



**EŞZAMANLI SICAKLIK VE GERİLİM ALGILAYABİLEN EĞİK FİBER
BRAGG SENSÖR TASARIMI VE SİMÜLASYONU**

Selin Ece KİPRİKSİZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2020

Selin Ece KİPRİKSİZ tarafından hazırlanan “EŞZAMANLI SICAKLIK VE GERİLİM ALGILAYABİLEN EĞİK FİBER BRAGG SENSÖR TASARIMI VE SİMÜLASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Murat YÜCEL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. İsa NAVRUZ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Mustafa BURUNKAYA

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 21/09/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER

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.

.....
Selin Ece KİPRİKSİZ
21/09/2020

EŞZAMANLI SICAKLIK VE GERİLİM ALGILAYABİLEN EĞİK FİBER BRAGG SENSÖR TASARIMI VE SİMÜLASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Selin Ece KİPRIKSİZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2020

ÖZET

Geleneksel sensörlere alternatif olan optik sensörlerin bir çeşidi olan Fiber Bragg ızgara tabanlı (FBI) sensörler sahip oldukları avantajlar sayesinde birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, OptiGrating 4.2.3 yazılımı kullanılarak tekdüze, apodize, cıvıltılı yapılarda FBI tabanlı sıcaklık sensörleri ve eş zamanlı sıcaklık ve gerilmeyi ölçebilen eğimli yapıda FBI tabanlı (TFBI) sensör tasarlanmıştır. Optimizasyonları yapılan apodize ve cıvıltı yapılarının yansıtıcılığa ve band genişliğine olan etkileri incelenmiştir. Tasarlanan FBI'ların sıcaklıkları 10 °C'lik periyotlarla değiştirilerek ızgara periyotlarında ve dalga boylarında meydana gelen değişimler izlenmiştir. Bragg dalga boyu hem sıcaklık hem de gerilme değişimine karşı duyarlı olması sebebiyle bir adet FBI kullanarak tasarlanmış olan sensörlerde, eş zamanlı sıcaklık ve gerilme ölçümü, çapraz hassasiyetini birbirinden ayırt edilemediği için yapılamamaktadır. TFBI saçaklarının eğimli yapısı sayesinde iletim spektrumunda eş zamanlı görülen çekirdek ve kılıf rezonanslarının sıcaklık ve/veya gerilmeye karşı duyarlılıkları farklıdır. Sıcaklık ve gerilmeyi eş zamanlı olarak ölçme yeteneğine sahip, eğim açısı 5° olan TFBI sensör tasarımı yapılmıştır. TFBI'ya ilk aşamada sadece 10 °C'lik periyotlarla değişen sıcaklık, ikinci aşamada 100 µε periyotlarla değişen gerilme, üçüncü aşamada ise eş zamanlı olarak değişen sıcaklık ve gerilme uygulanmış ve dalga boylarında meydana gelen doğrusal kaymalar yazılım üzerinden hesaplanmıştır. Sıcaklık sensörü tasarımı aşamasında, farklı ısıl genleşme ve termo-optik katsayıları ile çalışılarak, bu katsayıların dalga boyunda meydana getirdiği kayma miktarları incelenmiştir. Eş zamanlı sıcaklık ve gerilme uygulanmasıyla meydana gelen dalga boyu değişiminin eş zamanlı olmayan sıcaklık ve gerilme uygulanmasında meydana gelen toplam dalga boyu değişimine eşit olduğu görülmüştür. Tasarlanan sensörlerin sahip oldukları farklı yapısal özellikler sebebiyle birbirinden farklı spektrumlar sergilediği görülmüştür.

Bilim Kodu : 90532

Anahtar Kelimeler : Eğik fiber Bragg ızgara, fiber sensör, sıcaklık sensörü, gerilme sensörü, sıcaklık ve gerilme ayrımı, termo-optik katsayı, termal genleşme katsayısı

Sayfa Adedi : 56

Danışman : Prof. Dr. Murat YÜCEL

DESIGN AND SIMULATION OF THE TILTED FIBER BRAGG SENSOR CAPABLE OF SIMULTANEOUSLY DETECTING TEMPERATURE AND STRAIN

(M. Sc. Thesis)

Selin Ece KİPRİKSİZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2020

ABSTRACT

Fiber Bragg grating-based (FBG) sensors, a kind of optical sensors that are alternative to conventional sensors, are used in many applications due to their advantages. In this thesis study, FBG-based temperature sensors in uniform, apodized and chirped structures and a tilted FBG-based (TFBG) sensor capable of simultaneously measuring the temperature and strain were designed using the Optigrating 4.2.3 software. The effects of the optimized apodized and chirped structures on reflectivity and bandwidth were investigated. The temperatures of the FBGs designed were changed with 10 °C periods, and the changes that occurred in the grating period and wavelengths were examined. In the sensors designed using a FBG since the Bragg wavelength is sensitive to both temperature and strain changes, simultaneous temperature and strain measurement is not performed because the cross-sensitivity cannot be distinguished from each other. Due to the tilted structure of TFBG fringes, the sensitivity of the core and cladding resonances, which are observed simultaneously in the transmission spectrum, to temperature and/or strain is different. A TFBG sensor with a tilt angle of 5°, which was capable of measuring temperature and strain simultaneously, was designed. While only the temperature changing with 10 °C periods was applied to the TFBG in the first stage, the strain changing with 100 $\mu\epsilon$ periods was applied to it in the second stage, and simultaneously changing temperature and strain were applied to it in the third stage, and the linear shifts occurring at the wavelengths were calculated through software. In the stage of designing a temperature sensor, different thermal expansion and thermo-optic coefficients were used, and the amounts of shifts caused by these coefficients at the wavelength were examined. It was observed that the wavelength change that occurred with the simultaneous application of temperature and strain was equal to the total wavelength change that occurred in the non-simultaneous application of temperature and strain. It was observed that the sensors designed showed different spectra from each other due to their different structural features.

Science Code : 90532

Key Words : Tilted fiber Bragg grating, fiber sensor, temperature sensor, strain sensor, temperature and strain discrimination, thermo-optic coefficient, thermal expansion coefficient

Page Number : 56

Supervisor : Prof. D. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim ve tez çalışmalarım sürecinde bilgi, birikim ve tecrübeleri ile her daim kıymetli zamanını ayırıp yol gösterici olan, motivasyonumun düştüğü anlarda beni teşvik eden, hoşgörüsünü ve samimiyetini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Murat YÜCEL’e sonsuz şükranlarımı sunarım. Desteklerini her zaman hissettiğim hayatımdaki tüm güzellikleri borçlu olduğum değerli ve kıymetli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. FİBER BRAGG IZGARALAR	7
2.1. Giriş.....	7
2.2. Fiber Bragg Izgaralar	8
2.3. Fiber Bragg Izgaraların Üretim Teknikleri	9
2.3.1. İnterferometrik yöntem	10
2.3.2. Faz maskesi	11
2.3.3. Noktadan noktaya yazma tekniği	12
2.3.4. Eğik yapılı ızgara	12
2.4. Fiber Bragg Izgara Teorik Analizi	13
2.4.1. Bragg koşulu	13
2.4.2. Kırılma indisi profili	14
2.4.3. FBI'nın band genişliği.....	15
2.5. Fiber Bragg Izgara Çeşitleri	16
2.5.1. Tekdüze fiber Bragg ızgaralar.....	16

Sayfa

2.5.2. Apodize fiber Bragg ızgaralar	16
2.5.3. Cıvıtlı fiber Bragg ızgaralar	16
2.5.4. Eğik fiber Bragg ızgaralar	17
2.6. FBI Tabanlı Sıcaklık ve Gerilme Sensörü	19
2.6.1. FBI'nın sıcaklık ve gerilme hassasiyeti	20
2.6.2. Çapraz hassasiyet	21
2.6.3. TFBI sensör'ün sıcaklık ve gerilme hassasiyeti.....	22
3. FBI TABANLI SICAKLIK SENSÖRÜ TASARIMLARI.....	25
3.1. Tekdüze Fiber Bragg Izgara Tabanlı Sıcaklık Sensörü Tasarımı	27
3.2. Apodize Fiber Bragg Izgara Tabanlı Sıcaklık Sensörü Tasarımı.....	29
3.3. Cıvıtlı Fiber Bragg Izgara Tabanlı Sıcaklık Sensörü Tasarımı.....	32
3.4. Tasarlanan FBI'ların Karşılaştırması	35
4. TFBI TABANLI SICAKLIK VE GERİLME SENSÖRÜ TASARIMI.....	37
4.1. Tasarlanan TFBI'nın Sıcaklık Hassasiyeti	38
4.1.1. Termo-optik katsayısının dalga boyu değişimine etkisi	40
4.1.2. Isıl genleşme katsayısının dalga boyu değişimine etkisi	42
4.2. Tasarlanan TFBI'nın Gerilme Hassasiyeti	44
4.3. Tasarlanan TFBI ile Sıcaklık ve Gerilmenin Eş Zamanlı Ölçümü	45
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ.....	56

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Optik fiber parametreleri	26
Çizelge 3.2. Sıcaklık sensörünün parametreleri.....	26
Çizelge 3.3. Tekdüze FBI tasarımında kullanılan parametreler	27
Çizelge 3.4. Tekdüze FBI’da sıcaklığın etkisiyle ızgara periyodu ve λ_B değişimi	28
Çizelge 3.5. Apodize FBI’da sıcaklığın etkisiyle ızgara periyodu ve λ_B değişimi	31
Çizelge 3.6. Apodizeli cıvıltılı FBI’da sıcaklığın etkisiyle ızgara periyodu değişimi.....	33
Çizelge 3.7. Apodizeli cıvıltılı FBI’da, sıcaklığın etkisiyle λ_B değişimi	34
Çizelge 3.8. Tasarlanan FBI’ların karşılaştırılması	35
Çizelge 4.1. TFBI tasarımda kullanılan parametre değerleri	37
Çizelge 4.2. TFBI iletim spektrumunu oluşturan LP _{mn} modlarına ait kırılma indisleri.....	37
Çizelge 4.3. TFBI tabanlı sıcaklık sensörünün tasarım parametreleri	38
Çizelge 4.4. Sıcaklık uygulanmış TFBI’nın çekirdek ve hayalet modlarına ait dalga boyları ve kayma miktarları.....	39
Çizelge 4.5. Değişen termo-optik katsayısı çekirdek ve hayalet modlarının dalga boyunda meydana getirdiği kayma.....	40
Çizelge 4.6. Değişen ısı genleşme katsayısının çekirdek ve hayalet modlarının dalga boyunda meydana getirdiği kayma.....	42
Çizelge 4.7. TFBI tabanlı gerilme sensörü parametreleri	44
Çizelge 4.8. Gerilme uygulanmış TFBI’nın çekirdek ve hayalet modlarına ait dalga boyları ve kayma miktarları.....	44
Çizelge 4.9. Eş zamanlı sıcaklık ve gerilme uygulanmış TFBI’nın çekirdek ve hayalet modlarına ait dalga boyları ve kayma miktarları	46
Çizelge 4.10. TFBI’nın çekirdek ve hayalet modlarına ait lineer kayma miktarları	47

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Optik fiberde ışığın ilerlemesi	7
Şekil 2.2. FBI'nın yapısı	9
Şekil 2.3. İnterferometrik yöntemi ile FBI üretimi	11
Şekil 2.4. Faz maskesi yöntemi ile FBI üretimi	11
Şekil 2.5. TFBI üretimi	13
Şekil 2.6. FBI'nın Bragg koşulu	13
Şekil 2.7. FBI'nın kırılma indisi profili	14
Şekil 2.8. FBI'nın band genişliği	15
Şekil 2.9. (a) CFBI'nın yapısı (b) M adet tekdüze FBI kullanan CFBI modelinin yapısı	17
Şekil 2.10. TFBI'nın yapısı.....	18
Şekil 2.11. TFBI'nın iletim spektrumu	19
Şekil 3.1. OptiSystem'de kurulan simülasyon düzeneği	25
Şekil 3.2. SD lazer kaynağının spektrumu	26
Şekil 3.3. 25 °C'deki tekdüze FBI için, iletim-yansıma spektrumu	27
Şekil 3.4. 25, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için tekdüze FBI'nın yansıma spektrumu	28
Şekil 3.5. (a) 25 °C için, (b) 60 °C için tekdüze FBI'nın yansıma spektrumu	29
Şekil 3.6. 25 °C'de $L=30000 \mu\text{m}$ apodize FBI için iletim-yansıma spektrumu	30
Şekil 3.7. Apodize FBI'nın ızgara periyodu ve indis modülasyon genliği.....	30
Şekil 3.8. 25, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için apodize FBI'nın yansıma spektrumu	31
Şekil 3.9. (a) 25 °C için, (b) 60 °C için apodize FBI'nın yansıma spektrumu	32
Şekil 3.10. 25 °C'de $L=40000 \mu\text{m}$ cıvıtlı FBI için iletim-yansıma	32

Şekil	Sayfa
Şekil 3.11. (a) Cıvıtlı (b) Cıvıtlı-apodize FBI için indis modülasyon genliği değişimi.....	33
Şekil 3.12. 25, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için cıvıtlı FBI'nın yansıma spektrumu	34
Şekil 3.13. (a) 25 °C için, (b) 60 °C için cıvıtlı FBI'nın yansıma spektrumu	35
Şekil 4.1. Tasarlanan TFBI'nın iletim spektrumu	38
Şekil 4.2. Sıcaklık değişimine karşılık ve dalga boyu değişimi	39
Şekil 4.3. Farklı sıcaklıklarda çekirdek ve hayalet modlarının iletim spektrumları	40
Şekil 4.4. (a) Bütün modlar (b) 1548 nm-1564 nm arasındaki (yakınlaştırılmış) modlar için çekirdek değerleri için iletim spektrumu.....	41
Şekil 4.5. (a) Bütün modlar için (b) 1547,5 nm-1551,5 nm arasındaki modlar (yakınlaştırılmış) için (c) 1547,3 nm-1548,5 nm arasındaki modlar (yakınlaştırılmış) için çekirdek değerleri için iletim spektrumu.....	43
Şekil 4.6. Gerilme değişimine karşılık ve dalga boyu değişimi	45
Şekil 4.7. Değişen gerilme değerlerinde çekirdek ve hayalet modlarının iletim spektrumları.....	45
Şekil 4.8. Eş zamanlı sıcaklık ve gerilme değişimine karşılık dalga boyu değişimi	46
Şekil 4.9. Eş zamanlı sıcaklık ve gerilme uygulanmış TFBI'nın spektrumu.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

