalgaboyu bölmeli çoğullama tekniği kullanılmıştır [21].

Peng ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, yoğunluk ve dalgaboyu bölmeli çoğullama tekniğine dayalı FBI sensör sistemi tasarlanmış ve ışık kaynağı olarak ayarlanabilir çok portlu fiber ring lazer kullanılmıştır. Çok portlu fiber lazerin farklı çıkış güçleri, FBI sensörlerden yansıyan bilgileri adreslemektedir. Bu çalışmada üç port fiber sensör tasarlanmış ve deneysel olarak uygulanmıştır [22].

Rao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, eş zamanlı, uzamsal, zaman ve dalgaboyu bölmeli çoğullama tekniğine dayanan bir FBI sensör sistemi tasarlanmıştır. On bir adet fiber Bragg ızgara ile yarı statik, gerilme ölçen bir FBI sensör ağı tasarlanmış ve 7 μe gerilme çözünürlüğüne sahip sensör sistemi gerçekleştirilmiştir [23].

Dai ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada yapısal bütünlüğü izlemek için tasarlanan özgün bir FBI sensör sistemi incelenmiştir. Zaman bölmeli çoğullama tekniğine dayalı bir sensör sistemi tasarlanmıştır. Bu teknik, kazanç ortamı ve değişiklik için yarı iletken optik yükselteçleri kullanmaktadır. FBI sensörler bir fiber üzerinde yayılmış ve her birinin ayrı bir merkez dalgaboyu mevcuttur. Bu teknik ile 100 FBI'ya kadar ulaşabilen bir sensör sisteminin sorgulanabildiği gözlemlenmiştir [24].

Wu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada bir kenar filtresinin dalgaboyu ölçüm sistemi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dalgaboyu ölçüm sistemi için üç durum incelenmiştir. Birinci durumda, yansıyan FBI sinyali, referans ve sınır üstü filtresinden geçirilmiştir. İkinci durumda, yansıyan FBI sinyali yalnızca sınır üstü filtresinden geçirilmiştir. Üçüncü durumda, sınır üstü filtre FBI ile aynı hat üzerine konulmuştur. Bu üç durum hem benzetim hem de deneysel olarak incelenmiş ve en fazla dalgaboyu çözünürlüğüne sahip olan yöntemin üçüncü yöntem olduğu gözlemlenmiştir [25].

Luo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, çok zayıf fiber Bragg ızgaraya dayalı zaman bölmeli ve dalgaboyu bölmeli sensör çoğullama ağı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sensör ağının düşük giriş kaybı ve yüksek çoğullama yeteneği teorik analizler ile ve deneysel olarak incelenmiştir [26].

Koo ve Kersey'in yaptığı çalışmada FBI temelli lazerlerin sensör olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Tek modlu ve çok modlu lazerlerin yüksek çözünürlükleri ile lazer dalgaboyu

kaymaları, interferometrik bir algılama tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bir dizi halindeki çoklu sensör sistemi, dalgaboyu oğullama tekniği yaklaşımı ile incelenmiştir [27].

Dong ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ayarlanabilir bir darbeli lazer ile gerçekleştirilmiş FBI sensör sisteminin, kombine zaman ve dalgaboyu bölmeli oğullama demodülasyon tekniği ile tasarlanmış ve deneysel olarak incelenmiştir. Algılanan FBI'ların dalgaboyu algılamaları, bir fotodiyot ile gerilimleri algılanarak incelenmiştir [28].

Bigue'nin yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, seri olarak oklanmış özgün bir FBI sensör sistemi tasarlanmıştır. Bu alışmada FBI'lar birer çift olarak bağlanmış, her bir çift, temel bir algılama elemanı olarak kullanılmıştır. Her bir sensör sistemini birbirinden ayırt etmek için Fourier analizi kullanılmıştır. Her bir FBI çiftinin dalgaboyundaki kayma incelenerek, gerilme oznrlğ hesaplanmıştır. Bu oklu sensör çiftlerinin birbiriyle etkileşimlerini benzetim ortamında analiz etmek için de bilgisayarlı bir model geliştirilmiştir. Bu sensör sisteminin farklı sektörlerde uygulanabilirliği için öneriler sıralanmıştır [29].

Kersey ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada FBI sensör sistemindeki yeni gelişmeler incelenmiştir. Bu alışmada, FBI ile gerilme ölümü, cıvıltılı FBI sensörler, i ızgara algılama konsepti, uzun periyotlu ızgara sensörler, fiber ızgara lazer tabanlı sistemler ve interferometrik sensör temelli ızgara yansıtıcıları incelenmiştir [30].

Chi tarafından yapılan doktora çalışmasında, FBI sensör ile sensör dizilerinin ayarlanabilir lazer kaynağı (ALK) ile gerçekleştirilmesi incelenmiştir. Dalgaboyu algılama için en çok kullanılan iki teknik olan, direk algılama tekniği ile ilk sapmalı teknik incelenmiştir. Dalgaboyu ölümündeki gürültü etkileri ile istenmeyen interferometrik etkiler incelenmiştir. Gerilme algılama için 2 ve 4 FBI'dan oluşan sensör dizileri deneysel olarak incelenmiştir [31].

Zhou ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, gerçek zamanlı sıcaklık ve gerilme ölümü için fiber tabanlı sensörler incelenmiştir. FBI ile Mach-Zehnder interferometresi kullanılarak sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık lmleri 60 C'ye kadar, gerilme lmleri 600 $\mu\epsilon$ 'a kadar yapılmış ve ± 1 C hassasiyetle sıcaklık lmleri, ± 21 $\mu\epsilon$ hassasiyetle gerilme lmleri gerçekleştirilmiştir [32].

Tong ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Polarizasyona bağımlı FBI (PB-FBI) kullanılarak gerçek zamanlı gerilme ve sıcaklık ölçümleri için sensör tasarımı yapılmıştır. Ölçüm ucu olarak PB-FBI, filtre olarak ise Sagnac fiber döngü aynası kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri 60 °C'ye kadar, gerilme ölçümleri 480 $\mu\epsilon$ 'a kadar yapılmış, sıcaklık için $\pm 0.001^\circ\text{C}$, gerilme için $\pm 6.821 \mu\epsilon$ hata payı gözlemlenmiştir [33].

Chehura ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, bir adet FBI kullanılarak, sıcaklık ve gerilmede seçici davranabilen fiber optik bir sensör sistemi tasarlanmıştır. Algılama ucu olarak eğimli FBI kullanılmıştır [34].

Zhou ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, FBI ve iki bölümden oluşan çok modlu fiber (ÇMF) kullanılarak gerçek zamanlı sıcaklık ve gerilme ölçen bir fiber sensör tasarlanmıştır. ÇMF bölümlerinden biri gerilmeden bağımsız ölçüm yapacak şekilde izole edilmiş, diğeri ise sıcaklığa karşı izole edilmiştir [35].

Mondal ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, gerçek zamanlı sıcaklık ve gerilme ölçümleri için tümleşik ikili FBI'dan oluşan optik sensör tasarlanmıştır. Bu iki FBI'dan her biri, kavisli yapıdaki çelik şeridin her bir tarafına monte edilmiştir. Bu yapıda konkav ve konveks pozisyonundaki sensörler ile sırasıyla sıcaklık ve gerilme ölçümleri gerçekleştirilmiştir [36].

He ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada köprülerden geçen kabloların yapısal bütünlüğünün FBI ve Brillouin optik zaman domeni reflektometri temeline dayanan sensörler ile izlenebilirliği incelenmiştir [37].

Baker ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, 244 nm sürekli dalgalı lazer kullanarak, bor ve germanyum katkılı silika fiberdeki FBI'lar incelenmiştir. Izgaralarda hidrojenli ve hidrojenli olmayan uygulamalarla termal bozulma deneysel olarak incelenmiştir. Hidrojen yüklenmiş fiber ızgarada, güç kanunu modelinin uygulanmadığı görülmüştür. Hidrojen yüklenmiş fiber ızgaradaki bozulma karakteristiklerini incelemek için uzun süreli temsile dayalı yeni bir model geliştirilmiştir[38].

Canning'in yaptığı çalışmada, konvansiyonel ve konvansiyonel olmayan FBI'lar incelenmiştir. Bu FBI'lar germanyum silikat katkılı fiberler ve germanyum katkılı olmayan fiberler ile kullanılarak, FBI'ların tepkileri gözlemlenmiştir [39].

Bandyopadhyay ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, bor katkılı germanyum silika fiberdeki Tip1 FBI'ların 193 nm'de 1000 °C'ye kadar dayanım testleri yapılmış ve sonuçları gözlemlenmiştir [40].

Shen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, metal kaplamalı FBI'ların yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altındaki durumları incelenmiştir [41].

Sohn ve Shim tarafından yapılan çalışmada FBI temelli bir fiber optik sıvı seviye ölçüm sensörü tasarlanmıştır. Bir konsol içine konulmuş fiber Bragg ızgaradaki uzama ve gerilme ile sıvı seviyesi ölçülmüştür. Burada Bragg dalgaboyundaki kaymayı tespit etmek için bir bant geçiren filtre kullanılmıştır. Fotodedektör tarafından ölçülen bağlı güç ile aynı zamanda sıvı seviyesindeki değişimler lineer olarak gözlemlenmiştir [42].

Sengupta ve Kishore tarafından yapılan çalışmada, eşit oranda inceltilmiş optik fiber Bragg ızgara kullanılarak basit, küçük ve düşük maliyetli bir sıvı seviye ölçüm sensörü tasarlanmıştır. Sensör sistemi sadece fiber Bragg ızgara ve basit bir dedeksiyon sisteminden oluşmuştur. Bragg dalgaboyundaki kayma ile yoğunluk arasındaki çevirimi yapabilmek için lineer bir fiber filtre tasarlanmıştır. Sonuçlar, fotodedektör tarafından ölçülen güç değerlerinin lineer olarak sıvı seviyesindeki değişimlerle orantılı olduğu gözlemlenmiştir [43].

Su ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Magneto-optik fiber Bragg ızgaraların iletim ve polarizasyon özellikleri incelenmiştir. Jones Matrix metodu kullanılarak, farklı polarizasyon durumlarındaki girişler için iletim spektrumlarındaki değişimler incelenmiştir [44].

Bao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 2 adet FBI kullanılarak iki boyutlu eğim sensörünün yapılabirliği incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan hibrit bir pendulum transdüseri ile de, alt ve üst kısımların ölçümleri için kullanılmıştır [45].

Aneesh ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, sıcaklığa duyarlı olmayan FBI tabanlı bir eğim sensörü tasarlanmıştır. Sensör genliği ve tasarlanan dinamik aralığı $\pm 45^\circ$ ile gösterecek şekilde dizayn edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda $\sim \pm 0.36^\circ$ 'lik bir eğim doğruluğu ile ölçüm yapılabildiği görülmüştür [46].

Villalba ve Casas'ın yaptığı çalışmada, beton yapıların yapısal bütünlüğünün dağıtık optik sensörler ile yapılabirliği incelenmiştir. Bu kapsamda inşaat yapılarında meydana gelebilecek kırıkların algılanması araştırılmıştır [47].

Wei ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, fiber Bragg ızgara sensörlere dayalı gerçek zamanlı, tekerleklerdeki bozulmaları tespit edecek bir sistem anlatılmaktadır. Tekerleklerle ray arasındaki etkileşim ölçülerek tekerleklerini durumu incelenmiştir. Bu yaklaşım saha testleri ile doğrulanmış, fiber sensörler elektromanyetik girişime karşı bağısıklığa sahip olduğundan, tekerleklerdeki bozulmaları tespit etmek için etkin bir sistem olduğu görülmüştür. Bu sistemin bakım verimliliğini artırdığı ve tekerleklerdeki bozulmaları tespit etmek için yapılan harcamaları azalttığı gözlemlenmiştir [48].

Carlos ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, FBI algılama teknolojisi kullanılarak beton köprülerin yapısal bütünlüğünün izlenmesi incelenmiştir. Sistemin konsepti, benimsenen sensör ağ mimarisi ve FBI sensörlerine dayanan bir izleme sisteminin pratik kurulumu incelenmiştir. Son olarak işletme modu ve performansı mevcut beton bir köprü için modellenmiş ve anlatılmıştır [49].

Tiwari ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, erbiyum katkılı fiber kenar algılama filtresi ile bir FBI sensörü tasarlanmış ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kenar filtresi Erbiyum katkılı fiberdeki sönümleme temeline dayanmaktadır. C- bantta sıcaklık ölçümünde, 10 nm'lik filtre bant genişliği ve 1.0 dB/nm algılama hassasiyeti elde edilmiştir [50].

Tam ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, işletme altındaki bir demiryolu hattının yapısal bütünlüğünün izlenmesi için fiber optik sensörler kullanılmıştır. Bu sistem FBI sensör networkünden oluşmakta, kritik noktaların sıcaklık ve gerilme değerlerini ölçme temeline dayanmaktadır. Sensörler yolcu trenlerinin işletmesi altında çalışan demiryolu raylarına monte edilmiş ve bu sensörler ile ray ve tren tekerleklerindeki deformasyon ölçümü, trenlerin trafik durumu, tren akslarının sıcaklığının ölçülmesi gibi uygulamaların geliştirilmesi hedeflenmiştir [51].

Miloyevic ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada demiryollarında güvenli bir işletmenin sağlanabilmesi için FBI sensörler ile gerçekleştirilebilecek uygulamalar incelenmiştir.

“Akıllı Demiryolu” nu gerçekleştirmek için FBI sensörlerin çalışma prensipleri ile yapılabilecek uygulamalar değerlendirilmiştir [52].

Ho ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada demiryolu raylarının ve tren tekerleklerinin durumunu izlemek için gerilme tabanlı FBI sensörlerin kullanılabilirliği ve uygulamaları incelenmiştir [53].

Zhang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada referans bir FBI kullanılarak FBI gerilme sensörünün sıcaklığa bağlı değişim etkilerini minimize etmek amaçlanmıştır. Bu amaçla FBI sensör ile aynı dalgaboyuna sahip referans bir FBI kullanılmış, statik ve dinamik yük altındaki rayda denemiştir. Deneysel çalışma sonucunda bu metodun gerçek zamanlı ray gerilme izlenmesinde kullanılabileceği görülmüştür [54].

Kisala ve Cieszczyk'in yaptığı çalışmada bir sensör kafası kullanılarak bükme kuvveti ve sıcaklığının iki bileşenini ölçmek için bir yöntem sunulmuştur. Konsol giriş üzerine yerleştirilmiş iki FBI spektrumuna dayanan dolaylı çıkarım kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımda uygulanan kuvvetin değerini belirlemek için, normleştirilmiş iletim spektrumlarının genişliğindeki değişim kullanılmıştır. Sunulan yöntemde, bu değişikliğin kuvvete olan duyarlılığındaki artış, bilinen diğer sistemlere göre elde edilmiştir. Bükme kuvvetlerinde 0 ila 150 N arasında gerçekleşen artış için spektral genişlikteki değişiklik gözlemlenmiştir [55].

Zimmerman ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, sabit dar bantlı filtre demodülasyonuna dayanan FBI sorgulayıcının ölçüm aralığını genişletmek için yapay sinir ağları (YSA) kullanan yeni bir yaklaşım açıklanmaktadır. Sabit spektral filtreli sorgulayıcılar, sinyali demodüle etmek için filtrenin sadece bir kenarını kullanmaktadırlar. Önerilen yöntem, dar bant FBI filtrelerini kullanmaktadır. Bu çalışmada filtrenin demodüle edilmesi için tüm filtre bant genişliğinin her iki kenarı kullanılmıştır [56].

Majumder ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, FBI sensörlerini kullanarak mühendislik yapılarının yapısal bütünlüğünü izlemek için son zamanlarda yapılan araştırma ve geliştirme faaliyetleri, daha fazla çalışmanın gerekli olduğu alanlara dikkat çekilerek incelenmiştir. Ayrıca bu sensörlerin kullanımındaki sınırlamalar ve endüstriyel uygulamadaki engeller gözlemlenmiştir [57].

Sun ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada gemi iticinin dinamik kombine stresinin ölçümü için bir FBI sensör dizisinin kullanımı incelenmiştir. Üç eksenli stres, FBI sensörlerinden oluşan geliştirilmiş üç elemanlı dikdörtgen rozet kullanılarak tespit edilmiştir. Üç eksenli gerilme sensörü arasındaki faz gecikmesinin hata etkisi, çok kanallı demodülasyon kullanılarak bertaraf edilmiştir [58].

Chan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada dalgacık (wavelet) sayısal filtre, FBI gerilme sensöründeki interferometrik gürültünün neden olduğu dalga boyu saptama hatasını azaltmak için tasarlanmış ve uygulamada kullanılmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçları ile dalgacık filtreleme tekniğinin, FBI gerilme sensörünün algılama doğruluğunu arttırmak için uygun bir yaklaşım olduğu görülmüştür [59].

Lim ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Korelasyon sinyal işleme yöntemleri kullanılarak gerilme ve sıcaklık ölçümleri için çok modlu FBI sensörleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada biri holografik yöntemle diğeri faz maskesi tekniği ile çok modlu fiberde üretilen iki adet FBI kullanılmıştır [60].

Gong ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, FBI sensörlerinde Bragg dalga boyu kayma doğruluğunu belirlemek için spektrum korelasyonuna dayalı bir dijital son işleme tekniği geliştirilmiş ve uygulanmıştır. 1 pm'den daha iyi bir dalga boyu standart saptama doğruluğu deneysel olarak elde edilmiştir [61].

Negri ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, FBI spektrometrik sorgulama sistemlerinde kullanılan tepe algılama algoritmaları incelenmiştir. Güncel olarak kullanılan algoritmaların ve yapay sinir ağı algoritmasının doğruluk, kesinlik ve hesaplama performansları karşılaştırılmıştır. Centroid ve Gaussian uyarlama algoritmalarının yüksek bir hassasiyete sahip oldukları, ancak FBI kırılma indisi modülasyon profiline bağlı sistematik hatalar ürettiği gösterilmiştir [62].

Posseti ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ölçümlerin belirsizlik analizi dahil olmak üzere, FBI sensörlerden alınan sonuçların değerlendirmesi için kullanılan araçlar incelenmiştir. Yanıt eğrisi, kalibrasyon eğrisi, hassasiyet, çözünürlük, tekrarlanabilirlik ve uygunluk gibi FBI sensörlerinin temel özellikleri ile ilgili arka plan ve tanımlar araştırılmıştır [63].

Zhao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, fiber optik sensörler, daha kesin, etkili, uzun vadeli ve gerçek zamanlı izleme gerçekleştirebilen geleneksel algılama teknolojilerine kıyasla özel özellikleri nedeniyle betonarme donma-çözülme döngüsü izlemesinde geliştirilmiş ve kullanılmıştır. FBI algılama tekniği ve beyaz ışık interferometre (WLI) algılama tekniği incelenmiş ve silindirik beton örneklerinde artık genişleme gerginliğini test etmek için kullanılmıştır. Gömülü FBI ve WLI sensörleri tasarlanmış ve performansları, beton örnekleri su ile doyurulduğunda ve tekrarlanan dondurma ve çözme döngülerine tabi tutulduğunda gerçek zamanlı olarak gözlemlenmiştir [64].

Tang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, gömülü bir Kalman filtresine sahip doğrusal olmayan en küçük kare (NLS) algoritması, FBI algılama sistemlerinde, istenmeyen interferometrik sinyali kaldırarak, ölçüm doğruluğunu arttırmak için kullanılmıştır. Bu hibrit yöntem ile sade NLS yaklaşımının ve uzatılmış Kalman filtrenin dezavantajlarını ortadan kaldırarak daha kararlı bir sonuç alındığı gözlemlenmiştir [65].

Yun ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada dalgaboyu tarama tekniği kullanılarak FBI sensör dizisi gerçekleştirilmiştir. 3 mW'tan büyük sinyal gücü ve 0.1 nm spektral çözünürlüğe sahip ışık kaynağı kullanılarak ölçümler alınmıştır. Yapılan bu çalışmada 250 Hz'lik örnekleme oranında, 0.47 $\mu\epsilon$ 'luk çözünürlük ile gerilme ölçümleri alınmıştır [66].

Paterno ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, bir FBI sensörünün yansıttığı sinyalin spektrumları için radyal temelli fonksiyon ağının uygulanması incelenmiştir. Bu algoritma, sensörden elde edilen verilerin bir optik spektrum analizörü ile yorumlanmasına yardımcı olmaktadır. Sinir ağını kullanarak yaklaşık bir spektrumun zirvesini bulma yöntemi ile, tekdüze bir FBI sensöründen elde edilen çift zirve spektrumu ile ölçüm alma yöntemine kıyasla daha düşük bir hata ile sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir [67].

Chan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, FBI sensörlerinde dalga boyu saptama doğruluğunu arttırmak için adaptif bir doğrusal ağı kullanımı incelenmiştir. Deneysel olarak, 10 pm'lik bir hata oranı ile dalgaboyu ölçümleri alınmıştır [68].

Lee ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, spektral olarak bozulmuş FBI sıcaklık sensörlerinin ölçüm doğruluğunu arttırmak için, yansıyan sinyali Gauss şekillerine yerleştirme yöntemi kullanılmıştır. Gaussian eğri yerleştirme algoritması, ayarlanabilir bir bant geçiren filtre

demodülasyon şemasına uygulanarak, yaklaşık 0.3 °C'lik bir sıcaklık çözünürlüğü ile ölçüm sonuçları alınmıştır [69].

Dyer ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, FBI'dan yansıyan sinyalin dalgaboyunu yüksek doğrulukla belirlemek amacıyla, dalgaboyu metrolojisinin temel sınırları incelenmiştir. Bu amaçla dalgaboyu ölçümü için yaygın olarak kullanılan ayarlanabilir lazer, optik spektrum analizörü ve interferometrik ölçüm teknikleri araştırılmıştır. Optik spektrum analizörü kullanıldığında 10 pm'den daha iyi bir çözünürlük elde etmenin zor olduğu görülmüştür. Ayrıca FBI sorgulama sistemleri için kalibrasyon teknikleri incelenmiştir [70].

Bodendorfer ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, spektrometrik FBI sorgulama sistemleri için farklı tepe bulma algoritmaları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. FBI'dan alınan veri beş farklı algoritmaya uygulanmış ve sonuçlar gözlemlenmiştir [71].

Allwood ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Bu yazıda, ana akım endüstriyel süreç uygulamalarında kullanımı açısından FBI algılama teknolojisi incelenmiştir. Enerji üretimi, su arıtma ve hizmetler, madencilik ve petrol ve gaz sektörü gibi endüstriler için geliştirilmiş çeşitli tipte sensörler gözlemlenmiştir. Bu endüstriyel uygulamalarda FBI sensör ağlarının kullanılabilirliği araştırılmıştır [72].

Catalano ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada saldırı tespit sistemleri için FBI sensörlerinin kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu amaçla demiryollarına girişi korumak için bir çalışma yapılmıştır. Önerilen saldırı algılama sisteminin, demiryolu güvenliğinin artırılması için uygulanabilir bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir [73].

Allwood ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada fiziksel saldırı tespit sistemlerinde kullanılacak tüm fiber optik tabanlı algılama teknikler gözden geçirilmiştir. Algılama, sorgulama ve ağ yapıları için farklı yaklaşımlar incelenmiştir. Sistemin avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır [74].

Chui ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, x-ekseni ve z-ekseni boyunca her iki kontakta duyarlı olan yeni ikiz bir FBI yapısı olan yeni bir fiber prob, yüksek en boy oranına sahip mikro deliklerin ölçümü için incelenmiştir. Geliştirilen bir yeni yapı ile gölgeleme etkisi, sınırlı problama alanı ve çok boyutlu dokunma duyusu gereksinimi gibi yüksek en-boy

oranına sahip mikro deliklerin boyutsal ölçümünün gerçekleştirilebilirliği araştırılmıştır. Algılama prensibi ve dekaplaj algoritması deneylerle doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlar, üretim hatalarının etkisinin ve prob ve ölçüm koordinatları arasındaki yanlış hizalamanın dönüş ve eğim kalibrasyonu yoluyla azaltılabileceğini göstermektedir [75].

Allwood ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, fiber optik sorgulama sistemlerinin enstrümantasyon ve ölüm donanımları ile uyumluluğu incelenmiştir. Bu çalışmada programlanabilir lojik kontrolör (PLC)'ye FBI sensörden dijital ve analog bilgi aktarılarak bu sistemin avantaj ve dezavantajları gözlemlenmiştir. Böylece FBI sensörlerin SCADA uygulamalarında kullanılabilirliği gösterilmiştir [76].

Wild ve Richardson'un yaptığı çalışmada, güç dedeksiyonu temelli FBI sensör sorgulama sistemleri için analitik bir model geliştirilmiştir. Bu model, sorgulama sistemlerinin hassasiyet ve dinamik aralık açısından optimizasyonunu kolaylaştırmak için kullanılabilir. Burada geliştirilen analitik model, FBI ve ışık kaynağının Gauss şeklinde olduğunu varsaymaktadır. Bu şekilde, ışık kaynağının FBI tarafından filtrelenmesi, hem ışık kaynağının hem de FBI'nın özellikleri tarafından yönetilen bir Gauss spektrumunun yansımaları ile sonuçlanmaktadır. Model üzerindeki incelemeler, dikkate alınan farklı güç algılama yöntemlerinin hassasiyeti ve dinamik aralığı için analitik ifadelerin geliştirilmesini sağlamıştır. Sonuçlar, güç algılama yöntemlerinin dinamik aralığının ve hassasiyetinin, farklı FBI sensör genişlikleri ve farklı ışık kaynağı özellikleri ile ölçüm sonuçları üzerindeki etkisini göstermiştir. Bu durum, sorgulama yöntemleri arasında doğrudan bir karşılaştırmayı kolaylaştırmaktadır ve ayrıca belirli bir ışık kaynağına ya da FBI'ya dayalı olarak sistem optimizasyonunu mümkün kılmaktadır [77].

Cui ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, doğrulanmış FBI şemasına dayanan, bir yüksek çözünürlük ve hızlı cevap sorgulama metodu detaylı olarak incelenmiştir. Karşılaştırmalı olarak eşleştirilmiş FBI algılama sorgulama şemasının doğrusal olmayan problem, matematiksel modelin oluşturulması ve optimize edilmesi ile çözülmüştür. Kararlılık ve anti-sıcaklık bozulma performansının geliştirilmesi için referans FBI'nın merkez dalga boyu ayarlanarak, sorgulama yöntemini optimize etmek için bir mekanik ayarlama araştırılmıştır. Optik ve elektriksel sinyal işlemenin ölçüm gereksinimlerini karşılamak için iyi tasarlanmış bir devralma devresi hazırlanmıştır ve sorgulama yönteminin performansı üzerinde deneyler yapılmıştır [78].

Kim ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ön gerilmeli betonunun, ön gerilme kuvvetinin kesin ve etkin bir şekilde değerlendirilmesi ve önerilen yöntemin gerçek beton yapılar üzerindeki uygulanabilirliğinin doğrulanması amaçlanmıştır. Bu amaçla ön gerilmeli beton içine bir FBI sensör gömülerek izleme yapılmıştır. Geliştirilen yöntemin ölçüm performansı ise deneysel olarak değerlendirilmiş ve izleme verilerinin güvenilirliği incelenmiştir [79].

Potts ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, görüntü sensörüne bağlı konik oyuk Bragg dalga kılavuzlarını kullanan entegre bir dalga boyu sorgulama sistemi incelenmiştir. Spektral kaymalar, mod kesiminde yayılan ışığın dalga boyu bağımlılığından çıkarılır. Basit bir pik algılama algoritması kullanılarak 10 pm kadar küçük dalga boyları algılanmıştır. Gerilim ayarlı bir ızgaranın sorgulanması, bir geniş bantlı çoğaltılmış kendiliğinden yayılım kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve çoğullamalı sensör dizilerinin tek-çipli sorgulanmasının mümkün olduğu gösterilmiştir [80].

Ganziy ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, 850 nm FBI sensör sistemleri için düşük maliyetli 1550 nm telekom fiberlerinin kullanıp kullanılmayacağı araştırılmıştır. Bu amaçla 850 nm fiber kullanılarak oluşturulan FBI sensörünün polarizasyon hassasiyeti, , tek modlu 1550 nm fiber kullanılarak gerçekleştirilen FBI sensör sistemi ile karşılaştırılmıştır [81].

Qian ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, mekanik parmakların bir nesneyi yumuşak bir şekilde kavramasını sağlamak için, FBI temelli sürgülü bir sensor sistemi incelenmiştir. Bu çalışmada, sürgülü sensörün yapısal tasarımı ve sonlu eleman simülasyonu kullanılarak doğrulanan kayma duyum mekanizması açıklanmıştır. Sürgülü sensörün statik ve dinamik performansları ise deneysel olarak incelenmiştir [82].

Triana ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, özel bir FBI sensör tasarımı için bir kodlama stratejisi kullanılmıştır. Her bir sensörün kodlanması, her bir sensörün genlik ve faz modellerini tanımlamak için iki adet ikili kod gerektirmektedir. Bu çalışmada, sensörlerin merkez dalga boyunu tespit etmek için bir sorgulama kurulumu önerilmiş ve çalışma prensibi teorik olarak geliştirilmiştir. Sonuçlar, merkez dalga boyunun toplam tanımlamasının, üretilen sensörler arasında spektral örtüşme altında gerçekleştirildiğini ve sistem kapasitesinin üç kez iyileştirildiğini göstermiştir [83].

Ye ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, demiryolu tünel inşaatı sırasında güvenlik izleme için FBI algılama teknolojisinin uygulanması incelenmiştir. Bir FBI tabanlı sıcaklık izleme sistemi bir metro tüneli çapraz geçişinin donma inşaatı sırasında, donmuş zeminlerin gerçek zamanlı sıcaklık ölçümü için geliştirilmiştir. FBI temelli sıvı seviye sensörlerinin yerinde yerleştirilmesi yoluyla, yüksek hızlı bir demiryolu hattında tünel yapım aşamaları otomatik bir şekilde izlenmiştir [84].

Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, sürekli kaynaklı rayda uzunlamasına kuvvet ölçümünü çift yönlü FBI gerilme sensörleriyle ölçmek için yeni bir yöntem önerilmiştir. FBI'ların tepkisi teorik olarak farklı kısıtlanmış koşullar altında, raya bağlanarak analiz edilmiştir. Burada FBI'nın gerilme duyarlılığı katsayısı sıcaklık duyarlılığı ile kalibre edilmiştir. Önerilen bu sensör yapısı, bir yüksek hızlı tren sahasındaki seçilmiş iki noktaya kurulmuş ve ölçümler alınmıştır [85].

Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, sıcaklık kompanzasyonu gerektirmeyen AA-termal FBI sensörleri kullanılarak, CWR aksel kuvvetindeki performans değişikliklerini tespit edecek bir sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen palet aksel kuvvet hesaplama yazılımı ve izleme platformları ile birleştirilen bu optik fiber sensörler, izlenecek olan hat boyunca aksel kuvvet dağılımını hesaplamak üzere kullanılmıştır. Köprünün yapısının genişlemesindeki değişimin etkisini ve betonarme kalıp gerginliğinin hat aksel kuvvetleri üzerindeki değişimini daha iyi anlamak için, sensörler köprü genleşme derzlerine, ray sonlarına ve beton döşeme yataklarına yerleştirilmiştir. İzleme sonuçları, optik fiber sensörlerin hassas, net ve kararlı sinyaller verdiğini göstermiştir [86].

Lai ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, FBI algılama ağını kullanarak tren titreşimini ve ağırlığını algılamak için yeni bir işletme sistemi tasarlanmış ve test edilmiştir. Bu sistem trenlerin gerçek zamanlı izlenmesi için tasarlanmıştır. Optik sistemlerin hızlı yanıt vermesi nedeniyle, trenler, normal servisi sırasında herhangi bir özel düzenleme olmaksızın gerçek zamanlı olarak izlenebilmiştir [87].

Roman ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, tek bir lazer ve iki optik faz modülatörüne dayalı bir çift optik frekans taranarak FBI sorgulama sistemi tasarlanmıştır. Bu mimari, modların sayısı ve bunların FBI'nın yansıyan spektrumundaki konumları gibi çok modlu optik kaynak parametrelerinin yapılandırılmasına izin vermektedir. Optik spektrumu, radyo frekansı

spektrum çıkışına haritalamak suretiyle oluşturulan sorgulama şeması, titreşim ve ultrason gibi büyüklükleri hızlı ölçmek için tasarlanmıştır [88].

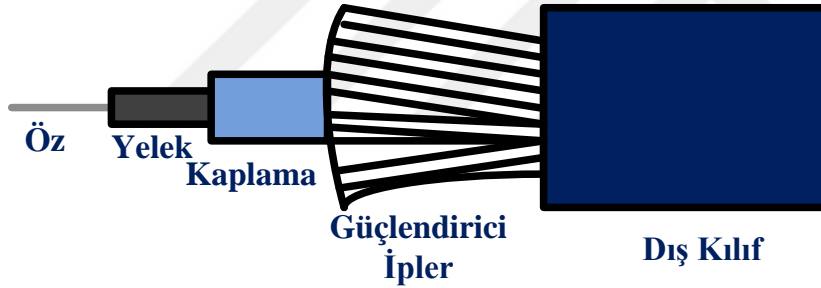
Fiber optik sensörler, FBI teknolojisi, FBI sensörler ve sorgulama sistemleri ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda fiber optik algılama sistemlerinin sinyal gürültü oranında iyileştirme, sensörün dalgaboyundaki değişimin hızlı ölçülebilmesi, tek bir sorgulayıcı ile daha fazla sensörden algılama yapılabilmesi, daha hassas ve kararlı ölçümler alınabilmesi gibi konularda çalışmaların devam ettiği ve güvenlik alanında fiber optik sensörler ile yeni çözümlerin araştırıldığı görülmüştür.





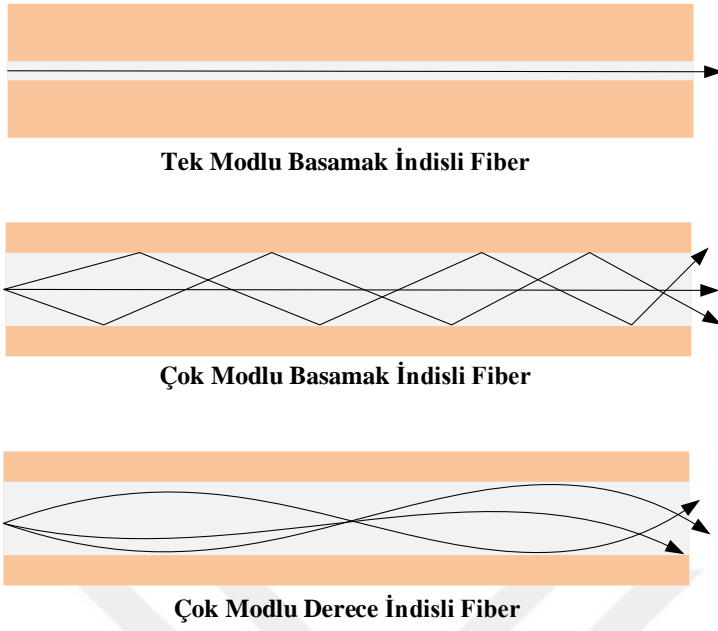
3. FİBER TEKNOLOJİSİ VE FİBER OPTİK SENSÖRLER

Bir fiber temel olarak öz, yelek ve kaplama olmak üzere üç bölüme ayrılmaktadır. Öz, genellikle camdan yapılmış, silindirik, dielektrik materyaldir. Işık fiberin özü içerisinde ilerlemektedir. Fiber özü, kuantum camından öz gibi dielektrik materyalden üretilen, ancak biraz daha düşük bir kırılma indisine sahip olan bir astar ile çevrelenmiştir ve bu astar Yelek olarak isimlendirilmektedir. Yelek katmanının kırılma indisi, fiber özün kırılma indisinden küçüktür. Yelek katmanı genellikle cam veya plastikten imal edilmektedir. Yelek katmanı, özden daha düşük kırılma indisine sahip olduğundan ışığın fiber özünden havaya saçılarak kaybolmasının önüne geçer, saçılma kaybını azaltır, mekanik dayanım kazandırarak korur. Yelek katmanının üzerinde bulunan Kaplama katmanı ise, optik fiberi atmosferden ve fiziksel hasarlardan korumaktadır ve plastik, elastik materyalden yapılmıştır. Fiber optik kabloda bunlara ilave olarak kaplamanın üzerinde güçlendirici ipler ve onun da üzerinde dış kılıf bulunmaktadır [1,2]. Fiber optik kablunun bu fiziksel yapısı Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Fiber optik kablunun fiziksel yapısı

Optik fiberleri yapıldıkları malzemeye göre temelde Plastik Optik Fiber (POF) ve kuantum cam (SiO_2 = Silika) fiber olarak sınıflandırmak mümkündür. İndis profiline göre ise basamak indisli (BİF) ve derece indisli (DİF) fiber olarak sınıflandırılmaktadır. Fiber içerisinde yayılabilen optik modların sayısına bağlı olarak da Çok Modlu Fiber (ÇMF) ve Tek Modlu Fiber (TMF) olarak ayrılmaktadır. Optik fiber türleri Şekil 3.2’de görülmektedir.

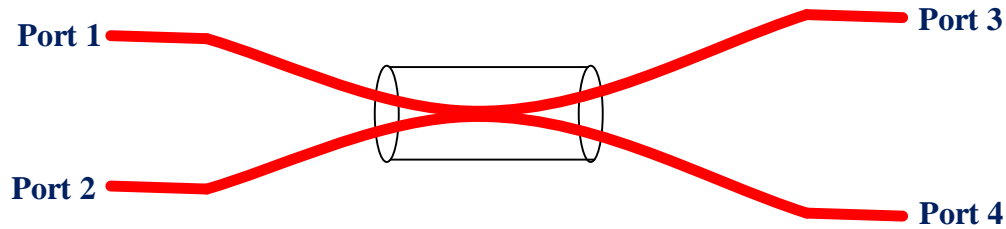


Şekil 3.2. Optik fiber türleri

Yayılan ışık dalgasının tutarlılığını koruyabilmesi nedeniyle, algılama alanındaki neredeyse tüm gelişmeler için kullanılan fiber tipi TM fiberdir. Bir TM fiberin içinde, ışık dalgası küçük çaplı bir öz içerisinde yayılmaktadır. Tek modlu çalışmayı elde etmek için, fiber özün çapı çok küçük olmalıdır ve tipik değerler $10\mu\text{m}$ 'nin altındadır.

Algılama alanında tek modlu fiber ile birlikte bazı fiber komponentler kullanılmaktadır. En çok kullanılan elemanlar ise kuplör ve sirkülatör'dür.