 Λ

Izgara periyodu

 $\vec{k}_i$

İleriye doğru ilerleyen dalga'nın vektörü

 $\vec{k}_y$

Geriye doğru ilerleyen dalga'nın vektörü

 Δ_n

İndis modülasyon genliği

 $\Delta\lambda_{\text{YMTG}}$

Yarı maksimumdaki tam genişlik

 $\vec{K}$

Izgara momentumu

 $K_{1,T}$

1. ızgara için sıcaklık yanıtı

 $K_{1,\epsilon}$

1. ızgara için gerilme yanıtı

 $K_{2,T}$

2. ızgara için sıcaklık yanıtı

 $K_{2,\epsilon}$

2. ızgara için gerilme yanıtı

 n_0

Izgara yazılmadan önceki kırılma indisini

 n_1

Çekirdeğin kırılma indisinden

 n_2

Kılıfın kırılma indisi

 $n_{\text{çekirdek}}$

Kılıf katmanının efektif kırılma indisi

 n_d

Dış ortam kırılma indisi

 $n_{\text{ef,çekirdek}}$

Çekirdek katmanının efektif kırılma indisi

 $n_{\text{ef,kılıf}}$

Kılıf katmanının efektif kırılma indisi

 $n_{\text{ef,kılıf}}^i$

Fiberin i . kılıf modunun efektif kırılma indisi

 P_{11}, P_{12}

Gerilme-optik tensörü

 $P_{\text{çekirdek}}$

Çekirdek moduna ait fotoelastik katsayısı

Simgeler**Açıklamalar**

p_e	Foto elastik etki
$p_{kılıf}^i$	i . kılıf moduna ait fotoelastik katsayıları
$\alpha_{çekirdek}$	Çekirdek katmanının ısı genleşme katsayısı
$\alpha_{kılıf}$	Kılıf katmanının ısı genleşme katsayısı
$\Delta n_{ac}(z)$	Kırılma indisi modülasyon genliğini
$\Delta n_{dc}(z)$	Kırılma indisindeki ortalama değişiklik
$\Delta \lambda_B$	Bragg dalga boyundaki kayma miktarı
ΔT	Uygulanan sıcaklıktaki değişim
θ_a	Kabul açısı
θ_c	Kritik açı
θ_i	Tam iç yansıma açısı
λ_B	Bragg dalga boyu
$\lambda_{çekirdek}$	Çekirdek modunun dalga boyu
Λ_g	TFBI'nın ızgara periyodu
$\lambda_{hayalet}$	Hayalet modunun dalga boyu
$\lambda_{kılıf}^i$	i . kılıf modunun dalga boyu
$\xi_{çekirdek}$	Çekirdek katmanının termo-optik katsayısı
$\xi_{kılıf}$	Kılıf katmanının termo-optik katsayısı
$ \lambda_{çekirdek} - \lambda_{hayalet} $	Çekirdek ve hayalet modu arasındaki mesafe
L	Izgara uzunluğu
N	Izgara düzlem sayısı
$\Delta \lambda_{çekirdek}$	Çekirdek modunun dalga boyu değişimi
$\Delta \lambda_{kılıf}^i$	i . kılıf modunun dalga boyu değişimi
Δn	İndis modülasyon genliği

Simgeler**Açıklamalar** $\Delta\epsilon$

Uygulanan gerilmedeki değişim

 θ

Eğim açısı

 $\theta(z)$

Periyot cıvıltısı

 ν

Poisson oranı

Kısaltmalar**Açıklamalar****CFBI**

Cıvıltılı fiber Bragg ızgara

DBÇ

Dalga boyu bölmeli çoğullama

FBI

Fiber Bragg ızgara

FOS

Fiber optik sensör

NA

Nümerik açıklık

SD

Sürekli dalga

TFBI

Eğimli fiber Bragg ızgara

YMTG

Yarı maksimumdaki tam genişlik

1. GİRİŞ

Fiber optik sensörler (FOS), fiber optik ve lazer teknolojisinin sürekli gelişmesiyle, 1970'lerden bu yana geleneksel sensörlere alternatif olabilecek yeni bir sensör türü haline gelmiştir. Fiber optik algılama teknolojisi, optik dalga kılavuzu teknolojisini ve fiber optik teknolojisini birleştirmiştir. Geleneksel sensörlerle kıyaslandığında optik sensörlerin birçok avantajı mevcuttur. FOS'lar yüksek doğruluk ve hassasiyetle çalışarak yüksek band genişliği imkanı verir [1-3].

FOS'lar, ölçülecek parametrenin değeri değiştiğinde, sensörden geçen ışığın bir veya daha fazla özelliğini değiştirerek çalışmaktadırlar [4]. Temel çalışma prensiplerini ifade etmek gerekirse, ışık, fiber optik aracılığıyla ışık kaynağından modülatöre doğru iletir. Test edilecek parametreler ve modülasyon alanındaki ışığı etkileştirilir. Etkileşim sonucunda ışığın optik özelliği (örneğin yoğunluk, dalga boyu, frekans, faz ve polarizasyon durumu) değişir ve bu ışık modüle edilmiş sinyal ışığı olarak adlandırılır. Modülasyon işleminden sonra test edilecek parametreler elde edilir. Işık, optik fiber aracılığıyla, algılama işlemi için dedektöre iletir. Fiber optik algılama sistemi esas olarak ışık kaynağı, iletim ortamı olarak fiber optik, algılama elemanı foto dedektör ve sinyal işleme ünitesinden oluşmaktadır [2-3].

Fiber optik sensörler, iç cihazlar ve dış cihazlar olarak basitçe kategorize edilebilir. Yerleşik (intrinsic) cihazlar, algılama mekanizmasının optik fiberin bir elemanı olarak kendisinin içinde çalıştığı yerleşik yapıli cihazlardır. Harici (extrinsic) cihazlar ise, izlenecek bölgeye ve bölgeden gelen optik sinyali birleştirmek için yalnızca bilgi taşıyıcısı olarak kullanıldığı dışsal cihazlardır [5]. İçsel sensörler tıp, savunma ve havacılık uygulamalarında kullanılır ve sıcaklık, basınç, nem, ivme ve gerginliği ölçmek için kullanılmaktadır. Dışsal sensörler, bir ağ içindeki optik fiberlerin durumunu ve performansını izlemek için telekomünikasyonda kullanılmaktadır [6].

Sensörlerin üretimi için farklı modülasyon/demodülasyon prensipleri vardır. Bu ilkelere göre optik fiber sensörlerin üretimi için çeşitli teknikler ortaya çıkmıştır [5]. Yoğunluk modülasyonlu sensörler, literatüre ilk bildirilen FOS'lardır ve en basit FOS'ları temsil etmektedir [4]. Yoğunluk modülasyonlu sensörlerde, algılanacak parametredeki değişim, ışık yoğunluğunun değişmesine sebep olur [2,4,5,7]. Algılama prensibi, izlenen parametre

tarafından indüklenen optik sinyalin zayıflamasına dayanır [5]. Mikro-bükümlü, azalan dalga alanı (evanescent field), iki fiber bağlantılı (two fiber coupling) sensörler bu kategoridedir [5]. Faz modülasyonlu FOS'lar, test edilen enerji alanının etkisiyle optik fiberde iletilen optik dalga fazını değiştirir ve daha sonra interferometri teknolojisi ile faz değişikliğini ışık şiddeti değişikliğine dönüştürür. Böylece parametreler tespit edilir. Mevcut sistemlerle, optik detektörler optik dalganın faz değişimini doğrudan algılayamamaktadır. Bu nedenle, faz değişikliğini ışık şiddeti değişikliğine dönüştürmek için ışık girişim teknolojisi uygulanmalıdır [2,5]. Fiber optik interferometreler temel olarak, sinyal modülasyonu için iki sinyal arasındaki paraziti kullanır. Bu parazit, sinyallerin ilerlediği farklı optik yollar ile elde edilir. Parazit elde etme yöntemi, bir veya iki optik fiber kullanılarak yapılabilir. Optik yollardan biri harici bozulmalara maruz bırakılarak sinyal, izlenen parametreye göre modüle edilebilir [5]. Mach-Zehnder, Fabry-Perot, ve Sagnac interferometrik FOS'ları bu prensiple çalışmaktadır [2,5]. Dalga boyu modülasyonlu FOS'lar, spektrum dağılımını izleyerek algılanacak parametreleri ölçmektedir [2]. Bu kategorideki sensörlerde, izlenen parametredeki değişim, optik sinyalin dalga boyunda bir kayma meydana getirir. Bragg ızgara tabanlı sensörler ve floresan sensörler, dalga boyu modülasyonlu sensörlerin en yaygın iki örneğidir [5]. FBI tabanlı sensörler bu tez çalışmasının temel konusudur. Polarizasyon modülasyonlu FOS'lar ise algılanacak parametrenin değişimi nedeniyle ışığın polarizasyon durumundaki değişikliği ölçerek çeşitli fiziksel özellikleri tespit eder. Faraday etkisi tabanlı optik akım sensörler, Kerr elektro-optik etki temelli sensörler, bu kategoridedir [2,7].

FOS'ların en önemli yeniliklerinden biri 1978'de FBI sensörünün geliştirilmesidir. Optik fiberin ışığa duyarlılığı Kanada İletişim Araştırma Merkezi'nde (Canadian Communications Research Center) Ken Hill ve arkadaşları tarafından germanyum katkılı silika optik fiber ve görünür argon iyon lazer radyasyonu kullanılarak yapılan deneyler sırasında keşfedilmiştir [8]. Optik fiberin foto duyarlılığın keşfedilmesi FBI'ların ilk adımıdır. 1989'da Gerald Meltz ve arkadaşları ultraviyole lazer ışığının girişim modeliyle FBI yazımını keşfetmişlerdir [7,9].

FBI, belirli dalga boyundaki ışığı seçici olarak bir kısmını yansıtan ve geri kalan kısmını ise ileten pasif bir optik malzemedir. Fiber optiğin kısa bir uzunluğunda, çekirdek bölgesinin kırılma indisinin, belirli periyodik modülasyonu ile ızgara yapısı oluşturulur. Kırılma indisi değişimi, optik fiberin mod yayılımını etkileyerek çalışma prensibini oluşturur.

FBI'lar, hafif, sağlam ve küçük boyutludur. Bu sebeple algılanacak nesnenin bütünlüğünü bozmadan yapıya kolayca gömülebilir veya yüzeye monte edilebilir. Sualtı gibi geleneksel sensörlerin çalışmadığı ortamlarda çalışabilir. Telemetri ve uzaktan algılama uygulamalarında, optik fiberin bir bölümü sensör olarak kullanılabilirken, algılanan bilgiler uzak bir birime aktarılabilir böylece yapının gerçek zamanlı izlenmesine olanak tanır. FBI'lar elektrik sinyallerini kullanmadıkları için kendinden güvenlik sağlar [3]. Yangın, ateş ya da kıvılcım riski olmadığından patlayıcı ortamlarda kullanımı güvenlidir. Hızlı ve doğru ölçümler yapan FBI sensörler, lineer algılama özelliklerine ve düşük fiber kaybına sahiptir [3-5,10]. FBI'lar sadece bir optik fiber kablo üzerinde dalga boyu bölmeli çoğullama (DBÇ) yöntemi ile çoğullanabilirler. Bu sayede bir optik fiber üzerinde rastgele aralıklarla birçok sensör kullanılabilir ve farklı noktalardan algılama yapabilir. Çoğullama sayesinde, optik sistemlerde dezavantaj olarak görülen yüksek maliyetleri düşürebilmek mümkündür [3-4].

Yarı dağıtık optik sensör çeşitlerinden olan, FBI'lar sahip oldukları avantajlar sayesinde kullanım alanları oldukça geniştir. Petrol, doğalgaz, demir yolları, inşaat, denizcilik, denizaltı, aviyonik sistemler, uzay araçları, savunma sanayi, tıp ve biyomedikal gibi alanlarda yaygın kullanılmaktadır [11].

Avantajları sebebiyle birçok uygulamada tercih edilen FBI sensörlere ait literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Khalid, Zafrullah, Bilal ve Mirza (2012) tarafından MATLAB ve OptiGrating kullanarak Gauss profili apodize FBI ile gerilme ölçümü yapılmıştır [12]. Ashry, Elrashidi, Mahros, Alhaddad ve Elleithy (2014) tarafından farklı apodizasyon profilleri (Sinc, Gaussian, Hamming, Tanh, Bartlett, Blackman, Cauchy, Raised sine) uygulanmış FBI'ların performans değerlendirmesi yapılmış ve FBI'nın yansıtma, yan lob seviyeleri ve band genişlikleri incelenmiştir [13]. Elgaud, Zan, Abushagur, Bakar ve Elshirkasi (2016) OptiGrating ile zaman bölmeli çoğullama ile tasarlamış oldukları dört adet FBI sensörünü çoklayarak gerilme ölçümü yapmışlardır [14]. Hisham (2017) çalışmasında, sayısal analiz kullanılarak, petrol ve gaz endüstrisi uygulamalarına uygun geniş bir band genişliği elde etmek amacıyla ızgara uzunluğu ve kırılma indisi değişimlerinin band genişliğine olan etkilerini incelemiştir [15]. Fathy, Mofreh ve Barakat (2019), Kaskad model Hamming, Barthan and Nuttal Sinc and Proposed apodizasyon fonksiyonları sayısal olarak incelemişlerdir. Her kaskad mertebesi ve apodizasyon fonksiyonu için yansıtıcılık ve band genişliklerini hesaplamışlardır [16]. D. Meena ve M. L. Meena (2020), dispersiyonu dengelemek amacıyla OptiSystem yazılımı ile civıltılı FBI modelleyerek 210 km mesafeli

optik iletişim hattını simüle etmişlerdir [17]. Frazo ve Santos (2004), çekirdeği 3 mol% GeO_2 katkılı SMF28 ve 20 mol% GeO_2 katkılı SM1500 optik fiberleri ile iki farklı FBI tasarlayarak, matris yöntemiyle sıcaklık ve gerilme duyarlılıklarını hesaplamışlardır. Sıcaklık duyarlılıkları aynı, gerilme duyarlılıkları farklı olan bu iki FBI'yı uç uca ekleyerek eş zamanlı sıcaklık ve gerilme ölçümünü gerçekleştirmişlerdir [18]. Elgaud, Zan, Abushagur ve Bakar (2016), yaptıkları çalışmada, OptiGrating uygulaması kullanarak 1549 nm ve 1551 nm Bragg dalga boylarında iki FBI tasarlamışlardır. 1549 nm FBI'ya hem sıcaklık hem gerilme uygulanmış, 1551 nm FBI ise sadece sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Eş zamanlı sıcaklık ve gerilme uygulaması sonucunda meydana gelen dalga boyu değişiminden, sadece sıcaklık uygulaması sonucunda meydana gelen dalga boyu değişimi farkı alınarak eş zamanlı gerilme ve sıcaklık ölçümünü gerçekleştirmişlerdir [19]. Chehura, James ve Tatam (2007), yaptıkları çalışmada, boron-germanyum katkılı optik fiber kullanarak uzunluğu 5 mm, eğim açısı $1,5^\circ$ olan TFBI imal ederek eş zamanlı sıcaklık ve gerilme ölçümünü gerçekleştirmişlerdir. Sadece bir adet TFBI kullanılarak sıcaklık ve gerilmeye ait çapraz hassasiyetler birbirinden ayrılmıştır [20]. Miao, Liu, ve Zhao (2008), çekirdek ve kılıf modlarının gerilme hassasiyetleri farklı, sıcaklık hassasiyetleri aynı TFBI imal ederek eş zamanlı sıcaklık ve gerilme ölçümünü gerçekleştirmişlerdir [21]. Zhang, Yang, Tong, Miao, Liu ve Dong (2010), tasarladıkları paketli ve paketsiz yapıdaki iki TFBI'nın sıcaklık duyarlılıklarını karşılaştırmışlar ve eş zamanlı sıcaklık ve gerilme ölçümünü gerçekleştirmişlerdir [22]. Cheng ve diğerleri (2018) tarafından, eğim açısı 2° olan TFBI üretilmiş ve çekirdek modu, 25 ve 28. kılıf modları kullanılarak sıcaklık, gerilme ve çevreleyen ortamın kırılma indisi hesaplanmıştır [23]. Wang, Li, X. Zhao ve C. Zhao (2015), çalışmalarında TFBI'nın iç parametre incelemelerini ve optimizasyonunu yapmış ve eğim açısı 3° olan TFBI ile eş zamanlı sıcaklık ve gerilme ölçümünü gerçekleştirmişlerdir [24]. Gao, Liu ve Mu (2014), OptiGrating uygulaması üzerinden tasarlamış oldukları eğim açısı 2° olan TFBI'nın LP_{01} ve LP_{05} modlarını kullanılarak sadece sıcaklık ölçümü yapmışlardır [25]. Sun ve diğerleri (2020) optik fiberin aynı bölümüne yazmış oldukları FBI ve TFBI ile faz kaydırmalı ızgara gibi davranan sıcaklık ya da gerilmeyi ölçebilen sensör tasarlamışlardır [26]. Kumara ve Sharmaa (2019) yaptıkları çalışmada tekdüze, apodize ve cıvıltılı yapıdaki FBI'ların yansımalarını hesaplamak için radyal sıralama metoduna dayanan yeni bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemi kullanarak sıcaklık ve gerilme ölçümünü gerçekleştirmişlerdir [27].

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde FBI'lar ve FBI tabanlı sensörler teorik olarak açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, OptiGrating yazılımı kullanılarak tekdüze, apodize, cıvıltılı yapılarda fiber Bragg ızgara (FBI) tabanlı sıcaklık sensör tasarımları yapılarak parametreleri optimize edilmiş ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, tasarlanan FBI'lara ait iletim spektrumlarına ait veriler uygun formatta OptiSystem 17 yazılımına aktarılarak her bir sıcaklık mertebesi için Bragg dalga boylarında meydana gelen kaymalar optik spektrum analizörü ile incelenmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde, eş zamanlı sıcaklık ve gerilmeyi ölçebilen saçakları 5° eğim açısına sahip TFBI sensör tasarımı yapılmıştır. TFBI sensörün çekirdek ve kılıf modlarına ait sıcaklık hassasiyetini doğrudan etkileyen çekirdek katmanına ait ısı genleşme ve termo-optik katsayılarının farklı değerleri ile çalışarak, bu katsayıların dalga boyunda meydana getirdiği kayma miktarları incelenmiştir. Beşinci bölümde ise tasarlanan FBI'ların ve TFBI'nın simülasyon sonuçları hakkında bilgi verilerek çalışma sonunda elde edilen sonuçlar ve öneriler paylaşılmıştır.

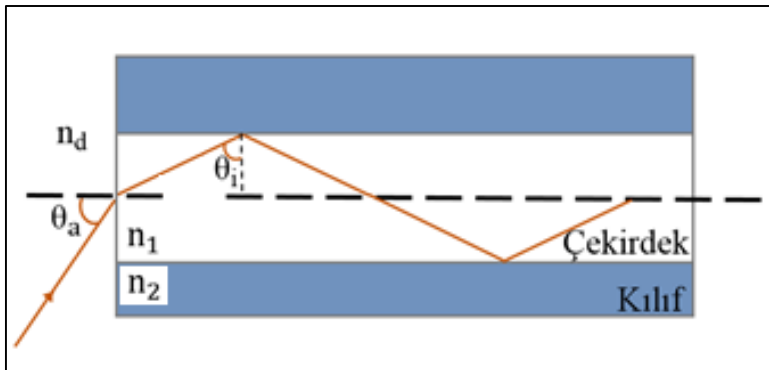
2. FİBER BRAGG IZGARALAR

2.1. Giriş

Optik fiberlerin yapısı çekirdek, kılıf ve kaplama olarak adlandırılan üç katmandan oluşmaktadır. Genel olarak, optik fiberler yüksek saflıkta silika camdan yapılır. Işık, fiber çekirdeğinin içerisinde ilerlemektedir. Kılıf katmanı, ışığın fiber çekirdeğe hapsederek ışığın fiber çekirdeğinden havaya saçılarak kaybolması engeller, saçılma kaybını azaltır ve çekirdek bölgesini korur. Işık, kılıf ve çekirdek arasındaki kırılma indisi farkından dolayı yansıma ile çekirdekte ilerler. Çekirdeğin içindeki ışığı yakalayıp iletebilmek için, kılıfın kırılma indisi (n_2) çekirdeğin kırılma indisinden (n_1) daha düşük olmalıdır [5,28-31]. Kılıf, ışığın tam yansıma yapmasını sağlayarak ışığın fiber içinde tutarak ilerlemesini sağlar. Kaplama katmanı ise, çekirdeği ve kılıf katmanlarını dış ortamdan ve hasardan korur, fiberin mekanik direncini artırır, optik kabloya esneklik sağlar. Kaplamalar için sıklıkla kullanılan malzeme plastiktir [5].

Kritik açı (θ_c), ışığın 90° 'lik açı ile kırılmasını sağlayan geliş açısıdır. Eğer ışık, çekirdek-kılıf ara yüzüne kritik açıdan daha büyük bir açıyla gelirse, ışın tam iç yansımaya uğrayarak, ışık ışınları tam iç yansıma açısı (θ_i) ile çekirdeğe yansıtılır ve ışık kırılma olmadan çekirdeğe yönlendirilir. Kritik açıya ilişkin formül Eş. 2.1'de verilmiştir [28-29,31-34].

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.1)$$



Şekil 2.1. Optik fiberde ışığın ilerlemesi

Nümerik açıklık (NA), fiberin ışık toplama yeteneğini gösterir ve ışığın fibere kabul edilmesi için gerekli olan kabul açısını (θ_a) belirlemek için kullanılan bir parametredir. Nümerik açıklık arttıkça, fiberin ışığı birleştirme yeteneği de artar. Bir fiberin sayısal açıklığı Eş. 2.2'deki gibi formüle edilir [28-29,33,34].

$$NA = \sin(\theta_a) = \sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2} \quad (2.2)$$

Kabul açısı (θ_a), dış ortamdan (n_d = dış ortam kırılma indisi), fibere doğru gelen ışık ışınlarının, dış ortam fiber sınırına çarparak çekirdeğe kabul edilmesi için gerekli maksimum açıdır. Kabul açısına eşit veya daha küçük açıyla gelen ışınlar fibere yönlendirilerek fiber içinde ilerlemeye devam eder ve çekirdek kılıf ara yüzüne kritik açıdan büyük ya da eşit açıyla gelir. Kabul açısından daha büyük açı ile gelen ışınlar, tam yansıma şartını sağlamayacağı için kılıfta kaybolmaktadırlar. Kabul açısı Eş. 2.3'teki gibi formüle edilir. [28,34]

$$\sin \theta_a = \frac{NA}{n_d} \quad (2.3)$$

Optik fiberin çekirdek ve kılıf katmanlarına ait kırılma indis değerlerini birbirlerinden farklı değerlere getirmek için katkılama yöntemleri kullanılmaktadır. Düşük kayıplı optik fiberler yüksek silika camlardan üretilmektedir. Silika camlar, kırılma indisini arttırmak ya da azaltmak için başka malzemelerle katkılanır. Germanyum dioksit (GeO_2), fosfor pentoksit (P_2O_5) ve daha az kullanılan alüminyum oksit (Al_2O_3) kırılma indisini yükseltirken, bor oksit (B_2O_3) ve flor azaltır. Bu katkı maddeleri ayrıca, genleşme katsayısı, dispersiyon, foto-elastik etki, zayıflama ve iyonlaştırıcı radyasyon gibi silika camların diğer özelliklerini de değiştirmektedir [2].

2.2. Fiber Bragg Izgaralar

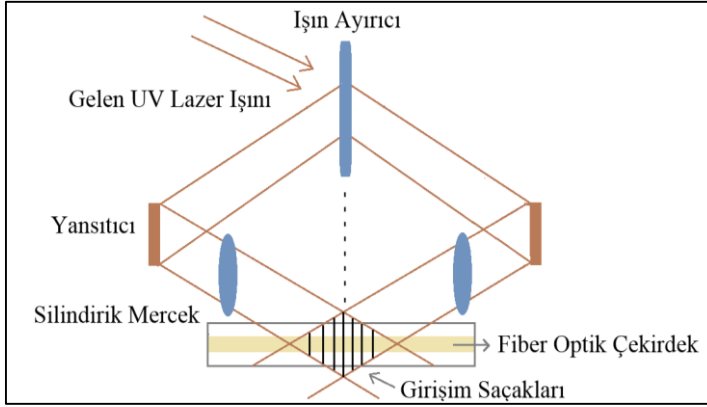
FBI, tek modlu bir optik fiber içine inşa edilmiş, fiber çekirdeğinin kısa bir uzunluğunun periyodik bir modülasyonu ile ızgara yapısının oluşturulduğu pasif optik malzemedir [8,35-37]. Belirli bir spektral genişliğe sahip ışık demeti optik ızgaraya girdiğinde, ızgara periyodu ve fiber çekirdeğinin kırılma indisine bağlı olan Bragg dalga boyuna eşit olan dar spektral kısmı yansıtılır ve geri kalan ışık ise iletilir [2-3]. Bu nedenle, FBI'lar temel olarak, gelen

1978’de Hill ve arkadaşları tarafından ilk fiber içi ızgaranın yanlılıkla yapıldığı süreçlerde keşfedilmiştir [38,40]. Silika optik fiberlerin, çekirdek katmanındaki germanyum, optik fiberi ışığa duyarlı hale getirmektedir. Optik fiber UV ışıma maruz kaldığında (genellikle 193 nm veya 244 nm bandında), çekirdek katmanın kırılma indisinde kalıcı bir artış olduğu kanıtlanmıştır. Bu nedenle, optik fiberi, UV ışımanın optik girişim modeline maruz bırakarak, optik fiberin çekirdeğinde UV ışıma maruz kalan bölgenin uzunluğu boyunca kalıcı bir periyodik kırılma indisi modülasyonu oluşturulur. En yaygın FBI yazım yöntemleri arasında faz maskesi, interferometrik ve noktadan noktaya teknikleri bulunur [32].

Optik fiberin çekirdek katmanına germanyum ile katkılama yapmak, çekirdek katmanında yüksek düzeyde ışığa duyarlılık sağlar. Işığa duyarlılık, yüksek bir germanyum konsantrasyonu ile büyük ölçüde artırılabilir. Çekirdek, germanyum yerine, alüminyum oksit (Al_2O_3) ve bor oksit (B_2O_3) bileşikleriyle katkılanabilir. Kalay kullanımının da ışığa duyarlılık açısından iyi sonuçlar verdiği bildirilmiştir [38].

2.3.1. İnterferometrik yöntem

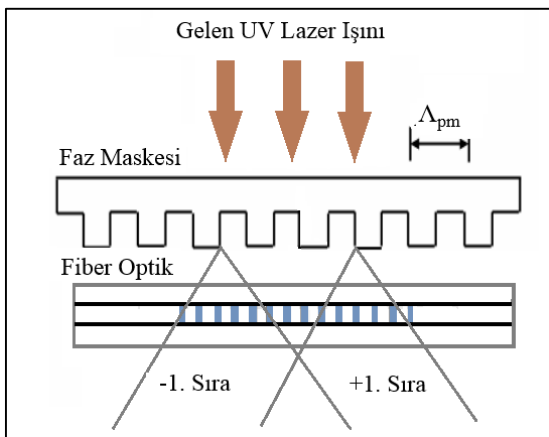
İnterferometrik yazma metodu, optik fiberde ızgara yazmak için kullanılan ilk tekniktir ve bu yöntemle ait farklı modeller birçok uygulamada kullanılmıştır. Işığa duyarlı bir fiberde kırılma indisi modülasyonunu gerçekleştirmek amacıyla saçak deseni kullanılmıştır ve önceden belirlenmiş bir periyot, iki girişim ışının açısının değiştirilmesi ile kolayca elde edilmektedir. Bir UV lazer ışını, bir ışın ayırıcısı (splitter) veya bir prizma ile ikiye ayrılır, aynalar tarafından yansıtılır ve girişim deseni oluşturmak üzere fiber çekirdeğinde tekrar birleştirilir [4,40-42]. UV ışınlarını, fiberin çekirdeğinde dar bir çizgide odaklamak için silindirik lensler/mercekler kullanılır. Ortaya çıkan Bragg rezonans dalga boyu, gelen ışınların açısı ile belirlenir [43]. İnterferometre yapılarındaki optik yolların uzunlukları ve kırılma indisini lokal olarak etkileyen hava akımları, kararlı bir saçak deseninin oluşturulmasında soruna sebep olmaktadır. Ayrıca, bu düzenek ile ışınların hizalanması zordur ve çok iyi bir uzamsal tutarlılık elde etmek gerekmektedir. Belirtilen bu olumsuz sebepler kalitesiz bir FBI üretimine yol açabilmektedir [41]. İnterferometrik FBI üretim metodu Şekil 2.3’te temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. İnterferometrik yöntemi ile FBI üretimi

2.3.2. Faz maskesi

FBI'ların imalatı için en etkili yöntem faz maskesi tekniği olarak bilinmektedir. Bu teknikte, girişim modeli oluşturmak için şeffaf bir kırılma elemanı (faz maskesi) kullanılır. Faz maskeleri holografi veya elektron ışını litografisi ile üretilir. Bu desenler, UV ışınlarla yüksek kaliteli silika yüzeylerde inşa edilmiş tek boyutlu bir yüzey kabartma yapısıdır ve üzerindeki olukların şekli kare dalga gibidir. Optik fiberi, faz maskesine hizalamak için bir kamera kullanılmaktadır. Fiber, faz maskesinin oluklarına mümkün olduğunca paralel ve yakın olacak şekilde konumlandırılmalıdır fakat faz maskesine dokunmaması gerekmektedir [40,42,44]. Fiber, faz maskesinden ne kadar uzağa yerleştirilirse, indüklenen indis modülasyonu o kadar düşük olur, bu da daha düşük yansıtıcılığa sahip Bragg ızgaraların üretimine sebep olur [42]. Faz maskesi ile FBI üretim yöntemi Şekil 2.4'te temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Faz maskesi yöntemi ile FBI üretimi

Bir UV lazer ışını, faz maskesine geldiğinde oluklar tarafından Şekil 2.4'te gösterildiği gibi dağıtılır ve bir kırılma meydana gelir. Işın birkaç kırılma sırasına ayrılır. -1 ve +1 sıraları, aynı noktadan başlar fakat ıraksayarak ilerler. Bu iki sıra birbiriyle kesiştiğinde girişim deseni oluşmaktadır. Maskeye kazınmış olan periyot (Λ_{pm}), ızgaraya çizilecek olan periyodun iki katı kadardır [40,41].

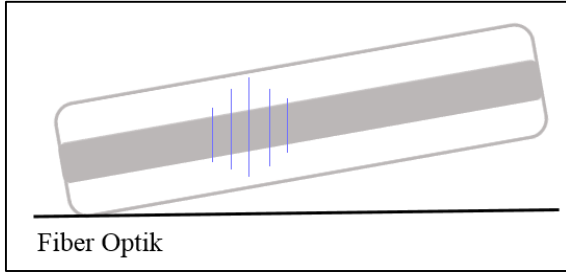
Faz maskesi yönteminde, hizalanacak aynalar olmadığı için kurulum diğer yöntemlere göre daha basittir. Fakat, faz maskesi kırılğan bir optik elemandır ve fiber ile teması faz maskesinin çizilmesine sebep olabilir [41,42].