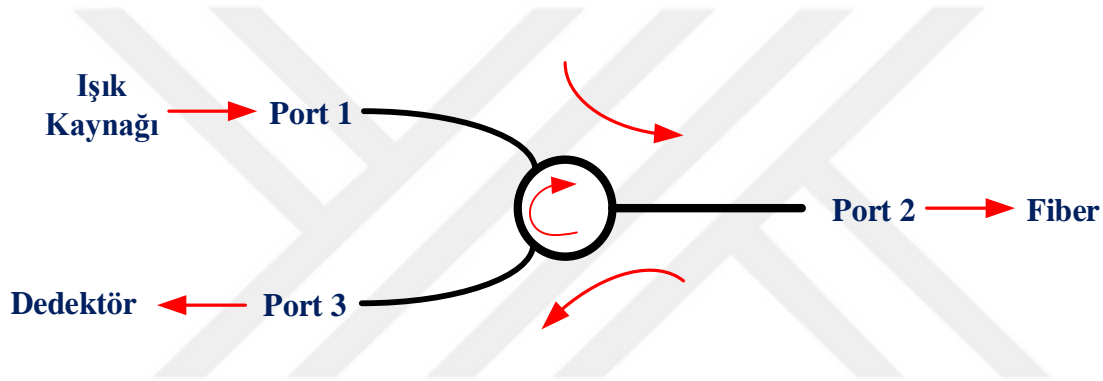
Fiber kuplör, bir göbekte birleşen iki tek modlu fiberden oluşmaktadır. Bir optik sinyali birkaç çıkışa dağıtmak veya ters yönlere yayılan ışık dalgalarını ayırmak için kullanılmaktadır [1,2]. Fiber kuplörün yapısı Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3. Fiber kuplörün yapısı

Fiberoptik sirkülator ise çoğunlukla iletilen ve yansıyan ışık dalgalarını ayırmak için kullanılmaktadır. Bağlantı noktalarından birine giren ışık, bir sonraki bitişik bağlantı noktasına dairesel olarak yönlendirilmektedir.

Fiber optik algılama sisteminde ışık kaynağı sirkülatorün 1 numaralı bağlantı noktasına bağlanmaktadır. Kaynaktan gelen ışık dalgası daha sonra, sirkülatorün 2. bağlantı noktasından fibere iletilmektedir. Fiberden yansıyan ışık ise sirkülatorün 3 nolu portundan geçmektedir ve buraya bağlanacak bir dedektör ile algılanabilmektedir. 3 nolu port aynı zamanda izolator gibi de çalışmakta, yansıyan ışık dalgalarının kaynaktan girişime neden olmasını da önlemektedir [1, 2]. Fiber sirkülatorün yapısı Şekil 3.4'te görülmektedir.

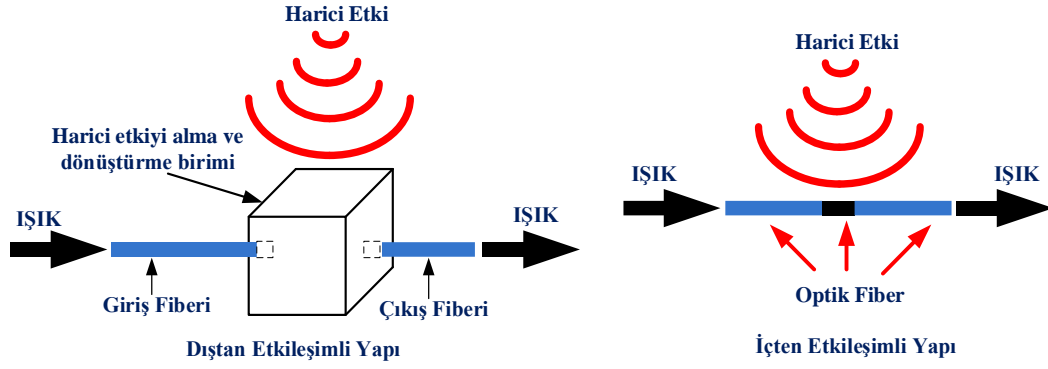


Şekil 3.4. Optik sirkülatorün yapısı

Fiber optik sensörler, fiber içerisinde ilerleyen ışığın çevresel etkenler nedeniyle bir kısmının saçılması prensibine dayanmaktadır.

Fibere gönderilen ışık, fiberi oluşturan cam molekülleri ile etkileşmektedir. Işık dalgaları, atomlar ile esnek çarpışma yapar ve ışık dalgası saçılıma uğrar. Saçılmayı, gelen ışığın yabancı bir maddeye çarpmasıyla oluşan dağılma ve ışık kaybı olarak tanımlamak mümkündür. Fiber içerisinden saçılan ışığın dalga boyu, genlik gibi büyüklüklerinin analizi ile fibere uygulanan fiziksel etkinin konumu ve büyüklüğünü tespit edilebilmektedir [1,2].

Işığın fiber içerisindeki durumu ile algılama konumları göz önüne alınarak, fiber optik algılayıcılar dıştan etkileşimli ve içten etkileşimli olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadırlar. İçten etkileşimli sensörlerde ışık fiber özün dışına çıkmaz. Dıştan etkileşimli sensörlerde ise ışık fiberi terk eder, dışardaki algılama bölgesine ulaşır ve fibere geri döner [89-91]. Bu yapılar Şekil 3.5'te görülmektedir.



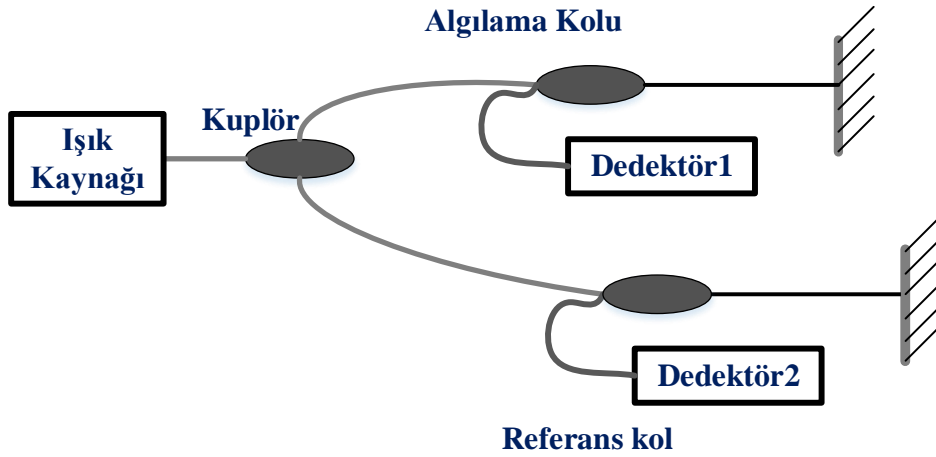
Şekil 3.5. Dıştan etkileşimli ve içten etkileşimli optik sensör yapıları [89,90]

FBI sensörler içten etkileşimli sensörlerdir ve bu sensörlerde ölçülecek etki doğrudan fibere uygulanır ve modülasyon tamamen fiberin içinde gerçekleşir. Çevresel etkenler fiberin içerisindeki ışığın bazı karakteristiklerini değiştirmektedir.

Fiber optik sensörler çalışma prensibine göre ise aşağıdaki gibi dört ana grupta toplanabilmektedir;

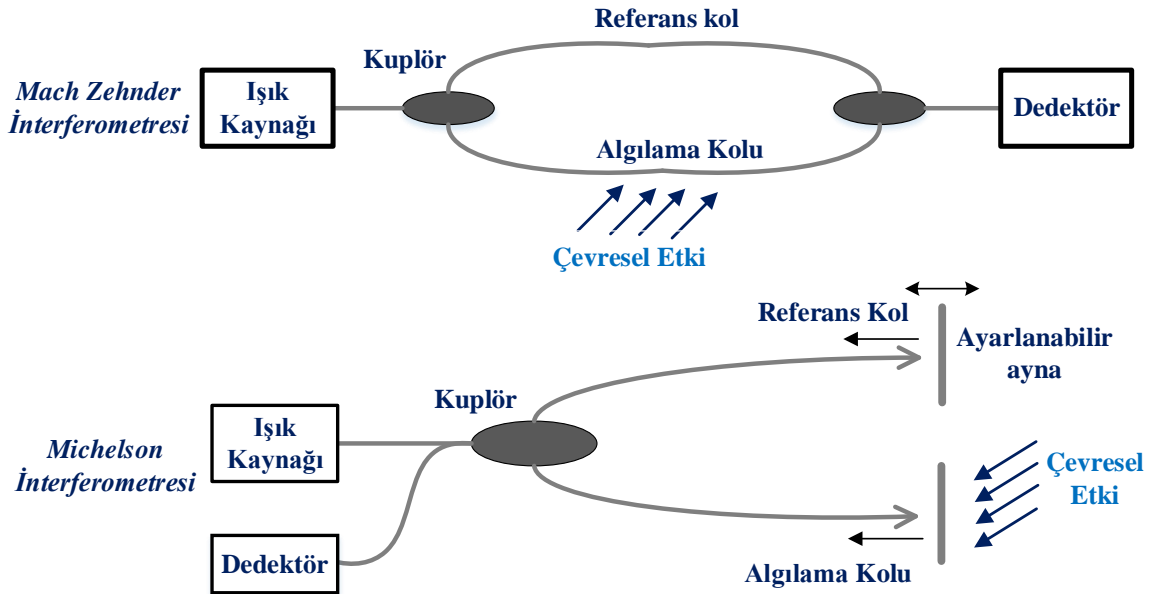
- Işık yoğunluğu değişimine bağlı fiber optik sensörler,
- Faz modülasyonlu fiber optik sensörler,
- Dalgaboyu ve frekans modülasyonlu fiber optik sensörler,
- Polarizasyon modülasyonlu fiber optik sensörler,

Işık yoğunluğu değişimine bağlı fiber optik sensörler, ışığın dış etkenler ile yoğunluğunun değiştiği pasif sensörlerdir. Genellikle mesafe ve basınç ölçmek için kullanılırlar. Bu sensörler daha fazla ışığa ihtiyaç duyduklarından genellikle çok modlu fiberler kullanılmaktadır. Bu sensörlerin çalışma prensibi, referans kolu ile algılama kolu arasındaki ışık yoğunluğu farkının karşılaştırılması prensibine dayanmaktadır. Işık yoğunluğu modülasyonlu optik sensörlerin çalışma prensibi Şekil 3.6'da görülmektedir [89].



Şekil 3.6. Işık yoğunluğu modülasyonlu fiber optik sensörlerin çalışma prensibi [89]

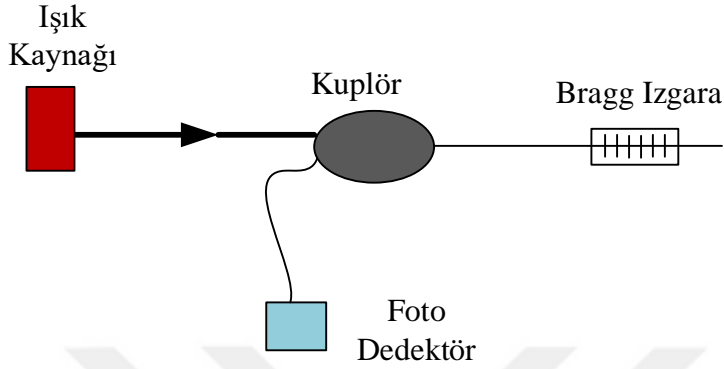
Faz modülasyonlu fiber optik sensörler hassas ölçüm alan sensörler olup, ışığın direk kendi bünyesinde meydana gelen faz kayması, faz açısı gibi değişimlerin ölçümü prensibine göre çalışmaktadır. Fiberde oluşan faz, polarizasyon gibi parametrelerdeki değişimin ölçülmesi, algılayıcı fiber kolu içinden ilerleyen ışığın, referans kolundaki ışık ile karşılaştırıldığı bir interferometre sistemine dayanmaktadır. Faz modülasyonlu optik sensörlerde kullanılan Mach-Zehnder ve Michelson interferometre yapıları Şekil 3.7’de görülmektedir [89, 92, 93].



Şekil 3.7. Faz modülasyonlu optik sensörlerde kullanılan interferometreler [92, 93]

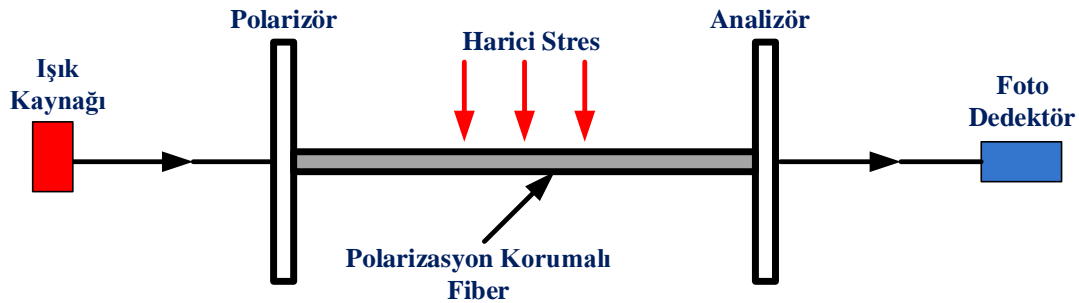
Dalgaboyu modülasyonlu fiber optik sensörler dalga boyundaki değişimleri kullanarak algılama yapmaktadır. Çevresel etkenler nedeniyle fiber öz içerisinde kırılma indisinde periyodik bir değişim meydana gelmektedir. Dalgaboyu değişimi, konnektörlerdeki

kayıplardan ve fiberdeki kıvrımlardan etkilenmediği için dalgaboyu modülasyonlu sensörler ile daha kararlı ölçümler almak mümkün olmaktadır. Dalgaboyu modülasyonlu fiber optik sensörlerin en bilineni FBI sensörlerdir. Bu sensör yapısı Şekil 3.8’de görülmektedir [89, 95].



Şekil 3.8. Dalgaboyu modülasyonlu fiber optik sensör kurulumu [95]

Polarizasyon modülasyonlu fiber optik sensörler, optik fiber içerisinden yayılan ışığın polarizasyonundaki değişimlerin ölçülmesine dayanmaktadır. Çevresel etkenler nedeniyle fiberin kırılma indisi değişime uğramaktadır. Böylece, farklı polarizasyon yönleri arasında uyarılan bir faz farkı oluşmaktadır. Basınç, gerilme gibi etkilerin altında bulunan fiberin değişen kırılma indisi, uyarılmış kırılma indisi olarak adlandırılmaktadır. Bu şekilde, farklı polarizasyon yönleri arasında, uyarılmış faz farkı bulunmaktadır. Diğer bir deyişle, basınç ve gerilme altında, optik fiber lineer bir geciktirici gibi çalışmaktadır. Bu şekilde çıkış polarizasyon durumundaki değişimin algılanması ile gerilme, basınç gibi çevresel etkenler algılanabilmektedir. Polarizasyon modülasyonlu optik sensör yapısı Şekil 3.9’da görülmektedir [89, 94].



Şekil 3.9. Polarizasyon modülasyonlu fiber optik sensörler [94]

Fonksiyonelliğine göre ise fiber optik sensörler noktasal algılamalı ve dağıtık algılamalı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Noktasal ölçümler için en ideal sensörler FBI sensörlerdir. FBI sensörler dalgaboyu ve frekanstaki değişimlere bağlı olarak algılama yapmaktadırlar.

Dağıtık algılama tekniğinde ise algılama; genlik, frekans, faz ve polarizasyondaki değişimlerin analiziyle elde edilmektedir. Düşük optik kayıpları nedeniyle uzun mesafelerde kullanılabilen bu sensör sistemleri, çok sayıdaki nokta algılayıcılarına göre daha düşük maliyetlidir. Dağıtık fiber optik algılamada, fiber içerisine gönderilen ve geri saçılan ışığın şiddetindeki değişim, sıcaklık ve gerilmenin fonksiyonu olarak değerlendirilmektedir. Işığın saçılması, fiber içerisinde ilerleyen ışık fotonları ile geri saçılan ışık fotonlarının frekansları arasındaki ilişkiye göre sınıflandırılmaktadır. FBI sensörler ise noktasal, kararlı ölçümlerin önem arz ettiği uygulamalarda sıcaklık, vibrasyon ve gerilmenin fonksiyonu olarak değerlendirilmektedir [30].

Geleneksel elektriksel algılayıcılarla karşılaştırıldığında, fiber optik algılayıcılar çok daha üstün performans sunmaktadır. Bu avantajlarından bazıları aşağıda listelenmiştir:

- Dış ortamdaki düzensizliklerden (kimyasal, elektrik ve ya aydınlatmalardan) etkilenmeme (EMG/RFG'ye dayanıklı),
- Algılama yapılacak fiber optik kablo hattı boyunca elektriksel güç gerektirmeme,
- Eş zamanlı çalışabilen çok sayıda ölçüm noktasına sahip olabilme özelliği,
- Verilerin sadece bir sorgulama sistemi tarafından sorgulanabilmesi,
- Büyük kablo uzunluklarında ve değişen coğrafik özelliklere sahip geniş alanlarda, fiziksel büyüklükleri ölçmenin yanı sıra konum bilgisi de sağlanabilmesi,
- Otomatik ve hızlı veri toplama özelliği ile uzaktan sürekli algılama
- Algılayıcı ünitenin, diğer algılama yöntemlerinde kullanılanlara kıyasla daha kompakt, işletimi kolay ve az bakım gerektiren bir yapıda olması,
- Sensör ve ölçüm maliyetinin diğer algılama yöntemlerine kıyasla daha ucuza mal edilebilmesi.

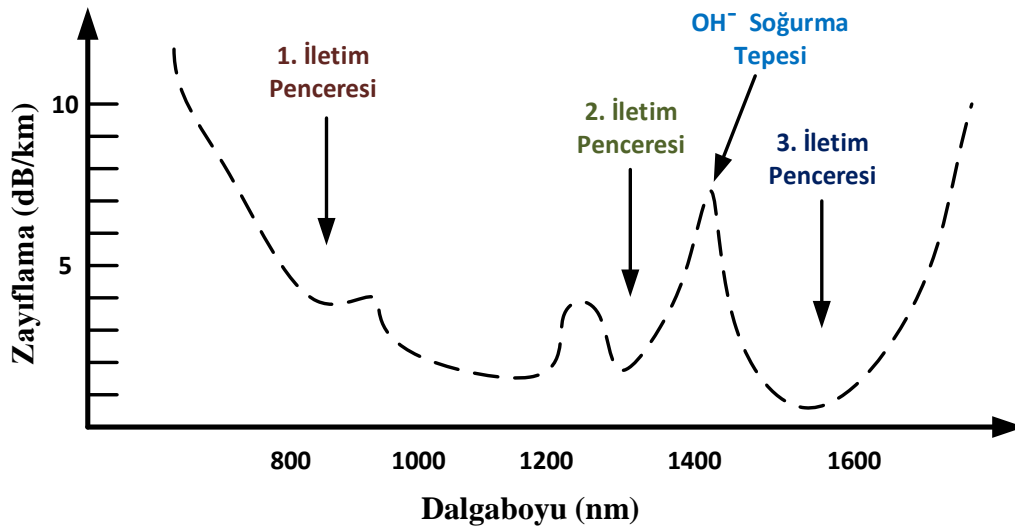
3.1. Dağıtık Algılamalı Fiber Optik Sensörler

Çoğu dağıtık optik fiber sensör, güçlü Optik Zaman Domeni Reflektometrisi (OZDR), diğer adıyla yansıma ölçme prensibine göre çalışmaktadır. OZDR, 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 [96-98].

Dağıtık algılamalı fiber optik sensörler, bir ışık kaynağı, algılama elemanı olarak bir optik fiber ve bir işaret işleme devre elemanından oluşmaktadır. Genellikle darbe kaynaklarının karakteristikleri, istenen algılama mesafesine, uzamsal aralığa ve uzamsal çözünürlüğe bağlı olarak değişmektedir [97-99].

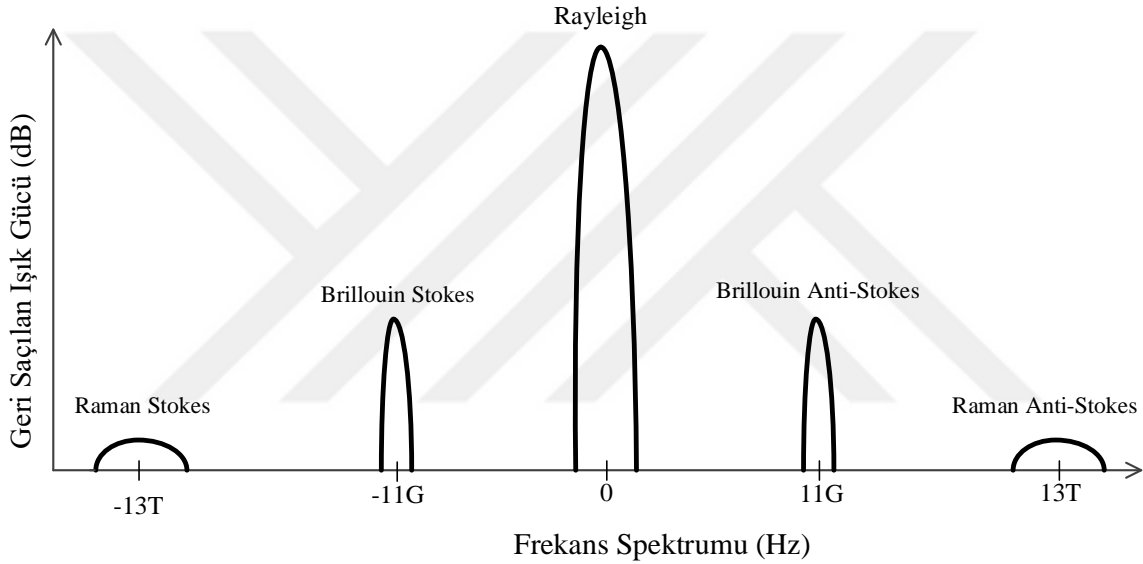
Dağıtık fiber optik sensör sistemlerinde kullanılan tek modlu fiber kablolar kilometrelerce uzunlukta olabilmektedir. Dolayısıyla gönderilecek sinyalin zayıflaması bu tür sensörlerde önem kazanmaktadır. Zayıflama, işaretin yeniden kuvvetlendirilmeden önce iletilebileceği maksimum seviyeyi belirleyen temel faktördür. Genellikle zayıflama, “birim uzunluk başına desibel” cinsinden ifade edilmektedir. Optik fiberde işaret zayıflamasından sorumlu çok sayıda etken bulunmaktadır. Bunlar; malzeme kompozisyonu, hazırlama ve saflaştırma tekniği ve dalga kılavuzu yapısıdır. Tek modlu fiberin dalga boyuna bağlı zayıflama eğrisi Şekil 3.10’da görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi optik haberleşme ve sensör sistemlerinde kullanılan tek modlu fiberin üç iletim penceresi bulunmaktadır. Tek modlu fiberin dalgaboyuna bağlı bu zayıflama eğrisinden görüldüğü gibi en düşük fiber zayıflaması üçüncü iletim penceresinde yer alan 1550 nm dalgaboyunda (yaklaşık 193 THz) gerçekleşmektedir. Bu nedenle ışık kaynağı bu bantta seçildiğinde daha düşük zayıflamalı algılama yapılabilir [96-100].



Şekil 3.10. Tek modlu fiberin dalga boyuna bağlı zayıflama eğrisi [1]

Fiberden geri saçılan ışık sinyali doğal olarak zayıf bir sinyaldir ve çok miktarda üzerine binmiş gürültü içermektedir. Bu yüzden, geri saçılan işarettten sıcaklık ve/veya gerilme bilgilerini elde etmek için ortalama alma ve veri işleme süreçlerine gerek duyulmaktadır.

Dağıtık optik fiber sensörler için kullanılan ana saçılma mekanizmaları; Rayleigh, Raman ve Brillouin saçılmalarıdır. Rayleigh saçılma mekanizmasının aksine, Raman ve Brillouin saçılmalarında fiber içerisine gönderilen ışığın frekansı ile saçılan ışığın frekans arasında fark bulunmaktadır. Bu fark, Raman saçılmasında 13 THz, Brillouin saçılmasında ise 11 GHz seviyelerindedir. Bu saçılmalar Şekil 3.11’de görülmektedir.



Şekil 3.11. 1550 nm dalga boyunda fiberde oluşan kendiliğinden Rayleigh, Brillouin ve Raman saçılım spektrumları [100]

Saçılma işlemi içinde, 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 [95-100].

3.2. Fiber Bragg Izzaralar ve FBI Tabanlı Sensörler

Bu bölümün birinci kısmında FBI'ların tarihçesi, üretim aşaması, yapıları, çeşitleri, fiziksel özellikleri gibi konular incelenmiştir. İkinci bölümde ise FBI sensörler, algılama prensipleri, sorgulama devreleri, FBI ile gerçekleştirilen gerilme ve sıcaklık algılama devreleri incelenmiştir.

3.2.1. FBI teorisi ve üretim yöntemleri

FBI'nın keşfi, fiber optik algılama ve telekomünikasyon sistemlerinde, araştırma ve geliştirme üzerinde önemli bir etki yapmıştır. FBI'lar genellikle telekomünikasyon sistemlerinde optik filtre, dispersiyon dengeleyici bileşenler ve dalgaboyu bölmeli çoğullama sistemleri olarak kullanılmaktadırlar [101]. Ayrıca, FBI'lar ızgara alanındaki herhangi bir değişime duyarlıdır ve bu özellikleri algılama birimi olarak kullanılmaları için kapsamlı araştırmalara yol açmıştır [102].

FBI'dan bilgiler dalgaboyu kodlamalı olarak ölçülmektedir. Şekil 3.12'den de görüldüğü gibi FBI, fiber özünün uzunlamasına eksenini boyunca kırılma indisinin periyodik ya da yarı periyodik bir dikey girişimidir [2, 4].



Şekil 3.12. Fiber Bragg ızgara yapısı

FBI'lar tek modlu fiber üzerinde çeşitli yazma teknikleri kullanılarak üretilmektedir. Bu tekniklerden yaygın olarak kullanılanlar yan yazma tekniği, faz maskesi ve nokta tekniğidir

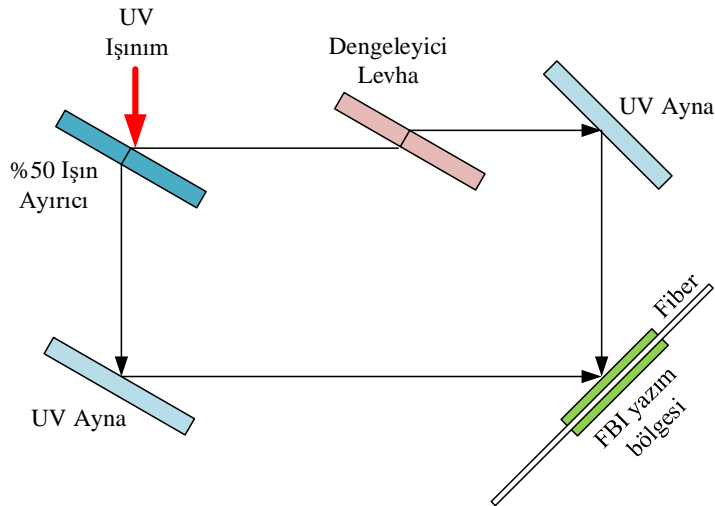
Bragg ızgaralar fiber öz üzerine uzamsal olarak değişen, yoğun UV ışınım uygulanarak üretilmektedirler. Kısa dalgaboyu (<300 nm) UV fotonları, son derece kararlı silikon-oksijen bağları kırmak için yeterli enerjiye sahiptir ve fiber öze uygulanarak özün yapısını değiştirmekte, kırılma indisini ise yavaşça artırmaktadırlar. İki tutarlı ışın veya fiber boyunca konumlanan maskelerden kaynaklanan UV yoğunluğu içerisindeki periyodik uzamsal değişim, fiberin kırılma indisindeki periyodik değişimin yerini tutmaktadır [1, 2].

Günümüzde FBI'lar yaygın olarak, germanyum katkılı silika fiber öz üzerine periyodik ultraviyole ışınım uygulanarak oluşturulan kırılma indis yapılarıyla üretilmektedirler. Germanyum ışığa duyarlı olduğu için, FBI üretiminde genellikle germanyum katkılı fiber öz kullanılmaktadır. Bu yöntemde çoğunlukla 240 nm ve 193 nm UV bantları kullanılmaktadır. Fiber öz üzerinde oluşturulan bu kalıcı kırılma indis değişimi ise ışığa duyarlılık olarak adlandırılmaktadır [1].

Işığa duyarlı fiber üretmenin ve onun üzerine ızgaraları yazmanın ilk dönemlerinde bu işlemler ayrı ayrı yapılmaktaydı. Günümüzde ise bu iki işlem aynı anda yapılmaktadır. Böylece üretim süresi ve maliyet azalmakta ve bir fiber öz üzerine daha fazla sayıda FBI gömmek mümkün olmaktadır.

Başlangıçta, ızgaralar fiber çekirdeği boyunca ilerleyen 488 nm argon iyon lazer kullanılarak imal edilmiştir. 1981 yılında FBI oluşum mekanizması, morötesi (UV) ışığın, çekirdeği oluşturan katkılı silis bant açısının hemen altındaki noktaya nüfuzu ile gerçekleşen iki foton yapısı rapor edilmiştir. Daha sonra, kırılma indisindeki herhangi bir değişikliğin tüm germanyum katkılı optik elyaflara indükte edilebileceği gösterilmiş ve FBI'daki araştırma faaliyetleri farklı bir boyut kazanmıştır. Işığın saçılmasının fotosensitivite kaynaklı olduğunun anlaşılması ile de cam materyalin kırılma indisinde kalıcı bir değişiklik meydana gelmiştir [1].

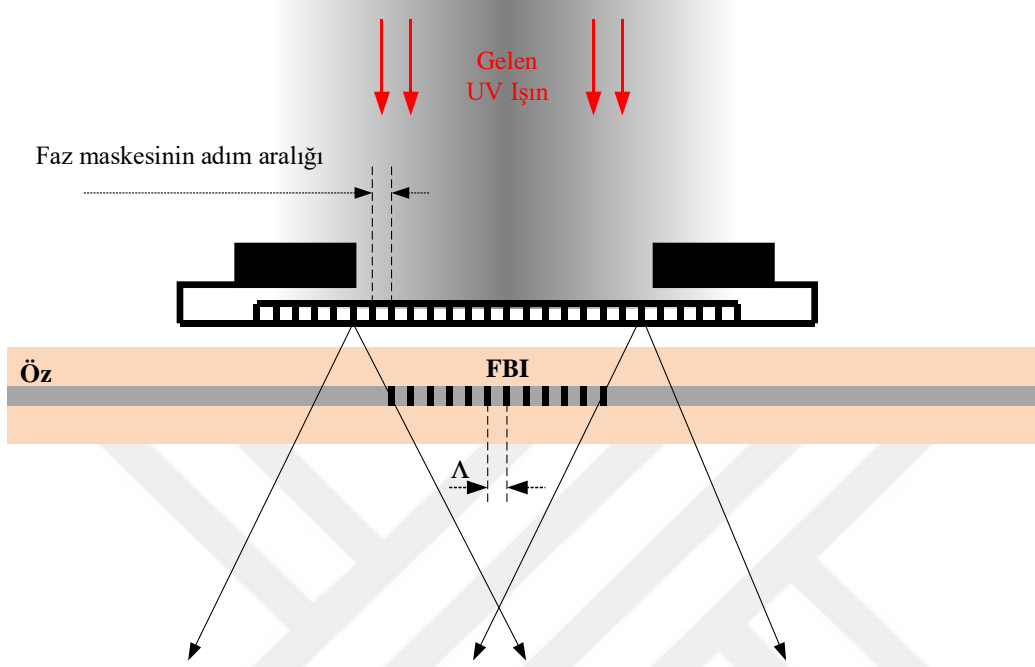
Bundan yaklaşık 10 yıl sonra, yan yazma tekniğinin (transvers holografi tekniği) geliştirilmesi ile FBI tarihinde bir atılım meydana gelmiştir. Bu teknik literatürde harici yazma tekniği ya da interferometrik teknik olarak da bilinmektedir. Bu metotta, 244 nm ışınım ikiye bölünmektedir ve ışığa duyarlı fiber özünde tekrar birleştirilmektedir. Bu teknik ile oluşturulan saçak modeli, kalıcı bir kırılma indis değişimi meydana getirmektedir [97]. Yan yazma tekniğine dayalı FBI üretim yöntemi Şekil 3.13'te görülmektedir.



Şekil 3.13. FBI yan yazma tekniği [102]

Bundan sonra birçok harici yazma tekniği geliştirildi ve rapor edildi. FBI'ların faz maskesi ile üretim metodu ise ilk olarak 1993'te uygulanmıştır [91]. Bu yöntemde UV ışık maskeden

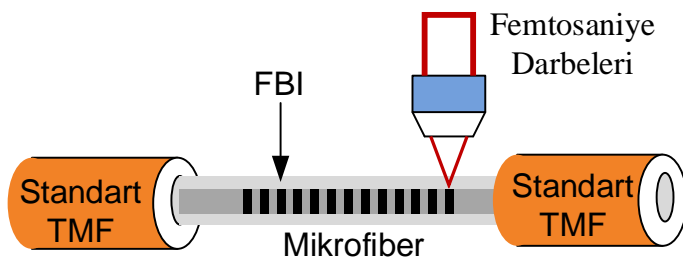
geçirilerek tek modlu fibere uygulanmakta ve ızgara yapısı oluşturulmaktadır. Faz maskesi üretim yöntemine ait temsili gösterim Şekil 3.14'te görülmektedir.



Şekil 3.14. Faz maskesi kullanılarak FBI üretme yöntemi [1]

Bu yöntemde ızgara periyodu, faz maskesinin periyodunun yarısına eşittir ($\Lambda_{\text{mask}} = 2\lambda_B$). Bu tekniğin en önemli dezavantajı, her bir özel Bragg dalgaboyu için farklı faz maskesine ihtiyaç duyulmasıdır [1,103].

Nokta (femtosaniye lazer ışın) tekniği ise, Bragg ızgaraları bir optik fiber içerisinde yazmanın en esnek yöntemlerinden biridir. Bu metot ile UV kaynak bir yarıktan geçmektedir ve sonra fibere odaklanarak bir noktada indis değişimini oluşturmaktadır. Daha sonra fiber Bragg periyodu mesafesi “ Λ ” kadar kaydırılmaktadır [104]. Nokta tekniği üretim yöntemine ait temsili gösterim Şekil 3.15'te görülmektedir.



Şekil 3.15. Nokta tekniği ile FBI üretme yöntemi [104]

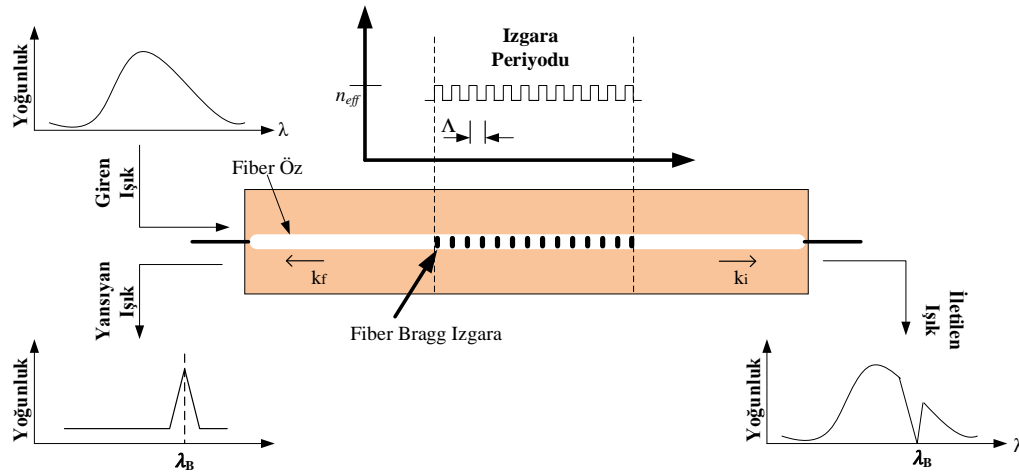
Bu üretim yöntemlerinden biri kullanılarak üretilen FBI'lar, fiber içerisinde bir pul aynası gibi davranarak, fiber özün kırılma indisinde oluşan periyodik değişime bağlı olarak özgül bir dalgaboyunu yansıtmaktadırlar. Bu pul aynasında oluşan küçük yansıma Bragg yansıması olarak adlandırılmaktadır. Optik fiber kablo üzerinde yaklaşık 1 cm uzunluğunda bir yer kaplayan FBI, kendisine gelen geniş bantlı ışığın spektrumunda, Bragg dalgaboyunu geri yansıtmakta, kalanını ise iletmektedir.

FBI'lar genellikle silika fiber öz üzerine işlenmekle birlikte, bazı mekanik ve kimyasal parametrelerinden dolayı polimer optik fiberler de kullanılmaktadır. Polimer optik fiber yapıları üzerine işlenen ızgara sensörler, kimyasal ve biyokimyasal yapılarda bazı avantajlar sunduğundan, tıp ve ilaç sektöründe daha çok tercih edilmektedirler.

Izgara saçaklarının fiber içinde üretilmesi yöntemine ve algılama mekanizmalarına göre FBI'lar Tip I, TipIA, TipII, TipIIA ve Rejeneratif Izgara olmak üzere farklı türlere ayrılmaktadır. FBI'da tip kavramı ışığa duyarlılık ve yüksek sıcaklıklara dayanma kabiliyeti gibi özelliklerle ilişkilidir. Bu FBI tiplerinde, fiberdeki katkılar ve üretim aşamasında fibere uygulanan ışığın karakteristiği değişmektedir [1].

FBI'nın yapısı, kırılma indisindeki veya ızgara periyodundaki değişime göre değişiklik gösterebilmektedir. Akıllı bir yapıda, FBI'nın ızgara periyodu tekdüze veya kademeli olabilmektedir. Ayrıca noktasal veya dağıtılmış da olabilmektedir. Kırılma indisindeki en önemli karakteristikler ise kırılma indis profili ve kaydırmadır. Kırılma indis profili tekdüze veya apodize olmakta, kırılma indisindeki kayma ise pozitif ya da sıfır olmaktadır [1,2].