2.3.3. Noktadan noktaya yazma tekniği

Noktadan noktaya yazma tekniğinde, UV ışını her seferinde fiberin belirli bir noktasına maruz bırakılır ve UV ışınına maruz kalan bölgenin kırılma indisinde değişiklik meydana gelir. [40,42]. Her ızgara saçığı, bir excimer lazerden gelen tekli UV ışını darbesi ile ayrı ayrı üretilmektedir. Excimer lazerinden alınan UV ışın darbesi, yarık içeren bir maskeden geçer. Böylece UV ışınına maruz kalmış fiberin o bölümündeki çekirdek katmanına ait kırılma indisi lokal olarak artar. Bir sonraki saçak modeli için, fiber optik, fiber eksenine paralel doğrultuda ızgara periyoduna karşılık gelen mesafe kadar ötelenir. Bu işlem, fiber çekirdeğinde istenilen ızgara yapısını oluşturana kadar tekrarlanır. Bu yöntemde, UV ışını noktadan noktaya uygulandığı için ızgaranın kırılma indisi profili istenilen herhangi bir spektral yanıtı sağlayacak şekilde ayarlanabilir. Fakat bu tekniğin dezavantajı, adım adım bir prosedür olduğundan, uzun bir işlem süresi gerektirmektedir [42].

2.3.4. Eğik yapılı ızgara

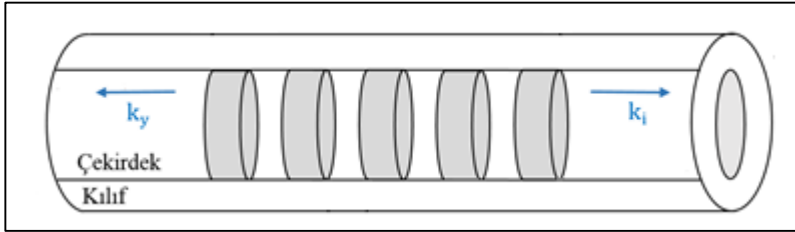
Düzleme paralel konumlandırılmış optik fiber, düzleme göre eğilimli bir hale getirilirse, fiberde yazılacak olan ızgara, modun yayılma yönünde eğilecektir. Fiber ve girişim deseni aynı düzlemde olmak üzere, girişim saçaklarıyla üst üste binecek şekilde istenilen açı kadar döndürülür. Daha sonra faz maskesi yöntemi ile TFBI üretimi yapılır [8]. TFBI üretim yöntemi Şekil 2.5'te temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. TFBI üretimi

2.4. Fiber Bragg Izgara Teorik Analizi

2.4.1. Bragg koşulu



Şekil 2.6. FBI'nın Bragg koşulu

Bragg ızgara koşulunun gerçekleşmesi için, hem enerji hem de momentumun korunumunun sağlanması gerekmektedir. Şekil 2.6'da gelen ve yansıyan dalga vektörünün yönleri gösterilmiştir. Enerji korunumuna göre, gelen ve yansıyan dalganın frekanslarının aynı olması gerekir [3,44-45]. Momentum korunumuna göre Eş. 2.4'teki eşitlik yazılır.

$$\vec{k}_y = \vec{k}_i + \vec{K} \quad (2.4)$$

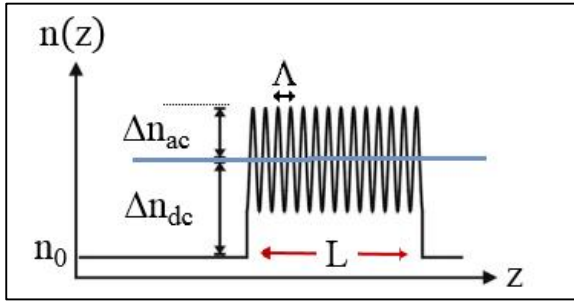
Burada, $\vec{k}_i$ ileriye doğru ilerleyen dalganın vektörü, $\vec{k}_y$ geriye doğru ilerleyen dalganın vektörü ve $\vec{K}$ ise ızgara momentumudur ve genliği $\frac{2\pi}{\Lambda}$ 'dır [3,44,45]. Bragg koşulu sağlandığında, ızgara düzleminin her birinden yansıyan ışık, geriye doğru üst üste binerek Bragg dalga boyunda yansıyan bir tepe oluşturur. Bu nedenle, Bragg dalga boyu çevresinde, FBI ışığı ileriye doğru ilerleyen kılavuzlu modlardan geriye doğru ilerleyen kılavuzlu modlara bağlar. Bragg dalga boyu Eş 2.5'teki gibi ifade edilir.

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{ef}\Lambda \quad (2.5)$$

Burada Λ ızgara periyodu ve n_{ef} efektif kırılma indisidir [3,44-46].

2.4.2. Kırılma indisi profili

Izgara profili, optik fiber çekirdeğinin UV ışınla işlenmesi sonucu ortaya çıkan indis modülasyonunun, optik fiber boyunca değişimine bağlı fonksiyonunun tanımıdır [39]. Şekil 2.7'den de görüldüğü gibi, bir Bragg ızgarası, optik fiber boyunca kırılma indisi dağılımı $n(z)$ ile karakterize edilir.



Şekil 2.7. FBI'nın kırılma indisi profili

Optik fiber boyunca kırılma indisi dağılımı Eş. 2.6'da verilmiştir.

$$n(z) - n_0 = \Delta n_{dc}(z) + \Delta n_{ac}(z) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z + \theta(z)\right) \quad (2.6)$$

Burada, n_0 ızgara yazılmadan önceki kırılma indisini, $\Delta n_{ac}(z)$ kırılma indisi modülasyon genliğini, Λ ızgara periyodunu, $\theta(z)$ periyot cıvıltısını, $\Delta n_{dc}(z)$ kırılma indisindeki ortalama değişikliği ifade etmektedir. [31,45]

İndüklenen kırılma indisi arttıkça FBI'nin yansıtıcılığı da artar. Benzer şekilde, ızgara uzunluğu arttıkça, yansıtma da artacaktır.

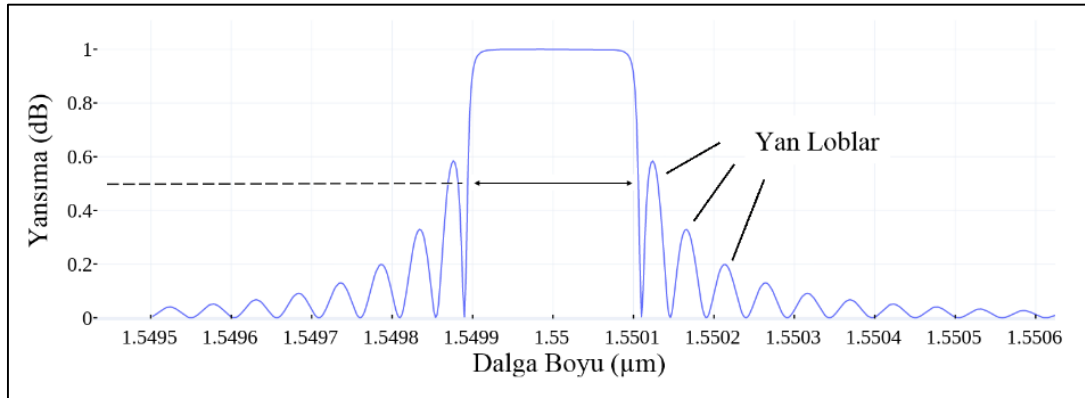
2.4.3. FBI'nın band genişliği

FBI'nin band genişliği, yarı maksimumdaki tam genişlik (YMTG) ile ifade edilmektedir. Band genişliği, ızgara düzlem sayısı (N) ve indis modülasyon genliği (Δn) bağlıdır ve Eş. 2.7'deki gibi formüle edilmektedir [3].

$$\Delta\lambda_{YMTG} = \lambda_B \left(\left(\frac{\Delta n}{2n} \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Burada, $\Delta\lambda_{YMTG}$ band genişliğidir. S değeri, yaklaşık % 100 yansıma ile çalışan güçlü ızgaralar için ~ 1 ve zayıf ızgaralar için $\sim 0,5$ olarak kabul edilir [3,44,47].

Şekil 2.8'de temsili bir FBI'ya ait yansıma spektrumu üzerinde, YMTG aralığı gösterilmiştir.



Şekil 2.8. FBI'nın band genişliği

2.5. Fiber Bragg Izgara Çeşitleri

2.5.1. Tekdüze fiber Bragg ızgaralar

Tekdüze FBI'lar en basit yapılı FBI türüdür. Izgara periyotları ve kırılma indis değişimleri ızgara boyunca sabittir. Cıvıtlı yapı için gerekli olan ızgara faz değişimi “0”dır. Tekdüze ızgaralar, yansıma filtresi gibi kullanılabilir [39].

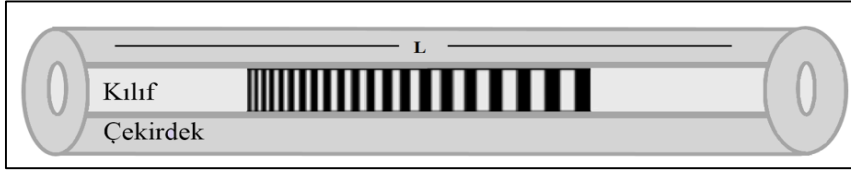
2.5.2. Apodize fiber Bragg ızgaralar

Apodizasyon uygulaması, ızgara ortasından, ızgaranın her iki ucuna doğru kırılma indis değişiminin belirli bir profilde uygulanarak giderek azaltılması tekniğidir. Bu sebeple apodizasyon uygulanmış ızgaraların, kırılma indisinde meydana gelen değişim ızgara uzunluğu boyunca farklılık gösterir [39]. Uygulama öncesinde belirlenen apodizasyon profili modelinde yapılır. Sinüs, sinc, Gauss, Hamming, tanh, Bartlett, Blackman ve Cauchy profillerde apodize teknikleri vardır [13]. Kırılma indisinin tekdüze modülasyonunun sonucu olarak ile Bragg ızgaraların yansıma spektrumlarında, maksimum yansıtıcılığın olduğu Bragg dalga boyunun bitişik dalga boylarında bir dizi yan lob ortaya çıkar. Rezonans olmayan bu bileşenlerin, yüksek oranda reddedilmesinin gerektiği uygulamalarda, bu yan lobların yansıtıcılığını azaltmak yani ızgaranın yansıma spektrumunu apodize etmek oldukça önemlidir. Apodizasyon uygulamaları, yan lobları bastırırken, Bragg dalga boyundaki yansıtıcılığın azalmasına sebep olmaktadır [1,10,13,44].

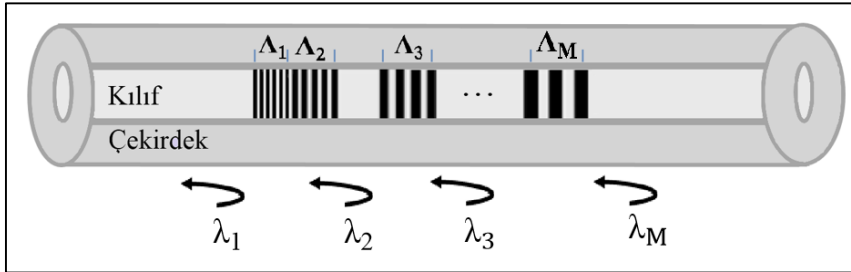
2.5.3. Cıvıtlı fiber Bragg ızgaralar

Cıvıtlı fiber Bragg ızgaralara ait (CFBI) ızgara periyodu, ızgara uzunluğu boyunca değişim göstermektedir. Izgaralardaki cıvıtlı yapısı, ızgara uzunluğu boyunca doğrusal, simetrik, rastgele, karesel ya da atlamaların olduğu bir değişime sahip olabilir [8]. CFBI’da, ızgaranın her bir farklı bölümü, farklı bir dalga boyunu yansıttığı için Bragg dalga boyu da ızgara boyunca değişkenlik gösterir [10,48,49]. CFBI’lar, dar bir spektrumu yansıtan FBI’ların bir kaskadı gibi davranır. L uzunluğuna sahip cıvıtlı ızgaranın, her biri $L_g = L/M$ uzunluğuna sahip her biri farklı Bragg dalga boyuna sahip M adet tekdüze FBI’ya ayrılarak, bir FBI zinciri olarak modellenebilir. Şekil 2.9’da cıvıtlı ızgaranın yapısı gösterilmiştir. M adet ayrıklaştırılmış ızgaranın her biri, Bragg dalga boyu cıvıtlı katsayısı tarafından belirlenmiş

ve Kuple Mod Teorisi kullanılarak analiz edilmiş tekdüze bir ızgara olarak işlem görmektedir. Izgaranın her bölümüne ait spektrum, FBI'nın toplam spektrumunu oluşturmaktadır. Bu sebeple, FBI'lardan daha geniş bir yansıma spektrumuna sahiptir [48,50].



(a)



(b)

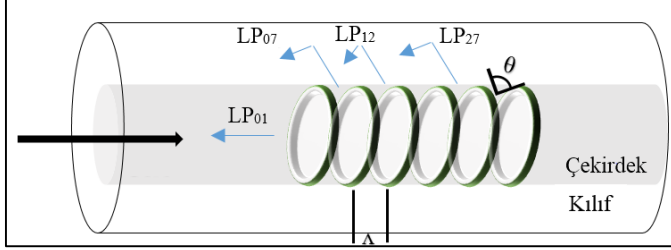
Şekil 2.9. (a) CFBI'nın yapısı (b) M adet tekdüze FBI kullanan CFBI modelinin yapısı

Izgara periyodu, ızgara uzunluğu boyunca değişim gösterdiği için, spektrumda farklı gecikmelere sahip farklı dalga boyları, farklı grup gecikmelerine maruz kalmaktadır. Bu sebeple, CFBI'lar dalga boyuna bağlı olarak diferansiyel grup gecikmesi sağlayarak kromatik dispersiyonu telafi etmek için kullanılmaktadır [8,48,50].

2.5.4. Eğik fiber Bragg ızgaralar

Bragg dalga boyu hem sıcaklık hem de gerilme değişimine karşı duyarlıdır. Bu nedenle, bir adet FBI kullanarak tasarlanmış olan sensörlerde, sıcaklık ve gerilmenin çapraz hassasiyetini birbirinden ayırt edilmesi mümkün değildir. FBI sensörlerin temel sorunu olan bu duruma, kısa periyotlu ızgaralar ailesinden olan TFBI'ların tasarlanması alternatif bir çözüm yöntemi olmuştur. TFBI kavramı, ilk olarak 1990 yılında Optik Fiber İletişim konferansında Meltz arkadaşları tarafından sunulmuştur [51].

TFBI saçakları eğimli yapıdadır ve Şekil 2.10’da gösterilmiştir. Bu eğime ait açı (θ) standart FBI’larda 0° iken TFBI’da 0° - 90° arasındadır [51]



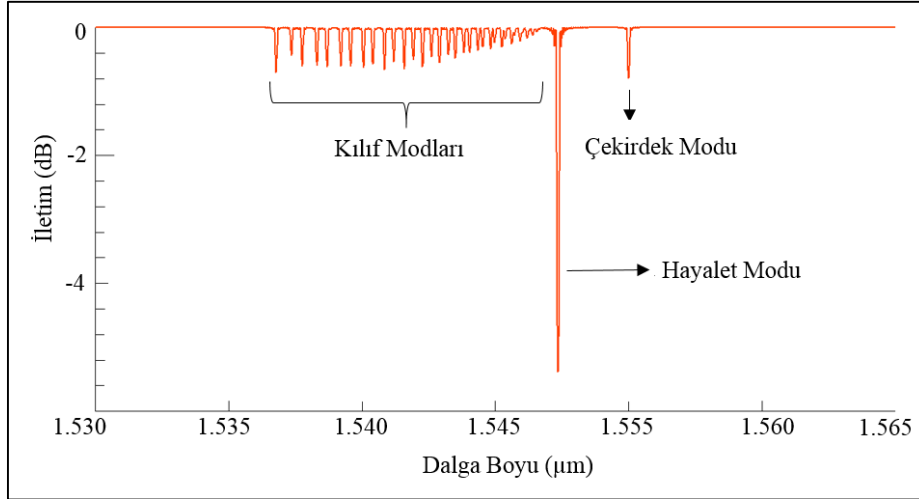
Şekil 2.10. TFBI’nın yapısı

Eş. 2.8’de, TFBI’ya ait ızgara periyodu formüle edilmiştir [21,22,25].

$$\Lambda_g = \Lambda / \cos \theta \quad (2.8)$$

Burada, Λ_g TFBI’nın ızgara periyodu, θ ızgara saçaklarının eğim açısı ve Λ normal ızgara periyodudur.

Izgara saçaklarının eğimli yapısı, TFBI’nın ileri yayılan çekirdek modundan geriye doğru yayılan kılıf modlarına bağlanmasını artırır ve ışık çekirdekten kılıfa birleştirilir. Yarı üç boyutlu yapıya sahip TFBI’ların eğik açılı ızgara yapısı fiber içi ızgaralara özel özellikler kazandırarak çok işlevli bir model sağlar [51]. TFBI’ların iletim spektrumunda, Bragg olarak isimlendirilen çekirdek modu rezonansı (LP_{01}) ve kılıf modu rezonansları (LP_{mn}) eş zamanlı olarak görünür [52-55]. TFBI’nın çekirdek modu, en büyük dalga boyuna sahip rezonanstır. Çekirdek boyunca yayılır ve bu sebeple dış kırılma indisini algılamaz. Kılıf modu rezonanslarının dalga boyları, çekirdek mod çekirdek rezonansından daha azdır. Kılıf modları, kılıf çevresi ortam arayüzüne yakın yayılır ve çevredeki ortamın kırılma indisinden etkilenir [52]. Şekil 2.11’deki temsili bir TFBI’ya ait iletim spektrumunda, hayalet modu rezonansı, diğer kılıf modlarına göre daha belirgin olarak görülür ve çekirdek modunun hemen solunda konumlanır. Hayalet modu rezonansı, en büyük dalga boyuna sahip kılıf modu rezonansıdır. [51] Hayalet modu, birkaç düşük dereceli kılıf modundan oluşur ve Bragg rezonansının birçok özelliğini taşır [53]. FBI’lar ile karşılaştırıldığında, TFBI’lar her bir kaplama modundan karmaşık veriler elde edilmesini sağlar [51].



Şekil 2.11. TFBI'nın iletim spektrumu

TFBI'nın iletim spektrumunu oluşturan, çekirdek ve i . kılıf modu rezonanslarının dalga boylarına ilişkin denklemler Eş 2.9 ve 2.10'da verilmiştir [4,21-22,53-55].

$$\lambda_{\text{çekirdek}} = 2 (n_{\text{ef,çekirdek}}) \frac{\Lambda}{\cos\theta} \quad (2.9)$$

$$\lambda_{\text{kılıf}}^i = (n_{\text{ef,çekirdek}} + n_{\text{ef,kılıf}}^i) \frac{\Lambda}{\cos\theta} \quad (2.10)$$

Burada sırasıyla, $\lambda_{\text{çekirdek}}$, $\lambda_{\text{kılıf}}^i$, TFBI'nın çekirdek modunun ve i . kılıf modunun dalga boyu, $n_{\text{ef,çekirdek}}$, $n_{\text{ef,kılıf}}^i$ fiberin çekirdek modunun ve i . kılıf modunun efektif kırılma indisidir.

2.6. FBI Tabanlı Sıcaklık ve Gerilme Sensörü

FBI'ya gerilme ve/veya sıcaklık uygulandığında ızgara periyodu ve efektif kırılma indisi değişime uğrar. Buna bağlı olarak geri yansıyan Bragg dalga boyu değişir ve meydana gelen kayma ile sıcaklık ve/veya gerilmedeki değişim tespit edilir. [10,46].

2.6.1. FBI'nın sıcaklık ve gerilme hassasiyeti

FBI'nın sıcaklık hassasiyeti

Sıcaklığın etkisiyle, ısı genleşme katsayısı ızgara periyodunda değişime, termo-optik etki ise fiberin efektif kırılma indisinde değişikliğe sebep olur. FBG'nın sıcaklık duyarlılığı, sıcaklık değişimine bağlı olarak Eş. 2.11'deki gibi hesaplanır.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \left(n_{ef} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \Lambda \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} \right) \quad (2.11)$$

Burada $\Delta\lambda_B$, Bragg dalga boyundaki değişim, ΔT ise uygulanan sıcaklıktaki değişimdir. $n_{ef} = \frac{\lambda_B}{2\Lambda}$ ve $\Lambda = \frac{\lambda_B}{2n_{ef}}$ olmak üzere, Eş. 2.11'de yerine konulduğunda Eş. 2.12 elde edilmektedir.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} \right) \lambda_B \quad (2.12)$$

Eş. 2.12 tekrar düzenlendiğinde Eş 2.13 elde edilir.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.13)$$

Eş. 3.3'ün ilk kısmı, $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$ termal genleşme katsayısı, ikinci kısmı ise $\xi = \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T}$ termo-optik katsayısını ifade etmektedir ve Eş. 2.13'te yerine yazıldıklarında, Eş. 2.14 elde edilmektedir. [10-11,41,45-46,56]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi) \Delta T \quad (2.14)$$

FBI'nin gerilme hassasiyeti

FBI'ya gerilme uygulandığında fiberin boyunda uzama meydana gelir buna bağlı olarak ızgara periyodu artış gösterir. Uygulanan gerilme, fiberin efektif kırılma indisini de

etkilemektedir. Fakat bu ızgara periyodu artışı ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğu için ihmal edilebilir [40].

FBI'nın gerilme duyarlılığı ise, yer değiştirmeye bağlı olarak Eş. 2.15'teki gibi formüle edilmektedir. [11,41,56]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta_L} = 2 \left(n_{ef} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \Lambda \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} \right) \quad (2.15)$$

Burada $\Delta\lambda_B$, uygulanan gerilme sebebiyle Bragg dalga boyundaki değişim, $\Delta\lambda_L$ ise yer değiştirmedeki değişimdir. $n_{ef} = \frac{\lambda_B}{2\Lambda}$ ve $\Lambda = \frac{\lambda_B}{2n_{ef}}$ olmak üzere, Eş. 2.15'te yerine konulduğunda Eş. 2.16 elde edilmektedir

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial L} + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial L} \right) \Delta_L \quad (2.16)$$

Eş. 2.16'nın birinci kısmı, fiber uzunluğu boyunca ızgara periyodundaki değişimi ifade etmektedir. Eş. 2.16'nın ikinci kısmı ise foto elastik katsayı p_e 'dir ve Eş. 2.17'deki gibi formüle edilmektedir.

$$p_e = \left(\frac{n_{ef}^2}{2} \right) [p_{12} - v(p_{11} + p_{12})] \quad (2.17)$$

Burada, p_{11} ve p_{12} gerilme-optik tensörü ve v Poisson oranıdır [45].

2.6.2. Çapraz hassasiyet

Sıcaklık ve gerilmeyi ölçmek için kullanılan FBI'ların dezavantajı, Bragg dalga boyu kaymasını belirlerken ölçülen parametre etkilerinin birbirinden ayırt edilmesine izin vermeyen çapraz hassasiyettir [58]. Yani eş zamanlı sıcaklık ve gerilme uygulamalarında Bragg dalga boyu hem sıcaklık hem de gerilmeye karşı değişim gösterecektir. Bragg dalga boyunda meydana gelen değişimin incelenmesi, kaymanın, sadece gerilme, sadece sıcaklık veya her ikisi sebebiyle gerçekleştiğini saptamak için yeterli olmamaktadır. Çapraz hassasiyet sebebiyle Bragg dalga boyundaki değişime sebep olan sıcaklık ve gerilmenin hassasiyetlerinin dalga boyuna olan etkilerinin ayrı ayrı tespit edilmesi gerekmektedir [11].

Dalga boyu değişimleri ve ölçülen büyüklükler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için çapraz hassiyet matrisi kullanılmaktadır ve Eş. 2.18’de verilmiştir [7,57].

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{1,\varepsilon} & K_{1,T} \\ K_{2,\varepsilon} & K_{2,T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon \\ T \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Burada $\Delta\lambda_1$ ve $\Delta\lambda_2$, iki ızgara sensöründen gelen dalga boyu kaymalarıdır, Sırasıyla; $K_{1,\varepsilon}$ ve $K_{1,T}$, 1. ızgara için gerilme ve sıcaklığa yanıtı, $K_{2,\varepsilon}$ ve $K_{2,T}$ 2. ızgara için gerilme ve sıcaklık yanıtıdır. Sıcaklık ve gerilmeyi ölçmek aşağıda farklı durumlar verilmiştir.

1. $K_{1,\varepsilon} = K_{2,T} = 0$ veya $K_{2,\varepsilon} = K_{1,T} = 0$ ise, ideal duruma ait çapraz duyarlılığı temsil eder.
2. Yanıt matrisindeki elemanlardan biri sıfır olmalıdır. (Sensörlerden biri, ölçülecek olan fiziksel parametrelerin birinden izole edilirse, diğer sensör için refans sağlayabilir.)
3. İki sensör, gerilme ve sıcaklığa çok farklı tepkilere sahiptir. Böylece tepki matrisinin belirleyicisi sıfır değildir.

Sıcaklık ve gerilmenin eş zamanlı ölçülmesini sağlamak için birçok yöntem kullanılmaktadır. Gerilme ve sıcaklık tepkisinin farklı olduğu iki FBI kullanılarak eş zamanlı ölçüm yapılabilir, pasif bir sıcaklık dengeleme paketi kullanılarak sıcaklık dalga boyundan bağımsız hale getirilebilir, ($K_{1,T}$ ’i veya $K_{2,T}$ ’yi sıfır yapmak), farklı fiber çaplarından üretilmiş iki FBI kullanılabilir (Büyük bir çapa sahip fiber, daha küçük bir çapa sahip olandan daha az gerilme yaşar), kullanılan iki FBI’den birine eş zamanlı sıcaklık ve gerilme uygulanırken, diğer FBI’ya sadece sıcaklık ya da gerilme uygulanarak eş zamanlı ölçümler yapılabilir [6]. Kullanılan bu yöntemler, birden fazla FBI ya da başka eklentiler gerektirmektedir. FBI sensörlerin temel sorunu olan bu duruma, kısa periyotlu ızgaralar ailesinden olan TFBI tasarlanması alternatif çözüm olmuştur. Sıcaklık ve gerilmenin sadece bir TFBI kullanarak eş zamanlı bağımsız ölçümü yapılabilir.

2.6.3. TFBI sensör’ün sıcaklık ve gerilme hassasiyeti

TFBI’ların algılama prensibi FBI’lardaki gibidir. Ölçülmek istenen fiziksel değişimler TFBI’ya uygulandığında, spektrumdaki modların dalga boyları değişime uğramaktadır. Eğim açısı sayesinde iletim spektrumunda eş zamanlı görülen çekirdek ve kılıf rezonanslarının sıcaklık ve gerilmeye karşı duyarlılıkları farklıdır. Bu sebeple, ölçülmek

istenen parametre TFBI'ya maruz bırakıldığında, çekirdek ve kılıf modlarının dalga boylarında farklı miktarda kaymalar meydana gelir. Bu özellik sayesinde sıcaklık ve gerilmenin eş zamanlı ölçümünü yapmak mümkündür.

TFBI sensör'ün sıcaklık hassasiyeti

Çekirdek ve kılıf modlarının sıcaklığa duyarlılığı, çekirdek ve kılıfa ait ısı genleşme ve termo-optik katsayılarına bağlı olarak değişir. Isıl genleşme katsayısı ızgara periyodunda değişime, termo-optik etki ise fiberin efektif kırılma indisinde değişikliğe sebep olur. TFBI'ya uygulanan sıcaklık ΔT kadar değiştirildiğinde, çekirdek modunun ve i . kılıf modlarının dalga boylarında meydana gelen kayma miktarları Eş. 2.19 ve 2.20'de verilmiştir [21,23,53-55].

$$\Delta\lambda_{\text{çekirdek}} = 2 \left(\frac{\Lambda}{\cos\theta} \frac{\partial n_{ef,\text{çekirdek}}}{\partial T} + \frac{n_{ef,\text{çekirdek}}}{\cos\theta} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T = K_{\text{çekirdek},T} \Delta T \quad (2.19)$$

$$\Delta\lambda_{\text{kılıf}}^i = \left(\frac{\Lambda}{\cos\theta} \frac{\partial (n_{ef,\text{çekirdek}} + n_{ef,\text{kılıf}}^i)}{\partial T} + \frac{(n_{ef,\text{çekirdek}} + n_{ef,\text{kılıf}}^i)}{\cos\theta} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T = K_{\text{kılıf},T}^i \Delta T \quad (2.20)$$

Burada, $\Delta\lambda_{\text{çekirdek}}$, $\Delta\lambda_{\text{kılıf}}^i$ sırasıyla, çekirdek mod ve i . kılıf modunun sıcaklık değişimiyle dalga boyunda meydana gelen değişimdir. $K_{\text{çekirdek},T}$, $K_{\text{kılıf},T}^i$ sırasıyla, çekirdek ve i . kılıf modunun sıcaklık yanıtıdır.

TFBI sensör'ün gerilme hassasiyeti

Çekirdek ve kılıf modlarının gerilmeye karşı duyarlılığı, fiber optiğin uzamasıyla değişen ızgara periyoduna ve fotoelastik etki sebebiyle kırılma indisinde meydana gelen değişime bağlı olarak değişir. TFBI'ya uygulanan gerilme $\Delta \varepsilon$ kadar değiştirildiğinde, çekirdek ve i . kılıf modlarının dalga boylarında meydana gelen kayma miktarları Eş. 2.21 ve 2.22'de verilmiştir [21,23,53,55].

$$\Delta\lambda_{\text{çekirdek}} = 2 \left(\frac{\Lambda}{\cos\theta} \frac{\partial n_{ef,\text{çekirdek}}}{\partial \varepsilon} + \frac{n_{ef,\text{çekirdek}}}{\cos\theta} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right) \Delta \varepsilon = K_{\text{çekirdek},\varepsilon} \Delta \varepsilon \quad (2.21)$$

$$\Delta\lambda_{\text{kılıf}}^i = \left(\frac{\Lambda}{\cos\theta} \frac{\partial (n_{ef,\text{çekirdek}} + n_{ef,\text{kılıf}}^i)}{\partial \varepsilon} + \frac{(n_{ef,\text{çekirdek}} + n_{ef,\text{kılıf}}^i)}{\cos\theta} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right) \Delta \varepsilon = K_{\text{kılıf},\varepsilon}^i \Delta \varepsilon \quad (2.22)$$

Burada, $\Delta\lambda_{\text{çekirdek}}$, $\Delta\lambda_{\text{kılıf}}^i$ sırasıyla, çekirdek ve i .kılıf modunun uygulanan gerilme sebebiyle dalga boyunda meydana gelen değişimdir. Eş. 2.21 ve Eş. 2.22'nin birinci kısımları, TFBI uzunluğu boyunca ızgara periyodundaki değişimi ifade etmektedir, ikinci kısmı ise foto elastik katsayıdır. $K_{\text{çekirdek},\varepsilon}$ ve $K_{\text{kılıf},\varepsilon}^i$ sırasıyla, çekirdek ve i .kılıf modunun gerilme yanıtıdır.