Algılama sistemlerinde, ızgara periyodu ve kırılma indis profil değişimine göre en yaygın kullanılan FBI, sabit ızgara alanına sahip tekdüze yapıdır. Bu yapıda ızgara periyodu tipik olarak 0.25-0.5 μm aralığındadır. Bu yapıdaki sensör ile en doğru gerilme ile sıcaklık algılaması yapıldığı düşünülmektedir, çünkü ölçümler dalgaboyu kodlamalı yapılmaktadır. Bu da diğer optik temelli sensör sistemlerinde görülen genlik ve yoğunluk dalgalanmalarını elimine etmektedir [1, 2, 4]. Şekil 3.16'da tekdüze yapıya sahip FBI'nın modülasyon genliği ve periyodu ile birlikte tipik bir gösterimi görülmektedir.



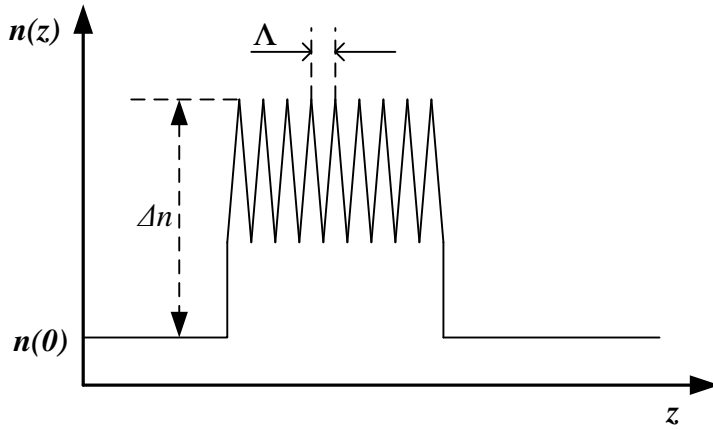
Şekil 3.16. Tekdüze FBI'nın indis modülasyon genliği ve periyot gösterimi [1]

Şekil 3.16'da FBI'ya giren, iletilen ve yansıyan ışık yayılımları grafiksel olarak görülmektedir. Her bir ızgaradan yansıyan ışığın katkısıyla Bragg durumu doyuma ulaştığında, yapısal olarak yansıyan sinyalin merkez dalgaboyu ızgara parametreleri ile tanımlanmaktadır. Bragg durumu enerji ve momentum korunumunun her ikisinin de katkısıyla doyuma ulaşmaktadır. Enerji korunumu gelen ve yansıyan ışım için aynı olmak durumundadır. Momentum korunumunda ise gelen dalga vektörü ile ızgara dalga vektörünün toplamı yansıyan dalga vektörüne eşit olmak durumundadır. Bu ilişki Eş. 3.1'de görülmektedir.

$$k_f = k_g + k_i \quad (3.1)$$

Burada k_f yansıyan dalga vektörünü, k_i gelen dalga vektörünü ve k_g ise $2\pi/\Lambda$ büyüklüğüne sahip ızgara dalga vektörünü ifade etmektedir [1].

FBI'daki ızgara saçak aralığı (Λ) ızgara periyodu olarak isimlendirilmektedir. Tekdüze ızgaralar için ızgara periyodu, ızgara boyunca sabit kalırken, cıvıltılı ızgaralarda değişmektedir. Kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı ise, Tekdüze ızgaralarda ızgara uzunluğu boyunca sabit kalırken, apodize ızgaralarda farklılık göstermektedir.



Şekil 3.17. Tekdüze FBI'nın kırılma indis gösterimi[105]

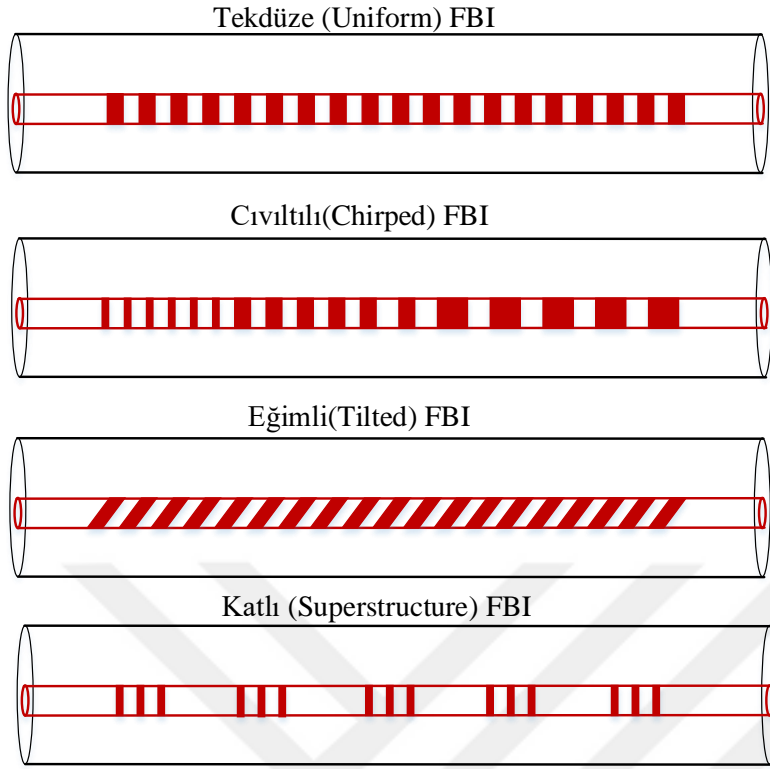
Şekil 3.17'den de görüldüğü gibi Bragg ızgara fiber boyunca oluşan kırılma indis dağılımı($n(z)$) ile karakterize edilmektedir [105]. Burada z fiber öz üzerindeki konumu ifade etmektedir. Δn ise kırılma indis farkını ifade etmektedir. Fiber boyunca kırılma indis dağılımı Eş. 3.2 ile gösterilmektedir.

$$n(z) = n_0 + \Delta n_{ac}(z) + \Delta n_{ac}(z) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \theta(z)\right) \quad (3.2)$$

Burada n_0 ızgara özelliğine bağlı kırılma indisini, $\Delta n_{ac}(z)$ kırılma indis modülasyon genliğini, $\theta(z)$ z ile yavaşça değişen periyot civıltısını ve $\Delta n_{ac}(z)$ ise ortalama kırılma indis değişimini ifade etmektedir [1].

Işık, dar dalgaboyu aralığında FBI boyunca ilerlerken, toplam yansıma Bragg dalgaboyunda gerçekleşmektedir. Ayrıca bunun dışında yanal loblar da oluşmaktadır. Bragg dalgaboyuna yakın bulunan bu yanal lobları bastırmak için apodizasyon tekniği kullanılmaktadır. Modülasyon genliğinin ızgara boyunca değiştirilmesi işlemine apodizasyon denilmektedir. Bu işlemde geçen FBI da apodize edilmiş ızgara olarak tanımlanmaktadır [1, 105].

FBI'ların farklı ızgara ve kırılma indis değişim yapıları bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yapılar tekdüze, civıltılı, eğimli ve katlı yapılardır [1, 4]. Bu FBI yapıları Şekil 3.18'de görülmektedir.



Şekil 3.18. FBI'daki kırılma indis değışim yapıları [1,113]

Algılama sistemlerinde çoğunlukla tekdüze ızgaralar kullanılmaktadır. Eğimli ızgaralar erbiyum katkılı yükselteçlerde kazanç eşitlemek için, cıvıltılı ızgaralar haberleşme uygulamalarında dispersiyon kompanzasyonu için, katlı ızgaralar ise ayarlanabilir lazer sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2].

FBI'larda indis modülasyonununun fazı genellikle sabit bir değere ayarlanmıştır. Ancak faz kaymalı ızgaralarda bu değere değışebilmektedir. Faz kayması darbantlı bir iletim penceresi açmakta ve bu FBI'lar dar bantlı iletim filtresi olarak kullanılabilir [1,2].

3.2.2. FBI sensörler

FBI tabanlı algılama sistemleri en basit haliyle bir ışık gönderici, alıcı, optik filtre, modülasyon birimi ve sinyal işleme biriminden oluşmaktadır.

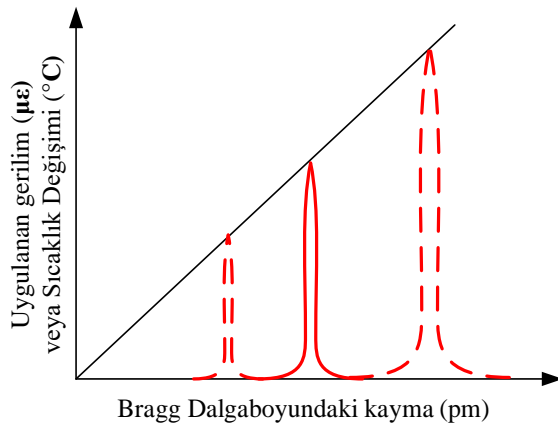
FBI sensörlerin algılama amaçlı ilk olarak kullanıldıkları 1989 yılından beri çeşitli ölçümler ve uygulamalar için farklı fikirler önerilmiş ve çeşitli demodülasyon teknikleri geliştirilmiştir [1,102].

FBI tabanlı optik algılama prensibi, ölçülen bilginin dalgaboyu kodlamalı olmasına dayanmaktadır ve dalgaboyundaki kayma, ölçülen büyüklüğe bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle FBI sensörlerinde temel çalışma konusu, Bragg yansımasındaki dalgaboyunun tespitine dayanmaktadır.

Dalgaboyu veya frekansta meydana gelen değişimleri inceleyerek algılama yapan FBI tabanlı sensörlerin en büyük avantajı, algılanan parametrenin etkilerinin, dalgaboyuna etkisinin hemen görülmesidir. Dalgaboyu ölçümü çok hassastır. Genellikle bağlantılardaki ışık kaybı veya ışık kaynağının yoğunluk dalgalanmalarından etkilenmezler [1,102].

FBI algılama sisteminin ilk evrelerinden beri, FBI sensör sisteminde kesin dalgaboyu ölçümü önemli bir konu olmuştur ve dalgaboyu sorgulama için birçok demodülasyon tekniği kullanılmıştır. Genellikle, dalgaboyu ölçümü çok basit olmamaktadır. Bu nedenle, genel bir prensip olarak dalgaboyundaki kaymanın tespiti için, yansıyan sinyal daha kolay ölçülebilen genlik, faz, frekans gibi büyüklüklere dönüştürülmektedir [1, 102].

Genlik ölçümü, fiber optik sensörlerde en yaygın kullanılan ve doğrudan ölçüm yöntemidir. Dalgaboyundaki kaymayı genlik değişimine çevirmek, sorgulama sisteminin daha basit ve düşük maliyetli olmasını sağlamaktadır. Genlik ölçümü için farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, kenar filtresi, uyumlu fiber ızgara filtresi, fiber Fabry-Perot filtresi kullanılmaktadır. Bu tekniklerden en basit ve uygun maliyetli olan yöntem kenar filtre kullanma yöntemidir. Bu yöntemde optik bir filtre kullanılarak, genlik değişimine bağlı olarak FBI'nın dalgaboyu kayması tespit edilmektedir [1, 25, 50]. Kenar filtre tekniğine dayalı FBI sensör hassasiyeti Şekil 3.19'da görülmektedir.



Şekil 3.19. Kenar filtre tekniğine dayalı FBI sensör hassasiyeti [25]

Kenar filtresi Bragg dalgaboyundaki kayma ile filtrenin çıkış yoğunluğu arasında lineer bir bağlantı sunmakta ve dalgaboyuna bağlı bir iletim sağlamaktadır. Ölçüm aralığı algılama çözünürlüğü ile ters orantılıdır. Kenar filtre tekniği, tekli FBI sensör sisteminde verimli sonuçlar alınmakta, ancak sensör dizileri için uygun olmamaktadır [1, 50].

FBI algılama devresinde kenar filtresi farklı yaklaşımlarla kullanılmaktadır. Bunlardan biri, yansıyan sinyali kenar filtresinden geçirdikten sonra fotodedektöre iletmektir. Bir diğerinde yansıyan sinyal kuplör vasıtasıyla ikiye bölündükten sonra biri kenar filtresinden diğer ise referans kolundan geçmektedir. Üçüncü bir yöntemde ise ışık önce kenar filtresine uygulanıp filtreledikten sonra FBI'ya iletilmektedir [25].

Dalgaboyu-Frekans dönüşümü yaklaşımında kullanılan bir yöntem, Akustik-Optik Ayarlanabilir Filtre (AOAF) kullanımınıdır. AOAF, uygulanan radyo frekansının kontrolü ile dalgaboyuna bağımlı iletilen ışığı göstermektedir [1, 102].

Dalgaboyu faz dönüşümü yaklaşımında en yaygın kullanılan yöntem Mach-Zehnder interferometresi kullanımınıdır. Mach-Zehnder interferometresi bir dalgaboyu ayrıştırıcı gibi çalışarak, FBI sensördeki dalgaboyu kaymasını algılamaktadır [93].

FBI Bragg dalgaboyundaki değişim çoğunlukla uygulanan gerilme ile çevresindeki sıcaklığa bağlı olmaktadır. Bragg dalgaboyundaki toplam kayma, uygulanan gerilme ve/veya sıcaklık sonucu kırılma indisi (n_{eff}) ve/veya ızgara periyodu (Λ) 'daki değişime bağlı olarak Eş. 3.3'teki gibi formüle edilmektedir [3].

$$\Delta\lambda_B = 2(n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T})\Delta T + 2(n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial L} + \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial L})\Delta L \quad (3.3)$$

Burada T sıcaklığı L ise yüzey uzunluğudur. Eş. 3.3'ün birinci kısmı Bragg dalgaboyundaki kaymaya sıcaklığın etkisini, ikinci kısım ise gerilmenin etkisini göstermektedir. Sıcaklık değişimi sıfır olduğunda dalgaboyundaki kayma gerilmeye bağlı, gerilme değişimi sıfır olduğunda ise dalgaboyundaki kayma sıcaklık değişimine bağlı olarak değişecektir. FBI sensörlerin sıcaklık ve gerilme parametreleri 4. Bölümde detaylı olarak incelenmiştir.

3.2.3. FBI sensörlerde çoğullama

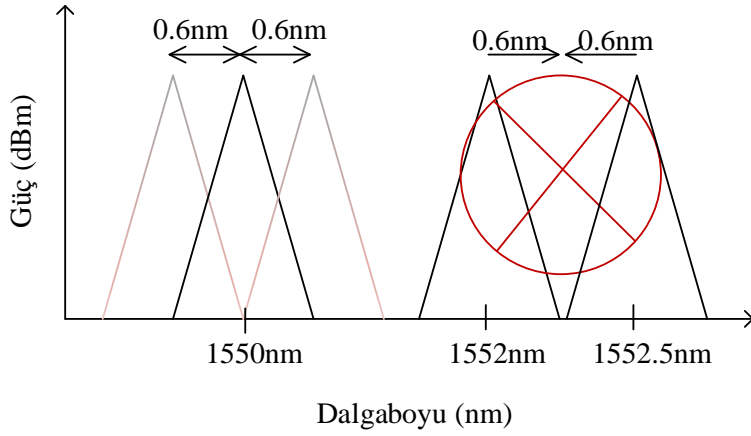
Birçok algılama stratejisi için, birden fazla sensörü bir sistem içerisinde birleştirmek büyük bir avantaj sağlamaktadır. Böylelikle her bir sensör için ihtiyaç duyulan bileşenleri ve dolayısıyla maliyeti azaltmak mümkündür. Çoğullama, aynı zamanda montaj ve izlemeyi de ciddi oranda kolaylaştırmaktadır. Demiryolları gibi, kilometrelerce alanın tek bir merkezden izlenmesini gerektiren uygulamalarda, çoğullama ile tek bir fiber kullanılarak tüm hattın izlenmesi mümkün olacaktır. Bununla birlikte, aynı kaynağı kullanan sensörlerin sorgulama sistemlerinde de büyük oranda kazançlar sağlanacaktır [1,3].

Fiber optik sensörleri çoğullamak için zaman, dalgaboyu, frekans, açıklık, polarizasyon bölmeli gibi farklı algılama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en yaygın kullanılan ve başarı sağlayan FBI sensörlerde çoğullama için dalgaboyu bölmeli, zaman bölmeli ve uzamsal çoğullama yöntemleri kullanılmaktadır [22, 24, 26].

Uzamsal çoğullamada her bir sensör ayrı bir fibere bağlanmaktadır. Bu sensör konfigürasyonunda, her bir fiber sadece bir sensör barındırmaktadır.

FBI sensörleri çoğullamak için, yaygın olarak kullanılan tekniklerin başında dalgaboyu bölmeli çoğullama gelmektedir. Bu metotta, her bir sensör ayrı bir dalgaboyu aralığına atanmaktadır. Sensörleri çoğullamak için, algılama sistemi her bir dalgaboyu aralığını birbirinden ayırt edebilmelidir [26].

Zaman bölmeli çoğullama sisteminde FBI'lar istenen algılama aralığını ölçebilecek yeterli bant genişliğine sahip kısa darbe sinyalleri ile sorgulanmaktadır. Izgaralar, detektöre ulaşan optik sinyalin gecikme zamanı ile tanımlanmaktadır. DBÇ'dan farklı olarak, her bir sensör için bir dalgaboyu atamak yerine, her bir ızgaranın zaman slotu bulunmaktadır. Zaman bölmeli çoğullamada, çok sayıda zaman slotuna sahip olabilmek için her bir zaman slotunu olabilecek en küçük boyutta seçmek ve her bir sensörden yansıyan yeterli optik güce sahip olmak önemlidir. Bu da, sistemde çok sayıda sensör kullanılabilmesine ve birbirine yakın kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır [21, 22, 24].



Şekil 3.20. Sensör dizisinde FBI spektral aralıkları

Bir tek modlu fiber üzerinde birden fazla FBI kullanıldığında, gerilme ve sıcaklık değişimlerinde sensörlerdeki kaymaların birbirine karışmaması için Şekil 3.20’de gösterildiği gibi uygun dalgaboyu spektral aralığı bırakılmalıdır. Gerilme sensörlerinde 5nm gibi bir dalgaboyu aralığı bırakılırken, sıcaklık sensörlerinde 1 nm’lik bir bant genişliği aralığı yeterli olmaktadır. Bu değerler, sensörün üretim özellikleri, ölçüm aralığı ile gerilme ve sıcaklık katsayılarına bakılarak kesin olarak belirlenebilmektedir.

4. FBI GERİLME VE SICAKLIK SENSÖRLERİ İLE DEMİRYOLU UYGULAMALARI

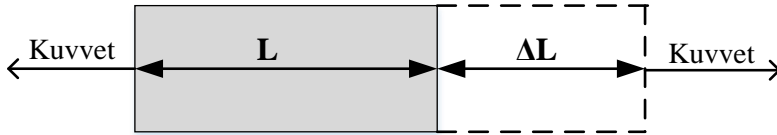
FBI sensör sistemleri, en az bir optik kaynak ve algılama biriminden oluşmak zorundadır. Bu algılama modülü aynı zamanda yansıyan ışığın dalgaboyundaki değişimlerin tespiti ile çevresel büyüklükleri de ölçebilmektedir.

FBI sensörler ile gerçekleştirilebilecek uygulamaların başında gerilme ve sıcaklık algılamaları gelmektedir.

Bu bölümde FBI gerilme ve sıcaklık sensörleri incelendikten sonra, bu sensörler ile demiryollarında gerçekleştirilebilecek uygulamalar örnekleriyle anlatılmıştır.

4.1. Gerilme Kavramı ve FBI Sensör ile Gerilmenin Algılanması

Uygulanan kuvvetle bir materyalde meydana gelen bozulma miktarı gerilme olarak adlandırılmaktadır. Gerilme Şekil 4.1’de anlatıldığı gibi materyalin uzunluğundaki bozulmanın, orijinal uzunluğu ile oranlanması sonucu elde edilen bir oranla tanımlanmaktadır.



Şekil 4.1. Boylamsal gerilme ölçümünde gözlenen uzunluk değişimi

Bir cisme uygulanan yanal kuvvet neticesinde oluşan gerilme, cismin uzunluğundaki değişim miktarının ilk uzunluğuna oranı olarak ifade edilmektedir;

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.1)$$

Burada ε gerilmeyi, L uzunluğu ve ΔL uzunluktaki değişimi ifade etmektedir.

Gerilme, pozitif (çekmeye dayalı) ya da negatif (sıkıştırmaya dayalı) olabilmektedir. Malzeme bir yönde sıkıştırıldığında diğer iki yönde genişleme eğilimi göstermektedir ve bu Poisson etkisi olarak bilinmektedir. Poisson oranı (ν), bu etkinin bir ölçümüdür ve

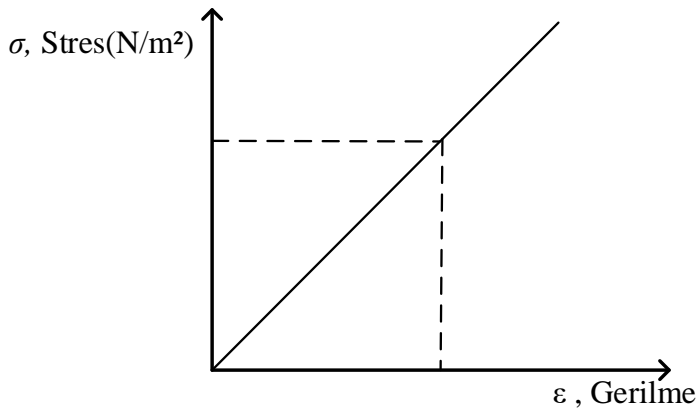
gerilmenin çapraz yönündeki negatif oranı olarak tanımlanmaktadır. Birimsiz olmasıyla birlikte, gerilme bazen inç/inç veya mm/mm gibi birimlerle de açıklanmaktadır. Pratikte ölçülen gerilmenin büyüklüğü çok küçüktür, bu yüzden genellikle mikrostrain ($\mu\epsilon$) ile tanımlanmaktadır.

Literatürde aksiyel, eğilme, kesme ve burulma olmak üzere dört farklı gerilme türü bulunmaktadır. Yaygın olarak aksiyel ve eğilme gerilmeleri ölçülmektedir. Yatay yönde uygulanan lineer kuvvetin sonucu olarak bir malzemedeki uzama veya sıkışma aksiyel gerilme ile ölçülmektedir. Dikey yönde uygulanan lineer kuvvetin sonucu olarak malzemenin bir yönündeki uzama ve diğer yönündeki büzülme eğilme gerilmesi ile ölçülmektedir. Uygulanan yatay ve dikey kuvvetlerin sonucu olarak komponentlerde meydana gelen bozulma kesme gerilmesi ile ölçülmektedir. Burulma gerilmesi ise komponente uygulanan yatay ve dikey kuvvetlerin dairesel kuvvetini ölçmektedir.

Stres birim materyale uygulanan kuvvet miktarı olarak tanımlanmaktadır. Stres ile gerilme arasında Şekil 4.2'de görüldüğü gibi lineer bir ilişki bulunmaktadır. Ancak bu lineerlik materyalin özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Çekme ve sıkıştırma yönünde nesneye uygulanan stres aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir:

$$\sigma = F_n / A \quad (4.2)$$

Burada σ stres (Pa , N/m^2 , psi), F_n uygulanan kuvvet (N) ve A stresin uygulandığı alanı (m^2 , $inç^2$) ifade etmektedir.



Şekil 4.2. Stres ile gerilme arasındaki genel ilişki

Şekil 4.2’de stres ile gerilme arasındaki lineer ilişki görülmektedir. Ancak bu lineerlik stres uygulanan malzemenin özelliklerine göre değişiklik göstermektedir.

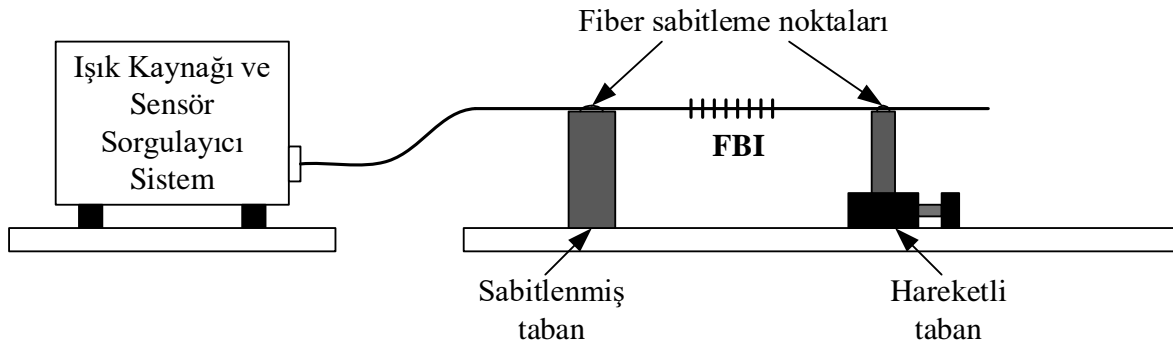
Gerilme ile stres arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir (Hooke yasası) ;

$$\varepsilon = \sigma / E \quad (4.3)$$

Burada, ε ölçülen gerilme, σ stres ve $E =$ Elastisite Modülü (Young modülü) ’dür. Elastisite modülü malzemedeki uzamayı veya sıkıştırmayı tahmin etmek için kullanılmaktadır. Malzemenin sertliği ile ilgili bir ölçümdür.

Elastik malzemelerdeki gerilmeyi birçok metot ile ölçmek mümkündür. Fakat sık kullanılan yöntemler strain gauge kullanımınıdır. Fiber optik sensörlerdeki gelişmeler neticesinde FBI’lar ile de kararlı gerilme ölçümleri yapılabilmektedir.

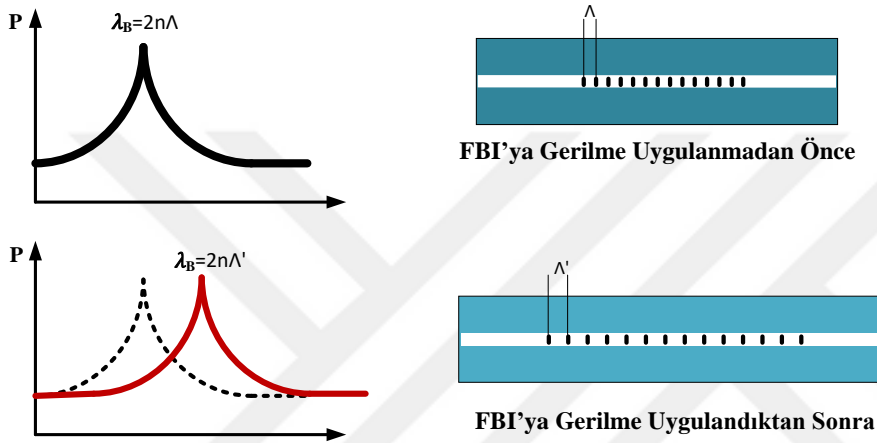
FBI’ları gerilme sensörü olarak kullanmanın önemli nedenleri statik, yarı statik ve dinamik yapıya sahip olmalarıdır. FBI tek modlu bir fiber üzerine yazıldığında, sabit sıcaklıkta gerilmeye bağlı değişim göstermekte, Bragg dalgaboyu ızgara saçak aralığı (Λ) ve etkin kırılma indisindeki (n_{eff}) değişime bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 4.3. FBI gerilme sensörünün genel şematik deney düzeneği [1]

Şekil 4.3’te fiziksel bir gerilme algılama deney düzeneği görülmektedir. FBI sensörler en az bir optik kaynak ile algılama ve sorgulama biriminden oluşmaktadır. Bu algılama ve sorgulama modülü, yansıyan ışığın dalgaboyundaki değişimlerin tespiti ile gerilmeyi ölçebilmektedir.

Çekme ve sıkıştırma yönünde nesneye uygulanan kuvvet nedeniyle materyal üzerine monte edilen FBI sensörün Bragg dalgaboyunda değişim meydana gelmektedir. Bragg dalgaboyundaki bu değişim ile gerilme miktarı hesaplanabilmektedir. FBI'ya gerilme uygulanmadan önceki ve sonraki durumlarında, ızgara periyodu ve merkez dalga boyunda meydana gelen değişim, temsili olarak Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4. FBI'ya gerilme uygulanmadan önceki ve sonraki durumlar

FBI'lar girişine gelen ışığı, her bir ızgara saçağından bir miktar yansıtarak ızgara girişinde toplamsal bir yansıtıcılık oluşturmaktadır ve bu yansıtıcılık merkez dalga boyunda maksimuma ulaşmaktadır [105]. FBI'dan yansıyan bu ışığın merkez dalga boyu Bragg dalga boyu ile ilişkilidir. Yani fiber ızgara, λ_B Bragg dalgaboyunda ışığı geri yansıtmaktadır. Bu ilişki Eş. 4.4'te görülmektedir;

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (4.4)$$

Burada Λ ızgara periyodu ve n_{eff} etkin kırılma indisidir. Gerilme ve sıcaklık ile Λ ve n_{eff} değiştiğinden geri yansıyan bileşenin dalga boyu da değişecektir. Yansıyan bileşenin dalga boyundaki kayma ile de gerilmedeki değişim tespit edilebilecektir.

Gerilme sonucunda Bragg dalgaboyunda oluşan kaymayı hesaplamak için Eş. 4.4 kullanıldığında, hassasiyetin yer değiştirme açısından kısmi türevli olduğu Eş. 4.5'te görülmektedir;

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta L} = 2n_{\text{eff}} \frac{\partial\lambda}{\partial L} + 2\lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial L} \quad (4.5)$$

Eş. 4.4 tekrar Eş. 4.5'te yerine konulduğunda Eş. 4.6'daki eşitlik elde edilmektedir.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial\lambda}{\partial T} \Delta L + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \Delta L \quad (4.6)$$

Fiberin uzunluğuna göre ızgara periyodundaki değişim Eş. 4.6'nın birinci kısmıdır. L uzunluğunda bir fibere sahip olduğumuzu ve bir FBI'nın bu fiber içerisine monte edildiğini varsayalım. Fibere stres uyguladığımızda, $\Delta L/L$ oranında bir gerilme elde ederiz. Aynı zamanda FBI'nın uzunluğunun L_{FBI} olduğunu varsayarsak $\Delta L_{FBI} / L_{FBI}$ oranında gerilme elde ederiz. Fakat FBI L uzunluğundaki fiberin içinde olduğundan $\Delta L_{FBI} / L_{FBI} = \Delta L/L$ eşitliği sağlanmaktadır.

Eş. 4.6'nın ikinci kısmı ise foto elastik katsayı ρ_e 'dir. Bazı cisimler için foto elastik katsayı materyalin Poisson katsayısına bağlıdır ve bu etki negatiftir. Yani optik fiber uzadığında, yansıma katsayısı materyalin yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak azalmaktadır. Bu nedenle fiberde uzama gerçekleştiğinde Eş. 4.5'nin iki kısmı birbiri ile zıt etkiler göstermektedir. Biri ızgaralar arasındaki mesafenin artmasına bağlı olarak Bragg dalgaboyunda artan yönde kayma oluşturmakta, diğeri kırılma indisini azaltarak Bragg dalgaboyunda azalan bir kayma oluşturmaktadır. Bu her iki durumun oluşturduğu etkilerin birleşimi, Bragg dalgaboyunda gerilme ile oluşacak kaymayı ifade etmektedir. Bu kayma ile boylamsal gerilme arasındaki ilişki Eş. 4.7'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_z \quad (4.7)$$

Burada ρ_e , fiberin fotoelastik katsayısı ve ε_z ızgaranın boylamsal gerilmesidir. Bu durum için sıcaklığın sabit olduğu kabul edilmiştir [3]. Sadece gerilmeyi ölçmek için, FBI sıcaklığa karşı korunmalı ve gerilme ölçümü yapılan ortamda sıcaklık sabit tutulmalıdır. Sıcaklıktaki değişim kompanze edildiğinde FBI'da oluşan gerilme değişimi Eş. 4.7 ile hesaplanacaktır [3]. Bu kompanzasyon için çeşitli yöntemler kullanılmakla birlikte, en etkili yöntem aynı fiber üzerinde ikinci bir FBI kullanmaktır. Bu durumda aynı fiber üzerindeki iki adet FBI'dan iki farklı Bragg yansıması oluşacaktır ve kompanzasyon için FBI'lardan biri aynı zamanda sıcaklık ve gerilmeye, diğeri ise sadece gerilmeye bağımlı olacaktır.

Çekme ve sıkıştırma yönünde nesneye uygulanan stres nedeniyle FBI sensörün Bragg dalgaboyunda değişme meydana gelecektir. Çekme uygulandığında Bragg dalgaboyu artı yönde değişirken, sıkıştırma uygulandığında Bragg dalgaboyu eksi yönde değişecektir. Bragg dalgaboyundaki bu değişim ile gerilme hesaplanabilmektedir.

Germanyum katkılı silika fiber öz için fiberin foto-elastik katsayısı, $\rho_e = 0.22$ 'dir [3]. 1555 nm dalgaboyuna sahip bir FBI için bu değer Eş. 4.7'de yerine konulduğunda;

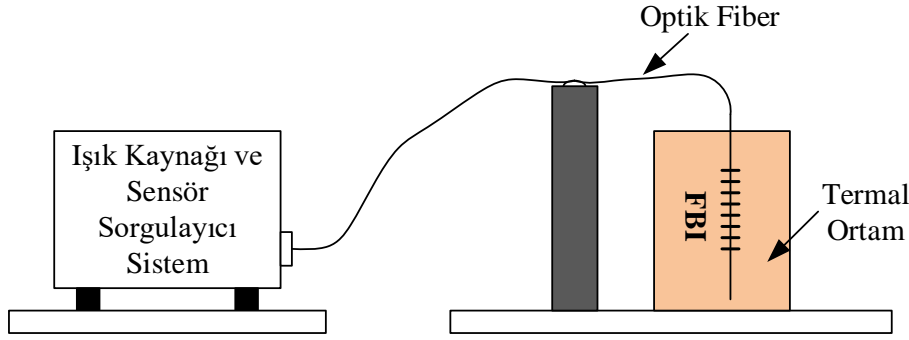
$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon_z} = (1 - \rho_e)\lambda_B = (1-0.22).1555.10^{-9} = 1.212 \text{ pm}/\mu\varepsilon,$$

olarak hesaplanmaktadır. FBI ve ortam özelliklerine göre değişiklik göstermekle birlikte, 1555 nm Bragg dalgaboyundaki germanyum katkılı silika fiber öze sahip bir FBI'da, sabit ve oda sıcaklığında, dalgaboyu/gerilme değişimi yaklaşık olarak 1.21 pm/ $\mu\varepsilon$ olarak gerçekleşmektedir. Sıcaklık sabit kalmakla birlikte farklı sıcaklıklarda farklı oranlar gerçekleşebilmektedir.

4.2. FBI Sensör ile Sıcaklık Algılama

FBI'lar sıcaklığa duyarlıdır ve sıcaklık ölçümü için birçok ortamda, özellikle de zorlu çevresel koşullara sahip ortamlarda kullanılmaktadır. Sıcaklık etkisiyle Bragg dalgaboyunda meydana gelen değişim iki önemli parametrede meydana gelen değişime dayanmaktadır. Bunlardan birincisi etkin kırılma indisindeki değişim, diğeri ise ızgara periyodundaki değişimdir.

FBI sıcaklık sensörü belirli bir dalgaboyunu yansıtmakta kalanını ise iletmektedir. Bununla birlikte bu yansıyan dalgaboyu sensörün sıcaklığına göre değişik göstermektedir. Böylece FBI sıcaklık sensörleri sıcaklık izleme uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. FBI sıcaklık sensörlerinin en önemli avantajlarından biri 700 °C gibi yüksek sıcaklıklara kadar algılama yapabiliyor olmaları, bir diğeri ise çok sayıda sensörün bir tek fiber öz üzerinden çoklanabiliyor olması ve bir tek sorgulayıcı ile gerçek zamanlı izlenebiliyor olmasıdır. Şekil 4.5'te fiziksel bir sıcaklık algılama deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.5. FBI sıcaklık sensörünün genel şematik deney düzeneği [1]

FBI’da oluşan sıcaklık değişimi ile Bragg dalgaboyundaki kaymayı hesaplamak için Eş. 4.4 kullanıldığında, FBI’nın sıcaklık duyarlılığı, sıcaklık değişimine bağlı olarak kısmi türevli olmakta ve bu eşitlik Eş. 4.8’de görülmektedir.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2n_{eff} \frac{\partial\lambda}{\partial T} + 2\lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \quad (4.8)$$

n_{eff} ve λ eşitlikleri Eş.4.4’ten elde edilerek ($n_{eff} = \lambda_B/2\lambda$ ve $\lambda = \lambda_B/2 n_{eff}$), Eş. 4.8’de yerine konulduğunda Eş. 4.9 elde edilmektedir.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial\lambda}{\partial T} \lambda_B + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \lambda_B \quad (4.9)$$

Eş. 4.9 eşitliğinin her iki tarafı tekrar düzenlendiğinde Eş. 4.10 yazılmaktadır.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial\lambda}{\partial T} \Delta T + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \Delta T \quad (4.10)$$

Burada $\Delta\lambda_B$ Bragg dalgaboyundaki değişmeyi ifade etmektedir. Eş. 4.10’un birinci kısmı silikanın ısıl genişleme katsayısı(α), ikinci kısmı ise termo-optik katsayıdır(η) . Bu katsayılar Eş. 4.10’da yerine yazıldığında sıcaklık değişimine bağlı olarak FBI’nın Bragg dalgaboyunda meydana gelen değişim Eş. 4.11’deki gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta)\Delta T \quad (4.11)$$

Eş. 4.7 ile Eş. 4.11 birleştirildiğinde Bragg dalgaboyunun sıcaklık ve gerilme hassasiyeti aşağıdaki Eş. 4.12’deki gibi formüle edilmektedir;

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\epsilon_z + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (4.12)$$

Bu durumda sadece $\Delta\lambda_B$ 'yi gözlemlemek Bragg dalgaboyundaki kaymanın sadece gerilmeye veya sadece sıcaklığa veya her ikisine bağlı olduğunu anlamak için yeterli olmamaktadır [3].

Sadece sıcaklığı ölçmek için, FBI gerilmeye karşı korunmalıdır. Gerilmedeki bu değişim kompanze edildiğinde FBI ile sıcaklık değişimi Denklem Eş. 4.11 ile hesaplanacaktır. Bu kompanzasyon için gerilme ölçümünde olduğu gibi aynı fiber üzerinde ikinci bir FBI kullanmak faydalı olacaktır. Bu durumda aynı fiber üzerindeki iki adet FBI'dan iki farklı Bragg yansıması oluşacaktır ve kompanzasyon için FBI'lardan biri aynı zamanda sıcaklık ve gerilmeye, diğeri ise sadece sıcaklığa bağımlı olacaktır [3]. Diğer bir yöntem ise uzun periyotlu ızgara (UPI) kullanmaktır. UPI'nın sıcaklığa duyarlılığı FBI'dan fazla, gerilmeye duyarlılığı ise düşüktür. Böylece FBI ve UPI'nın sıcaklık ve gerilmeye karşı dalgaboyu tepkisi bilindiğinde, sıcaklık ve gerilme değişimleri yüksek doğrulukla tespit edilebilecektir [1,3].