Çekirdek ve kılıfa ait foto elastik katsayıları Eş. 2.23 ve Eş. 2.24'teki gibi formüle edilir.

$$p_{\text{çekirdek}} = - \frac{1}{n_{ef,\text{çekirdek}}} \frac{\partial n_{ef,\text{çekirdek}}}{\partial \varepsilon} \quad (2.23)$$

$$p_{\text{kılıf}}^i = - \frac{1}{(n_{ef,\text{çekirdek}} + n_{ef,\text{kılıf}}^i)} \frac{\partial (n_{ef,\text{çekirdek}} + n_{ef,\text{kılıf}}^i)}{\partial \varepsilon} \quad (2.24)$$

Eş. 2.23 ve 2.24, Eş. 2.21 ve 2.22'de yerine konularak düzenlenirse, aşağıdaki Eş 2.25 ve 2.26 elde edilir ve çekirdek ve i .kılıf modlarının gerilme sebebiyle dalga boylarında meydana gelen kayma miktarları bu şekilde de ifade edilebilir [53-55].

$$\Delta\lambda_{\text{çekirdek}} = \lambda_{\text{çekirdek}} (1 - p_{\text{çekirdek}}) \Delta\varepsilon \quad (2.25)$$

$$\Delta\lambda_{\text{kılıf}}^i = \lambda_{\text{kılıf}}^i (1 - p_{\text{kılıf}}^i) \Delta\varepsilon \quad (2.26)$$

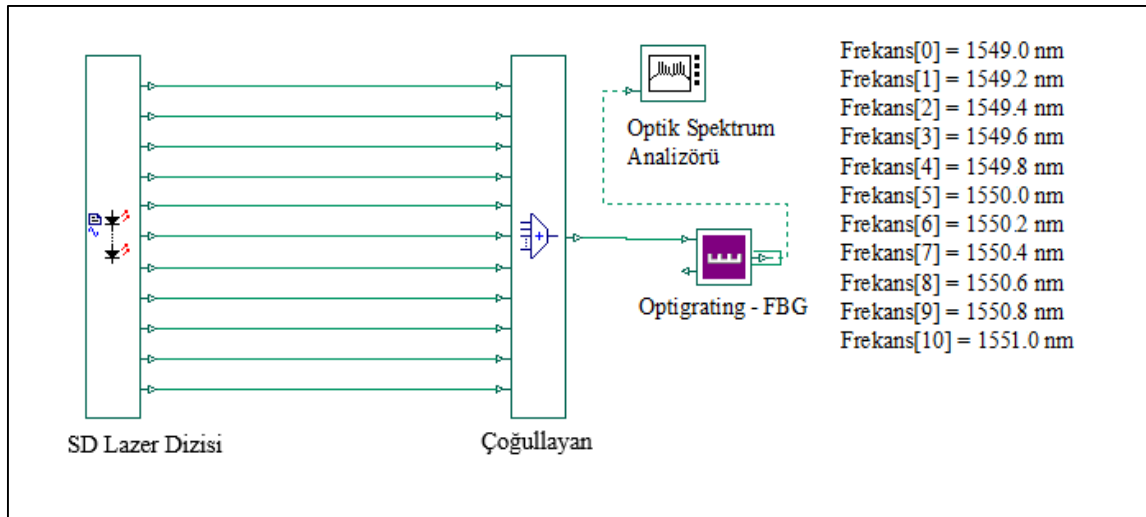
Çekirdek ve kılıfa ait fotoelastik katsayıları, p_{11} ve p_{12} gerilme-optik tensörü, ν = Poisson oranı cinsinden Eş. 2.27'deki gibi formüle edilir [45,56,58].

$$p_e = \left(\frac{n_{ef}^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (2.27)$$

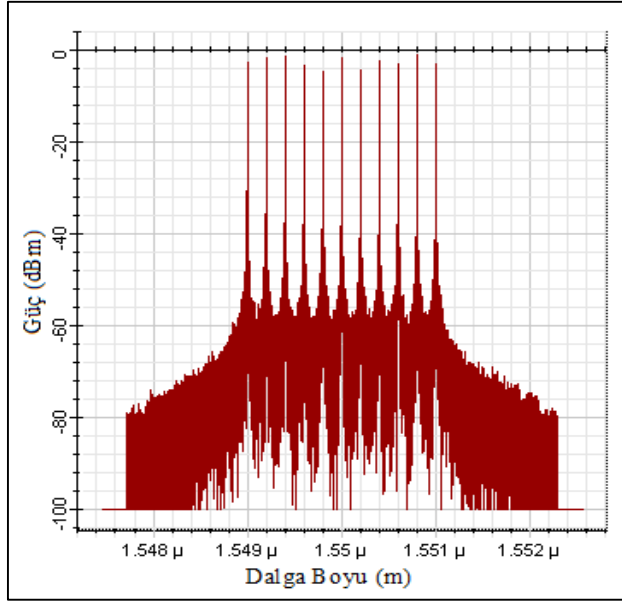
FBI tabanlı sensörler ile basınç, yük, bükme, titreşim, hızlanma, elektrik gücü, elektrik akımı, manyetik alan ve hidrojen gibi değişimler de ölçebilmektedir. Bu parametrelerin çoğu için temel algılama ilkeleri gerilme ve sıcaklık için olanlarla aynıdır [6].

3. FBI TABANLI SICAKLIK SENSÖRÜ TASARIMLARI

Bu tez çalışmasının ilk aşaması olarak, tekdüze, apodize ve cıvıltılı yapılarıdaki FBI sensör tasarımları ve tasarlanan bu FBI'ların yansıma spektrumlarının incelenmeleri OptiGrating yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tasarlanan bu üç tip FBI'nın, uygulanmış olan 25, 40, 50, 60 °C sıcaklıklarının yansıma spektrumlarına ait veriler uygun formatta OptiSystem yazılımına aktarılmış ve incelemeye bu yazılım üzerinden devam edilmiştir. Geniş band lazer kaynağı ve verileri OptiGrating yazılımından aktarılmış olan FBI, kullanılarak kurulmuş olan düzenek Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada, lazer kaynakların çıkış güçlerinin, ışıma kaynaklarına göre daha yüksek olması nedeniyle FBI'ların analizlerinin daha net elde edilebilmesi için geniş band lazer kaynağı tercih edilmiştir. FBI'nın girişine geniş band lazer kaynağı (Simülasyonda olmadığı için 1549 nm - 1551 nm aralığında 0.2 nm adım aralığıyla artan sürekli dalga (SD) lazer dizisi kullanılmıştır.) bağlanarak, her bir sıcaklık mertebesi için FBI merkez dalga boylarında meydana gelen kaymalar optik spektrum analizörü ile incelenmiştir. Tasarlanmış olan tekdüze, apodize ve cıvıltılı FBI'lar için bu aşamalar tekrarlanmıştır. Simülasyonda kullanılan SD lazer dizisi Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bileşenlerin çıkış gücü 0 dBm (1 mW)'dir.



Şekil 3.1. OptiSystem'de kurulan simülasyon düzeneği



Şekil 3.2. SD lazer kaynağının spektrumu

Tekdüze, apodize ve cıvıtlı FBI'ların tasarımlarında kullanılan optik fibere ve sıcaklık sensörüne ait parametrelerde silika fiberler referans alınmıştır. Optik fibere ait parametre değerleri Çizelge 3.1'de, sıcaklık sensörü termo-optik parametreleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Optik fiber parametreleri

Optik Fiber Parametreleri	Değer
Çekirdek yarıçapı	4,1 μm
Kılıf yarıçapı	62,25 μm
Çekirdeğin efektif kırılma indisi	1,46
Kılıfın efektif kırılma indisi	1,45

Çizelge 3.2. Sıcaklık sensörünün parametreleri

Sıcaklık Sensörü Termo-optik Parametreleri	Değer
$\alpha_{\text{çekirdek}}$	5,5e-007 1/°C
$\xi_{\text{çekirdek}}$	8,3e-006 1/°C
$\alpha_{\text{kılıf}}$	5,5e-007 1/°C
$\xi_{\text{kılıf}}$	8,3e-006 1/°C

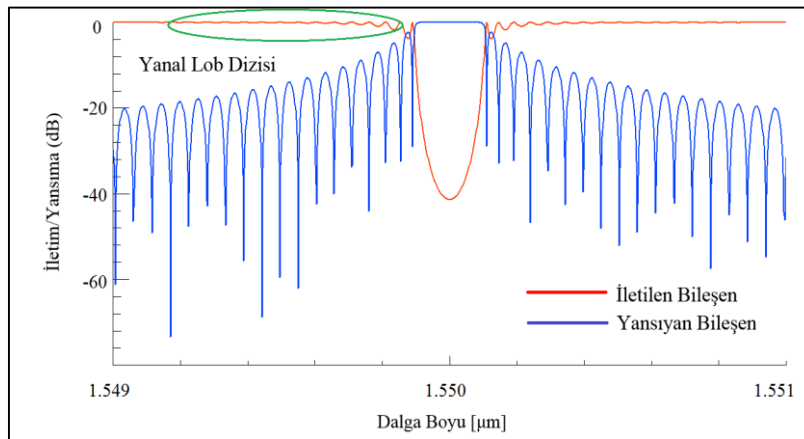
3.1. Tekdüze Fiber Bragg Izgara Tabanlı Sıcaklık Sensörü Tasarımı

Bragg dalga boyu 1550 nm olan tekdüze FBI, Çizelge 3.3'te verilen ızgara parametre değerleri kullanılarak tasarlanmıştır (L: ızgara uzunluğu, Δn : indis modülasyon genliği). Bragg dalga boyundaki yansıtıcılık %99,992677'dir.

Çizelge 3.3. Tekdüze FBI tasarımında kullanılan parametreler

Tekdüze Izgara Parametreleri	Değer
L	15000 μm
Λ	0,53219353 μm
Δn	0,0002

Referans sıcaklıkta (25 °C) tasarlanan tekdüze FBI sensörün iletim-yansıma spektrumu Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Yansıtıcılığın maksimum olduğu Bragg dalga boyu (1550 nm) çevresinde yanal loblar konumlanmıştır ve 1549,876 nm ve 1550,124 nm aralığında gözlemlenmiştir. Bragg dalga boyundan uzaklaştıkça yansıtıcılığın azaldığı, iletimin arttığı görülmektedir. Tasarlanan ızgaranın bang genişliği 0,26 nm'dir.



Şekil 3.3. 25 °C'deki tekdüze FBI için, iletim-yansıma spektrumu

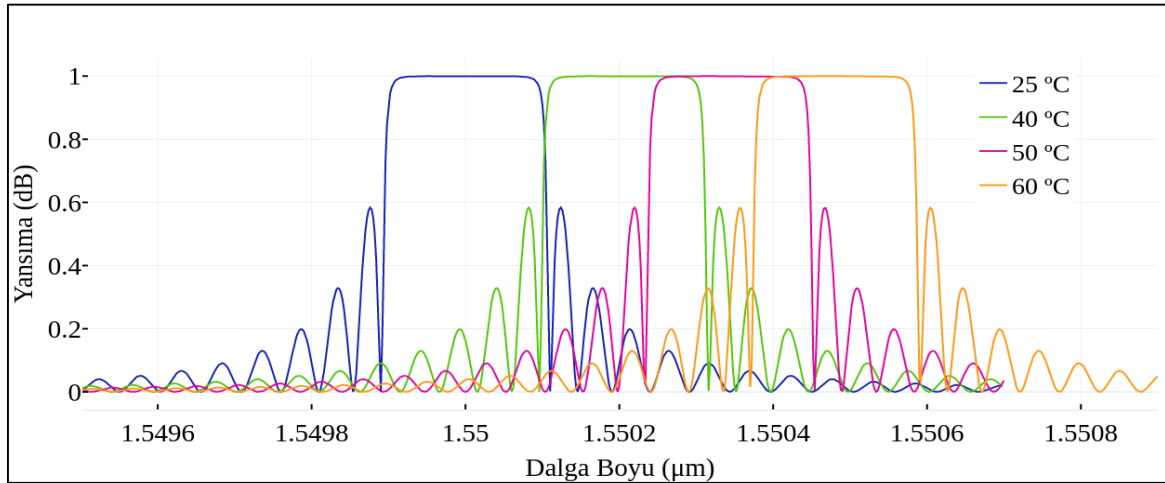
Referans sıcaklık 25 °C olmak üzere, sıcaklık 40-60 °C aralığında 10 °C periyotlarla artırılarak tekdüze FBI'ya uygulanmıştır. Her bir sıcaklık mertebesine ait, ızgara periyodu ve Bragg dalga boyu Çizelge 3.4'te verilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla, ızgara periyodu, ısıl genişleme katsayısına bağlı olarak genişlemiş ve kırılma indisi termo-optik katsayıya bağlı olarak artmıştır. Dalga boyu da bu faktörlere bağlı olarak değişmiştir. Dalga boylarındaki

kayma miktarları 10 °C'lık değişimlerde 0,13 nm ve 0,14 nm mertebelerinde olmuştur. Kullanılan yazılımın hassasiyetinden kaynaklanan bu farklılık göz ardı edilerek kaymalar doğrusal kabul edilmiştir.

Çizelge 3.4. Tekdüze FBI'da sıcaklığın etkisiyle ızgara periyodu ve λ_B değişimi

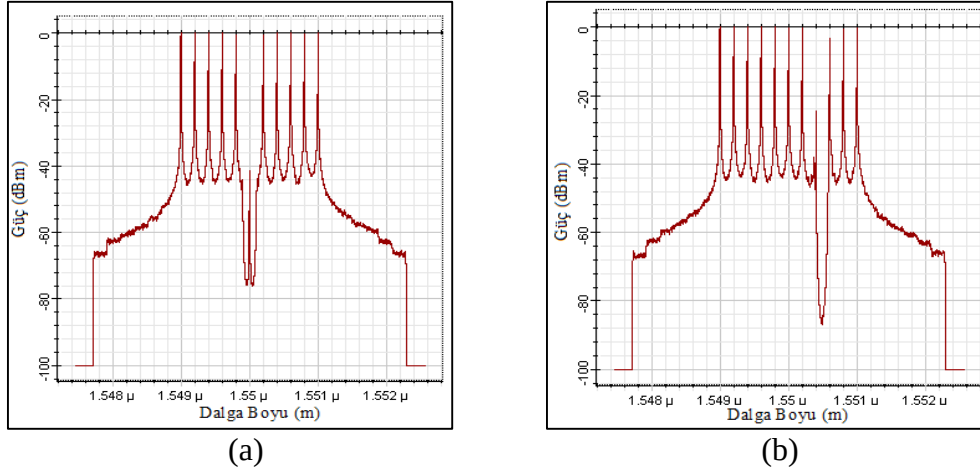
Uygulanan Sıcaklık (C°)	Izgara Periyodu	λ_B (nm)
25	0,532194	1550,00
40	0,532198	1550,21
50	0,532201	1550,34
60	0,532204	1550,48

Uygulanan her bir sıcaklık mertebesine ait tekdüze FBI sensörün yansıma spektrumları Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Isıl genleşme ve termo-optik katsayılarının pozitif değerli olması sebebiyle spektrum sağa doğru kaymıştır.



Şekil 3.4. 25, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için tekdüze FBI'nın yansıma spektrumu

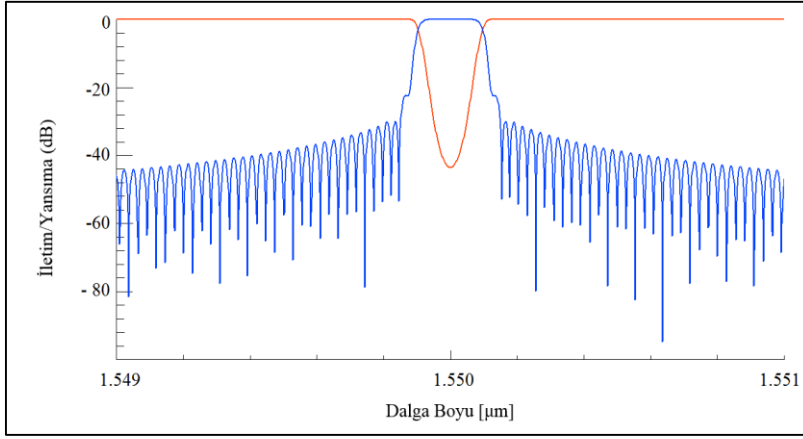
OptiGrating yazılımında tasarlanmış olan tekdüze FBI'nın 25 ve 60 °C'lerdeki yansıma spektrumlarına ait veriler OptiSystem yazılımına uygun formatta aktarılmıştır. Şekil 3.5'te, SD lazer dizinin çıkışındaki tekdüze FBI'nın 25 ve 60 °C sıcaklıklarına ait yansıma spektrumları gösterilmiştir. Şekil 3.5b'deki spektruma göre, 60 °C için hesaplanan Bragg dalga boyuna ait bölgeyi yansıttığı görülmüştür (Bkz Çizelge 3.4).



Şekil 3.5. (a) 25 °C için, (b) 60 °C için tekdüze FBI'nın yansıma spektrumu

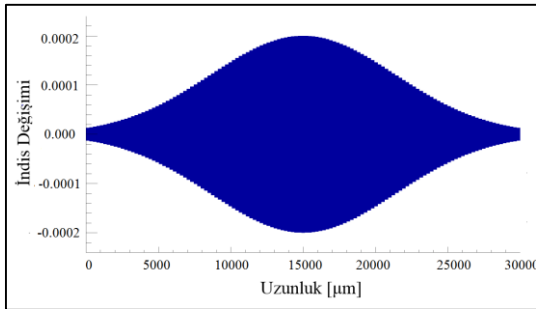
3.2. Apodize Fiber Bragg Izgara Tabanlı Sıcaklık Sensörü Tasarımı

Izgara uzunluğu $L=15000 \mu\text{m}$, indis modülasyon genliği 0,0002 ve taper (azalma) parametre değeri 0,5 olmak üzere, Bragg dalga boyu 1550 nm olan Gauss model apodize FBI tasarlanmıştır. Bragg dalga boyundaki yansıtıcılık %98,668030 olarak elde edilmiştir. Bir önceki çalışmada tasarlanan tekdüze FBI'nın $L=15000$, indis modülasyon genliği 0,0002 Bragg dalga boyu 1550 nm olmak üzere, yansıtıcılığı %99,992677 olarak elde edilmiştir. Bu durum, apodize uygulamasının FBI'nın yansıtıcılığını azalttığı sonucunu çıkarmaktadır. Aynı parametre değerleri için tekdüze ızgaranın yansıtıcılığı apodize ızgaraya göre daha yüksektir. Maksimum yansıtıcılık elde edebilmek amacıyla, apodize FBI'nın ızgara uzunluğu $30000 \mu\text{m}$ 'ye yükseltilerek %99,995505 yansıtıcılık elde edilmiştir. Şekil 3.6'daki apodize FBI'ya ait iletim-yansıma spektrumu incelendiğinde, tekdüze FBI'ya ait spektrumda (Bkz. Şekil 3.3) bulunan yan lobların, apodize tekniği ile minimuma indiği görülmüştür. Yanal lob dizilerinin istenmediği uygulamalarda, apodize teknikleri ile minimuma indirilebilir.



Şekil 3.6. 25 °C’de L=30000 µm apodize FBI için iletim-yansıma spektrumu

Izgara uzunluğu boyunca, ızgara periyodunun ve indis modülasyon genliği ilişkisi Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Tasarlanan apodize FBI, Gauss model apodize yapıda olduğu için geometrik olarak Gauss profilinde değişim göstermiştir. İndis modülasyon genliği değişimi ızgara uzunluğunun orta noktasında en yüksek seviyededir ve ızgaranın başına ve sonuna doğru azalım göstermiştir. Izgara periyodu, ızgara uzunluğu boyunca sabittir. Sıcaklık artışı, profil üzerinde geometrik olarak değişime sebep olmamıştır (Bkz Şekil 3.7.) fakat ızgara periyodunun artmasına sebep olmuştur. 25 ve 60 °C’lerdeki ızgara periyotları sırasıyla 0,532194 ve 0,532204 µm’dir.



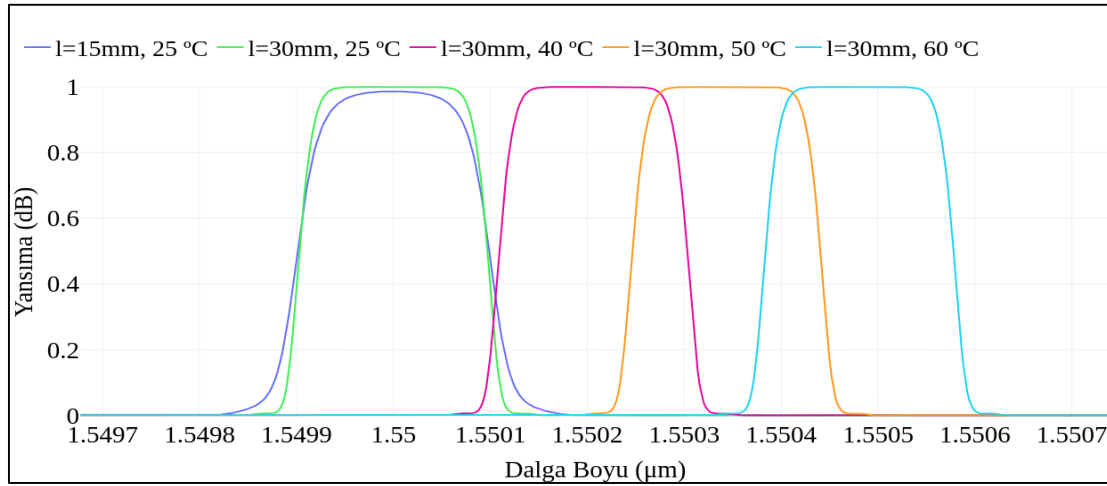
Şekil 3.7. Apodize FBI’nın ızgara periyodu ve indis modülasyon genliği

Referans sıcaklık 25 °C olmak üzere, sıcaklık 40-60 °C aralığında 10 °C periyotlarla artırılarak apodize FBI’ya uygulanmıştır. Her bir sıcaklık mertebesine ait, ızgara periyodu ve Bragg dalga boyları Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Apodize FBI’da sıcaklığın etkisiyle ızgara periyodu ve λ_B değişimi

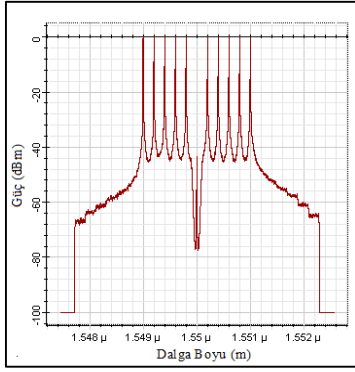
Uygulanan Sıcaklık C°	Izgara Periyodu	λ_B (nm)
25	0,532194	1550
40	0,532198	1550,21
50	0,532201	1550,34
60	0,532204	1550,48

Uygulanan her bir sıcaklık mertebesine ait FBI sensörün yansımaya spektrumları Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Isıl genleşme ve termo-optik katsayıları pozitif değerli olduğu için spektrumlar sağa doğru kaymıştır. Yansıtıcılık ızgara uzunluğunun artmasına bağlı olarak artmıştır.

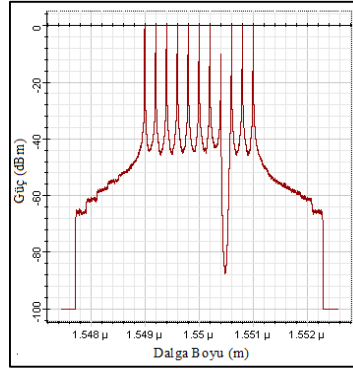


Şekil 3.8. 25, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için apodize FBI’nın yansımaya spektrumu

Tasarlanmış olan apodize FBI’nın 25, 60 °C sıcaklıklarının spektrumlarına ait veriler OptiSystem yazılımına uygun formatta aktarılmıştır. SD lazer dizisinin çıkışındaki apodize FBI’nın 25 ve 60 °C sıcaklıklarına ait yansımaya spektrumları Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Şekil 3.9b’deki spektruma göre, 60 °C için hesaplanan Bragg dalga boyuna ait bölgeyi yansıttığı görülmüştür (Bkz Çizelge 3.5).



(a)

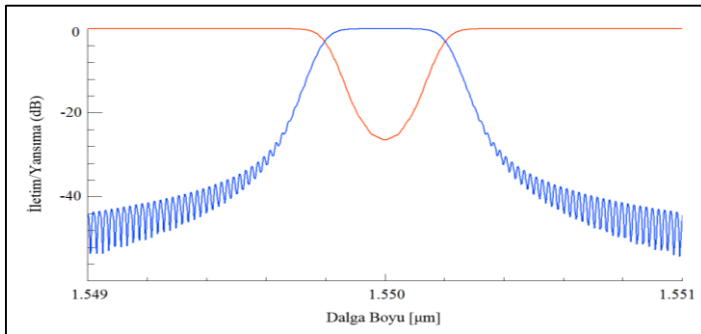


(b)

Şekil 3.9. (a) 25 °C için, (b) 60 °C için apodize FBI'nın yansımaya spektrumu

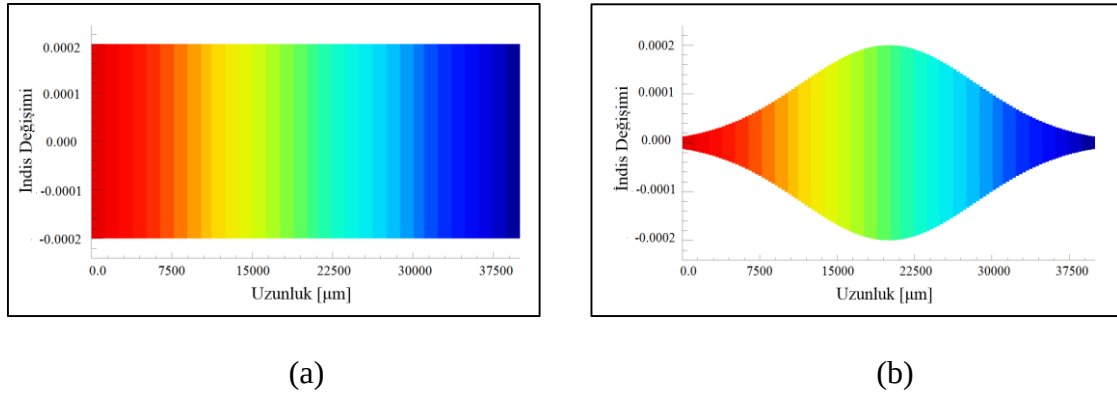
3.3. Cıvıtlı Fiber Bragg Izgara Tabanlı Sıcaklık Sensörü Tasarımı

Izgara uzunluğu $L=30000 \mu\text{m}$, indis modülasyon genliği 0,0002, toplam cıvıltı 0,2 nm ve Bragg dalga boyu 1550 nm olan cıvıtlı FBI sensör tasarlanmıştır. Bragg dalga boyundaki yansıtıcılık %98,969786 olarak elde edilmiştir. Bir önceki çalışmada tasarlanan apodize FBI'nın $L=30000 \mu\text{m}$, indis modülasyon genliği 0,0002 Bragg dalga boyu 1550 nm olmak üzere, yansıtıcılığı %99,995505 olarak elde edilmiştir. Aynı parametre değerleri için apodize ızgaranın yansıtıcılığı cıvıtlı ızgaraya göre daha yüksektir. Cıvıltı uygulaması, FBI'nın yansıtıcılığını azaltmıştır. Maksimum yansıtıcılık elde edebilmek amacıyla cıvıtlı FBI'nın ızgara uzunluğu $40000 \mu\text{m}$ 'ye çıkarılmıştır ve yansıtıcılık %99,7725 olmuştur. Cıvıtlı FBI'nın 25 °C'deki iletim-yansımaya spektrumu Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Cıvıtlı FBI'nın band genişliğinin, tekdüze ve apodize yapıdaki FBI'lara göre daha geniş olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 3.3, Şekil 3.6). Cıvıltı uygulaması band genişliğini arttırmıştır.



Şekil 3.10. 25 °C'de $L=40000 \mu\text{m}$ cıvıtlı FBI için iletim-yansımaya spektrumu

Tasarlanan cıvıtlı FBI'nın ızgara uzunluğu boyunca, ızgara periyodunun ve indis modülasyon genliğinin değişimi Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Cıvıtlı uygulaması sebebiyle, ızgara periyodu, ızgara uzunluğu boyunca değişim göstermiştir. Her bir renk, farklı ızgara periyodu değerini ifade etmektedir. Şekil 3.11a'daki profile göre, apodize uygulanmamış cıvıtlı FBI'nın indis modülasyon genliği değişmemiş fakat ızgara periyodu ızgara uzunluğu boyunca değişim gösterilmiştir. Şekil 3.11b'deki profile göre cıvıtlı FBI'nın Gauss profil apodizasyon uygulandığı için hem ızgara periyodu hem de indis modülasyon genliği ızgara uzunluğu boyunca değişim göstermiştir.



Şekil 3.11. (a) Cıvıtlı (b) Cıvıtlı-apodize FBI için indis modülasyon genliği değişimi

Referans sıcaklık olmak üzere, 25 °C Sıcaklık 40-60 °C aralığında, 10 °C periyotlarla arttırılarak cıvıtlı-apodize FBI'ya uygulanmıştır. Uygulanan her bir sıcaklık mertebesindeki, ızgara periyodu ve indis modülasyon genliğinin değişimi geometrik olarak 25 °C sıcaklıktaki profil ile aynı olmuştur (Bkz. 3.11b). Fakat, artan sıcaklık sebebiyle, ızgara periyodu her bir periyot değişiminde artmış buna bağlı olarak da Bragg dalga boyunda kayma gözlemlenmiştir. Çizelge 3.6'da, 25 ve 60 C° için, ızgara periyonun, değişimleri verilmiştir. Çizelge 3.7'de 25, 40, 50 ve 60 C° için sıcaklıkla değişen Bragg dalga boyları verilmiştir.