Germanyum katkılı silika fiber öz için ısıl genişleme ve termo-optik katsayıları , $\alpha = 0,55 \cdot 10^{-6}$, $\eta = 8,6 \cdot 10^{-6}$ 'dır [3]. 1555 nm dalgaboyuna sahip bir FBI için bu değerler Eş. 4.11'de yerine konulduğunda;

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = (\alpha + \eta)\lambda_B = (0,55 \cdot 10^{-6} + 8,6 \cdot 10^{-6}) \cdot 1555 \cdot 10^{-9} = 14,22 \text{ pm}/^\circ\text{C},$$

olarak hesaplanmaktadır. FBI ve ortam özelliklerine göre değişiklik göstermekle birlikte, 1555 nm Bragg dalgaboyundaki germanyum katkılı silika fiber öze sahip bir FBI'da, sabit gerilme ve oda sıcaklığında, dalgaboyu/sıcaklık değişimi yaklaşık olarak 14,22 pm/°C olarak gerçekleşmektedir.

4.3. Demiryollarında FBI Sensör Uygulamaları

Demiryolu sistemlerinde emniyetli ve hızlı trafik akışını sağlamak amacıyla, oluşabilecek tehlikeleri ve güvenlik sorunlarını, risk analizleri ile tespit ederek gerekli tedbirlerin alınması gerekmektedir [109].

Raylı sistemlerde trenlerin emniyetli bir şekilde seyretmelerini, düşük maliyetle yüksek kapasitede en verimli şekilde kullanılmasını ve hızlı trafik akışını sağlamak amacıyla çeşitli güvenlik sistemleri kullanılmaktadır [109].

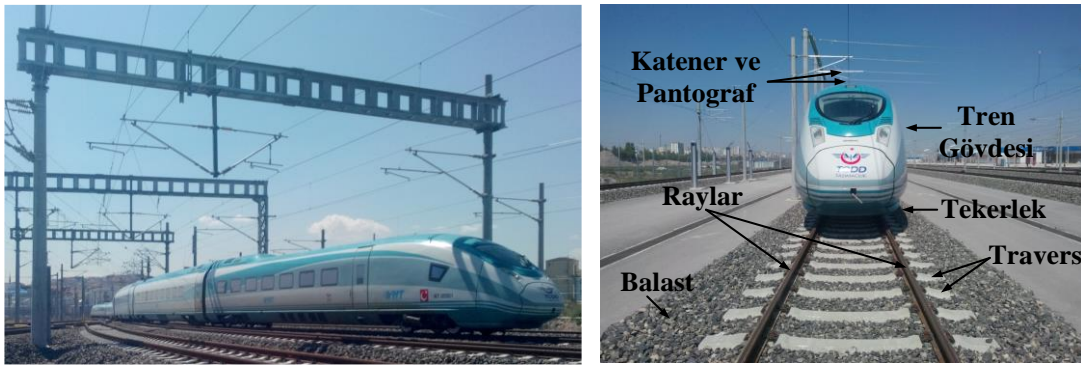
Fiber optik sensörler de demiryollarındaki güvenlik konularında çözümler üretecek uygun maliyetli sistemlerdir. FBI sensörler ile demiryollarında birçok önemli parametreyi bir fiber optik sensör ağı oluşturarak, gerçek zamanlı ve düşük maliyetle izlemek mümkün olmaktadır. Demiryollarındaki kritik parametrelerin gerçek zamanlı izlenebilmesi hat kapasitesini artırmaya yardımcı olacaktır. Bununla birlikte elektrik tüketiminin optimizasyonunu sağlayacak ve işletmenin güvenliğini ve kalitesini etkileyecek potansiyel tehlikeleri önceden algılamaya, olası risklerin önüne geçmeye yardımcı olacaktır [110].

Bu bölümde FBI sensörler ile gerçekleştirilebilecek, raylar ve trenler arasındaki etkileşimin algılanması, aks sayma ile tren dedeksiyonu ve hız tespiti, tünel ve viyadüklerin yapısal bütünlüğünün izlenmesi, katener-pantograf ilişkisinin izlenmesi uygulamaları incelenmiştir.

4.3.1. Raylar ile trenler arasındaki etkileşimin algılanması

Raylar ve trenler demiryolu işletmelerinin iki temel fiziksel bileşeni durumundadır. Trenler ile raylar arasındaki sürekli etkileşim, zamanla her ikisinde de bozulmalara neden olmaktadır. Bu bozulmaların tespiti için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [53, 107, 111, 123].

Ultrasonik muayene bu yöntemlerden biridir. Bir demiryolu aracı üzerine monte edilen bu sistemle hat boyunca raylardaki bozulmalar tespit edilebilmektedir. Ancak bu testi yapabilmek için hattın işletmeye kapatılması gerekmektedir.

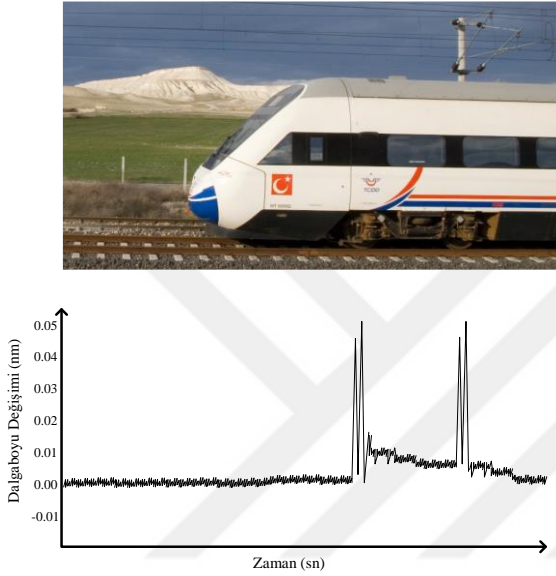


Şekil 4.6. Tren ile ray ana bileşenleri

Raydaki bozulmaları tespit etmek için strain gauge, manyetik bobinler, yarıiletken hol sensörler gibi yöntemler de kullanılabilir. Hattan toplanan veriler kontrol merkezine telefon hattı veya diğer iletişim araçları ile aktarılmaktadır. Bu yöntemde uzaktan izleme

mümkün olmakla birlikte bant genişliği ve kullanılabilir olan sensör sayısı sınırlı olmaktadır.

Trenler ile raylar arasındaki bu etkileşimi algılamak için kullanılabilir bir diğer yöntem ise FBI gerilme sensörü kullanmaktır. Trenler ile ilgili parametreleri ölçmek için algılayıcıları raylara monte etmek gerekmektedir. Raylar ile ilgili parametreleri ölçmek için ise algılayıcılar tren üzerinde bulunmalıdır [13, 87, 107, 111].



Şekil 4.7. Trenin geçişi ile raydaki FBI'da zamanla oluşan dalgaboyu değişim grafiği

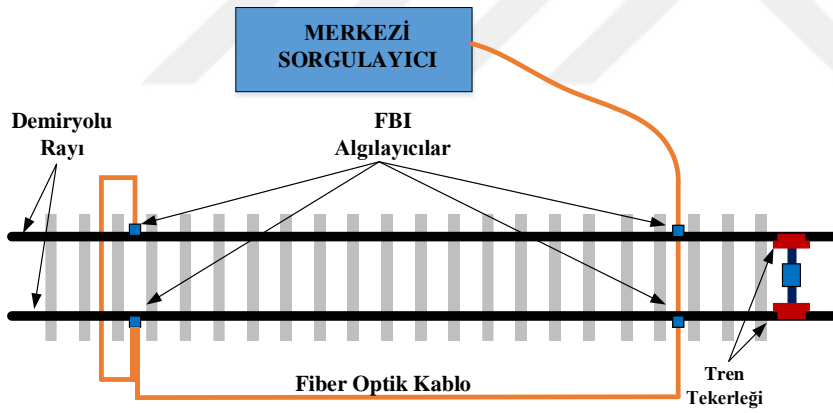
Trenle ilgili parametreleri ölçmek için FBI gerilme sensörü raya monte edildiğinde ve o noktada bir dikey kuvvet ölçüldüğünde, aynı zamanda bölgeden geçen bir trenin varlığı da algılanmış olacaktır. Trenin geçişi sırasında, raya monte edilen FBI'nın zamanla dalgaboyu değişimi arasındaki ilişkiye bir örnek Şekil 4.7'de görülmektedir. Her bir tekerlek FBI üzerinden geçtiğinde, rayda oluşan gerilmenin etkisiyle, FBI'dan saçılan dalgaboyu artı yönde değişecektir. Bu değişim ile de hem trenin varlığı, hem de trenin rayda oluşturduğu gerilme hesaplanabilecektir. Tekerlekler arasındaki mesafe bilindiğinde ise trenin hızını hesaplamak da mümkün olacaktır.

Demiryolu hattı boyunca bir sorgulama sistemi kurularak, tek bir fiber öz üzerinden birden fazla algılayıcıdan bilgi almak mümkün olmaktadır. Sensörler raya tespit edildiğinde, tren tekerleklerinin bu bölgeden geçmesi ile rayda gerilme oluşacak ve bu gerilme nedeniyle yansıyan merkez dalgaboyunda kayma meydana gelecektir. Beklenenin dışında bir kayma

meydana geldiğinde ise tekerleklerdeki muhtemel apleti (bozulma) durumları tespit edilebilecektir[12, 13, 107, 111].

4.3.2. Aks sayma ile tren dedeksiyonu ve hız tespiti

Yüksek hız ve kısa süreli sefer aralığının (headway) gerekli olduğu demiryollarında, güvenli ve hızlı bir işletme için hatada emniyetli (fail-safe) bir sinyalizasyon sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Demiryolu sinyalizasyonunda, trenin dedeksiyonu ve trenin kontrolü olmak üzere genel olarak iki ana fonksiyon bulunmaktadır. Sabit bloklu sinyalizasyon sistemlerinde tren dedeksiyonu için çoğunlukla kullanılan yöntem ray devresi olmaktadır. Ayrıca ray devresi kadar güvenli olmamakla birlikte, bazı uygulamalarda aks sayıcı devreler de tercih edilmektedir. Ancak bu elektrikli dedeksiyon sistemleri elektrifikasyon gerilimi ve akımı nedeniyle oluşan elektromanyetik girişimden etkilenebilmektedir. Elektromanyetik girişimden etkilenmemeleri ve elektrik enerjisine ihtiyaç duymamaları nedeniyle fiber optik sensörlerin tren dedeksiyonu için kullanılması birçok konuda avantaj sağlayacaktır [20].



Şekil 4.8. FBI sensör ile demiryolunda aks sayma şematik gösterimi

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi bir fiber optik öz üzerine birden fazla sensör seri olarak bağlanabilmekte ve bu sensörler tek bir sorgulayıcı devre vasıtasıyla sorgulanabilmektedir.

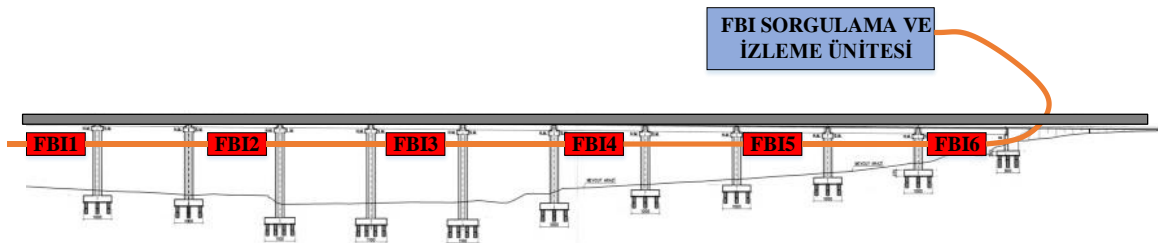
FBI ile aks sayma uygulamasında, sensörün bulunduğu noktadan tren geçtiğinde, oluşan gerilmenin ölçülmesiyle akslar sayılmakta ve trenin varlığı algılanmaktadır. Her aks, sensörün bulunduğu noktadan geçtiğinde yansıyan optik sinyalde kayma meydana gelecektir. Bu kaymanın tespiti ile FBI sensörün bulunduğu noktadan geçen trenlerin aksları

sayılarak trenlerin mevcudiyeti belirlenebilecektir. Trenlerin aksları arasındaki mesafe biliniyorsa yine bu yöntemle trenin hızını tespit etmek de mümkün olacaktır.

4.3.3. Tünel ve viyadük güvenliği

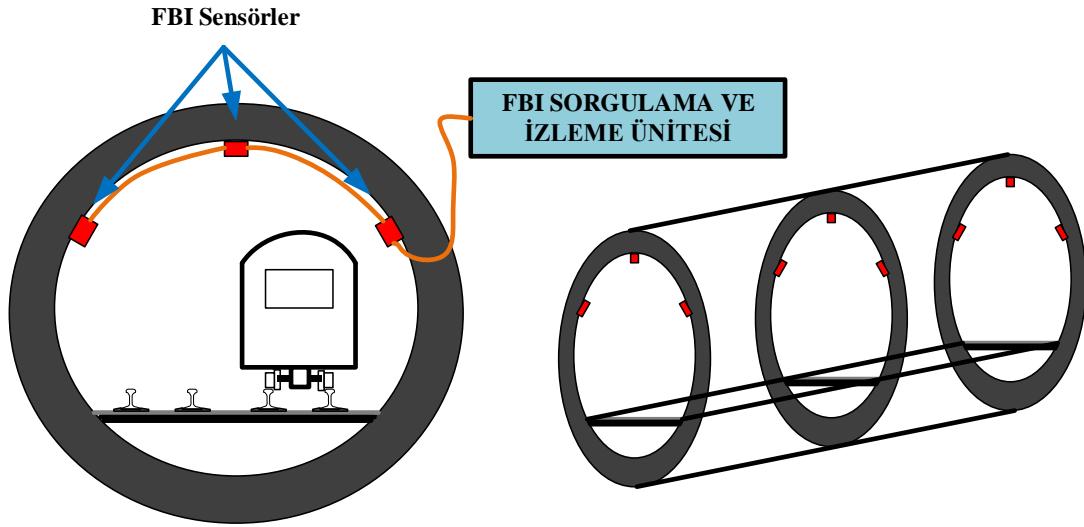
İnşaat mühendisliğinde sanatsal yapılara ait yapısal bütünlüğün izlenmesi giderek önemli bir konu haline gelmektedir. Yapıların mevcut durumunun tanımlanması, hasarların ve bozulmaların algılanması, güvenlik durumunun değerlendirilmesi ve yapısal performansının tahmin edilebilmesi için yapıların gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve veri mühendisliğinin yapılması gerekmektedir. Demiryollarında tünel ve viyadükler gibi sanatsal yapıların gerilme, sıcaklık, kayma ve yer değişimleri, kırılmalar ve oluşan hasarların tespiti için fiber optik sensörler kullanılabilir [37, 49, 54].

Viyadükler üzerinden tren geçerken dinamik gerilmeler ve salınımlar meydana gelmektedir. Kuvvetli rüzgarlar ve farklı hava şartlarında bu etkiler farklılık gösterebilmektedir. Özellikle yük trenlerinin çalıştığı hatlarda, viyadüklerdeki yapısal bütünlüğün izlenmesi, viyadük ve tren güvenliği için önem arz etmektedir. Viyadük boyunca bir tek fiber öz üzerine seri olarak tesis edilmiş FBI sensörler ile kilometrelerce uzunluktaki viyadüklerin yapısal bütünlüğü izlenebilecektir. Şekil 4.9'da viyadük güvenliği için gerçekleştirilebilecek bir FBI sensör uygulaması görülmektedir.



Şekil 4.9. FBI Sensör ile viyadüklerin yapısal bütünlüğünün izlenmesi

Demiryollarında tünel güvenliği de tren ve yolcu emniyeti açısından önemli bir konudur. Tüneldeki mekanik ve fiziksel deformasyonlar, yapım aşamasında ve sonrasında önemli güvenlik riski oluşturabilmektedir. Bu riskleri elimine etmek için tünellerin gerçek zamanlı izlenmesi gerekmektedir [84]. Şekil 4.10'da tünellerin yapısal bütünlüğünün izlenmesi için FBI sensör ile yapılabilecek örnek bir uygulama görülmektedir.



Şekil 4.10. Tünellerin yapısal bütünlüğünün izlenmesi için fiber optik sensör uygulaması

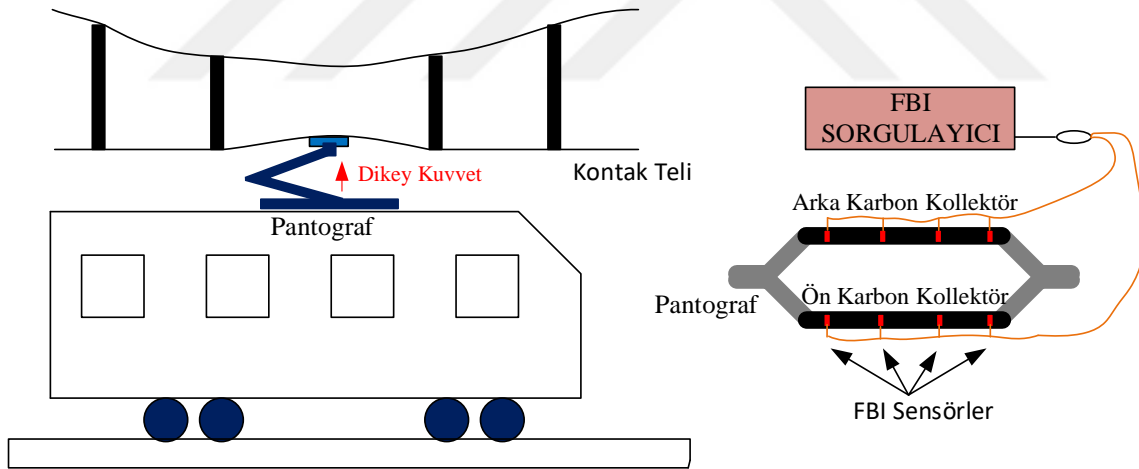
Tünel güvenliği için bir diğer önemli konu da özellikle işletme aşamasında tünellerde oluşabilecek yangınların izlenebilmesidir. Demiryolu tünellerinde özellikle de yüksek yolcu kapasitesine sahip metrolarda tünellerdeki sıcaklığın ölçülmesi muhtemel yangınları önlemek için büyük öneme sahiptir. Tünellerdeki sıcaklık algulamaları ile tünel havalandırma, yolcu tahliye ve yangın söndürme senaryoları oluşturulabilmektedir. Tünellerin yapısal bütünlüğünün izlenmesi için FBI gerilme sensörü, tünel sıcaklıklarının ölçümü için ise FBI sıcaklık sensörünün kullanımı uygun olacaktır.

4.3.4. Katener-pantograf ilişkisinin izlenmesi

Günümüzde demiryollarında enerji besleme sistemleri konvansiyonel katener, rijit katener ve üçüncü hat besleme sistemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Konvansiyonel katener sistemli hatlarda trenin enerjisi çoğunlukla pantograf aracılığıyla trene iletilmektedir. Bu nedenle bazı özel durumların dışında pantograf üzerindeki karbon kollektörler sürekli katener kontak teline temas etmek zorundadır. Düzenli bir akım ve düzenli bir sürüş sağlayabilmek için pantograf ile kontak teli arasında düzenli bir temas sağlanmalıdır. Yeterli temas kuvveti uygulanarak temas sağlanamadığında pantograf ile kontak teli arasında ark oluşmaktadır. Bu istenmeyen elektriksel arklar, elektriksel ve elektromanyetik girişimlere sebep olmakta ve hem kontak teli hem de kollektörde bozulmalara yol açmaktadır. Bu durum ise yüksek bakım maliyetlerine neden olmaktadır.

Demiryollarında pantograf ile katener kontak teli arasındaki bu temasın algılanması bakım personeline izleme imkanı vermekle birlikte, olası işletme aksaklıklarını önleyecek ve bakım maliyetlerini düşürecektir. Pantograf ile kontak teli arasındaki etkileşim genel olarak iki ana değişkenden meydana gelmektedir. Birincisi karbon kollektör ile kontak teli arasındaki temas kuvveti, diğeri ise pantograftaki hızlanmadır. Bu iki değişken etkileşimdeki kaliteyi doğrudan etkilemektedir.

Bu temas miktarını ölçmek için elektriksel sensörler kullanıldığında, ortamda bulunan yüksek elektromanyetik girişim nedeniyle doğru sonuçlar alınamayabilecektir. Fiber optik sensörler ise özellikle elektromanyetik girişimden etkilenmediklerinden bu uygulamada kullanılabilir en uygun sensörlerdir. Pantograf ile kontak teli arasındaki bu etkileşimi ölçmek için en uygun fiber optik sensörler iyi bir gerilme çözünürlüğü sağladıkları ve optik algılamadaki kaliteleri nedeniyle FBI sensörlerdir [18, 108]. Pantograf ile katener kontak teli arasındaki temas miktarını ve her ikisinde oluşabilecek kusurları ölçebilecek FBI gerilme sensörüne dayalı bir düzenek Şekil 4.11’de görülmektedir.



Şekil 4.11. Katener-pantograf ilişkisinin FBI algılayıcılar ile izlenmesi

Özellikle sıcak havalarda doğru stres ve gerilme verisi alabilmek için, sıcaklık değişimini ikinci bir FBI ile kompanse etmek gerekmektedir. Ayrıca bu FBI sensörü ile pantograf ve kontak telinin sıcaklığı da ölçülebilecektir [18, 108].

5. FBI SENSÖR SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE DENEYSEL OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

FBI sensörlerin yüksek performansı onları farklı ortamlarda ve uygulamalarda kullanışlı kılmaktadır. Pnömatik sistemlerde, uçakların yapısal durumunun izlenmesi, hızlı trenlerin izlenmesi gibi FBI ile dinamik ölçümler için birçok uygulama geliştirmek mümkündür. Bu tür uygulamalarda FBI'lar tekli veya dizi halinde, yüzeye monte edilebilmekte veya materyalin içerisine gömülebilmektedir.

FBI sensör dizilerinin sorgulama sistemleri ortak bir ışık kaynağına bağlı olmaları temeline dayanmaktadır. Bu kaynak ALK veya GBLK olabilmektedir. GBLK ile hızlı ölçüm alınabilmekle birlikte, sensörden zayıf bir sinyal elde edilmektedir. ALK ile sensörden güçlü bir sinyal elde edilmekte, ancak bu yöntemde de bant aralığı sınırlı sayıda sensörü bağlamaya imkan tanımaktadır [88].

Bu tez çalışmasında öncelikle OptSim 12.0 yazılımı kullanılarak FBI sensör sisteminin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimde tekli sıcaklık sensörü ve 5 FBI'lı sensör dizisi oluşturulmuş ve FBI'ların sıcaklığa bağlı katsayıları değiştirilerek, FBI'ların dalgaboyu ve frekans spektrumları gözlemlenmiştir.

Daha sonra GBLK ve ALK ışık kaynakları kullanılarak, farklı dış kaplama özelliklerine sahip FBI'lar ile tekli ve dizi halinde sıcaklık sensörleri deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

Gerilme ölçümü için ise öncelikle örnek bir düzenek kurulmuş ve FBI'nın uygulanan kuvvete karşılık gerilme tepkileri incelenmiştir. Gerçek zamanlı gerilme ölçümü için ise bir demiryolu rayı kullanılmış ve rayı uygulanan kuvvete karşılık rayda meydana gelen gerilme gözlemlenmiştir.

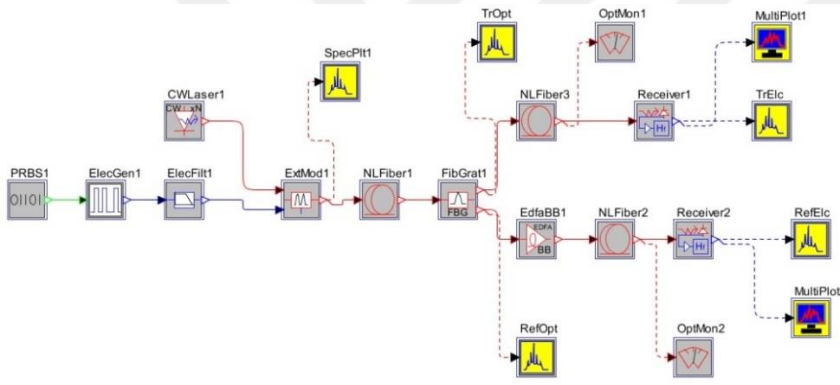
Bu bölümde FBI sensör sistemi benzetimi ile sıcaklık ve gerilme ölçümleri için yapılan deneysel çalışmalar anlatılmaktadır.

5.1. FBI Sensör Sistemi Benzetimi

FBI sensör sistemi benzetimi tekli ve dizi halinde OptSim 12.0 programı kullanılarak yapılmıştır. Bu bölümün birinci kısmında tekli FBI sensör sistemi benzetimi, ikinci kısmında ise 5 FBI'dan oluşan sensör dizisinin benzetimi incelenmiştir.

5.1.1. Tekli FBI sensör sistemi benzetimi

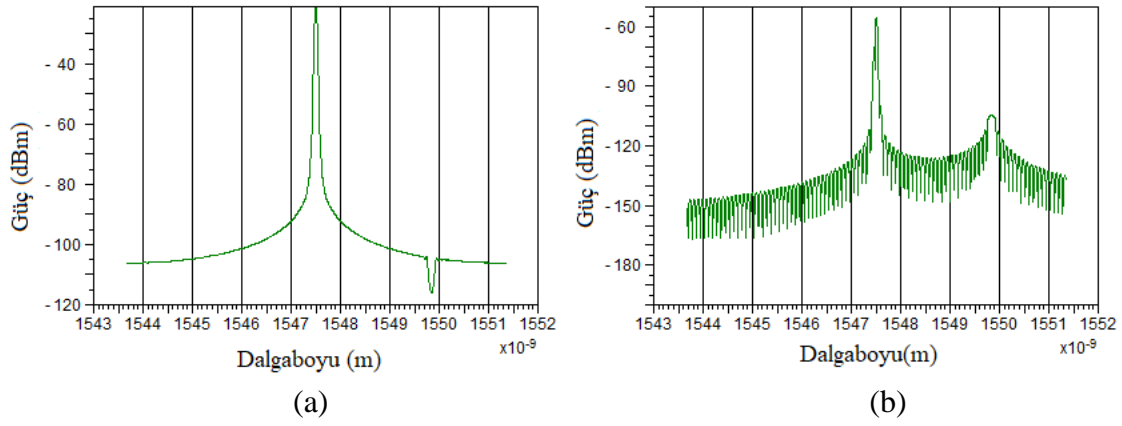
Bu çalışmada 0°C 'deki dalgaboyu 1549.8 nm olan FBI kullanılmıştır. FBI için modülasyon derinliği $100\ \mu\text{m}$ ve uzunluk 10 mm alınmıştır. İletim ortamı olarak da 100 m uzunluğunda, zayıflaması 0,25 db/km olan tek modlu fiber kullanılmıştır. OptSim 12.0 programı kullanılarak oluşturulan benzetim devresi Şekil 5.1'de görülmektedir.



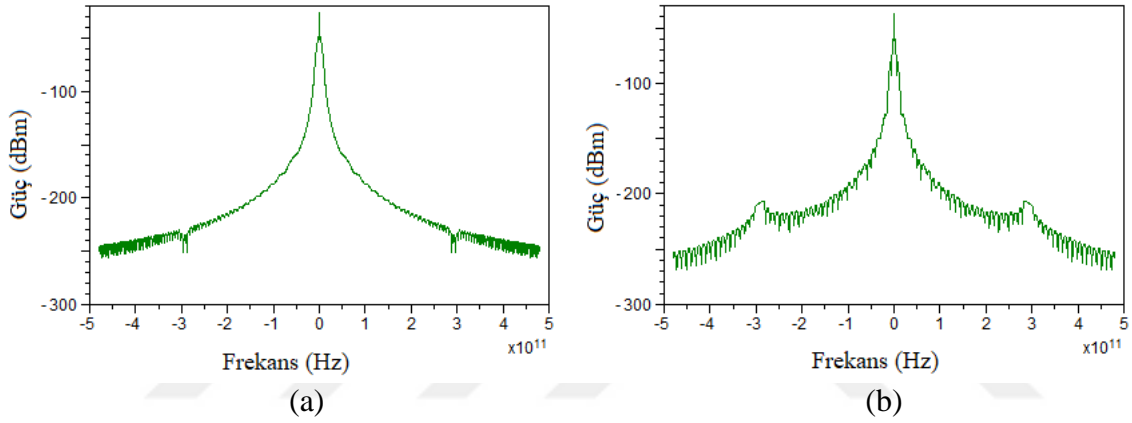
Şekil 5.1. Tekli FBI sensör sistemi için OptSim ile oluşturulan benzetim devresi

Bu benzetimde iletilen ve yansıyan sinyalleri algılamak için iki adet alıcı fotodedektör kullanılmıştır. Yansıyan sinyali fotodedektöre girmeden önce güçlendirmek için ayrıca bir de EKFY kullanılmıştır.

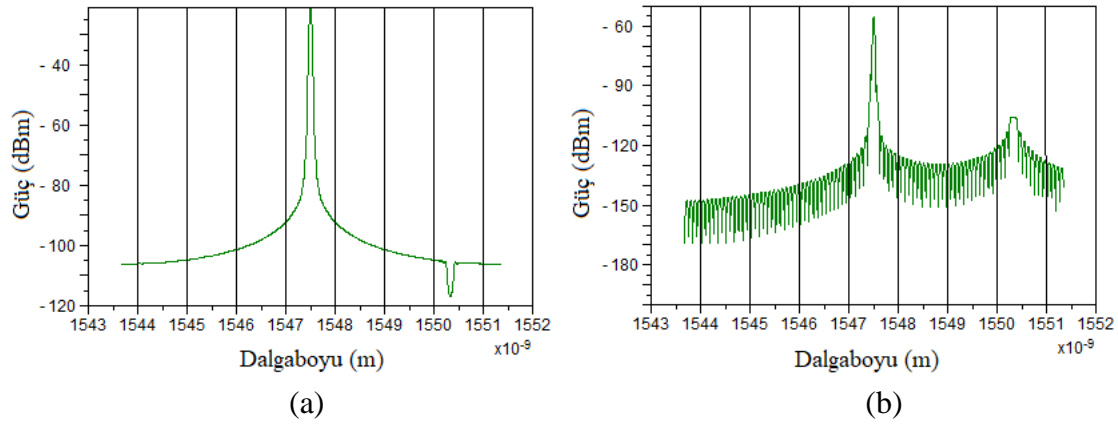
Sıcaklık $0-60^{\circ}\text{C}$ aralığında 10° ar derecelik periyotlarla değiştirilmiş ve sonuçlar gözlemlenmiştir. 0°C 'de iletilen ve yansıyan optik sinyallerin dalgaboyu spektrumları Şekil 5.2'de, 0°C 'de iletilen ve yansıyan sinyallerin dalgaboyu spektrumları Şekil 5.3'te, 60°C 'de iletilen ve yansıyan optik sinyallerin dalgaboyu spektrumları Şekil 5.4'te, 60°C 'de iletilen ve yansıyan sinyallerin frekans spektrumları Şekil 5.5'te görülmektedir.



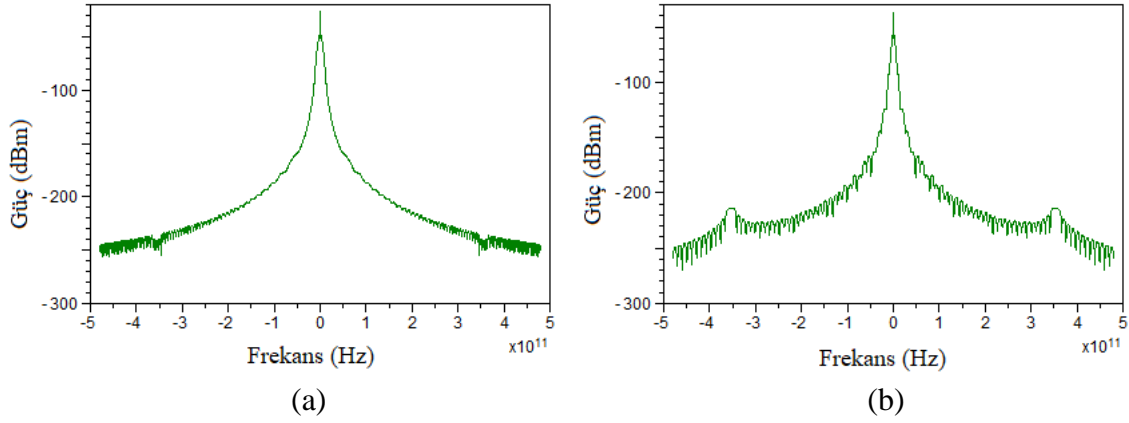
Şekil 5.2. 0 °C’de iletilen (a) ve yansıyan (b) optik sinyallerin dalgaboyu spektrumu [112]



Şekil 5.3. 0°C’de iletilen (a) ve yansıyan (b) sinyallerin frekans spektrumu [112]



Şekil 5.4. 60°C’de iletilen (a) ve yansıyan (b) optik sinyallerin dalgaboyu spektrumu [112]

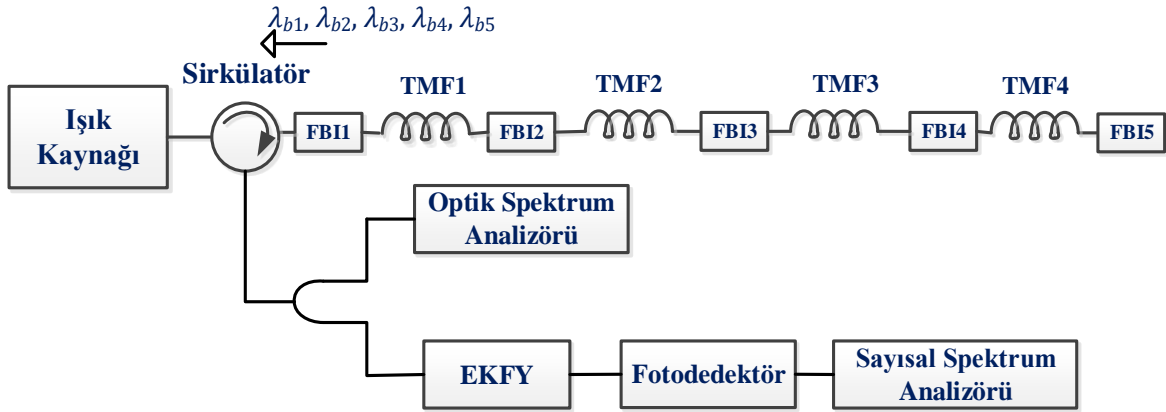


Şekil 5.5. 60°C’de iletilen (a) ve yansıyan (b) sinyallerin frekans spektrumu [112]

Şekil 5.2’de 0°C’de yansıyan sinyaldeki dalgaboyunun 1549,8 nm, Şekil 5.4’te 60°C’de yansıyan sinyaldeki dalgaboyunun 1550,4 nm olduğu görülmektedir. 0-60°C aralığında dalgaboylarındaki kaymalar gözlemlendiğinde 1°C’lik sıcaklık değişiminde dalgaboyunda yaklaşık 10 pm’lik bir kayma meydana geldiği görülmektedir [112].

5.1.2. FBI sensör dizisinin benzetimi

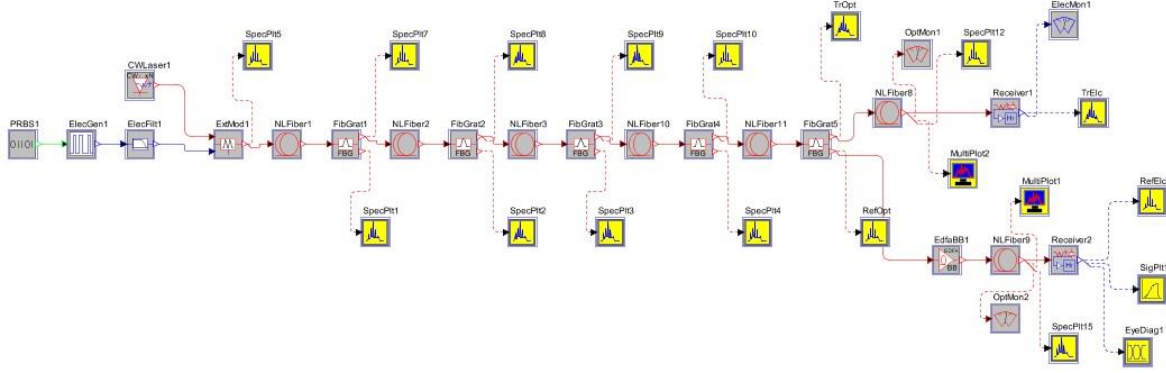
Tekli FBI sensörünün benzetimi yapıldıktan sonra, 5 FBI’den oluşan sensör dizisinin benzetimi yapılmıştır. Bu benzetim tasarım şeması Şekil 5.6’da görülmektedir.



Şekil 5.6. FBI sensör dizisi için tasarım şeması [113]

Bu tasarım şemasına göre ise OptSim 12.0 yazılımı kullanılarak Şekil 5.7’de gösterilen benzetim devresi kurulmuştur. Bu benzetimde PRBS biçim üretici (pattern generator), farklı tiplerde ikili dizi oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. OptSim programında PRBS biçim

üreticinin farklı modları bulunmakla birlikte, bu çalışmada rastgele ikili dizi oluşturan PRBS modu kullanılmıştır.



Şekil 5.7. FBI sensör dizisi için OptSim ile oluşturulan benzetim devresi

Elektriksel sinyal jeneratörünün ikili girişleri elektriksel sinyale çevirmek için kullanılmıştır. Çıkış sinyali gerilim ya da akım olabilmektedir. Bu çalışmada gerilim seçilmiştir.

Elektriksel filtre vericideki gürültüyü azaltmak amacıyla kullanılmıştır. Bu çalışmada elektriksel filtre olarak LP Bessel seçilmiştir.

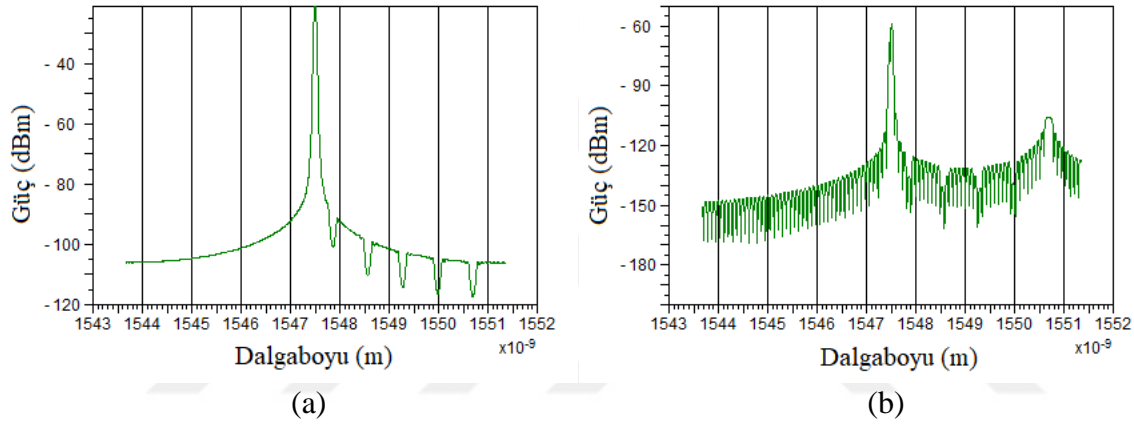
Bir ya da daha fazla sürekli dalga üretmek amacıyla Sürekli Dalgalı (SD) Lazer kullanılmıştır. İkili sinyali SD kaynak üzerine kodlamak için bir de harici modülatör kullanılmıştır. Bu çalışmada modülatör olarak Mach-Zehnder modülatör kullanılmıştır. Benzetimde SD kaynak; dalgaboyu, güç, faz, bağıl yoğunluk gürültüsü ile karakterize edilmiştir ve bunları OptSim 12.0 programında dalgaboyu, maksimum güç, sinyal genişliği, faz parametrelerinden ayarlamak mümkündür. Bu çalışmada kaynağın dalgaboyu 1547.5 nm, maksimum gücü ise 10 mW seçilmiştir.

Örnek olarak, 1550 nm Bragg dalgaboyunda benzetim gerçekleştirmek için kırılma indisi FBI karakteristiklerinde $n_e = 1.42020$ ve ızgara boyu $\Lambda = 0.5457 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir. Bu değerler $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ formülasyonunda yerine konulduğunda $\lambda_B = 2(1.42020)(0.5457 \mu\text{m}) = 1550 \text{ nm}$ olduğu görülmektedir.

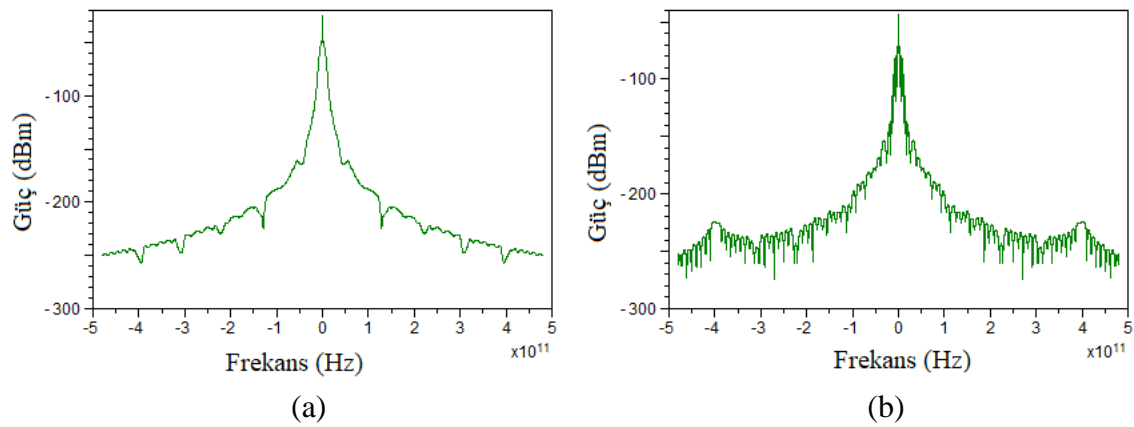
Bu benzetimde iletilen ve yansıyan sinyalleri algılamak için iki adet alıcı fotodedektör kullanılmıştır. Yansıyan sinyali fotodedektöre girmeden önce güçlendirmek amacıyla ayrıca bir de erbiyum katkılı fiber yükselteç (EKFY) kullanılmıştır.

Bu FBI'lar için modülasyon derinliği 100 μm ve uzunluk 10 mm alınmıştır. Bu benzetimde 0 $^{\circ}\text{C}$ 'deki dalgalıboyları sırasıyla 1547.9, 1548.5, 1549.3, 1550, 1550.7 nm olan 5 adet FBI kullanılarak sensör dizisi oluşturulmuş ve aralarında iletim ortamı olarak 100 m uzunluğunda, zayıflaması 0,25 db/km olan fiber optik kablo kullanılmıştır.

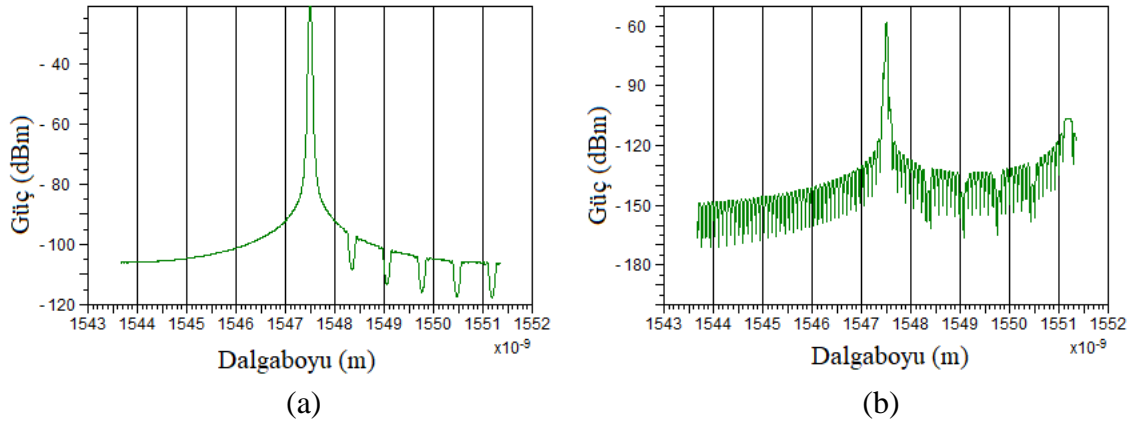
OptSim ile her bir FBI'nın sıcaklıkları 0 $^{\circ}\text{C}$ ile 60 $^{\circ}\text{C}$ aralığında 10 $^{\circ}\text{C}$ 'lik periyotlarla değiştirilerek yansıyan ve iletilen sinyallerin dalgalıboyu spektrumları ile frekans spektrumları incelenmiştir. Bu benzetim ile elde edilen sonuçlar Şekil 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 ve 5.13'te detaylı olarak görülmektedir.



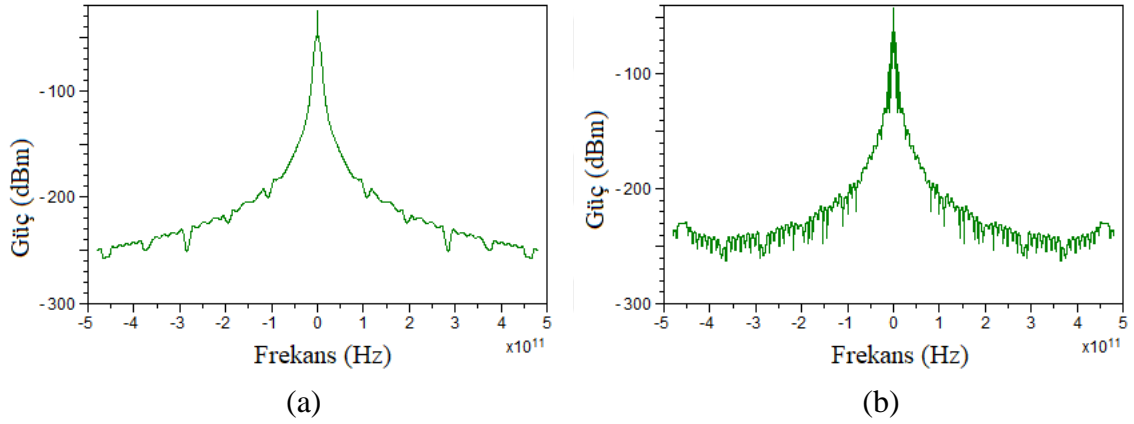
Şekil 5.8. 0 $^{\circ}\text{C}$ 'de 5 FBI için iletilen (a) ve yansıyan (b) optik sinyallerin dalgalıboyu spektrumu [113]



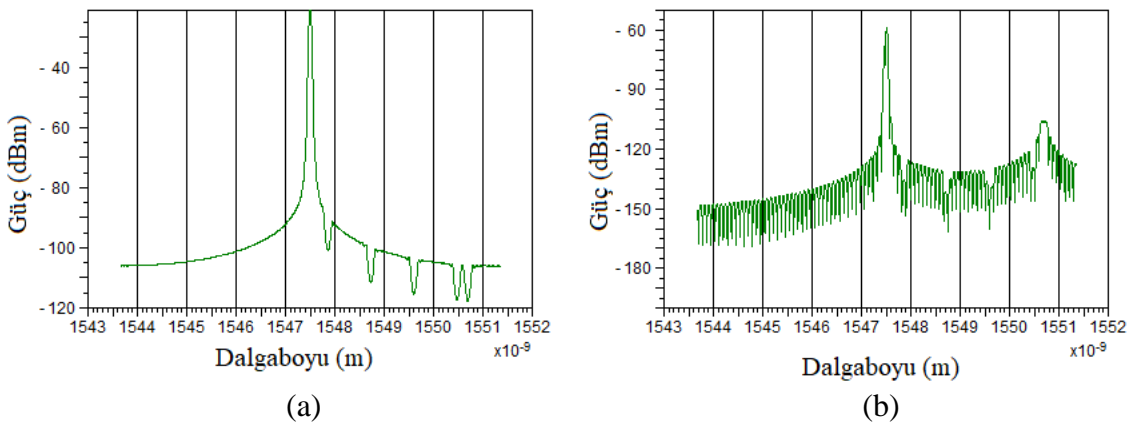
Şekil 5.9. 0 $^{\circ}\text{C}$ 'de 5 FBI için iletilen (a) ve yansıyan (b) sinyallerin frekans spektrumu [113]



Şekil 5.10. 60°C'de 5 FBI için iletilen (a) ve yansıyan (b) optik sinyallerin dalgaboyu spektrumu [113]

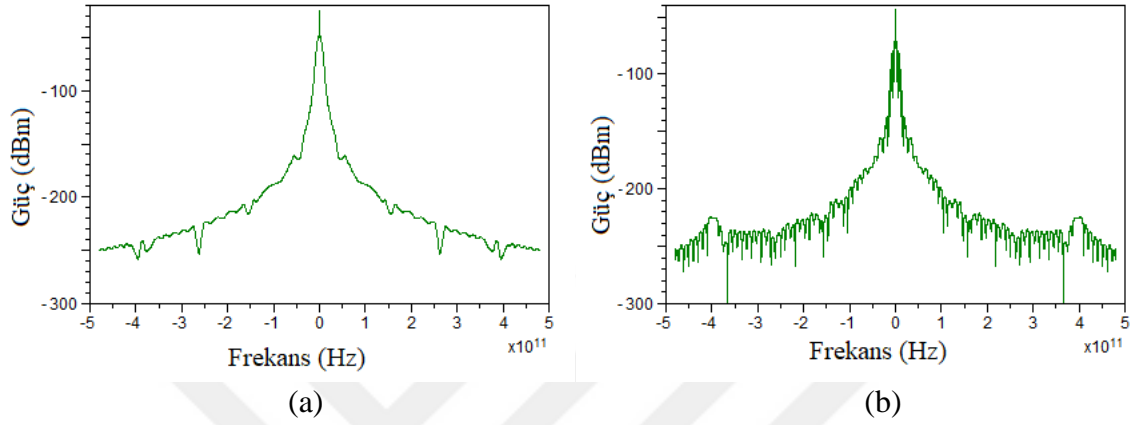


Şekil 5.11. 60°C'de 5 FBI için iletilen (a) ve yansıyan (b) sinyallerin frekans spektrumu [113]



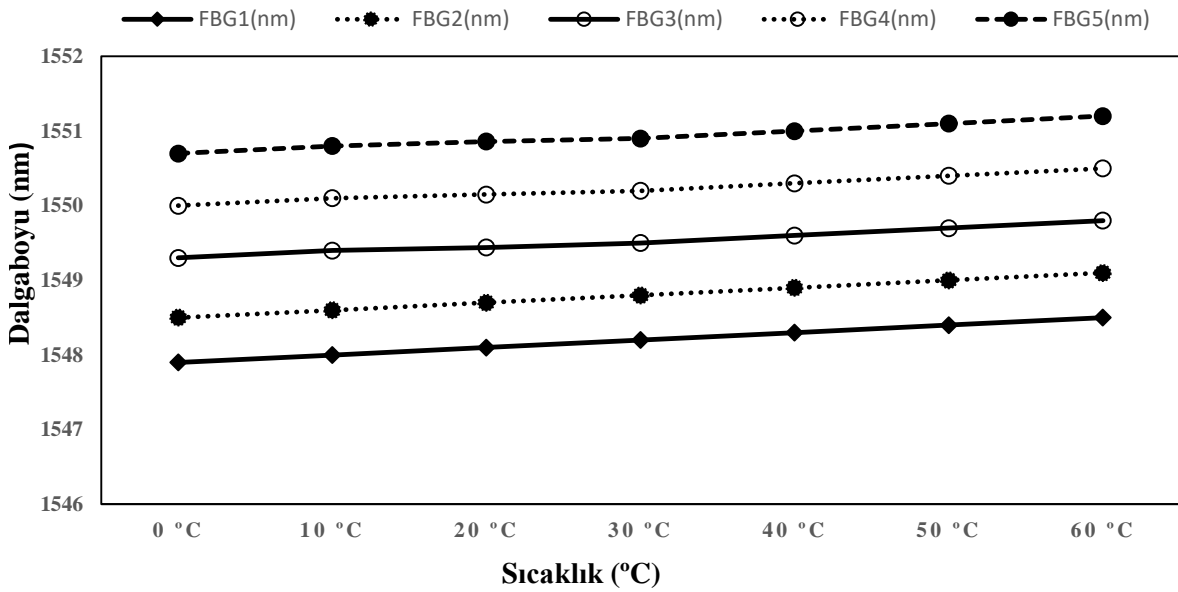
Şekil 5.12. 5 FBI için sırasıyla 0-20-40-60-0 °C'de iletilen (a) ve yansıyan (b) optik sinyallerin dalgaboyu spektrumu [113]

Şekil 5.12’de FBI’ların sıcaklıkları sırasıyla 0, 20, 40, 60 ve 0°C’ye ayarlanarak FBI’lardaki kaymalara ait optik spektrumlar gözlemlenmiştir. FBI4 60°C ve FBI5 0°C’ye ayarlanarak Bragg dalga boylarındaki yansımanın birbirine karışmadığı ve her bir FBI için yeterli spektral aralığın bırakıldığı görülmüştür.



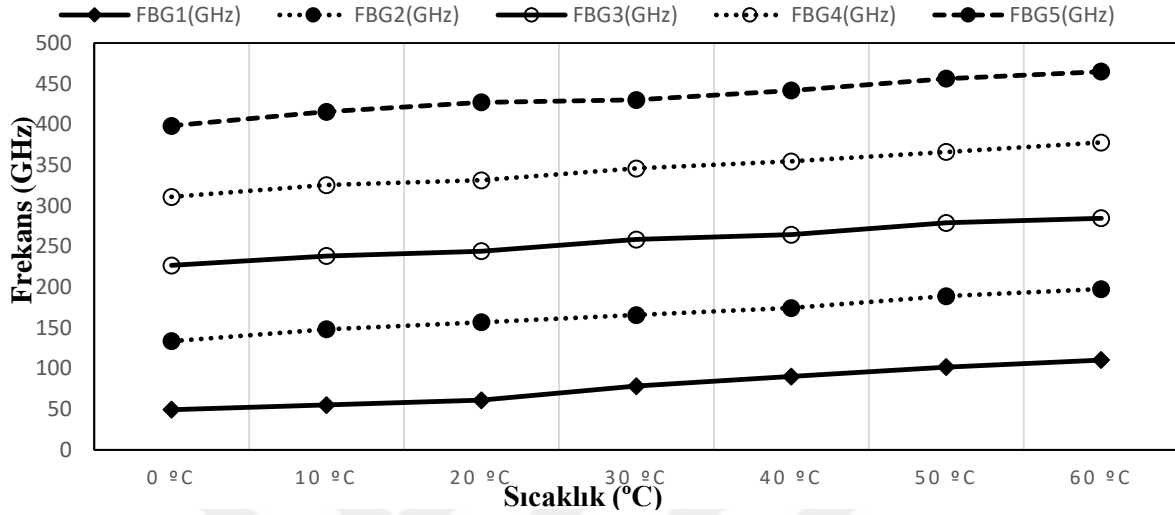
Şekil 5.13. 5 FBI için sırasıyla 0-20-40-60-0 °C’de iletilen (a) ve yansıyan (b) sinyallerin frekans spektrumu [113]

FBI’ların sıcaklıkları sırasıyla 0, 20, 40, 60 ve 0 °C’ye ayarlandığında meydana gelen frekans spektrumları ise Şekil 5.13’te görülmektedir.



Şekil 5.14. FBI sensörlerde sıcaklık değişimi ile dalgaboyu spektrumunda gözlenen değişim [113]

0-60 °C aralığında 10°C'lik periyotlarla alınan sıcaklık değerlerine karşılık gelen optik sinyallerin dalgaboyu spektrumundaki değişimler Şekil 5.14'te her bir FBI için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 5.15. FBI sensörlerde sıcaklık değişimi ile frekans spektrumunda gözlenen değişim [113]

0-60 °C aralığında 10°C'lik periyotlarla alınan sıcaklık değerlerinde meydana gelen frekans spektrum değişimleri ise Şekil 5.15'te her bir FBI için ayrı ayrı görülmektedir.

Bu çalışmada ZDR çoğullama tekniğine dayalı 5 FBI ile 0-60 °C aralığındaki sıcaklık değerleri için benzetim gerçekleştirilmiştir. ZDR tekniğinde sinyal üreticinin frekansı değiştirilerek darbeler arasındaki mesafe değiştirilebilmekte ve sensörün algılama çözünürlüğü belirlenebilmektedir.

Bu benzetimde sıcaklık artışı ile dalgaboyu ve frekans spektrumundaki kaymalar her bir FBI için ayrı ayrı incelenmiştir. Her 1°C'lik sıcaklık değişimi için dalgaboyundaki kaymanın yaklaşık 10 pm olduğu gözlemlenmiştir [112, 113].

Bu benzetimde çoklu sensör sistemi, zaman bölmeli çoğullamaya benzer bir yapıda modellenmiştir, ancak FBI sensörleri çoğullamak için, yaygın olarak kullanılan dalgaboyu bölmeli çoğullama kullanılmıştır. Bu metotta, her bir sensör ayrı bir dalgaboyu aralığına atanmaktadır. Farklı Bragg dalgaboylarına sahip sensörleri çoğullamak için, algılama sistemi her bir dalgaboyu aralığını birbirinden ayırt edebilmektedir.

Sensör dizisinde 0-60 °C aralığında her bir FBI için yaklaşık 0.6 nm'lik spektral aralığa ihtiyaç olduğundan bu çalışmada spektral aralık yaklaşık 0.7 nm seçilerek, her bir FBI'ya ait kaymanın diğerine karışması önlenmiştir.

5.2. Geniş Bantlı Lazer Kaynağı (GBLK) ile FBI Sıcaklık Sensör Dizisi Tasarımı

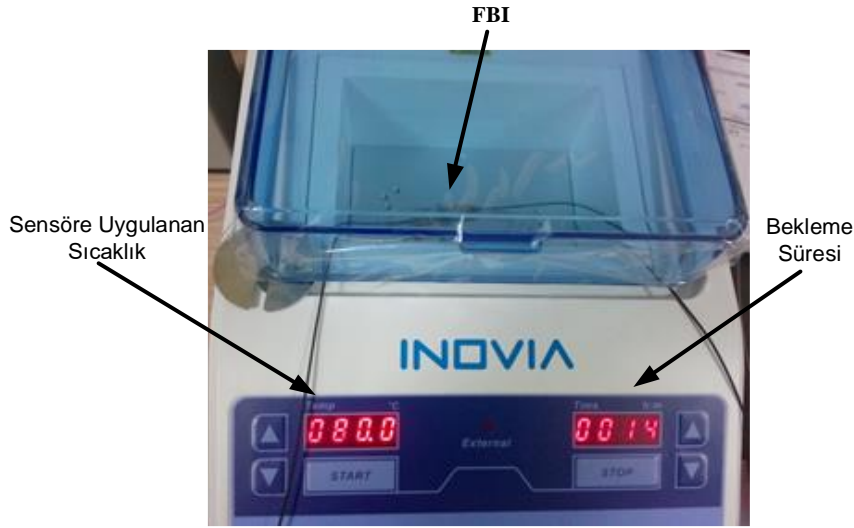
GBLK kullanılarak tasarlanan FBI sensör dizilerinde hızlı ve eş zamanlı ölçüm yapmak mümkün olmaktadır. Ancak sinyal gürültü oranında (SGO) sınırlı bir çözünürlük sağlanmaktadır. Bununla birlikte, genişbantlı lazer kaynağı ile daha geniş bir bantta çalışmak mümkün olduğundan bir kanala daha fazla sensör bağlanabilmektedir. Ayrıca GBLK ile sensörün dalgaboyundaki değişimler ALK'ya göre daha hızlı ölçülebilmektedir [99].

Bu çalışmada GBLK kullanılarak 4 adet fiber FBI ile sıcaklık ölçümü için sensör dizisi tasarlanmıştır. Termal ortam içine konulan FBI'ların sıcaklığı 30 °C -100 °C aralığında artırılarak, sıcaklık artışlarında optik sinyalde gözlemlenen değişimler incelenmiştir.

GBLK ile 1530-1560 nm dalgaboyu aralığında ışık dört FBI'dan oluşan sensör dizisine uygulanmış, termal ortam içindeki FBI'lardan yansıyan optik sinyaller sirkülatör yardımıyla Optik Spektrum Analizörüne aktararak gözlemlenmiştir. Bu çalışmada Thorlabs S5FC1550S GBLK kullanılmıştır. Optik spektrum analizi için ise Anritsu MS9710B kullanılmıştır.

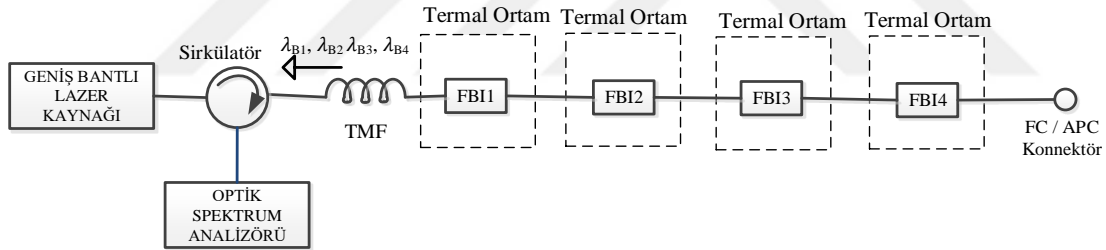
Deneyde JDSU firmasına ait 1530-1565 nm dalgaboyu aralığına sahip C band, 3 portlu sirkülatör kullanılmıştır. Bu sirkülatörün giriş kaybı tipik olarak 0.7 dB, maksimum ise 0.9 dB'dir. Dönüş kaybı ise 50 dB civarında gerçekleşmektedir. Fiber uzunluğu 1.5 m, fiber tipi ise 9/125/250 SMF28 tek modlu fiberdir.

Termal ortam olarak, 5°C ile 105°C aralığında çalışan Inovia firmasına ait NDI-1 blok ısıtıcı kullanılmıştır. Her bir sıcaklık değişiminde kararlı ölçüm alabilmek için 15 dakika süreyle beklenildikten sonra yansıyan optik sinyaller kaydedilmiştir. Bu ısıtıcı Şekil 5.16'da görülmektedir.



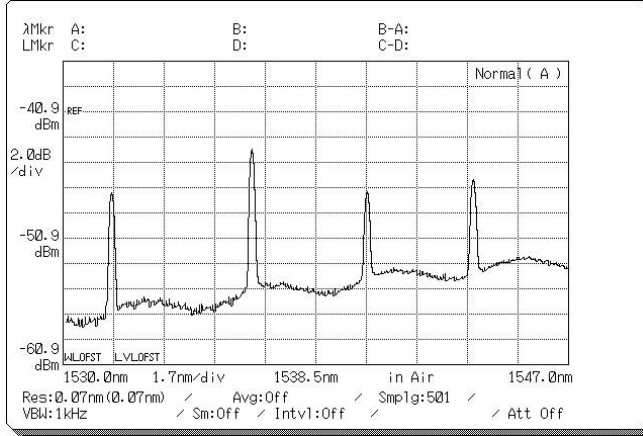
Şekil 5.16. FBI ile sıcaklık ölçümünde kullanılan termal ortam

Bu çalışmada seramik kaplamalı 1532.032 nm ve metal kaplamalı 1536.674, 1540.446 ve 1544.150 nm dalgaboylarındaki FBI'lar kullanılarak sensör dizisi oluşturulmuştur. Bu FBI sensör dizisine ait deneysel kurulum Şekil 5.17'de görülmektedir.

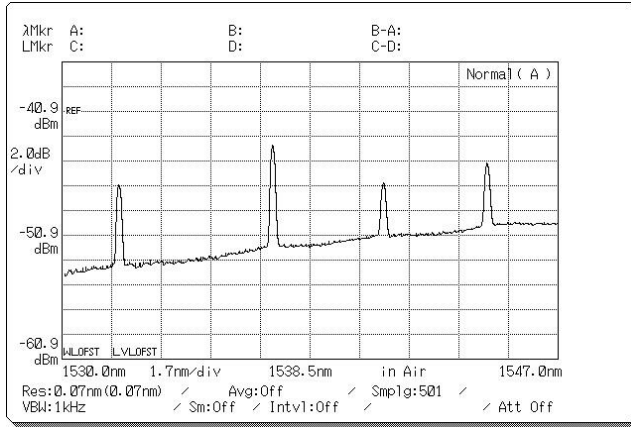


Şekil 5.17. GBLK ile oluşturulan FBI sensör dizisi [99]

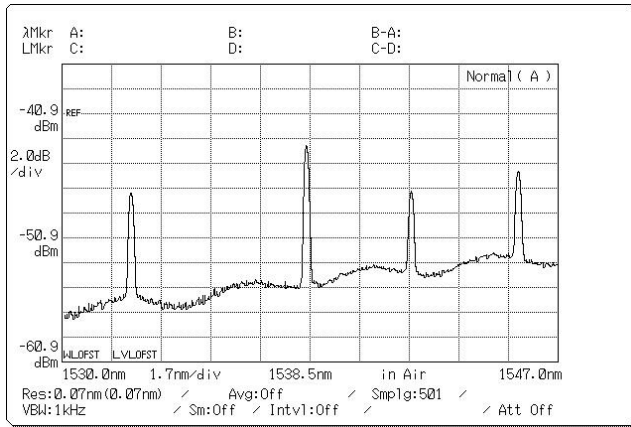
Tüm FBI'lar aynı anda termal ortam içerisine konulmuş ve 30 °C – 100 °C aralığında sıcaklık 5 °C'lik periyotlarla artırılarak, her 5 °C'lik sıcaklık artışında optik sinyaldeki kaymalar ve sıcaklık değişimleri analiz edilmiştir [99].



Şekil 5.18. 30°C de FBI'lardan yansıyan optik sinyal spektrumları [99]

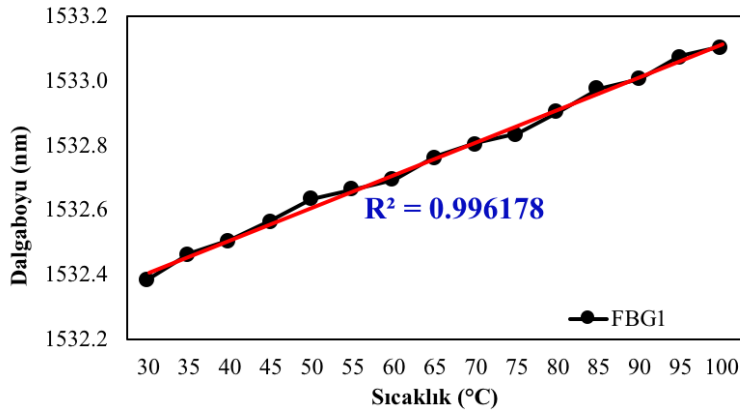


Şekil 5.19. 60°C de FBI'lardan yansıyan optik sinyal spektrumları [99]



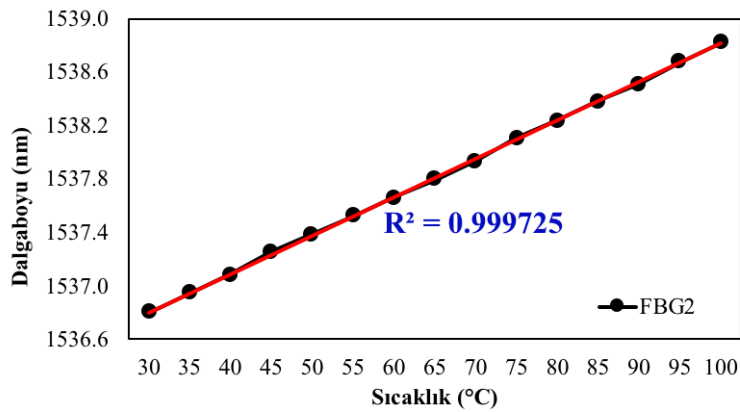
Şekil 5.20. 90°C'de FBI'lardan yansıyan optik sinyal spektrumları [99]

Şekil 5.18'de 30°C, Şekil 5.19'da 60°C ve Şekil 5.20'de 90°C'de soldan sağa sırasıyla FBI1, FBI2, FBI3 ve FBI4'ten yansıyan sinyallerin dalgalıboyları görülmektedir.



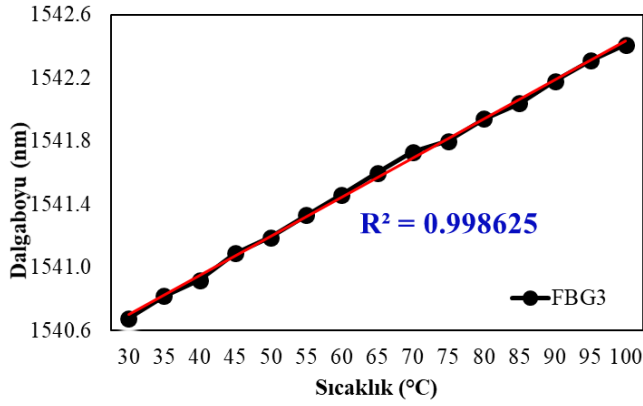
Şekil 5.21. FBI1 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında elde edilen optik sinyal değişimleri [99]

FBI1 ile 30°C -100°C aralığında, her 5°C'lik periyotlarla alınan sıcaklık değişimlerine karşılık gelen dalgaboyundaki kaymalar arasındaki ilişki Şekil 5.21'de görülmektedir. Bu deneyde FBI1 ile 1°C'lik sıcaklık değişiminde optik sinyalin dalgaboyundaki kayma yaklaşık olarak, $\Delta\lambda_{B1}/\Delta T = 0.72\text{nm}/70 \cong 10 \text{ pm}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.22. FBI2 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında elde edilen optik sinyal değişimleri [99]

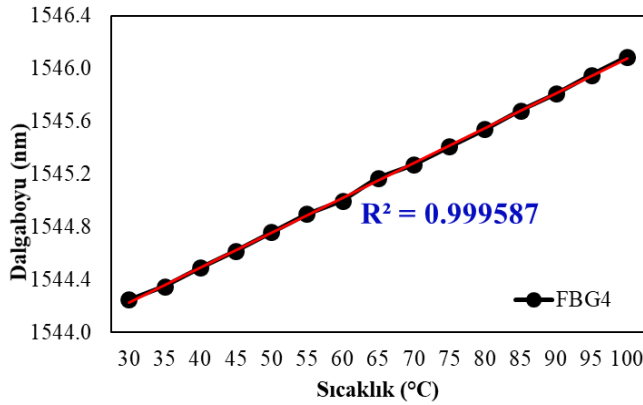
FBI2 ile 30°C -100°C aralığında, her 5°C'lik periyotlarla alınan sıcaklık değişimlerine karşılık gelen dalgaboyundaki kaymalar arasındaki ilişki Şekil 5.22'de görülmektedir. FBI2 ile 1°C'lik sıcaklık değişiminde optik sinyalin dalgaboyundaki kayma yaklaşık olarak, $\Delta\lambda_{B2}/\Delta T = 2.01\text{nm}/70 \cong 28.7 \text{ pm}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.23. FBI3 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında elde edilen optik sinyal değişimleri [99]

FBI3 ile 30°C -100°C aralığında, her 5°C'lik periyotlarla alınan sıcaklık değişimlerine karşılık gelen dalgaboyundaki kaymalar arasındaki ilişki Şekil 5.23'te görülmektedir. FBI3 ile 1°C'lik sıcaklık değişiminde optik sinyalin dalgaboyundaki kayma yaklaşık olarak, $\Delta\lambda_{B3}/\Delta T = 1.73 \text{ nm}/70 \cong 24.7 \text{ pm}$ olarak ölçülmüştür.

FBI4 ile 30 °C – 100 °C aralığında, her 5 °C'lik periyotlarla alınan sıcaklık değişimlerine karşılık gelen dalgaboyundaki kaymalar arasındaki ilişki Şekil 5.24'te görülmektedir. FBI4 ile 1°C'lik sıcaklık değişiminde optik sinyalin dalgaboyundaki kaymanın yaklaşık olarak, $\Delta\lambda_{B4} / \Delta T = 2.04 \text{ nm}/70 \cong 29.1 \text{ pm}$ olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.24. FBI4 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında elde edilen optik sinyal değişimleri [99]

FBI'lar metal ve seramik olmak üzere farklı dış kaplama özelliklerine sahip olduklarından, sıcaklık değişimlerinde saçılan optik sinyalin dalgaboyundaki kaymalar farklılık göstermektedir. Metal kaplamalı FBI'larda seramik kaplamalı FBI'ya göre 1°C'lik sıcaklık

değişiminde yansıyan optik sinyalin dalgaboyundaki kaymanın daha yüksek gerçekleştiği görülmüştür.

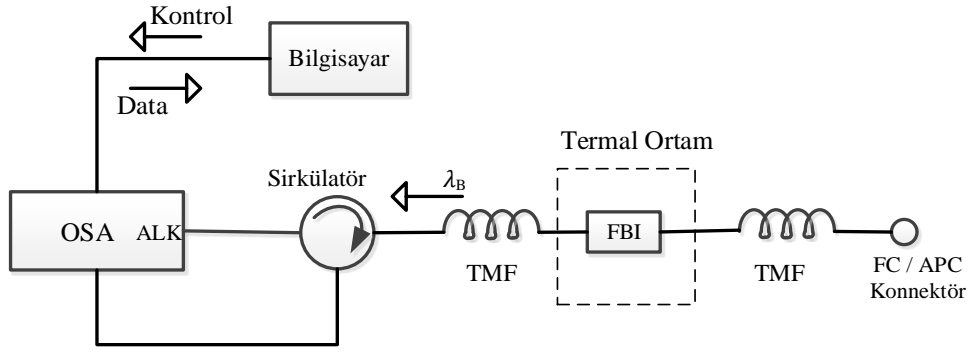
GBLK kullanılarak dört adet FBI'dan oluşan FBI dizisinde 30 °C - 100 °C sıcaklık aralığında yansıyan optik sinyaldeki değişimler her bir FBI için ayrı ayrı Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi sıcaklık ile yansıyan sinyalin dalgaboyundaki değişimler arasındaki ilişki yaklaşık olarak lineerdir. Ancak kullanılan her bir FBI çeşidinin sıcaklık katsayısı farklı olduğundan, bu katsayıların belirlenerek sensör sistemlerinde mutlaka dikkate alınması gerekmektedir [99].

GBLK ile daha geniş bir bantta çalışmak mümkün olduğundan ALK'ya göre bir kanala daha fazla sensör bağlanabilmekte ve hızlı ölçümler alınabilmektedir. Ancak ALK'da sinyal gürültü oranı daha düşük olduğundan daha hassas sonuçlar alınabilmektedir. Bu nedenle hızın önemli olduğu uygulamalarda GBLK, hassas ölçümlerin önemli olduğu uygulamalarda ise ayarlanabilir ışık kaynağı kullanmak daha uygun olacaktır.

5.3. Ayarlanabilir Lazer Kaynağı (ALK) Kullanılarak FBI Sıcaklık Sensörü ve Sensör Dizisi Tasarımı

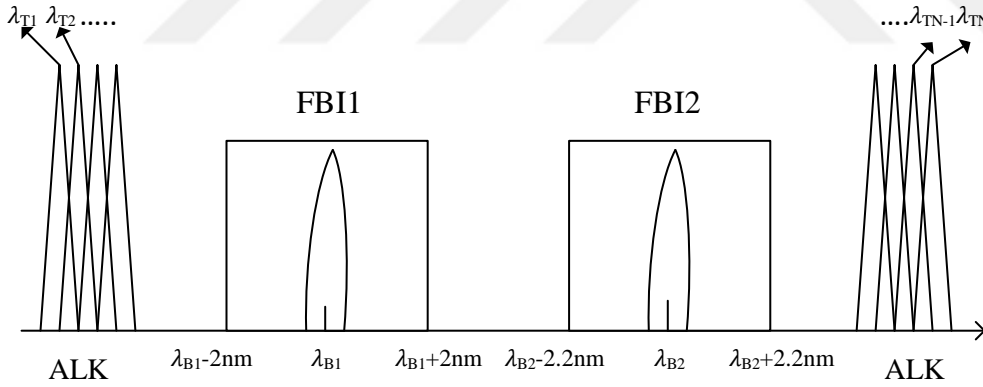
ALK dar bir bantta enerjiyi göndermektedir. Böylelikle iyi bir sinyal gürültü oranına (SGO) sahip, yüksek güçlü ışık sağlanmaktadır. Oluşturulan bu yüksek optik güç, bu mimaride bir tek kaynak ile çoklu fiber sensör hattını beslemeye imkan tanımaktadır. Bu da çok kanallı sorgulayıcılar için karmaşıklığı azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bu ayarlanabilir lazer mimarisinde sorgulayıcılar ışığın dar dalgaboyu bandında taranması ile çalışmaktadır. ALK'nın dalgaboyu FBI'nın dalgaboyu ile eşleştiğinde, fotodedektör yansıyan ışığı algılamaktadır. Bu yansıyan ışığın dalgaboyundaki değişimle de FBI'nın sıcaklığı ve gerilmesi ölçülebilmektedir [31, 114].

FBI ile sensör tasarımında OSA, FBI, sirkülatör ve sinyal işleme için bilgisayar ve Matlab programı kullanılmıştır. Deneysel olarak kurulan düzenek Şekil 5.25'te görülmektedir.



Şekil 5.25. Tekli FBI sıcaklık sensörü için deney düzeneği [114]

Bu çalışmada ayarlanabilir lazer tarama tekniği kullanılmıştır. Şekil 5.26'da kullanılan tarama tekniğinin prensip şeması görülmektedir. λ_{B1} seramik kaplamalı FBI1 sensörü (merkez dalgaboyu 1532.032 nm), λ_{B2} metal kaplamalı FBI2 sensörü (merkez dalgaboyu 1536.674 nm), $\lambda_{T1}, \dots, \lambda_{TN}$ ise lazer kaynağının her bir tarama dalgaboyunu göstermektedir. Bu çalışmada lazer tarama adımı $\lambda_{T2} - \lambda_{T1} = 3$ pm seçilmiştir. Her bir FBI'nın spektral aralığına göre lazerin taramaya başladığı ve bittiği dalgaboyları belirlenmiştir.



Şekil 5.26. FBI sensör dizisi için ALK ile lazer tarama tekniği [114]

Yüksek çözünürlüklü ALK sayesinde çok hassas ölçümler alınmıştır. Aynı zamanda yansıyan optik sinyaller OSA'dan bilgisayara gerçek zamanlı olarak aktarılmış ve Matlab yardımı ile işlenmiştir. FBI'daki hassas sıcaklık değişimleri gerçek zamanlı olarak monitör edilmiştir.

5. 3.1. Seramik kaplamalı FBI1 ile ALK kullanılarak sıcaklık algılama

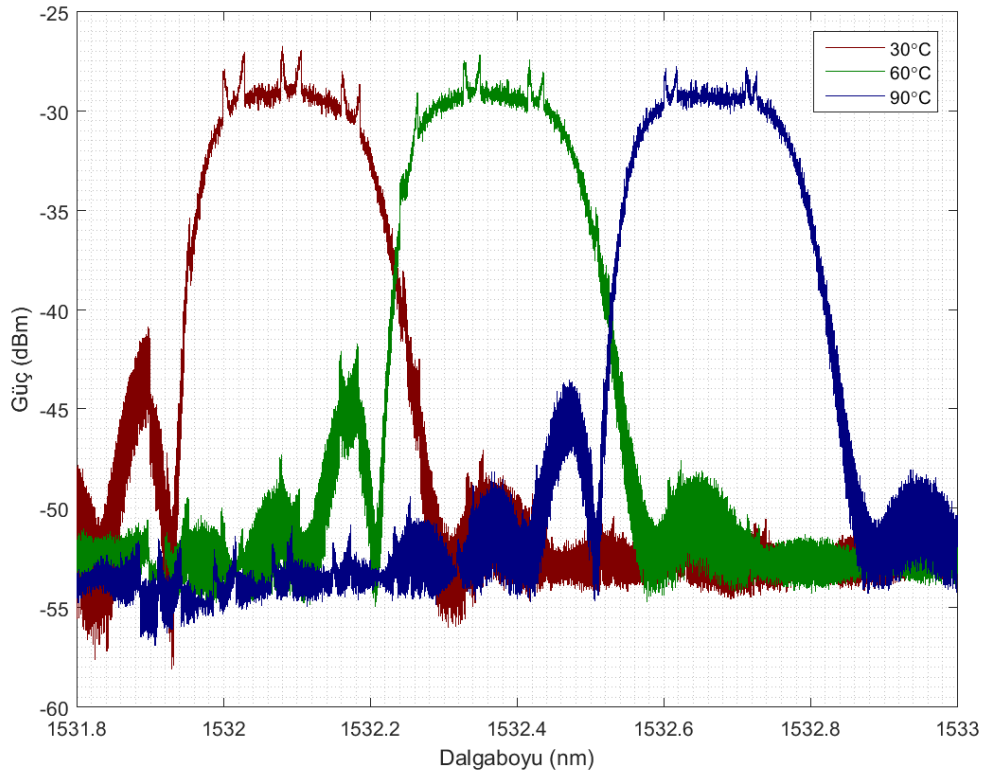
Bu deneyde Micronoptics firmasının OS4300 serisi, 1532.032 nm dalgaboyundaki contalı, alüminyum oksit seramik bir tüp içerisinde tasarlanmış FBI kullanılmıştır. Bu seramik

kaplamalı yapı ortam sıcaklığını ölçmek için uygundur. -40, +120 °C aralığında ölçüm kalibrasyonuna sahip olan bu FBI ile +30, +100 °C aralığında ölçümler yapılmıştır.



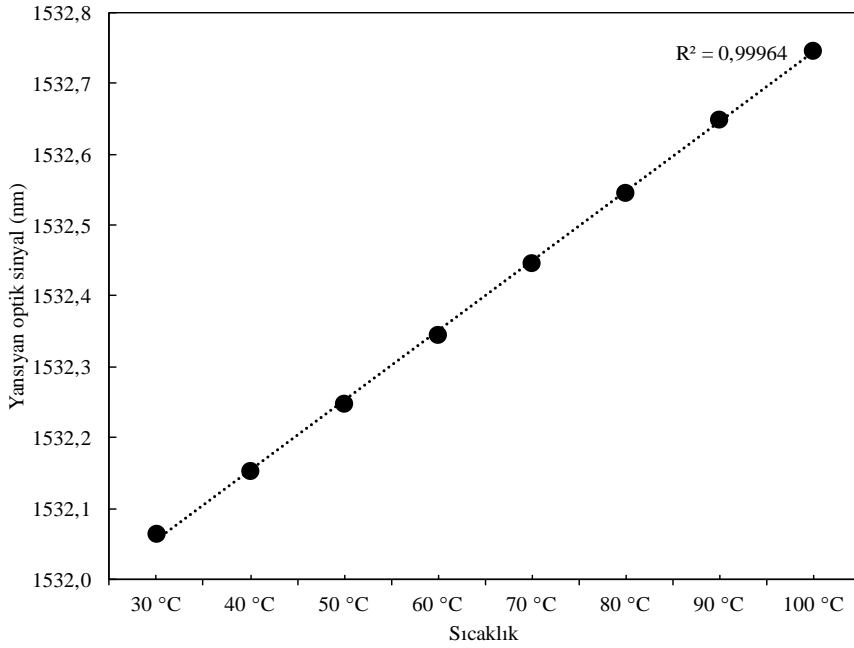
Şekil 5.27. Seramik kaplamalı FBI

Bu çalışmada öncelikle 1532.032 nm dalgaboyundaki seramik kaplamalı FBI1'in sıcaklık karakterizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla FBI1, 30 °C - 100 °C aralığında ayarlanabilir termal ortama konularak 10 °C'lik adımlarla sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. FBI'dan yansıyan optik sinyalin dalgaboyundaki değişimler gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda FBI1'in çok hızlı bir şekilde gerçek zamanlı olarak sıcaklığı gösterdiği görülmüştür.



Şekil 5.28. FBI1 ile 30-60-90 °C sıcaklıklarda alınan ölçüm sonuçları [114]

Seramik kaplamalı FBI1 için 30 °C, 60 °C ve 90 °C’de yansıyan optik sinyallerin dalgaboyları arasındaki farklar ile sinyal güçleri Şekil 5.28’de gözlemlenmektedir. FBI1 için 30 °C - 100 °C aralığında her 10 °C’deki Bragg dalgaboyundaki değişimler Şekil 5.29’da görülmektedir. Değişimin lineer olduğu grafikten gözlemlenmektedir. 22 °C için FBI1’in merkez dalgaboyu 1532.032 nm olup, ölçüm sıcaklıkları için optik kayma hesaplamasında bu merkez dalgaboyu referans alınmıştır [114].



Şekil 5.29. FBI1 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında yansıyan optik sinyaldeki değişimler [114]

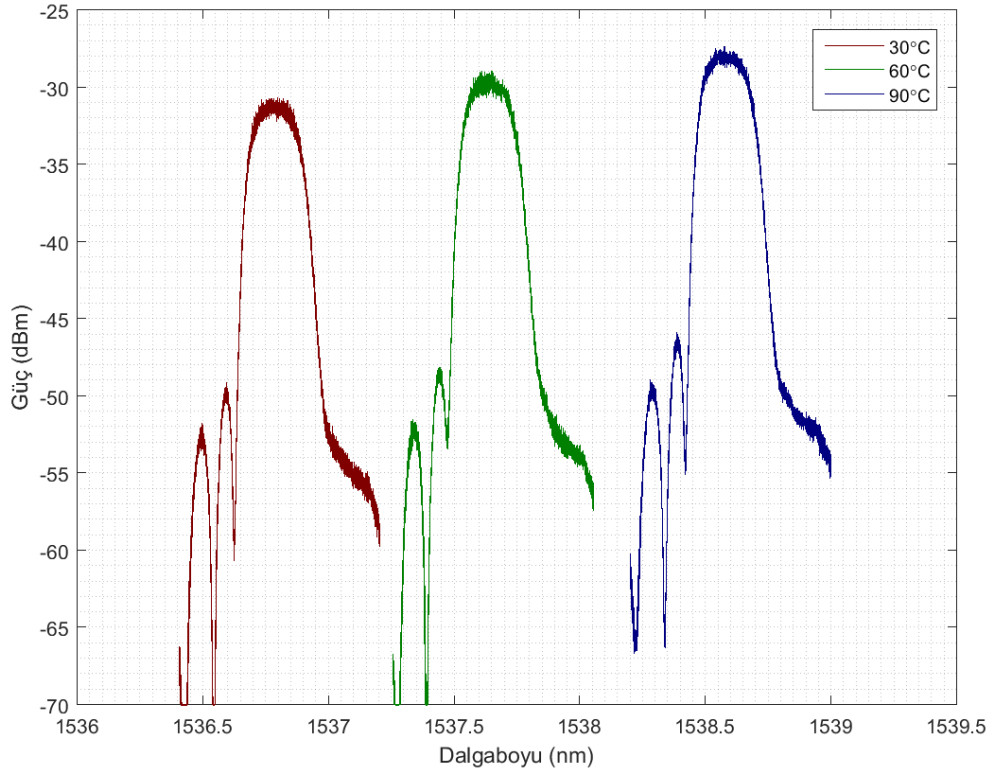
5.3.2. Metal kaplamalı FBI2 ile ALK kullanılarak sıcaklık algılama

Bu deneyde Micronoptics firmasının os4100 serisi 1536.674 nm merkez dalgaboyundaki metal kaplamalı FBI kullanılmıştır. Bu metal kaplamalı yapı daha çok yüzey sıcaklığını ölçmek için uygundur. -40, +150 °C aralığında ölçüm kalibrasyonuna sahip olan bu FBI ile +30, +100 °C aralığında ortam sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır.



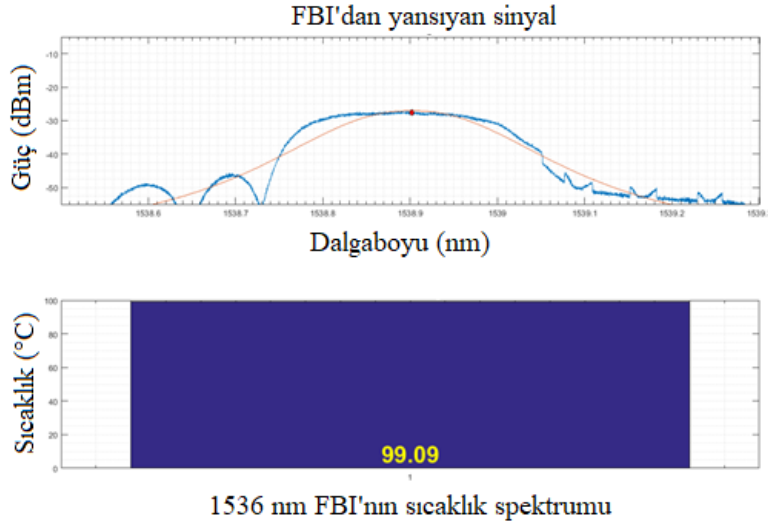
Şekil 5.30. Metal kaplamalı FBI

Bu çalışmada 1536.674 nm dalgaboyundaki metal kaplamalı FBI2 için sıcaklık karakterizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla FBI2, 30 °C - 100 °C aralığında ayarlanabilir termal ortama konularak 10 °C'lik adımlarla sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



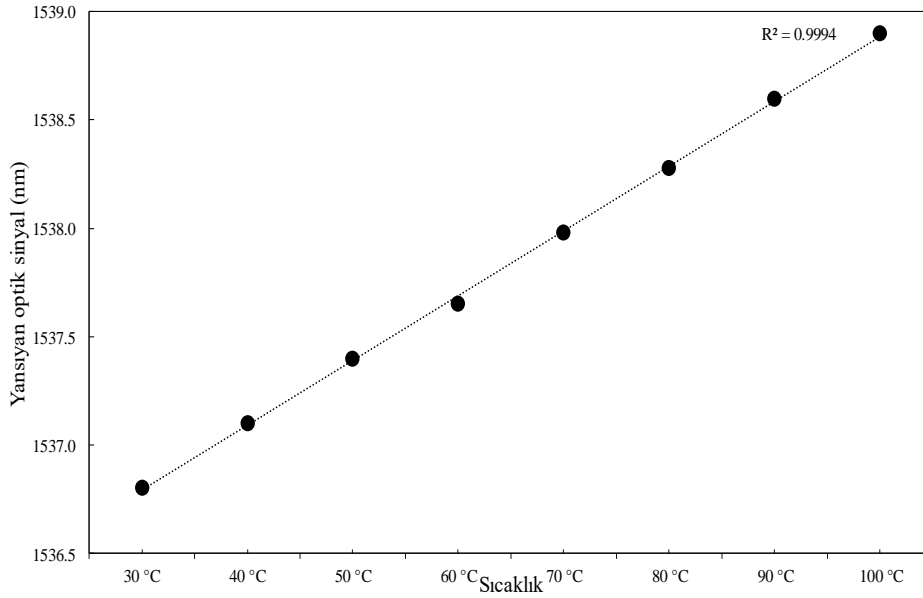
Şekil 5.31. FBI2 ile sıcaklık değişimlerine karşılık gelen sinyal güç değerleri [114]

Metal kaplamalı FBI için 30 °C, 60 °C ve 90 °C'de yansıyan optik sinyallerin dalgaboyları arasındaki farklar ile sinyal güçleri Şekil 5.31'de gözlemlenmektedir. Metal kaplamalı FBI'da, birim sıcaklık başına düşen dalgaboyu kayması daha yüksek olduğundan, seramik kaplamalı FBI ile karşılaştırıldığında 30 °C, 60 °C ve 90 °C'de dalgaboyları arasındaki fark daha net gözlemlenmektedir. FBI2 ile 99 °C alınan ölçüm değerine karşılık gelen sıcaklık-dalgaboyu spektrumu ise Şekil 5.32'de görülmektedir.



Şekil 5.32. FBI2 ile 99 °C'de alınan ölçüme karşılık gelen dalgaboyu spektrumu

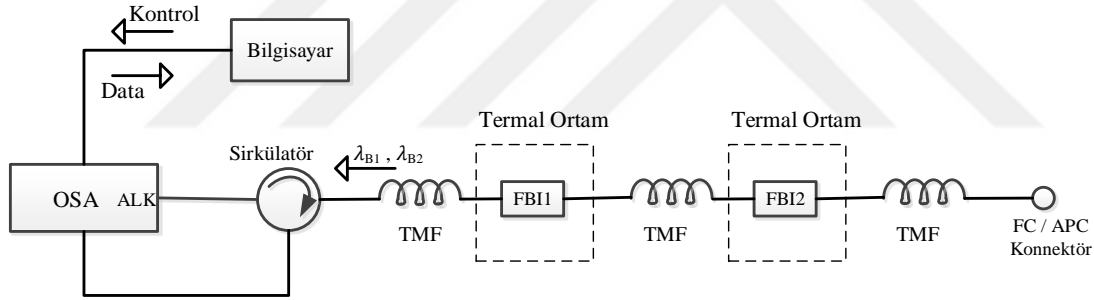
Metal kaplamalı FBI için 30 °C-100 °C aralığında her 10 °C'deki Bragg dalgaboyu değişimleri Şekil 5.33'te gözlemlenmektedir. Şekilden bu değişimin lineer olduğunu görülmektedir. 22 °C için FBI1'in merkez dalgaboyu 1536.674 nm olup, ölçüm sıcaklıkları için optik kayma hesaplamasında bu merkez dalgaboyu referans alınmıştır [114].



Şekil 5.33. FBI2 ile 30°C-100°C sıcaklık aralığında yansıyan optik sinyaldeki değişimler [114]

5.3.3. ALK ile FBI sıcaklık sensör dizisinin gerçekleştirilmesi

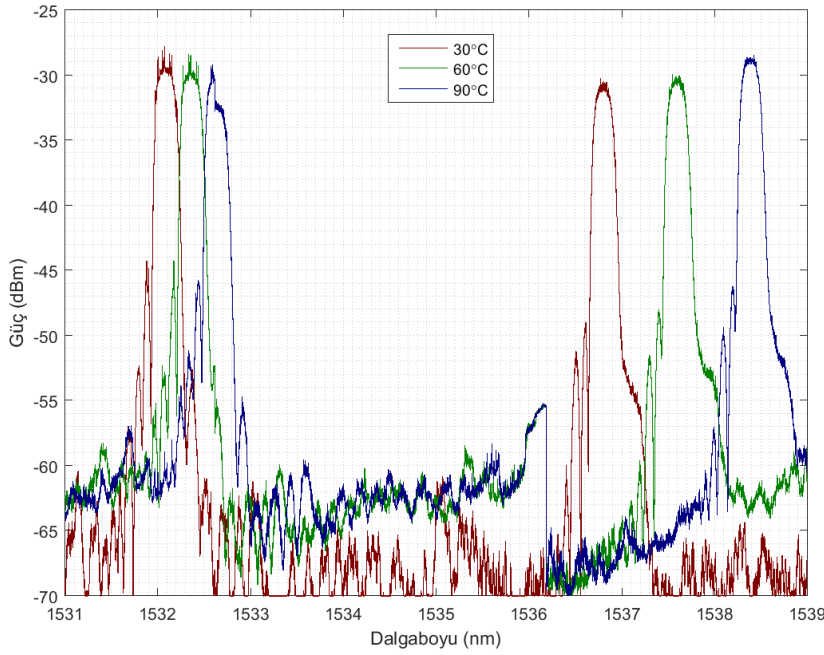
Pratik uygulamalarda FBI sensör uygulamaları genellikle sensör dizisi şeklinde kullanılmaktadır. Uygun sensör dizisi, dalga boyu bölmeli çoğullama, zaman bölmeli çoğullama ya da her ikisi birden kullanılarak oluşturulur. Seçilen FBI'ların dalga boyu, kullanılan tekniğe göre seçilir. Bu sensör dizisi uygulamasında dalga boyu bölmeli çoğullama tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte, FBI'ların dalga boyu farklı seçildiği için sensörler birbirinden bağımsızdır. Bu da ölçüm sisteminin kalitesini arttırmaktadır. Bir sensörde görülen ölçüm veya hesaplama hatası diğer sensördeki ölçümde hiçbir etki yaratmamaktadır. Fiber hat kopmadığı sürece sensörler bağımsız bir şekilde çalışabilmektedir. Seramik kaplamalı 1532.032 nm dalga boyu merkezli FBI1 ile metal kaplamalı 1536.674 nm dalga boyu merkezli FBI2 seri bağlanarak, Şekil 5.34'te görüldüğü gibi FBI sensör dizisi için deney düzeneği oluşturulmuştur. Kullanılan FBI'ların merkez dalga boyları üretici firma tarafından 22 °C ortam sıcaklığında ölçülmüştür.



Şekil 5.34. ALK ile FBI sensör dizisi için deney düzeneği [114]

Bu deneyde her iki FBI aynı ısıtıcı içine konularak, sıcaklık 30 °C - 100 °C aralığında değiştirilmiş ve sonuçlar gözlemlenmiştir.

Şekil 5.35'te solda FBI1'in, sağda ise FBI2'nin sırasıyla 30 °C, 60 °C ve 90 °C'deki saçılma grafiği görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi metal kaplamalı FBI2'nin sıcaklığa karşı hassasiyeti seramik kaplamalı FBI1'den daha yüksektir.



Şekil 5.35. FBI sensör dizisi ile sıcaklık ölçümü [114]

FBI'ların aynı ısıtıcı içerisinde, 30 °C, 60 °C ve 90 °C'de yansıyan dalgalıboylarındaki kaymalar Şekil 5.35'te görülmektedir. Bu her iki FBI arasında yeterli spektral aralık bulunduğundan, sinyallerde herhangi bir girişim meydana gelmediği şekilden de gözlemlenmektedir. FBI1 ve FBI2 için 30 °C - 100 °C aralığında her 10 °C'deki Bragg dalgalıboylundaki değişimler Çizelge 5.1'de görülmektedir. Görüldüğü gibi FBI'ların dalgalıboylarındaki değişimler doğrusallığını korumaktadır.

Çizelge 5.1. FBI1 ile FBI2 için 30 °C-100 °C aralığında yansıyan optik sinyal değerleri

Sıcaklık	FBI1		FBI2	
	Yansıyan Optik Sinyal (nm)	Optik Kayma (nm)	Yansıyan Optik Sinyal (nm)	Optik Kayma (nm)
30 °C	1532,064	0,032	1536,806	0,132
40 °C	1532,152	0,12	1537,102	0,428
50 °C	1532,248	0,216	1537,399	0,725
60 °C	1532,346	0,314	1537,653	0,979
70 °C	1532,447	0,415	1537,980	1,306
80 °C	1532,546	0,514	1538,279	1,605
90 °C	1532,650	0,618	1538,598	1,924
100 °C	1532,747	0,715	1538,900	2,226

Metal kaplamalı FBI'da, birim sıcaklık başına düşen dalgaboyu kayması daha yüksek olduğundan, seramik kaplamalı FBI ile karşılaştırıldığında farklı sıcaklıklardaki optik kaymaların metal kaplamalı FBI'da daha yüksek olduğu Çizelge 5.1'den gözlemlenmektedir. Bu durum FBI'lar üzerindeki kaplamaların farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Bu dizi çalışması ile uygulamaya yönelik, doğrusallığı yüksek, sensörleri birbirinden bağımsız ve hassasiyeti yüksek bir sensör ağı kurulmuştur. Tek bir FBI sensörün optik kaymasının bilgisayar ortamında analizi daha kolayken, aynı hatta bağlı birden fazla FBI'da meydana gelen farklı değişimleri algılamak çok daha zor olmaktadır. Bu amaçla bu çalışmada, sıcaklık artışı ile optik sinyallerdeki kaymalar her iki FBI için ayrı ayrı ve sensör dizisi şeklinde incelenmiştir. Seramik kaplamalı 1532.032 nm FBI1 ile metal kaplamalı 1536.674 nm dalgaboylarındaki FBI2 ile 30 °C-100 °C sıcaklık aralığında testleri yapılmıştır.

Mevcut durumda laboratuvarımızda iki adet FBI bulunduğundan, FBI sensör dizisi iki adet FBI'dan oluşturulmuştur. 30 °C-100 °C sıcaklık aralığındaki sıcaklık ölçümü için, 1530nm-1560 nm aralığında, her bir FBI için 4 nm spektral aralık bırakıldığı düşünüldüğünde en az 6 adet FBI ile sensör dizisi oluşturulabilecektir.

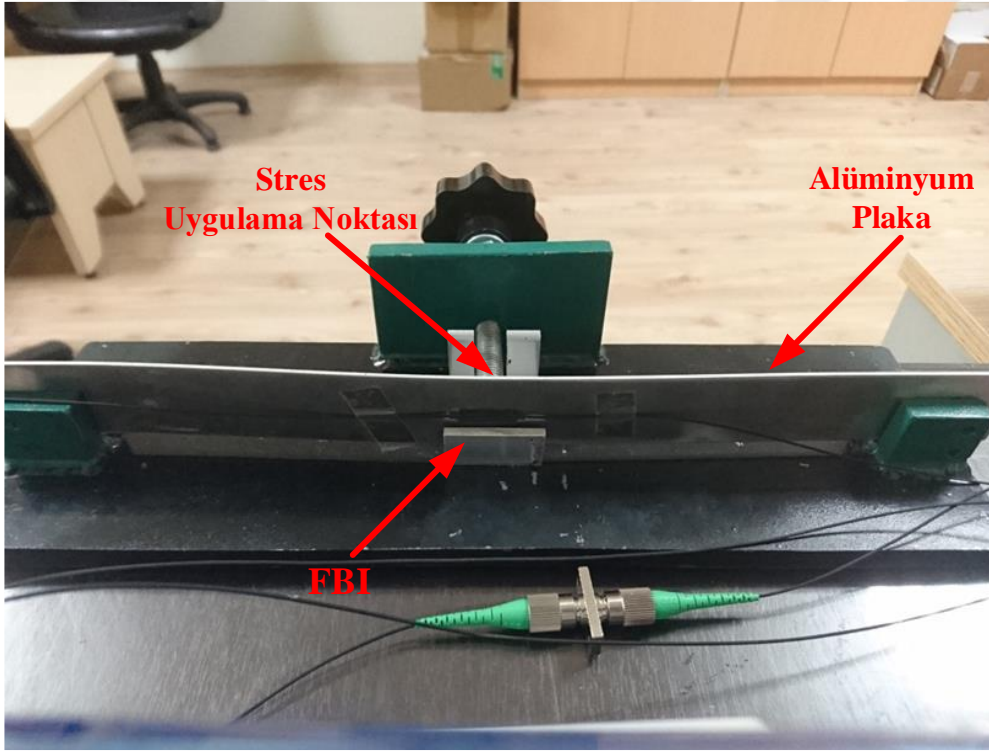
Sonuç olarak, seramik kaplamalı FBI1 ile 1°C'lik sıcaklık değişimi için optik sinyalin dalgaboyundaki kaymanın yaklaşık 9,6 pm olduğu gözlemlenmiştir. Metal kaplamalı FBI2'de ise bu değer yaklaşık 29 pm olarak ölçülmüştür. Her iki FBI için de 0.5 °C hassasiyetle sıcaklık ölçümleri gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir.

OSA kullanılarak gerçekleştirilen FBI sensör sistemi özgün bir çalışma olmakla birlikte, sensör sisteminde bir OSA'nın bulunması maliyeti artırmaktadır. Ancak, OSA'nın lazer tarama adımı olarak 3 pm'ye kadar aralıklar seçilebildiğinden, FBI'nın sıcaklık cevabı hızlı daha hassas ölçülebilmekte ve gerçek zamanlı sıcaklık ölçümüne imkan tanınmaktadır. Ayrıca ölçüm sonuçları ile FBI'ların verileri analiz edildiğinde 1'e çok yakın korelasyon katsayıları elde edilmiştir [114].

FBI sıcaklık sensörleri konvansiyonel termokupl ile karşılaştırıldığında, kalibrasyon gerektirmemekte ve elektromanyetik girişimden etkilenmemektedirler. Bu nedenle hassas ölçüm gerektiren birçok alanda kullanmak mümkündür.

5.4. ALK ile FBI Gerilme Sensörünün Gerçekleştirilmesi

FBI ile gerilme ölçümü yapmak için Şekil 5.36'daki gibi kuvvet uygulanabilecek örnek bir düzenek kurulmuş ve FBI'nın gerilme tepkileri incelenmiştir. Bu düzenekte kullanılan alüminyum plaka üzerine FBI monte edildikten sonra, FBI'ya dikey kuvvet uygulanarak plakada oluşan gerilme sonucu Bragg dalgaboyunda meydana gelen kaymalar incelenmiştir.

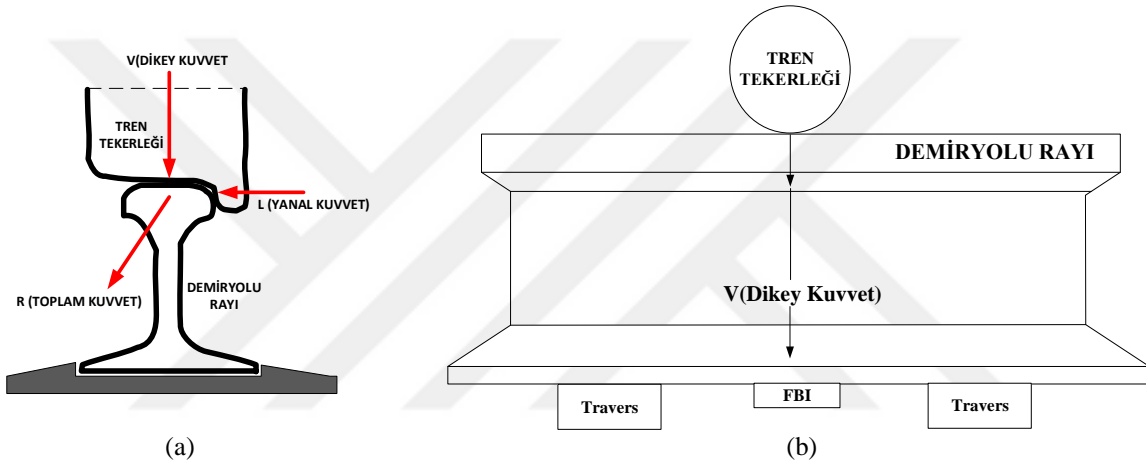


Şekil 5.36. FBI ile gerilme ölçüm düzeneği

Bu şekilde bir demiryolu rayında oluşabilecek gerilme simüle edildikten sonra gerçek zamanlı gerilme ölçümü için bir demiryolu rayı kullanılmış ve raya uygulanan kuvvete karşılık rayda oluşan gerilme incelenmiştir.

5.4.1 Teorik analiz

Raylar ve trenler demiryolu işletmelerinin iki temel fiziksel bileşeni durumundadır. Trenler ile raylar arasındaki sürekli etkileşim nedeniyle oluşan etkilerin tespiti için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [122]. Bu yöntemlerin başlıcaları ultrasonik ses dalgalarının kullanımı, strain gauge kullanımı ve fiber optik sensör kullanımıdır. Bu çalışmada fiber optik sensörler ile ray ve trenler arasındaki etkileşim incelenmiştir. Trenin rayda hareketi sonucunda tren tekerleğinin rayya uyguladığı dikey ve yanal kuvvetler temsili olarak Şekil 5.37’de görülmektedir.



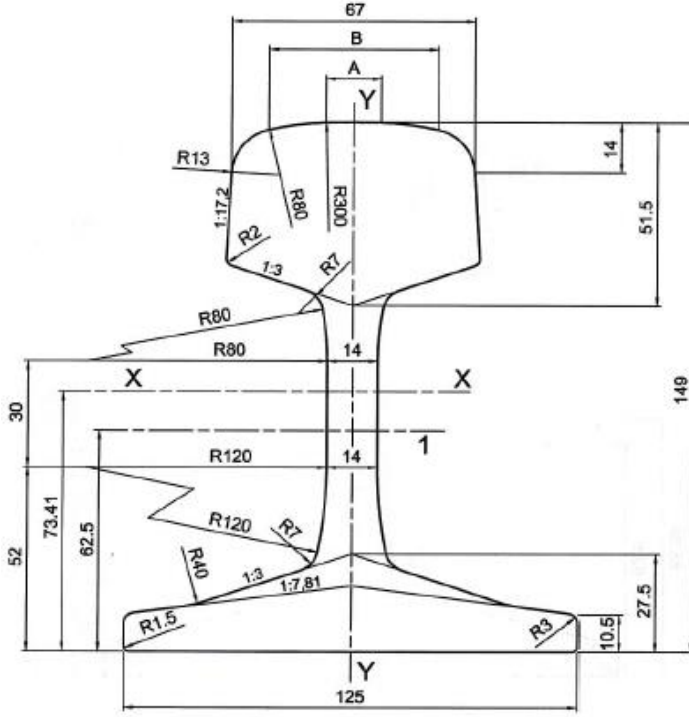
Şekil 5.37. a) Tren/ray arasındaki dikey ve yatay kuvvetler, b) rayya uygulanan dikey kuvvetin FBI sensör ile ölçümü [115]

Tren tekerleğinin iki travers arasında rayya uyguladığı dikey kuvvet, Şekil 5.37-b’de görüldüğü gibi rayya monte edilen bir FBI sensör ile ölçülebilmektedir. FBI sensörün monte edildiği bölgede bir dikey kuvvet ölçüldüğünde, aynı zamanda o noktadan geçen bir trenin varlığı da algılanmış olacaktır.

Tren tekerleğinin rayya uyguladığı dikey kuvvet sonucunda rayda stres oluşmaktadır. Rayda oluşan stres ile gerilme arasında da elastisite modülü oranında doğrusal bir bağlantı bulunmaktadır. Deneysel olarak, belirli bir uzunluktaki rayın merkezine uygulanan dikey kuvvet ile rayda oluşan stres arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$\sigma = \frac{F.l.c}{4.I} \quad (5.1)$$

Burada σ stres, F kuvvet, l mesnetler arasındaki uzaklık (100 cm), c rayın tabanı ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe ve I rayın atalet momentini (moment of inertia) ifade etmektedir. Bu deneyde kullanılan 49E1 ray profiline ait ölçüler EN 13674-1 46 kg/m ve üzeri Vignole Demiryolu Rayları standardında tanımlanmış olup, Şekil 5.38’de görülmektedir.



Şekil 5.38. EN 13674-1 standardına göre 49E1 ray profiline ait ölçüler

EN 13674-1 standardına göre 49E1 ray profili için, rayın tabanı ile x-x ağırlık merkezi arasındaki mesafe (c) 7.341 cm, rayın atalet momenti (I) ise 1816 cm^4 ‘dir. Bu değerler Eş. 5.1’de yerine konulduğunda kuvvet ile stres arasında aşağıdaki bağıntı elde edilmektedir;

$$\sigma \cdot 10,197 \text{ kg/cm}^2 = \frac{F \cdot 100 \cdot 7,341}{4 \cdot 1816}$$

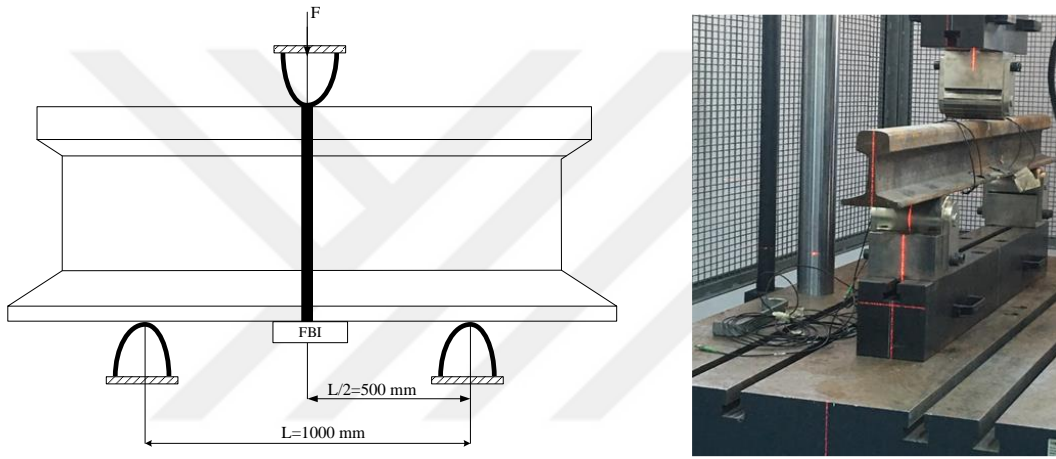
Raya uygulanan kuvvete göre yukarıdaki eşitlikten elde edilen stres değeri ile Eş. 4.3 (Hooke kanunu) kullanılarak raya uygulanan gerilme değeri teorik olarak hesaplanmaktadır. Bu ray tipi için E elastisite modülü yaklaşık olarak 210 GPa olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla ray için stres ile gerilme arasındaki bağlantı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [115].

$$\sigma = 210 \cdot \varepsilon \quad (5.2)$$

Burada σ stres ve ε raydaki gerilmedir.

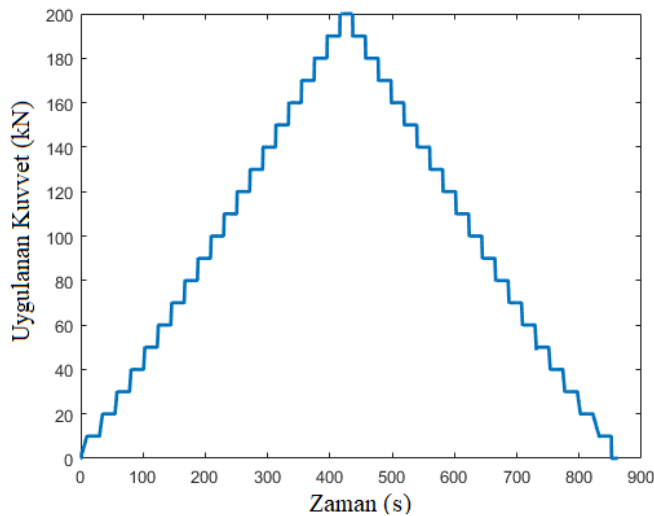
5.4.2. Deneysel analiz

FBI sensör ile dikey kuvvetin rayda oluşturduğu gerilmeyi ölçebilmek için sensörü yüzeye monte etmek gerekmektedir. Bu işlem tipik olarak yapıştırma veya kaynak şeklinde olmaktadır. Bu çalışmada 180 cm uzunluğundaki bir ray kesitine, bir adet metal kaplamalı FBI (Micronoptics OS3155) kaynak yapılarak monte edilmiştir. Bu deneyde R260 sertliğe ve kaliteye sahip 49E1 tipinde ray kullanılmıştır. Rayın merkezinden 50 cm sağa ve 50 cm sola olacak şekilde birer adet destek kütleleri yerleştirilmiş ve rayın merkezine kuvvet uygulanmıştır [114,116]. Bu deneysel kurulum Şekil 5.39’da görülmektedir.



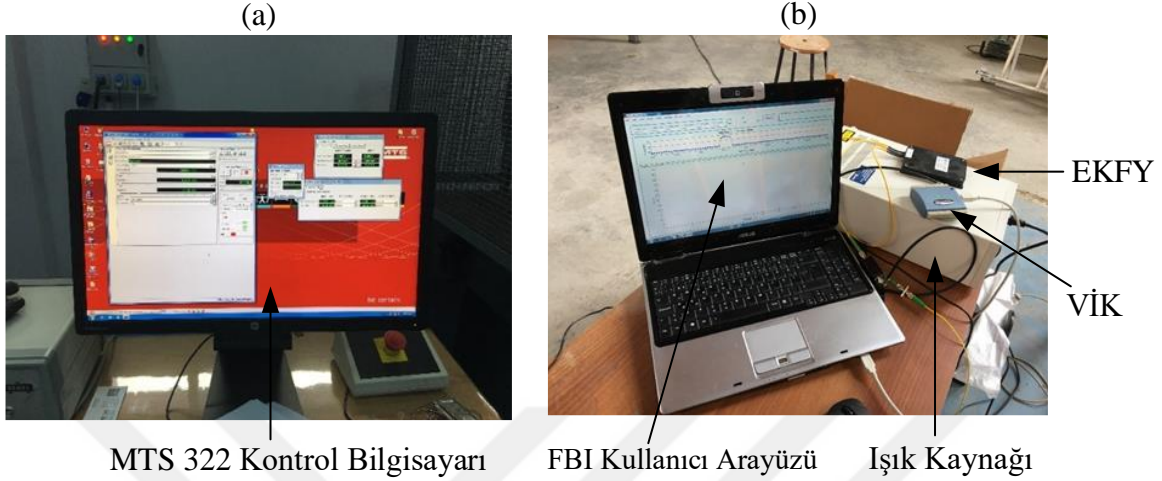
Şekil 5.39. FBI ile gerilme sensörü tasarımı için fiziksel kurulum [115]

Rayın merkezine 10kN’luk adımda en az 20 sn süreyle sabit kuvvet 0-200 kN aralığında uygulanmıştır. Uygulanan kuvvetin karakteristiği Şekil 5.40’ta görülmektedir.



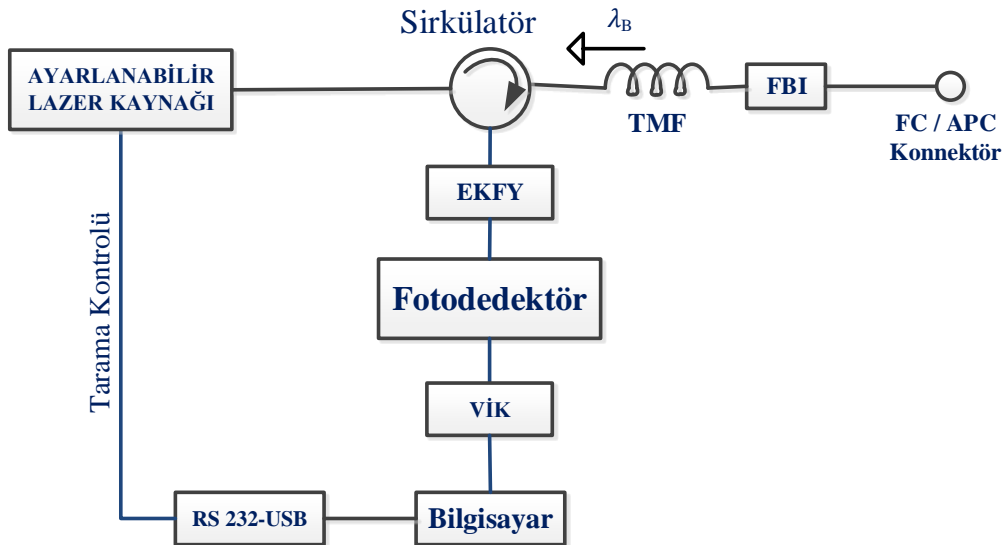
Şekil 5.40. Rayın merkezine uygulanan kuvvet-zaman grafiği [115]

Raya kuvvet uygulamak için TCDD Genel Müdürlüğü'nün Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezindeki MTS 322 eğme deneyi test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.41. (a) Kuvvet uygulama kontrol bilgisayarı, (b) FBI sorgulama sistemi

Bu cihaz ile 0'dan 200 kN'a kadar 10'ar kN'luk periyotlarla kuvvet artırılarak raya uygulanmıştır. Kullanılan cihazın kuvvet uygulama hassasiyeti ortalama % 0.08'dir. Alınan sonuçların teyidi için ise 200 kN'dan tekrar 0'a kadar 10 kN'luk azalan periyotlarla kuvvet uygulanarak FBI sensör sorgulama sistemi ile alınan sonuçlar kaydedilmiştir. Şekil 5.41'de kuvvet uygulama cihazının kontrol bilgisayarı (a) ile FBI sorgulama sistemi (b) görülmektedir. Raya uygulanan kuvvetin oluşturduğu gerilmenin algılanması için kurulan FBI gerilme sensörü deneysel kurulum düzeneği ise Şekil 5.42'de görülmektedir.

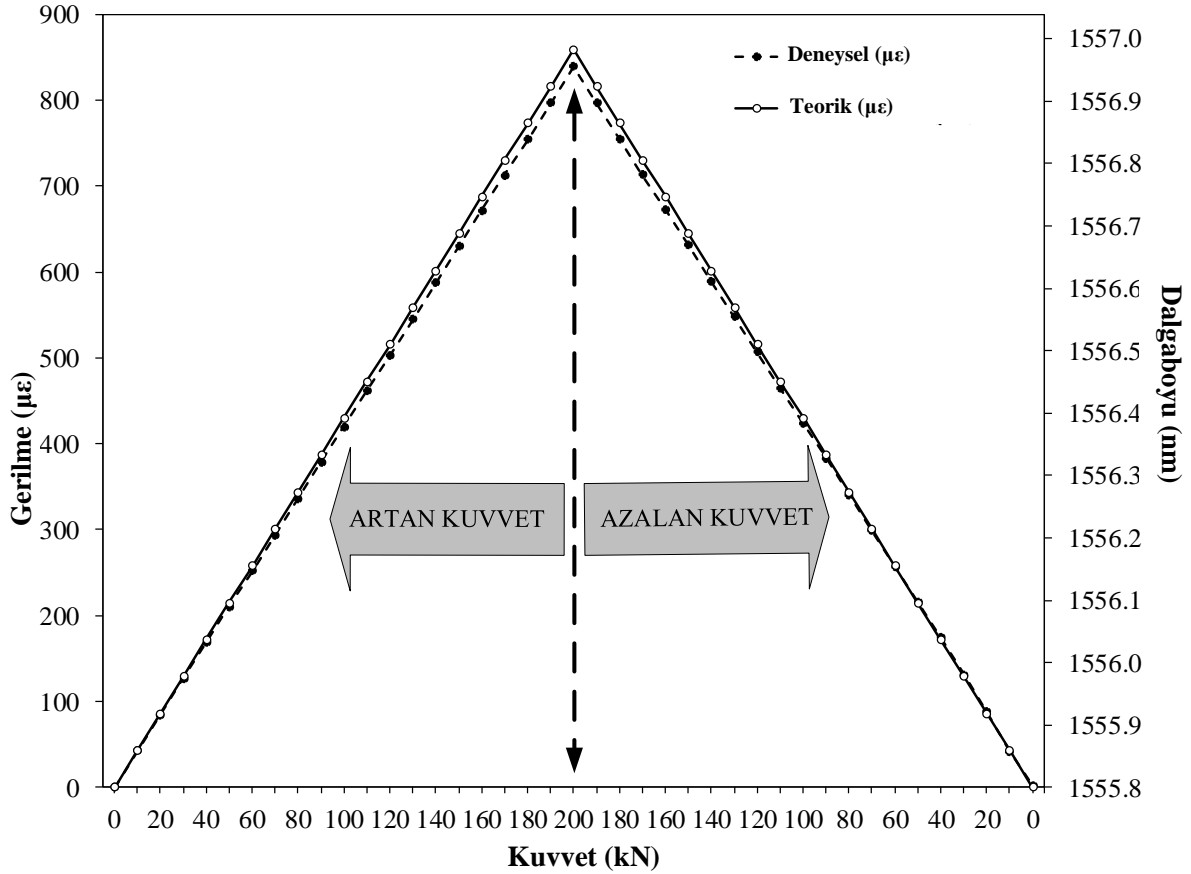


Şekil 5.42. ALK ile FBI gerilme sensörü tasarımı için deneysel kurulum düzeneği [115]

Bu deneyde ışık kaynağı olarak bilgisayar kontrollü ayarlanabilir Santeç TSL-210V ışık kaynağı kullanılmış ve ışık 1556 nm merkez dalgaboyuna sahip FBI'ya $\pm 2\text{nm}$ 'lik bant genişliğinde uygulanmıştır. Bilgisayar ile ALK'nın tarama adımlarını kontrol etmek için USB-RS232 dönüştürücü kullanılmıştır.

Tasarlanan FBI sensör sistemi ile, raya uygulanan kuvvete karşılık FBI'da oluşan dalgaboyu ve gerilme değişimleri, bilgisayar kullanıcı arayüzü ile gerçek zamanlı olarak monitör edilmiştir.

Bragg dalgaboyundaki değişim ile FBI'dan ölçülen gerilme değeri ve Eş. 5.2 kullanılarak hesaplanan teorik gerilme değerleri Şekil 5.43'te görülmektedir.



Şekil 5.43. Uygulanan kuvvete karşılık teorik olarak hesaplanan ve ölçülen gerilme değerleri [115]

Şekilden de görüldüğü gibi ölçülen ve hesaplanan gerilme değerleri arasında küçük sapmalar meydana gelmektedir. Rayın merkezine uygulanan kuvvet ile rayın altına monte edilmiş FBI'nın Bragg dalgaboyundaki değişimler şekilde ikincil eksende görülmektedir.

Ölçülen gerilme ile dalgaboyu değişimi arasındaki ilişkinin 0-200 kN arasındaki kuvvet değişimi ile yaklaşık olarak lineer değiştiği Şekil 5.42’de görülmektedir.

Bu çalışmada R260 sertliğe ve kaliteye sahip 49E1 tipi bir demiryolu rayının gerilmesini ölçmek için bir tasarlanan FBI sensör sistemi ile ölçümler alınmıştır. Raya kuvvet uygulamak için Ray Eğme Testi Cihazı kullanılmıştır. 0-200 kN kuvvet aralığında rayda oluşan gerilme FBI ile ölçülmüştür. Bu ray tipi için uygulanan kuvvete karşılık gelen gerilme değerleri ayrıca hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Ölçülen ile hesaplanan değerler birbirlerine çok yakındır. 100 kN’a kadar uygulanan kuvvetlerde ölçülen ve hesaplanan değerler arasında küçük sapmalar oluşurken, kuvvet arttıkça sapmanın da arttığı gözlemlenmiştir. Bu sapmanın 200 kN’a yaklaştıkça maksimum %2.5 oranında gerçekleştiği görülmüştür. Dalgaboyu/gerilme değişimi arasında ise yaklaşık olarak 1.38 pm/ $\mu\epsilon$ ’lik bir ilişki olduğu hesaplanmıştır [115].

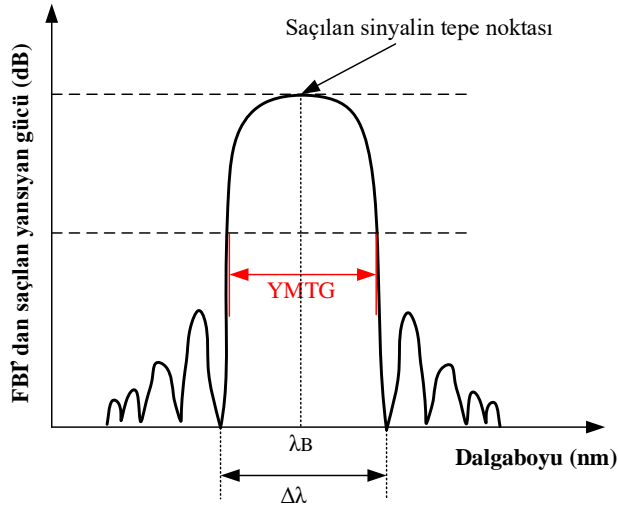
6. FBI SENSÖR SİSTEMİ TASARIMINDA SİNYAL İŞLEME ADIMLARI

FBI, ışık kaynağı tarafından kendisine gönderilen ışığın Bragg dalgaboyuna denk gelen belli bir kısmını yansıtmakta, kalanını ise iletmektedir. Bu yansıyan sinyal bir fiber yükselteç ile güçlendirildikten sonra fotodedektöre iletilmektedir. Fotodedektör ile elektriksel sinyale dönüştürüldükten sonra da sorgulama sistemine aktarılmakta ve sinyal işleme uygulanmaktadır. Bu bölümde FBI sensör sistemi için oluşturulan sinyal işleme adımları incelenmiştir.

FBI'ların en önemli özelliği, ölçülen parametrenin doğrudan Bragg dalgaboyunda bir kaymaya dönüştürülmesidir. Yansıyan ışığın dalga boyundaki kayma, optik kaynaktaki güç değişikliklerinden bağımsız olarak gerçekleşmektedir. FBI sensörlerdeki en önemli konu, yansıyan spektrumun tepe noktasına karşılık gelen dalgaboyunun tespitidir. FBI sensör sistemlerinde bulunan elektronik ekipman donanımı, ölçümün yapıldığı ortam ve FBI özellikleri nedeniyle sinyalde gürültü meydana gelmektedir ve bu gürültü demodülasyon doğruluğunu etkilemektedir. Gürültüyü elimine ederek tepe noktasının dalgaboyunu belirlemek için kullanılan temel teknikler, çapraz korelasyon ile sinyal işleme ve sayısal filtreleme tekniğidir [71,118].

Çapraz korelasyon tekniği, referans spektrum ile gerilme veya sıcaklık değişiminden kaynaklanan dalga boyu kayması sonucunda ızgaralardan ölçülen spektrumlar arasındaki korelasyonu kullanmaktadır. Sayısal filtreleme algoritmaları ise sinyal gürültü oranını iyileştirerek, yansıyan sinyalin spektral özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır [118].

FBI'dan yansıyan bandın merkez dalgaboyunun tespiti ile fiziksel ortamdaki sıcaklık ve gerilme değişimleri tespit edilmektedir. Bu da yansıyan sinyalin tepe dalgaboyunu bulmakla mümkün olmaktadır [62, 69-71]. FBI'dan sinyalin örnek bir spektrumu Şekil 6.1'de görülmektedir.



Şekil 6.1. Tipik Bragg yansıma sinyali [3]

FBI yansıma spektrumunun bant genişliği Eş. 6.1 ile verilmektedir.;

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B^2}{\pi n_{eff}^2} (k^2 L^2 + \pi^2)^{1/2} \quad (6.1)$$

Burada L fiber ızgaranın uzunluğunu, k ise bağlaşım katsayısını ifade etmektedir [117].

FBI'dan yansıyan sinyalin merkez dalgaboyunu belirlemek için çeşitli tepe bulma yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu tepe bulma yöntemlerinden bazıları, sinyaldeki en yüksek genliği tarama (maximum algorithm), spektrumun tepesindeki geometrik merkezi tarama (centroid algorithm), dalgacık dönüşümü (wavelet transform) ve Gaussian uyarlama (Gaussian fitting) yöntemleridir [69-71, 118-122]. Bu çalışmada FBI sensörlerinden yansıyan spektrumun merkez dalgaboyunun tespiti için Gaussian uyarlama tekniği kullanılmıştır.

Gaussian fonksiyonları matematik, bilim ve mühendislikteki bir çok prosesi açıklamak, bunları kullanışlı hale getirmek, sinyal ve görüntü işlemek için uygun olmaktadır. FBI spektrumunun Gaussian dağılımı Eş. 6.2 ile verilmektedir.

$$R(\lambda) = R_0 \cdot \exp\left[-4 \cdot \ln 4 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta}\right)^2\right] \quad (6.2)$$

Burada Δ Gauss çanının yarı yükseklikteki tam genişliğini (YMTG), λ_B FBI'nın merkez dalgaboyunu, $R(\lambda)$ FBI'nın yansıma spektrumunu, R_0 Bragg dalgaboyunda gerçekleşen

maksimum yansımayı ifade etmektedir[117]. FBI'nın YMTG değeri FBI'nın uzunluğu, ızgara periyodu ve kırılma indisine bağlı olarak değişmektedir.

Yansıyan ışığın fotodedektördeki spektrumu ise Eş. 6.3'deki gibi yazılabilmektedir.

$$I_s(\lambda) = \frac{I_0}{4} R(\lambda) = \frac{I_0}{4} R_0 \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta} \right) \right] \quad (6.3)$$

Burada I_0 ışık kaynağının başlangıçtaki yoğunluğunu ifade etmektedir. Sistemde herhangi bir gürültü oluştuğunda fotodedektördeki ışık yoğunluğu, ideal sinyal $I_s(\lambda)$ 'ya ek olarak, gürültü sinyali $I_n(\lambda)$ 'yı da içerecektir. Bu durumda bozulmuş sinyal Eş. 6.4'teki gibi yazılacaktır.

$$x(\lambda) = I_s(\lambda) + I_n(\lambda) \quad (6.4)$$

Ölçülen spektrumdaki güçlü gürültü, sensörün izleme ve işlem karakteristiğinde büyük etkiye sahiptir. Karmaşık fiziksel faktörlerin neden olduğu bir sinyalin rastgele gürültüsü, olasılık teorisinden merkezi limit teoremine göre Gauss dağılımı ile modellenabilmektedir [120]. Genel Gaussian eğri uyarılama fonksiyonu Eş. 6.4'teki gibi yazılmaktadır.

$$y = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6.4)$$

Burada A sinyalin genliğini, x sinyalin merkezini, σ ise sinyaldeki sapmayı ifade etmektedir [121].

Eş. 6.4 FBI sensörlere uyarlandığında ve yansıyan sinyalin merkez dalgaboyu λ_B , Bragg dalgaboyundaki hesaplanan genlik y_B olarak tanımlandığında FBI Gauss eğri uyarılama fonksiyonu Eş. 6.5'teki gibi yazılabilmektedir.

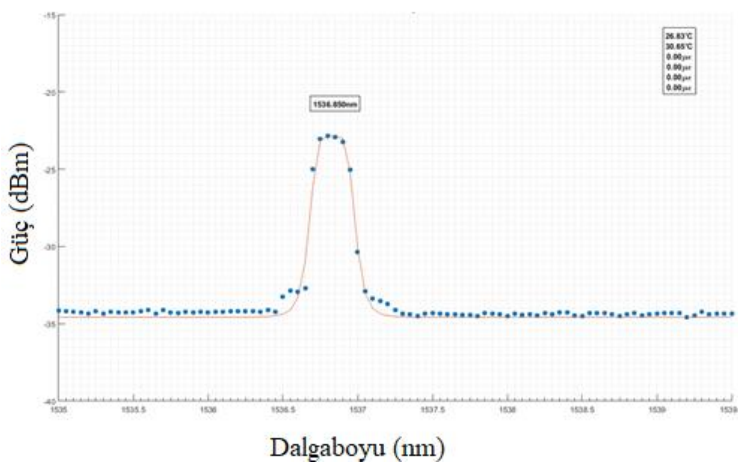
$$y_B = A \cdot \exp\left(-\frac{(C-\lambda_B)^2}{2V^2}\right) \quad (6.5)$$

Burada A sinyalin genliğini, C sinyalin merkezini, V ise sapmayı ifade etmektedir [58]. Burada $C = \lambda_B$ olduğunda yansıyan sinyalde tam bir çan eğrisi elde edilmiş olmaktadır.

FBI bandı Gauss şekle benzediğinden Gauss uyarılama yöntemi ile merkez dalgaboyu bulunduğu bant üzerindeki gürültünün, dalgaboyu üzerindeki hata etkisi de minimize edilmiş olmaktadır [58,120].

Alınan ölçüm sonuçlarındaki gürültüyü elimine etmek ve ölçüm doğruluğunu artırmak için kullanılan yöntemlerden biri Kalman filtre kullanımıdır. Ölçüm sistemlerinde Kalman filtresi gürültüyü bastırmak için kullanılmaktadır. Daha sonra kalan inovasyon dizileri, kazanç matrisi ve Kalman filtresi tarafından yaratılan değişim, bir büyüklüğü bir doğrusal tahmin edici kullanarak tanımlamak için kullanılmaktadır. Kalman filtresi sadece sürekli sinyali tahmin etmek için kullanılabilir, rastgele ve kesikli bir sinyali tahmin etmek için kullanılamamaktadır [65, 123].

FBI'dan yansıyan bant Gauss şekline yakınsamakla birlikte tam olarak sinüzoidal bir bant izlememektedir. Bu nedenle doğru ölçüm alabilmek ve hata oranını azaltmak için, FBI'dan yansıyan bu sinyalin üzerine uygun yöntemlerle Gaussian oturtmak gerekmektedir. Gaussian uyarlama ile merkez dalgaboyunu belirlemeye yönelik bir gösterim Şekil 6.2'de görülmektedir.

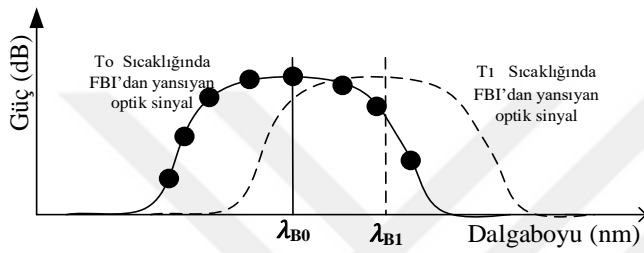


Şekil 6.2. Gaussian uyarlama ile merkez dalgaboyunun belirlenmesi

FBI bandını gözlemek için öncelikle uygun adım aralığı seçilmelidir. FBI'dan yansıyan sinyalin bant genişliği, uzunluğuna, ızgara periyoduna ve kırılma indisine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan FBI'ların yansıma bandı yaklaşık olarak 300-400 pm aralığında değişmektedir. Gerilme ölçümü için tasarlanan FBI sensör sisteminde, tarama adım aralığı 50 pm seçilmiş ve FBI dalgaboyu bandı 8 noktadan gözlemlenmiştir. Bazı denemelerden sonra, merkez bulma algoritmaları için optimum gözlem yapma sayısı ve zamanı elde edilmiştir. FBI bandında gözlemlenen bu 8 noktadan genliği en yüksek olan noktaya ait dalgaboyu merkez dalgaboyu olarak kabul edilmiş ve dalbayundaki kaymalar bu

referansa göre belirlenmiştir. Böylece FBI'dan yansıyan sinyalin üzerine Gauss oturtularak merkez dalgaboyu yüksek doğrulukla elde edilmiştir.

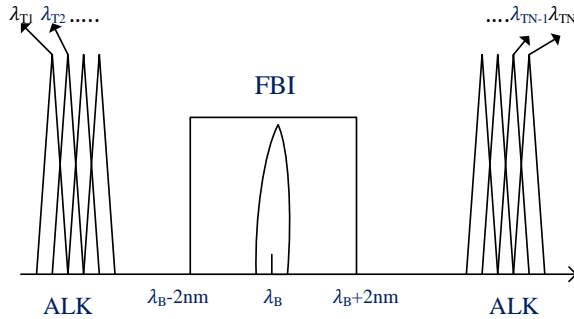
Sıcaklık ölçümü için uygulanan Gaussian eğri uyarlama gösterimi Şekil 6.3'te görülmektedir. Burada λ_{B0} başlangıçtaki sıcaklığa karşılık gelen dalgaboyunu, λ_{B1} ise Δt zaman sonundaki sıcaklığa karşılık gelen dalgaboyunu ifade etmektedir. Bu teknik ile, FBI'nın yansımada bandı boyunca her 50 pm'ye karşılık gelen güç değerleri ölçülerek tepe noktası bulunmaktadır. En yüksek güce sahip bu tepe noktasına karşılık gelen dalgaboyundaki kaymanın tespiti ile de sıcaklık değişimi elde edilmektedir.



Şekil 6.3. Gaussian uyarlama tekniği ile sıcaklık ölçüm prensibi

Merkez dalgaboyu değeri, kaplama özelliklerine göre üretici tarafından verilen sapma değerleri de dikkate alınarak formülasyonlar ile sıcaklık için derece (santigrat), gerilme için ise mikrostrain'e çevrilebilmektedir.

Optik sensör tarama tekniğinde ışık kaynağının adım aralığı, saniyedeki adım sayısı ve çıkış gücü gibi önemli faktörler bulunmaktadır. ALK kaynak ile gerçekleştirilen FBI sensör sisteminde kullanılan lazer tarama tekniğinin prensip şeması Şekil 6.4'te görülmektedir.



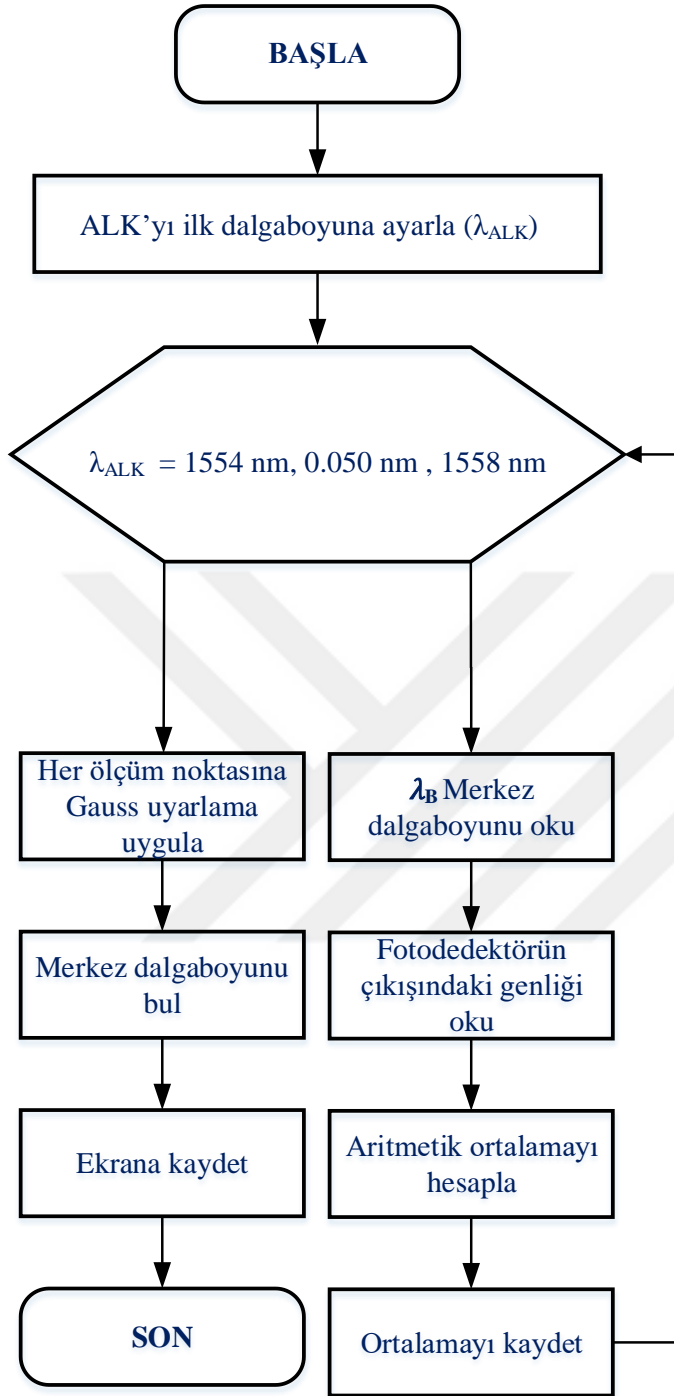
Şekil 6.4. ALK ile lazer tarama tekniği [114]

λ_B FBI sensörünün merkez dalgaboyunu ifade etmektedir. $\lambda_{T1}, \dots, \lambda_{TN}$ ise lazer kaynağının her bir tarama dalgaboyunu göstermektedir. Bu çalışmada lazer tarama adım aralığı $\lambda_{T2} - \lambda_{T1} = 50$ pm

seçilmiştir. FBI'nın spektral aralığına göre lazerin taramaya başladığı ve bittiği dalgaboyları belirlenmiştir [28, 114].

Şekil 6.5.`te gerilme ölçümü için ALK ile tasarlanan FBI sensör sisteminin akış diyagramı görülmektedir. ALK olarak TSL-210V kaynak kullanılmıştır. Tarama adımlarını belirlemek için bilgisayar ile ALK arasında seri haberleşme oluşturulmuş ve Matlab'ın seri haberleşme fonksiyonları kullanılarak haberleşilmiştir. Işık kaynağına, FBI'ya uygulanacak dalgaboyu emri yazılım yardımı ile gönderildiği için fotodedektörden ölçülen gücün de bu dalgaboyuna ait olduğu bilinmekte ve kaydedilmektedir. Akış diyagramından da görüldüğü gibi 0.05 nm`lik her adımda merkez dalgaboyunun tespiti için, sinyale Gaussian uyarlama uygulanmıştır.





Şekil 6.5. Dalgaboyu tarama yönteminde FBI sensör sisteminin akış diyagramı [115]

FBI sensörden yansıyan ve bir EKFY tarafından güçlendirildikten sonra fotodedektör vasıtasıyla sayısal büyüklüğe dönüştürülen bu sinyaller, bir DAQ veri işleme kartı aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve Matlab programı ile işlenmiştir. Fotodedektörden mutlak değeri 0-20 V ($\pm 10V$) aralığında alınan sinyaller, veri işleme kartı aracılığıyla 0-65536 aralığında sayısal büyüklüğe dönüştürülerek bilgisayara aktarılmaktadır. Sinyaldeki gürültünün etkisini azaltmak ve 50 pm'lik optik tarama adımını elde etmek için her bir

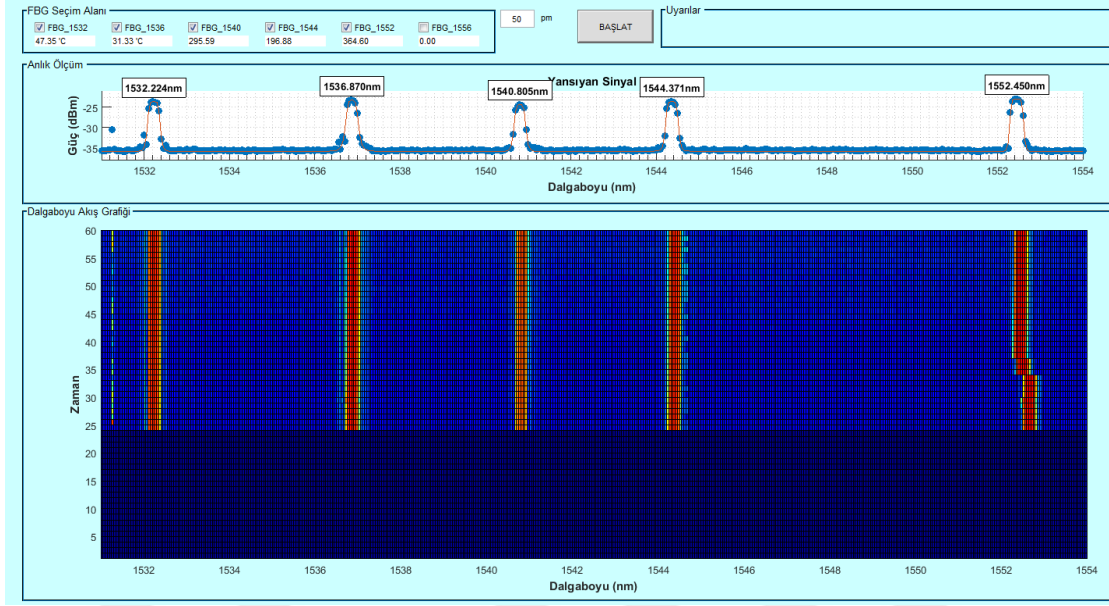
sinyalden 25 örnek alınmıştır. Yani her 50 pm'lik optik tarama adımı, fotodedektörün çıkışında yaklaşık olarak 8mV'luk bir değişime karşılık gelmektedir. Bu şekilde elde edilen ΔV değerleri ile $\Delta \lambda$ hesaplanmış ve FBI'nın üretim özelliklerine göre değişen kompanzasyon katsayıları da dikkate alınarak, dalga boyuna denk gelen sıcaklık ya da gerilme değişimleri tespit edilmiştir.

Gaussian uyarılama ile merkez dalgaboyu elde edilen ve Kalman filtre yardımı ile kararlı hale getirilen ölçüm sonuçları kaydedilmiş ve grafik arayüze aktarılmıştır. Kullanıcı grafik arayüzü içerisinde her ölçümü görebilmek için, anlık FBI bant grafiği, bant akış grafiği, işlenmiş ölçüm değerleri bulunmaktadır. Ölçümün kontrolü için giriş tarama başlangıç-bitiş değerleri ve adım değerleri grafik arayüzde tanımlanabilmektedir. İşlemleri başlatmak için ise geçiş butonu kullanılmaktadır. Sistem çalışırken bu butonun durumu sürekli kontrol edilmektedir. Bu buton pasif olduğunda işlem durdurulmaktadır.

FBI ile gerilme ölçümü için bir demiryolu rayı kullanılmıştır. Bu çalışmada raya uygulanan her bir gerilme değerine karşılık dalgaboyunda oluşan kaymalar incelenerek, lineer regresyon ile dalgaboyu-gerilme ilişkisi hesaplanmıştır. Bu şekilde raya uygulanan kuvvet nedeniyle FBI'da oluşan dalgaboyu değişimleri ve gerilme değişimleri gerçek zamanlı olarak izlenmiştir.

FBI ile sıcaklık ölçümünde ise termal ortam olarak blok ısıtıcı kullanılmıştır. Her bir sıcaklık değişiminde kararlı ölçüm alabilmek için 15 dakika süreyle beklenildikten sonra optik sinyaller kaydedilmiştir.

Tespit edilen bu sıcaklık ve gerilme değerleri sinyal işleme teknikleri kullanılarak oluşturulan gerçek zamanlı kullanıcı arayüzü vasıtasıyla monitör edilmiş ve FBI bandının izlenmesi sağlanmıştır. Bu arayüz Şekil 6.6'da görülmektedir. Arayüzde dizi halinde kullanılan her bir FBI ayrı ayrı ya da birlikte seçilerek ölçüm süreleri, adım aralığı ve tarama tipleri denenmiştir.

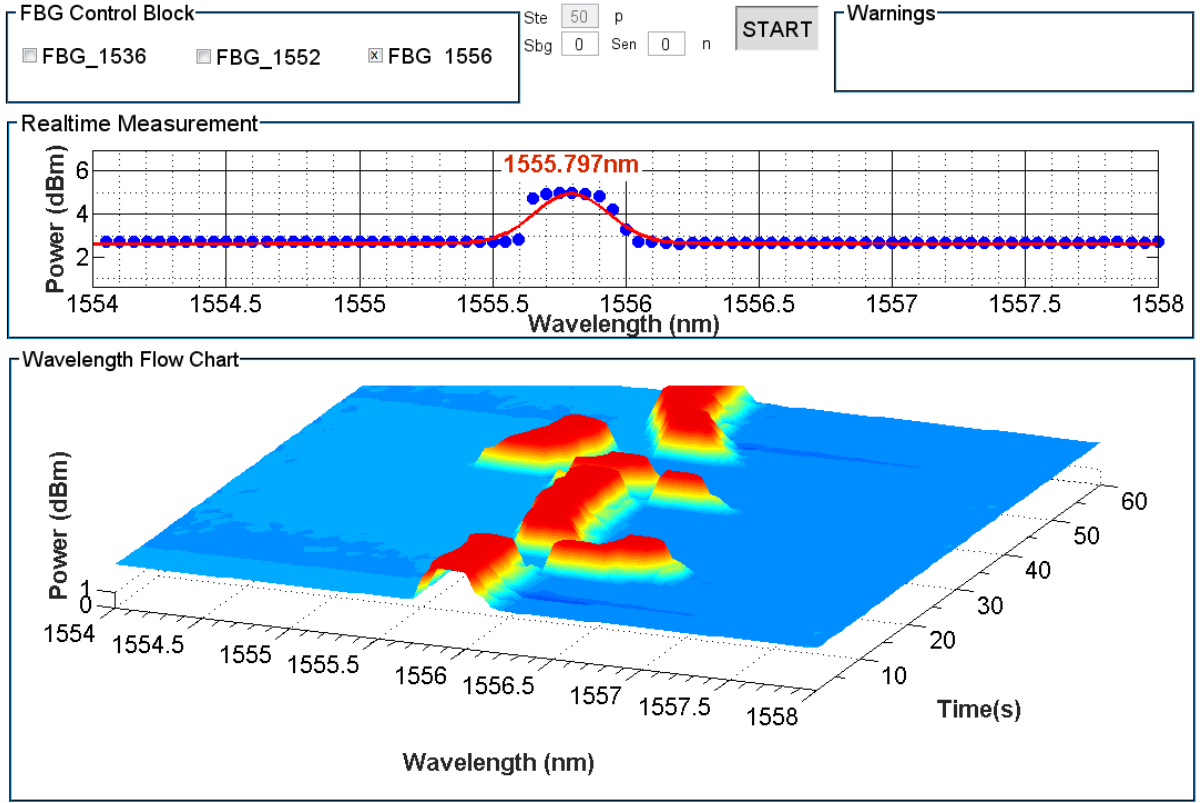


Şekil 6.6. FBI sensör sistemi için tasarlanan kullanıcı arayüzü

Şekil 6.6’da görülen arayüzün sol üst köşesinde kullanılan FBI’lar dalgaboyları ile birlikte gösterilmiştir. Bu kısımdan izlenmek istenen FBI’lar seçilebilmektedir. Hemen altında ise anlık ölçümler görülmektedir. Şekil 6.6’da kullanılan 1532 nm ve 1536 nm merkez dalgaboylarına sahip FBI’lar sıcaklık, 1540 nm, 1544 nm ve 1552 nm merkez dalgaboylarına sahip FBI’lar ise gerilme ölçmektedir. İlgili FBI’nın hemen altında ise hesaplanan sıcaklık ve gerilme değerleri görülmektedir. Bu alanın hemen sağında adım aralığının pm (pikometre) olarak seçilmesi için bir bölüm bulunmaktadır. Bunun yanında başlat düğmesi ile sağında uyarılar bölümü bulunmaktadır.

Bu arayüzde FBI’lar iki ayrı grafik ile takip edilmiştir. Üst kısımdaki “Anlık Ölçüm” grafiğinde FBI’ların adımları, Gaussian ve merkez dalgaboyları görülmektedir. Hemen altındaki grafikte ise üst kısımdaki grafiğin zamana göre akışı gösterilmiştir.

Şekil 6.7’de ise gerilme ölçümünde kullanılan ve tek bir FBI sensör için oluşturulan üç boyutlu gerçek zamanlı ölçüm diyagramı görülmektedir. Gerçek zamanlı ölçüm diyagramında x eksenı FBI’nın dalgaboyunu, y eksenı ise bu dalgaboyuna karşılık gelen fotodetektörden ölçülen gücü göstermektedir. Gerçek zamanlı ölçümün hemen altında ise 60 sn süreyle ölçülen değerlerin üç boyutlu akış diyagramı görülmektedir. Bu akış diyagramında x eksenı her bir gerilme değerine karşılık gelen dalgaboyunu, y eksenı zamanı, z eksenı ise her bir gerilme değerinde ölçülen sinyalin gücünü göstermektedir.



Şekil 6.7. Bilgisayar kullanıcı arayüzü ile gerilme ölçümü [115]

Şekil 6.7’de görülen çalışmada 1556 nm merkez dalgaboyuna sahip FBI kullanılarak laboratuvar ortamında gerilme ölçümü yapılmıştır. Gerilme ölçümü için bir demiryolu rayı kullanılmıştır. Bu gerilme ölçümünde uygulanan kuvvete karşılık formülasyon kullanılarak hesaplanan gerilme değeri ile yazılım aracılığıyla ölçülen değerler karşılaştırılmıştır. Bu ray tipi için, uygulanan kuvvete karşılık, ölçülen ile hesaplanan değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür [115].

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde FBI algılama sistemlerinin sinyal gürültü oranında iyileştirme, sensörün dalgaboyundaki değişimin hızlı ölçülebilmesi, tek bir sorgulayıcı ile daha fazla sensörden algılama yapılabilmesi, daha hassas ve kararlı ölçümler alınabilmesi gibi konularda çalışmalar devam etmekte ve güvenlik alanında FBI sensörler ile yeni çözümler araştırılmaktadır. Bu tez çalışmasında, tasarlanan FBI tabanlı sensör sistemi ile sıcaklık ve gerilme ölçümünde hassas ve kararlı ölçümler almak ve sensör sisteminin başarımını artırmak için benzetim uygulanmış ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde fiber teknolojisi ile dağıtık ve noktasal algılamalı fiber optik sensör sistemleri incelenmiştir. Bu bölümde FBI'ların teorisi, üretim teknikleri, algılama yöntemleri ve FBI sensörlerde çoğullama yöntemleri incelenmiştir.

Dördüncü bölümde FBI ile sıcaklık ve gerilme algılama sistemleri ile bu sensörlerin demiryolu uygulamaları incelenmiştir.

Beşinci bölümde tez konusu FBI tabanlı algılama sistemlerinin tasarım başarımını artırmak için yapılan benzetim ile tasarlanan ve deneysel olarak gerçekleştirilen FBI tabanlı sıcaklık ve gerilme sensör sistemleri anlatılmıştır.

Altıncı bölümde FBI algılama sistemleri için gerçekleştirilen sinyal işleme adımları incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında FBI tabanlı sensör sistemi teorik ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Deneysel olarak yapılan çalışmalarda ALK ve GBLK kullanılarak FBI sensörü ve sensör dizileri ile bunlara ait sorgulama sistemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen sensör sistemleri ile gerilme ve sıcaklık ölçümü için farklı uygulamalar geliştirilmiştir.

Sıcaklık ölçümü için yapılan deneysel çalışmalarda tekli ve dizi halinde FBI sensör sistemleri tasarlanmış ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Farklı hassasiyetlere sahip seramik ve metal kaplamalı FBI'lar termal ortam içerisine konularak, her bir sıcaklıkta 15 dakika süreyle bekletilerek sıcaklık değişimi ile Bragg dalgaboyunda meydana gelen

değişimler gözlemlenmiştir. Bu dalgaboyu değişimleri ile sıcaklık hesaplamaları yapılmış ve maksimum 0.5 °C'lik sapma ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Gerilme ölçümü için gerçekleştirilen deneysel çalışmada ise kullanılan metal kaplamalı FBI ile demiryolu rayının gerilme ölçümü için bir uygulama geliştirilmiştir. R260 sertliğe ve kaliteye sahip 49E1 tipi bir demiryolu rayına bir adet FBI kaynak yapılarak monte edilmiştir. Raya kuvvet uygulamak için Ray Eğme Test Cihazı kullanılmıştır. 0-200 kN kuvvet aralığında rayda oluşan gerilme FBI ile ölçülmüştür. Bu ray tipi için uygulanan kuvvet ve malzeme özelliklerine göre hesaplanan gerilme değerleri, deneysel olarak elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Ölçülen ile hesaplanan değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür. 100 kN'a kadar uygulanan kuvvetlerde ölçülen ve hesaplanan gerilme değerleri arasında küçük sapmalar oluşurken, kuvvet arttıkça sapmanın da arttığı gözlemlenmiştir. Bu sapmanın 200 kN'a yaklaştıkça maksimum %2.5 oranında gerçekleştiği görülmüştür. Dalgaboyu ile gerilme değişimi arasında ise yaklaşık olarak 1.38 pm/ $\mu\epsilon$ 'lik bir ilişki olduğu hesaplanmıştır.

ALK ve GBLK kullanılarak oluşturulan sensör sistemleri karşılaştırıldığında, GBLK kullanılarak oluşturulan sensör sistemlerinin daha hızlı olduğu, ancak özellikle sensör dizilerinde yansıyan sinyalin zayıfladığı gözlemlenmiştir. ALK kaynak kullanılarak oluşturulan sensör sistemlerinde ise bu çıkış sinyal gücündeki zayıflamanın daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte GBLK ile sensörün dalgaboyundaki değişimlerin ALK'ya göre daha hızlı ölçülebildiği gözlemlenmiştir. GBLK ile daha geniş bir bantta çalışmak mümkün olduğundan ALK'ya göre bir kanala daha fazla sensör bağlanabilmektedir. ALK'da ise sinyal gürültü oranı daha iyi olduğundan daha hassas sonuçlar alınabilmektedir. Bu nedenle hızın önemli olduğu uygulamalarda GBLK, daha hassas ölçümlerin önemli olduğu uygulamalarda ise ALK kullanmak daha uygun olacaktır.

FBI'lar ile yapılan ölçümlerde seramik ve metal kaplama gibi üretim özelliklerinden dolayı farklı ölçüm katsayıları elde edilmiştir. Gerçek zamanlı sensör uygulamalarında doğru ölçümlerin yapılabilmesi için bu ölçüm katsayılarının bilinmesi tasarımcıya büyük kolaylık sağlayacaktır.

Deneysel çalışmalarda FBI ile alınan ölçümlerin gerçek zamanlı takibi için de özgün bir arayüz tasarlanmıştır. FBI sensörlerden yansıyan sinyalin merkez dalgaboyunu belirlemek

için Gaussian uyarılama yöntemi kullanılmıştır. ALK ile yapılan çalışmalarda farklı tarama adımları seçilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Tarama adımları küçük seçildiğinde daha hassas ölçümler alınabilmekle birlikte, tarama zamanı uzun olmakta ve anlık değişimlerin takibi zorlaşmaktadır. Tarama adımları çok büyük seçildiğinde ise çok kısa sürede ölçüm almak mümkün olmakta, ancak hassas sonuçlar alınamamaktadır. Yapılan farklı çalışmalardan sonra en uygun adım aralığının 50 pm olduğu gözlemlenmiş ve bu yöntemle yaklaşık 300-400 pm'lik bir FBI dalgaboyu bandı en az 6-8 noktadan gözlemlenmiştir. Böylece FBI bandı boyunca her 50 pm'ye karşılık gelen güç değerleri ölçülerek sinyalin tepe noktası bulunmuştur. Sinyalin tepe noktası belirlendikten sonra, sıcaklık ve gerilme değişimleri sonucunda sinyalde meydana gelen kaymalar algılanmış ve grafik arayüze aktarılmıştır. Bu grafik arayüzde FBI sensörün gerçek zamanlı dalgaboyu-güç grafiği ile 60 saniyelik iki boyutlu dalgaboyu-zaman ve üç boyutlu zaman-dalgaboyu-güç akış diyagramları oluşturulmuştur. Geliştirilen sinyal işleme yazılımı ve tasarlanan arayüz ile kararlı ölçümler alınabilmektedir. Oluşturulan FBI sorgulayıcı basit, ergonomik, kullanıcı dostu ve gerçek zamanlı olarak pratikte uygulanabilir bir sistemdir.

Tasarlanan, deneysel olarak gerçekleştirilen ve gerçek zamanlı kullanıcı arayüzü ile desteklenen FBI sıcaklık ve gerilme sensörleri ile demiryolu güvenliği için önem arz eden birçok bileşenin durumunu izlenebilecektir. Tek bir sorgulayıcı ile uzun demiryolu hatlarındaki birçok bileşeni, fiber optik sensörler ile aynı anda izlemek mümkün olmaktadır. FBI sensörler ile demiryollarında raylar ile trenler arasındaki etkileşimin algılanması, tekerleklerdeki apleti durumlarının tespiti, aks sayma ile tren dedeksiyonu ve hız tespiti, viyadük ve tünel gibi sanatsal yapıların durumlarının izlenmesi, katener-pantograf ilişkisinin izlenmesi, tünel sıcaklıklarının izlenmesi gibi bir çok alanda, uygun maliyetli uygulama geliştirmek mümkündür. Bununla birlikte optik sensör teknolojisinin demiryollarında yaygınlaşabilmesi için, başlıca demiryolu işletmecileri tarafından yeterli saha çalışmaları yapılarak güvenlik standartlarının oluşturulması gerekmektedir.



KAYNAKLAR

1. Rajan, G. (2015). *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications*. Florida: CRC Press, 208–245.
2. Heininger, H. (2013). *Interrogation of Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications Using Widely Tunable Laser*, Phd Thesis, Brno University of Technology, Brno.
3. Cuadrado-Laborde, C. (2013). *Current Trends in Short and Long Period Fiber Bragg Gratings*. London: Intech Press, Chapter 1, 1-24.
4. Erdogan, T. (1997). Fiber grating spectra. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1277–1294.
5. Yücel, M., Göktaş, H. H., and Öztürk, N. F. (2014). *The fiber optical sensing based on Brillouin scattering*. In IEEE 22th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Trabzon, 838-841.
6. Yücel, M., Öztürk, N. F., and Göktaş, H. H. (2015). *The analyzes of the Brillouin scattering for the different fiber types*. IEEE 23th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Malatya, 632-635.
7. Yücel, M., Yücel, M., Gündüz, A. E., Göktaş, H. H., and Öztürk, N.F. (2016). *Using single-mode fiber as temperature sensor*. In Signal Processing and Communications Applications Conference, Zonguldak, 461-464.
8. Yücel, M., Gündüz, A. E., Torun, M., Öztürk, N. F., and Göktaş, H. H. (2017). *Effect of EDFA power on Brillouin power spectrum*. In Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), 2017 4th International Conference, Ankara, 18-22.
9. Wei, H., Cheng, H. B., Mei, J. C., and Jiang, D. S. (2002). *Direct measurement of strain-optic effect in fiber Bragg gratings*. In 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 171-174.
10. Ye, X. W., Su, Y. H., and Han, J. P. (2014). Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review. *Scientific World Journal*, 1-11.
11. Poeggel, S., Tosi, D., Duraibabu, D., Leen, G., McGrath, D., and Lewis, E. (2015). Optical fibre pressure sensors in medical applications. *Sensors*, 15(7), 17115–17148.
12. Durana, G., Kirchhof, M., Lubber, M., Ocariz, I. S., Poisel, H., Vazquez, C., and Zubia, J. (2009). Use of a novel fiber optical strain sensor for monitoring the vertical deflection of an aircraft flap. *IEEE Sensors Journal*, 9(10).
13. Li, S., and Chen, S. (2017). Structural health monitoring of Maglev guideway PC girders with distributed long-gauge FBG sensors. *Structural Control Health Monitoring*, 25(1).

14. Qiao, X., Shao, Z., Bao, W., and Rong, Q. (2017). Fiber Bragg grating sensors for the oil industry. *Sensors*, 17(3), 429-445.
15. Liang, M., and Fang, X. (2018). Application of fiber Bragg grating sensing technology for bolt force status monitoring in roadways. *Applied Sciences*, 8(1), 107-119.
16. Ou, W.W.L. (2009). *Fiber Bragg Grating Strain Sensors for Railway Applications*, Master Thesis, University of Illinois, Chicago.
17. Filograno, M.L. Rodriguez, A., and Gonzalez, M., (2012). Real time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors. *IEEE Sensors Journal*, 12(1), 85-92.
18. Boccione, M., Bucca, G., Collina, A., and Comolli, L. (2013). Pantograph-catenary monitoring by means of fiber bragg grating sensors: Results from tests in an underground line. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 41(1-2), 226-238.
19. Wei, C., Lai, C., Lui, S., Chung, W.H., Ho, T.K., and Tam, H.Y. (2010). A fiber Bragg grating sensor system for train axle counting. *IEEE Sensors Journal*, 10(12), 1905-1912.
20. Kang, D., Kim, D., and Jang, S. (2012). Design and development of structural health monitoring system for smart railroad-gauge-facility using FBG sensors. *Experimental Techniques*, 38(5), 39-47.
21. Chung, W. H., Tam, H. Y., Wai, P.K.A., and Khandelwal, A. (2006). Time- and wavelength-division multiplexing of FBG sensors using a semiconductor optical amplifier in ring cavity configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17, 2709 – 2711.
22. Peng, P.C., Lin, J.H., Tseng, H.Y., and Chi, S. (2004). Intensity and wavelength-division multiplexing FBG sensor system using a tunable multiport fiber ring laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16, 230 – 232.
23. Rao, Y.J., Lobo Ribeiro, A.B., Jackson, D.A., Zhang, L., and Bennion, I. (1996). Simultaneous spatial, time and wavelength division multiplexed in-fibre grating sensing network. *Optics Communications*, 125(1-3), 53-58.
24. Dai, Y., Zhang, Z., Leng, J., and Asundi, A. (2009). *A novel fiber Bragg grating sensor interrogator based on time division multiplexing technique*. In Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, Weihai, China.
25. Wu, Q., Wang, P., Semenova, Y., and Farrell, G. (2010). A study of the effect of the position of an edge filter within a ratiometric wavelength measurement system. *Measurement Science and Technology*, 21(9).
26. Luo, Z., Wen, H., Guo, H., and Yang, M. (2013). A time and wavelength division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings. *Optics Express*, 21(19), 22799-22807.
27. Koo, K.P., and Kersey, A.D. (1995). Bragg grating based laser sensors systems with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing. *Journal of Lightwave Technology*, 13(7), 1243 - 1249.

28. Dong, B., He, S., Hushu, Y., Tianda, W., Lvjun, F., Guo, T., and Zhao, Q. (2007). Combined time and wavelength division multiplexing demodulation technique of fiber grating sensor arrays using a tunable pulsed laser. *Applied Optics*, 46(7), 1015-1018.
29. Bigue, J. (1997). *Development of a Novel Serially Multiplexed Fiber Bragg Grating Sensor System Using Fourier Analysis*, Master Thesis, University of Toronto, Toronto.
30. Kersey, A.D., Davis, M.A., Patrick, H.J., LeBlanc, M., Koo, K.P., Askins, C.G., Putnam, M.A., and Friebele, E.J. (1997). Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1442-1463.
31. Chi, J.C.C. (2000). *Interrogation of Fiber Bragg Grating Sensors With a Tunable Laser Source*, Phd Thesis, Polytechnic University, Hong Kong.
32. Zhou, D.P., Wei, L., Liu, W.K., and Lit, J. W. Y. (2008). Simultaneous measurement of strain and temperature based on a fiber Bragg grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror. *Optics Communications*, 281(18), 4640-4643.
33. Tong, Z., Zhao, J., and Yang, X. (2011). Simultaneous measurement of axial strain and temperature using a PM fiber Bragg grating. *Microwave and Optical Technology Letters*, 53(4), 867-870.
34. Chehura, E., James, S.W., and Tatam, R.P. (2007). Temperature and strain discrimination using a single fibre Bragg grating. *Optics Communications*, 275(2), 344-347.
35. Zhou, D.P., Wei, L., Liu, W.K., Y. Liu, Y., and Lit, J.W.Y. (2008). Simultaneous measurement for strain and temperature using fiber Bragg gratings and multimode fibers. *Applied Optics*, 47(10), 1668-1672.
36. Mondal, S.K., Mishra, V., Tiwari, U., Poddar, G.C., Singh, N., Jain, S.C., Sarkar, S.N., and Kapur, P. (2009). Embedded dual fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of temperature and load (strain) with enhanced sensitivity. *Microwave and Optical Technology Letters*, 51(7), 1621-1624.
37. He, J., Zhou, Z., and Ou, J. (2013). Optic fiber sensor-based smart bridge cable with functionality of self-sensing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 35(1-2), 84-94.
38. Baker, S.N., Rourke, H.N., Baker, V., and Goodchild, D. (1997). Thermal decay of fiber Bragg gratings written in boron and germanium codoped silica fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1470-1477.
39. Canning, J. (2008). Fibre gratings and devices for sensors and lasers. *Laser Photonics Reviews*, 2(4), 275-289.
40. Bandyopadhyay, S., Canning, J., Stevenson, M., and Cook, K. (2008). Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm. *Optics Letters*, 33(16), 1917-1919.

41. Shen, R.S., Zhang, J., Wang, Y., Teng, R., Wang, B.Y., Zhang, Y.S., Yan, W.P., Zheng, J., and Du, G.T. (2008). Study on high temperature and high pressure measurement by using metal coated FBG. *Microwave and Optical Technology Letters*, 50(5), 1138-1140.
42. Sohn, K.R., and Shim, J. H. (2009). Liquid level monitoring sensor systems using FBG embedded in cantilever. *Sensors and Actuators A:Physical*, 152(2), 248–251.
43. Sengupta, D., and Kishore, P. (2014). Continuous liquid level monitoring sensor system using fiber Bragg grating. *Optical Engineering*, 53(1).
44. Su, Y., Zhu, Y., Zhang, B., Li, J., and Li, Y. (2011). Use of the polarization properties of magneto-optic fiber Bragg gratings for magnetic field sensing purposes. *Optical Fiber Technology*, 17(3), 196–200.
45. Bao, H., Dong, X., Shao, L.Y., Zhao, C.L., and Jin, S. (2010). Temperature-insensitive 2-D tilt sensor by incorporating fiber Bragg gratings with a hybrid pendulum. *Optics Communications*, 283(24), 5021–5024.
46. Aneesh, R., Maharana, M., Munendhar, P., Tam, H.Y., and Khijwania, S.K. (2011). Simple temperature insensitive fiber Bragg grating based tilt sensor with enhanced tunability. *Applied Optics*, 50(25), E172–E176.
47. Villalba, S. and Casas, J.R. (2013). Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 39(1-2), 441-451.
48. Wei, C., Xin, Q., Chung, W.H., Liu, S., Tam, H., and Ho, S.L. (2012). Real time train wheel condition monitoring by fiber grating sensors. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(1).
49. Carlos, R., Carlos, F., Armindo, L., and Figueiras, J. (2010). Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges. *Engineering Structures*, 32 (8), 1993-2002.
50. Tiwari, U., Thyagarajan, K., Shenoy, M.R., and Jain, S.C. (2013). EDF-based edge-filter interrogation scheme for FBG sensors. *IEEE Sensors Journal*, 13(4), 1315–1319.
51. Tam, H. Y., Lee, T., Ho, S.L., Haber, T., Graver, T. and Mendez, A. (2007). *Utilization of fiber optic Bragg grating sensing systems for health monitoring in railway applications*. 6th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA.
52. Miloyevic, A., Tomic, M., and Pavlovic, N.T. (2012). *Application of FBG sensor in smart railway*. Scientific-Expert Conference on Railways (RAILKON), Nis, Serbia, October 4-5, 2012.
53. Ho, T. K., Liu, S. Y., Lee, K. Y., Ho, Y. T., Ho, K. H., McCusker, A., Kam, J., Tam, H. Y., and Ho, S. L. (2009). An investigation of rail condition monitoring by fibre Bragg grating sensors. *HKIE Transactions*, 16(2), 9-15.

54. Zhang, Z., Yan, L., Pan, W., Luo, B., Wang, P., Guo, L., and Zhou, W. (2012). Sensitivity enhancement of strain sensing utilizing a differential pair of fiber Bragg gratings. *Sensors*, 12(4), 3891–3900.
55. Kisala P., and Cieszczyk S. (2015). Method of simultaneous measurement of two direction force and temperature using FBG sensor head. *Applied Optics*, 54(10), 2677-2687.
56. Zimmerman, A.C., Veiga, C.L.N., and Encinas, L.S. (2008). Unambiguous signal processing and measuring range extension for fiber Bragg gratings sensors using artificial neural networks – a temperature case. *IEEE Sensors Journal*, 8(7), 1229-1235.
57. Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K., and Bhattacharya, D.K. (2008). Fiber Bragg gratings in structural health monitoring—present status and applications. *Sensors and Actuators*, 147, 150-164.
58. Sun, A., Farrell, G., Semenova, Y., Chen, B., Li, G., and Lin, Z. (2011) The distributed dynamic combined – stresses measurement of ship thruster inner-skin using fiber Bragg grating sensor rosette array. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 122(19), 1779-1781.
59. Chan, C.C., Ni, N., Sun, J., Chu, Y.C., Tang, Y., and Poh, C.L. (2010). Interferometric noise suppression in fiber Bragg grating sensors by using wavelet filter. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 12(6), 1241-1246.
60. Lim, J., Yang, Q., Jones, B.E., and Jackson, P.R. (2002). Strain and temperature sensors using multimode optical fiber Bragg gratings and correlation signal processing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51(4), 622-627.
61. Gong, J.M., Chan, C.C., Jin, W., MacAlpine, J.M.K., Zhang, M., and Liao, Y.B. (2002). Enhancement of wavelength detection accuracy in fiber Bragg grating sensors by using spectrum correlation technique. *Optics Communications*, 212, 29-33.
62. Negri, L., Nied, A., Kalinowski, H., and Paterno, A. (2011). Benchmark for peak detection algorithms in fiber Bragg grating interrogation and a new neural network for its performance improvement. *Sensors*, 11(4), 3466-3482.
63. Posseti, G.R.C., Kamikawachi, R.C., Muller, M., and Fabris, J.L. (2012). Metrological evaluation of optical fiber grating based sensors: an approach toward the standardization. *Journal of Lightwave Technology*, 30(8), 1042-1052.
64. Zhao, X., Lv, X., Wang, L., Zhu, Y., Dong, H., Chen, W., Li, J., Ji, B., and Ding, Y. (2015). Research of concrete residual strains monitoring based on WLI and FBG following exposure to freeze–thaw tests. *Cold Regions Science and Technology*, 116, 40–48.
65. Tang, Y., Chu, Y.C., Chan, C.C., and Sun, J. (2007). Nonlinear least squares algorithm with embedded Kalman filter for Bragg wavelength detection in fiber Bragg grating sensors. *Optoelectronics and Advanced Materials- Rapid Communications*, 1(4), 145-148.

66. Yun, S.H., Richardson, D.J., and Kim, B.Y. (1998). Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser. *Optics Letters*, 23(11), 843-845.
67. Paterno, A.S., Silva, J.C.C., Milczewski, M.S., Arruda, L.V.R., and Kalinowski, H.J. (2006). Radial-basis function network for the approximation of FBG sensor spectra with distorted peaks. *Measurement Science and Technology*, 17(5), 1039-1045.
68. Chan, C.C., Shi, C.Z., Jin, W., and Wang, D.N. (2003). Improving the wavelength detection accuracy of FBG sensors using an ADALINE network. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(8), 1126-1128.
69. Lee, H.W., Park, H.J., Lee, J.H., and Song, M. (2007). Accuracy improvement in peak positioning of spectrally distorted fiber Bragg grating sensors by Gaussian curve fitting. *Applied Optics*, 46(12), 2205-2208.
70. Dyer, S.D., Williams, P.A., Espejo, R.J., Kofler, J.D., and Etzel, S.M. (2005). Fundamental limits in fiber Bragg grating peak wavelength measurements. *Proceedings of SPIE*, 5855, 88-93.
71. Bodendorfer, T., Muller, M., Hirth, F., and Koch, A. (2009). Comparison of different peak detection algorithms with regards to spectrometric fiber Bragg grating interrogation systems. In Proceedings of International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT 2009), Istanbul, Turkey.
72. Allwood, G., Wild, G., and Hinckley, S. (2017). Fiber Bragg grating sensors for mainstream industrial processes. *Electronics*, 6(4), 92.
73. Catalano, A., Bruno, F.A., Galliano, C., Pisco, M., Persiano, G.V., Cutolo, A., and Cusano, A. (2017). An optical fiber intrusion detection system for railway security. *Sensors and Actuators A: Physical*, 253, 91-100.
74. Allwood, G., Wild, G., and Hinckley, S. (2016). Optical fiber sensors in physical intrusion detection systems: a review. *IEEE Sensors Journal*, 16(14), 5497-5509.
75. Cui, J., Feng, K., Hu, Y., Li, J., and Tan, J. (2014). A twin fiber Bragg grating probe for the dimensional measurement of microholes. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(17), 1778-1781.
76. Allwood, G., Wild, G., and Hinckley, S. (2017). Universal signal conditioning technique for fiber Bragg grating sensors in PLC and SCADA applications. *Instruments*, 1(1), 7.
77. Wild, G., and Richardson, S. (2015). Analytical modeling of power detection-based interrogation methods for fibre Bragg grating sensors for system optimization. *Optical Engineering*, 54(9), 97109.
78. Cui, J., Hu, Y., Feng K., Li J., and Tan J. (2015). FBG Interrogation method with high resolution and response speed based on a reflective-matched FBG scheme. *Sensors*, 15(7), 16516-16535.
79. Kim, S.T., Park, Y., Park, S.Y., Cho, K., and Cho, J.R. (2015). A sensor-type PC strand with an embedded FBG sensor for monitoring prestress forces. *Sensors*, 15(1), 1060-1070.

80. Potts, C., Allen, T.W., Azar, A., Melnyk, A., Dennison, C.R., and DeCorby, R.G. (2014). Wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors using tapered hollow Bragg waveguides. *Optics Letters*, 39, 5941–5944.
81. Ganziy, D., Rose, B., Bang, O. (2016). Performance of low-cost few-mode fiber Bragg grating sensor systems: polarization sensitivity and linearity of temperature and strain response. *Applied Optics*, 55(23), 6156–6161.
82. Qian, M., Yu, Y., Ren, N., Wang, J., and Jin, X. (2018). Sliding sensor using fiber Bragg grating for mechanical fingers. *Optics Express*, 26(1), 254-264.
83. Triana, A., Pastor, D., and Varon, M. (2017). A code division design strategy for multiplexing fiber Bragg grating sensing networks. *Sensors*, 17(11), 2508.
84. Ye, X.W., Ni, Y.Q., and Yin, J.H. (2013). Safety monitoring of railway tunnel construction using FBG sensing technology. *Advances in Structural Engineering*, 16(8), 1401-1410.
85. Wang, P., Xie, K., Shao, L., Yan, L., Xu, J., and Chen, R. (2015). Longitudinal force measurement in continuous welded rail with bi-directional FBG strain sensors. *Smart Materials and Structures*, 25(1), 1-10.
86. Wang, C.Y., Tsai, H.C., Chen, C.S, and Wang, H.L. (2011). Railway track performance monitoring and safety warning system. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25(6), 577-586.
87. Lai, C.C., Kam, J.C.P., Leung, D.C.C., Lee, T.K.Y., Tam, A.Y.M., Ho, S. L., Tam, H. Y., and Liu, M.S.Y., (2012). Development of a fiber-optic sensing system for train vibration and train weight measurements in Hong Kong. *Journal of Sensors*, 2012, 1-7.
88. Roman, J.E.P., Souto, J.A.G., Poiana, D.A., and Acedo, P. (2016). Fast interrogation of fiber Bragg gratings with electro-optical dual optical frequency combs. *Sensors*, 16(12), 1-11.
89. Ghetia, S., Gajjar, R., and Triverdi, P. (2013). Classification of fiber optical sensors. *International Journal of Electronics Communication and Computer Technology*, 3(4), 442-445.
90. Tracey, P.M. (1991). Intrinsic fiber-optic sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 27(1), 96-98.
91. Fidanboylu, K., and Efendioglu, H.S. (2009). *Fiber optic sensors and their applications*. 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), Karabuk, Turkey.
92. Nascimento, I. M., Baptista, J. M., Jorge, P. A. S., Cruz, J. L., and Andres, M. V. (2015). Passive interferometric interrogation of a magnetic field sensor using an erbium doped fiber optic laser with magnetostrictive transducer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 227-235.

93. Ahmed, F., Ahsani, V., Melo, L., Wild, P., and Jun, M. B. (2016). Miniaturized tapered photonic crystal fiber Mach–Zehnder interferometer for enhanced refractive index sensing. *IEEE Sensors Journal*, 16(24), 8761-8766
94. Froggatt, M. E., Gifford, D.K., Kreger, S.T., Wolfe, M.S., and Soller, B. J. (2006). *Distributed strain and temperature discrimination in unaltered polarization maintaining fiber*. Optical Fiber Sensors Conference, Cancun, Mexico.
95. Berkovic, G., Rotter, S., and Shafir, E. (2002). Wavelength-modulated fiber optic sensor for high precision displacement measurement. *Review of Scientific Instruments*, 73(10).
96. Yücel, M., Torun, M., Öztürk, N. F. and Göktaş, H. H. (2017). *Brillouin scattering based fiber optic strain sensor*. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Antalya, 1-4.
97. Yücel, M., Göktaş, H. H., Öztürk, N. F. and Gündüz, A. E. (2017). Experimental analysis of the temperature dependence of the Brillouin gain spectrum in short-length single-mode fiber. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(5), 3881-3891.
98. Yücel, M., Yücel, M., Öztürk, N. F., Göktaş, H. H., Gemci, C. and Çelebi, F. V. (2015). The effects of signal level of the microwave generator on the Brillouin gain spectrum in BOTDA and BOTDR. World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 10(1), 23-27.
99. Yücel, M., Öztürk, N. F., Yücel, M., Göktaş, H.H. (2018). *Design of a multiple fiber Bragg sensor define of temperature parameters of the fiber Bragg gratings*. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), İzmir.
100. Yücel, M. (2018). *Brillouin Saçılması Tabanlı Fiber Optik Sensör Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, Türkiye.
101. Onoufriou, A., Kalli, K, and Kohnke, G.E. (2000). Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. *Physics Today*, 53(5).
102. Kashyap, R. (2009). *Fiber Bragg Gratings (2nd edition)*. California: Academic Press.
103. Hill, K.O., Malo, B., Bilodeau, F., Johnson, D.C., Albert, J. (1993). Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask. *Applied Physics Letters*, 62(10), 1035–1037.
104. Malo, B., Hill, K. O., Bilodeau, F., Johnson, D. C., and Albert, J. (1993). Point-by-point fabrication of micro-Bragg gratings in photosensitive fibre using single excimer pulse refractive index modification techniques. *Electronics Letters*, 29(18), 1668–1669.
105. Navruz, İ. (2006). *Uzun Mesafeli ve Yüksek Hızlı Fiberoptik Haberleşme Sistemlerinde Optik İzgara Tabanlı Dispersiyon Kompanzasyonu*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, Türkiye.

106. Hill, K.O., and Meltz, G. (1997) Fiber Bragg grating technology – fundamentals and overview. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1263-1276.
107. Marais, J.J., and Mistry, K.C. (2003). Rail integrity management by means of ultrasonic testing. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 26(10), 931-938.
108. Bucca, G., Collina, A., Manigrasso, R., Mapelli, F., and Tarsitano, D. (2011). Analysis of electrical interferences related to the current collection quality in pantograph–catenary interaction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(5), 483–499.
109. Öztürk, N.F. (2012). *Hafif Raylı Sistemlerde PLC ile Makas Otomasyonu*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.
110. Kouroussis, G., Kinet, D., Moeyaert, V., Dupuy, J., and Caucheteur, C. (2016). Railway structure monitoring solutions using fibre Bragg grating sensors. *International Journal of Rail Transportation*, 4(3).
111. Hussaini, K, Indraratna, B., and Vinod, J.S. (2015). Application of optical-fiber Bragg grating sensors in monitoring the rail track deformations. *Geotechnical Testing Journal*, 38(4), 387-396.
112. Yücel, M., Öztürk, N.F., Göktaş, H. H., and Gündüz, A. E. (2016) *Design of a fiber Bragg grating based temperature sensor*. In Signal Processing and Communications Applications Conference, Zonguldak, 669-672.
113. Yücel, M., Öztürk, N.F., and Gemci, C. (2016). *Design of a fiber Bragg grating multiple temperature sensor*. Sixth International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP), Konya, Turkey.
114. Yücel, M., Öztürk, N.F. ve Torun, M. (2017). Fiber bragg ızgara sensör dizisi tabanlı sıcaklık ölçüm sistemi tasarımı ve uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 957-964.
115. Yücel, M., and Öztürk, N.F. (2017). Real-time monitoring of railroad track tension using a fiber Bragg grating-based strain sensor. *Instrumentation Science & Technology*, 1-15.
116. Yücel, M., Öztürk, N.F., Yücel, M., and Göktaş, H.H. (2018). *Implementation and design of fiber Bragg grating based rail strain measurement system*. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), İzmir.
117. Ghosh, C., Alfred, Q.M., and Ghosh, B. (2015). Spectral Characteristics of Uniform Fiber Bragg Grating With Different Grating Length and Refractive Index Variation. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 3(1).
118. Li, Y., Xie, Y., and Yao, G. (2010). *Comparison of peak searching algorithms for wavelength demodulation in fiber Bragg grating sensors*. IEEE 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science(ICIECS), Wuhan, China.

119. Harasim D., and Gulbahar, Y. (2015). Improvement of FBG peak wavelength demodulation using digital signal processing algorithms. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 9662.
120. Harasim, D., Kashaganova, G., and Kussambayeva, N. (2015). Accuracy improvement of fiber Bragg grating peak wavelength demodulation using wavelet transform and various center wavelength detection algorithms. *Przegląd Elektrotechniczny*, 92(6), 86-89.
121. Wen, X., Zhang, D., Qian, Y., Li, J., and Fei, N. (2012). Improving the peak wavelength detection accuracy of Sn-doped H₂-loaded FBG high temperature sensors by wavelet filter and Gaussian curve fitting, *Sensors and Actuators A: Physical*, 174, 91-95.
122. Guo, H. (2011). A simple algorithm for fitting a gaussian function. *IEEE Signal Processing Magazine*, 28(5), 134 – 137.
123. Song, X., Zhang, Y., and Liang, D. (2017). Load identification for a cantilever beam based on fiber Bragg grating sensors. *Sensors*, 17(8), 1733.
124. Liu, X.Z., and Ni, Y.Q. (2017). *Wheel tread defect detection for high speed trains using wheel impact load detector*. Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17), Seoul, Korea.
125. Prasad, G., Abhishek, B., and Asokan, S. (2009). *Fiber Bragg Grating sensor packages for sensing water pressures inside ocean*. International Conference on Emerging Trends in Electronic and Photonic Devices & Systems (ELECTRO'09), Varanasi, India.
126. Glisic, B. (2013). Distributed fiber optic sensing technologies and applications – an overview. *ACI Special Publication*, 292 (2), 1-18.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZTÜRK, Nail Ferhat
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 17.09.1980, Malatya
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0312 309 05 15
 e-mail : nailferhatozturk@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Elek.-Elektr. Müh.	Devam ediyor
Yüksek lisans	İstanbul Üniversitesi / Elek.-Elektr. Müh.	2012
Lisans	İnönü Üniversitesi / Elek.-Elektr. Müh.	2001
Lise	Malatya Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Egis Rail	Mühendis
2010-2017	TCDD Genel Müdürlüğü	Mühendis
2006-2010	Metro İstanbul	Mühendis
2002-2006	Çalık Holding	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Yücel, M., Öztürk, N.F., Yücel, M., and Göktas, H.H. (2018). *Design of a multiple fiber Bragg sensor define of temperature parameters of the fiber Bragg gratings*. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), İzmir.

2. Yücel, M., Öztürk, N.F., Yücel, M., and Göktaş, H.H. (2018). *Implementation and design of fiber Bragg grating based rail strain measurement system*. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), İzmir.
3. Yücel, M., and Öztürk, N. F. (2017). Real-time monitoring of railroad track tension using a fiber Bragg grating-based strain sensor. *Instrumentation Science & Technology*, 1-15.
4. Yücel, M., Öztürk, N. F., ve Torun, M. (2017). Fiber bragg ızgara sensor dizisi tabanlı sıcaklık ölçüm sistemi tasarımı ve uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 957-964.
5. Yücel, M., Gündüz, A. E., Torun, M., Öztürk, N. F., and Göktaş, H. H. (2017). *Effect of EDFA power on Brillouin power spectrum*. International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), 2017 4th International Conference, Ankara, 18-22.
6. Yücel, M., Torun, M., Öztürk, N. F., and Göktaş, H. H. (2017). *Brillouin scattering based fiber optic strain sensor*. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Antalya, 1-4.
7. Yücel, M., Göktaş, H. H., Öztürk, N. F., and Gündüz, A. E. (2017). Experimental analysis of the temperature dependence of the Brillouin gain spectrum in short-length single-mode fiber. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(5), 3881-3891.
8. Yücel, M., Öztürk, N. F., and Gemci, C. (2016). *Design of a fiber Bragg grating multiple temperature sensor*. Sixth International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP), Konya, Turkey.
9. Yücel, M., Öztürk, N. F., Göktaş, H. H., and Gündüz, A. E. (2016). *Design of a fiber Bragg grating based temperature sensor*. In Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), Zonguldak, 669-672.
10. Yücel, M., Gündüz, A. E., Göktaş, H. H., and Öztürk, N. F. (2016). *Using single-mode fiber as temperature sensor*. In Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), Zonguldak, 461-464.
11. Yucel, M., Ozturk, N. F., Goktas, H. H., Gemci, C., and Celebi, F. V. (2015). The effects of signal level of the microwave generator on the Brillouin gain spectrum in BOTDA and BOTDR. World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 10(1), 23-27.
12. Yücel, M., Öztürk, N. F., and Göktaş, H. H. (2015). *The analyzes of the Brillouin scattering for the different fiber types*. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Malatya, 632-635.
13. Yücel, M., Göktaş, H. H., and Öztürk, N. F. (2014). *The fiber optical sensing based on Brillouin scattering*. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Trabzon, 838-841.



GAZİ GELECEKTİR..