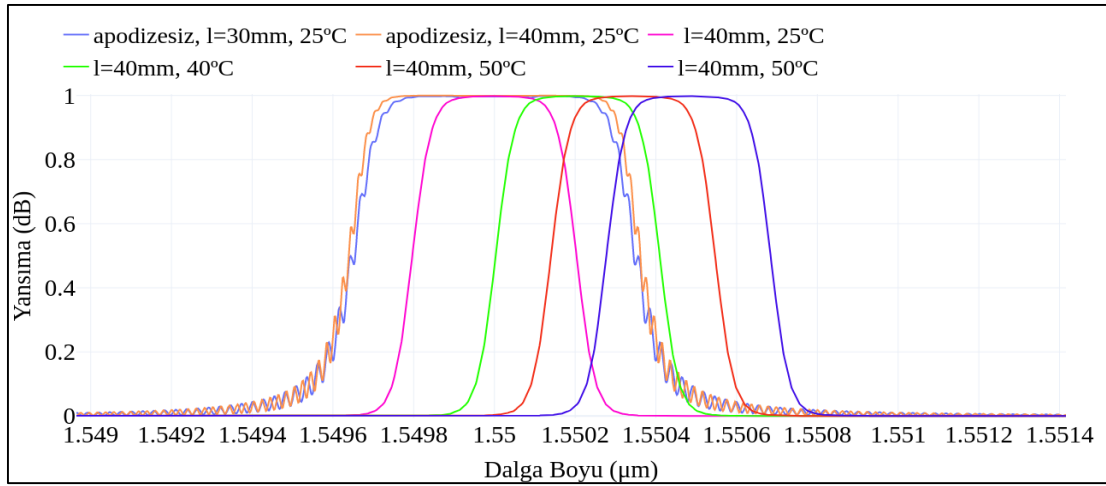
Çizelge 3.6. Apodizeli cıvıtlı FBI'da sıcaklığın etkisiyle ızgara periyodu değişimi

Izgara Uzunluğu									
	0 μm	4875 μm	9750 μm	14625 μm	19500 μm	24375 μm	29250 μm	34125 μm	39000 μm
25 °C	0,53229	0,53227	0,53224	0,53222	0,53219	0,53217	0,53214	0,53212	0,53209
60 °C	0,53230	0,53228	0,53225	0,53223	0,53220	0,53218	0,53215	0,53213	0,53210

Çizelge 3.7. Apodizeli cıvıtlı FBI’da, sıcaklığın etkisiyle λ_B değişimi

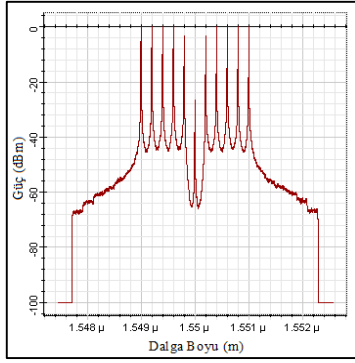
Uygulanan Sıcaklık C°	λ_B (nm)
25	1550
40	1550,21
50	1550,34
60	1550,48

Uygulanan her bir sıcaklık değerine ait cıvıtlı FBI sensörün yansımaya spektrumları Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Isıl genleşme ve termo-optik katsayılarının pozitif değerli olması sebebiyle spektrum yine sağa doğru kaymıştır. Apodize uygulaması, band genişliğini azaltmıştır ve yan loblar minimize edilmiştir. Cıvıtlı FBI’nın band genişliği, tekdüze ve apodize FBI’ların band genişliklerinden daha fazla olmuştur. (Bkz. Şekil 3.4, Şekil 3.8).

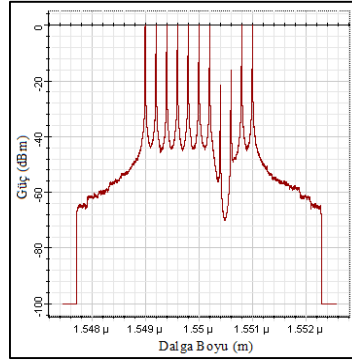


Şekil 3.12. 25, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için cıvıtlı FBI’nın yansımaya spektrumu

Daha sonra, tasarlanmış olan apodize uygulanmış cıvıtlı FBI’nın 25 ve 60 °C sıcaklıklarının spektrumlarına ait veriler OptiSystem yazılımına aktarılmıştır. Şekil 3.13’te, SD lazer dizisinin çıkışındaki cıvıtlı FBI’nın 25 ve 60 °C sıcaklıklarına ait yansımaya spektrumları gösterilmiştir. Şekil 3.13b’deki spektruma göre, 60 °C için hesaplanan Bragg dalga boyuna ait bölgeyi yansıttığı görülmüştür (Bkz Çizelge 3.7). Cıvıtlı FBI’nın band genişliği, tekdüze ve apodize FBI’lara göre daha geniş olduğu için, SD lazer dizisi kaynağının spektrumun diğer FBI’lara göre daha geniş bir bölgesini yansıtmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.13. (a) 25 °C için, (b) 60 °C için cıvıtlı FBI'nın yansıma spektrumu

3.4. Tasarlanan FBI'ların Karşılaştırması

Çizelge 3.8'de, tasarlanan FBI'ların ($\lambda_B = 1,55 \mu\text{m}$) değişen özellikleri incelenmiştir. λ_B 'daki yansıtıcılıkların maksimum referans değeri 1 olmak üzere, ızgara uzunluğunun artışıyla arttığı görülmektedir. Apodize ve cıvıtlı uygulamaları sebebiyle azalan yansıtıcılık, ızgara uzunluğu artırılarak, optimize edilmiştir. Artan ızgara uzunluğuna bağlı olarak band genişlikleri azalmıştır. Tekdüze ızgaranın Bragg dalga boyunun solunda bulunan yan lob 1549,876 nm'de başlayarak spektrumun soluna doğru, Bragg dalga boyunun sağında bulunan yan lob 1550,124 nm'de başlayarak spektrumun sağına doğru konumlanmıştır. Uygulanan gauss profil apodize tekniği ile, yan loblar Bragg dalga boyundan daha uzak dalga boylarında konumlanarak genlik değerlerinin de 1000 kat azaldığı görülmektedir. Apodize uygulaması yan lobların bastırılmasını ve band genişliğinin azalmasını sağlarken FBI'nın yansıtıcılığını olumsuz etkilemiştir. Cıvıtlı FBI, tekdüze ve apodize türlerinden farklı olarak en geniş band genişliğine sahiptir. Cıvıtlı sebebiyle azalan yansıtıcılığı arttırmak için artırılan ızgara uzunluğu yan lobların genliğini arttırmıştır.

Çizelge 3.8. Tasarlanan FBI'ların karşılaştırılması

FBI Türü	L (mm)	YMTG (nm)	λ_B 'daki Yansıtıcılık	Sol Yan Lob	Değer	Sağ Yan Lob	Değer
Tekdüze	15	0,260	0,999927	1549,876	0,583845000	1550,124	0,583777000
Apodize	15	0,196	0,986680	1549,740	0,000511104	1550,260	0,000510858
Apodize	30	0,192	0,999055	1549,866	0,005749580	1550,134	0,005741630
Apodize-Cıvıtlı	30	0,384	0,989698	1549,654	0,003075410	1550,346	0,003064330
Apodize-Cıvıtlı	40	0,404	0,997725	1549,678	0,006398990	1550,322	0,006383350

4. TFBI TABANLI SICAKLIK VE GERİLME SENSÖRÜ TASARIMI

Çizelge 4.1’deki fiber optik ve ızgara parametre değerleri kullanılarak çekirdek modunun dalga boyu 1,55 μm olan, ızgara saçakları 5° eğimli TFBI, OptiGrating programı ile tasarlanmıştır.

Çizelge 4.1. TFBI tasarımı için kullanılan parametre değerleri

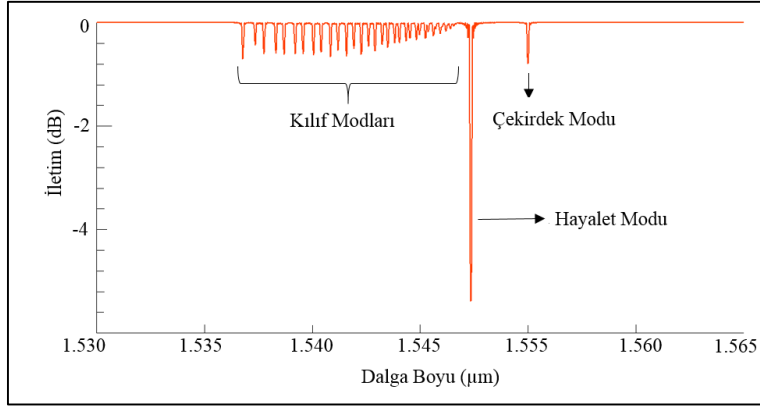
TFBI Parametreleri	Değer
$\lambda_{\text{çekirdek}}$	1,55 μm
$\lambda_{\text{kılıf}}$	1,54735 μm
$\alpha_{\text{çekirdek}} - n_{\text{ef,çekirdek}}$	4,1 μm - 1,46
$\alpha_{\text{kılıf}} - n_{\text{ef,kılıf}}$	62,25 μm - 1,45
Eğim açısı	5°
L	10000 μm
Λ	0,53016837 μm
Δ_n	0,0002

TFBI’nın spektrumunu oluşturan LP_{mn} modlarına ait kırılma indisleri birbirlerinden farklı olmaktadır. $m=0,1$ ve $n=20$ için LP_{mn} modlarına ait kırılma indisi değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. TFBI iletim spektrumunu oluşturan LP_{mn} modlarına ait kırılma indisleri

LP_{mn} modları ve kırılma indisi değerleri							
$LP_{(0,1)}$	1,4562372	$LP_{(0,11)}$	1,4450322	$LP_{(1,1)}$	1,4512558	$LP_{(1,11)}$	1,4446270
$LP_{(0,2)}$	1,4499558	$LP_{(0,12)}$	1,4440163	$LP_{(1,2)}$	1,4499276	$LP_{(1,12)}$	1,4435368
$LP_{(0,3)}$	1,4498060	$LP_{(0,13)}$	1,4429110	$LP_{(1,3)}$	1,4497511	$LP_{(1,13)}$	1,4423493
$LP_{(0,4)}$	1,4495528	$LP_{(0,14)}$	1,4417146	$LP_{(1,4)}$	1,4494689	$LP_{(1,14)}$	1,4410654
$LP_{(0,5)}$	1,4491978	$LP_{(0,15)}$	1,4404243	$LP_{(1,5)}$	1,4490818	$LP_{(1,15)}$	1,4396860
$LP_{(0,6)}$	1,4487426	$LP_{(0,16)}$	1,4390370	$LP_{(1,6)}$	1,4485915	$LP_{(1,16)}$	1,4382123
$LP_{(0,7)}$	1,4481891	$LP_{(0,17)}$	1,4375502	$LP_{(1,7)}$	1,4479991	$LP_{(1,17)}$	1,4366458
$LP_{(0,8)}$	1,4475392	$LP_{(0,18)}$	1,4359620	$LP_{(1,8)}$	1,4473057	$LP_{(1,18)}$	1,4349877
$LP_{(0,9)}$	1,4467950	$LP_{(0,19)}$	1,4342715	$LP_{(1,9)}$	1,4465121	$LP_{(1,19)}$	1,4332391
$LP_{(0,10)}$	1,4459588	$LP_{(0,20)}$	1,4324787	$LP_{(1,10)}$	1,4456190	$LP_{(1,20)}$	1,4314009

Kırılma indisleri, Eş. 2.9 ve Eş. 2.10’da verilen formüllerde yerine yazıldığında, LP_{mn} modları Şekil 4.1’de gösterilen iletim spektrumundaki gibi konumlanır. TFBI’nın iletim spektrumunda hayalet modunun dalga boyu 1,547350 μm ’dir. Kılıf modlarının dalga boyu 1,53679 μm - 1,546558 μm aralığında değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. Tasarlanan TFBI'nın iletim spektrumu

4.1. Tasarlanan TFBI'nın Sıcaklık Hassasiyeti

Çalışmanın bu bölümünde, sıcaklığın TFBI üzerindeki etkisi, çekirdek ve hayalet modlarının sıcaklık hassasiyetleri hesaplanarak incelenmiştir. Sensör tasarımında kullanılan parametre değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Bu parametre değerleri seçilirken silika fiberler referans alınmıştır ve bu tip fiberlerde ısı genleşme katsayısı, termo-optik katsayıdan ihmal edilebilecek düzeyde küçük olduğu için, ısı genleşme katsayısı çekirdek ve kılıf katmanları için aynı seçilmiştir.

Çizelge 4.3. TFBI tabanlı sıcaklık sensörünün tasarım parametreleri

Sıcaklık Sensörü Termo-optik Parametreleri	Değer
$\alpha_{\text{çekirdek}}$	5,5e-007 1/°C
$\xi_{\text{çekirdek}}$	5,0e-005 1/°C
$\alpha_{\text{kılıf}}$	5,5e-007 1/°C
$\xi_{\text{kılıf}}$	8,3e-006 1/°C

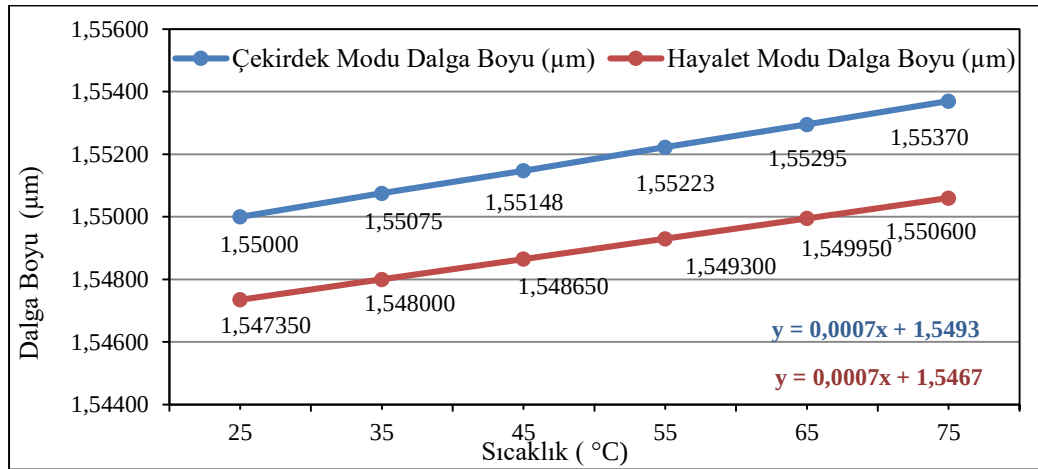
Referans sıcaklık 25°C kabul edilerek, sıcaklık 25-75°C aralığında 10°C periyotlarla arttırılmıştır. Sıcaklığın artmasıyla, ızgara periyodu ısı genleşme katsayısına bağlı olarak genişlemiş ve kırılma indisi termo-optik katsayıya bağlı olarak artmıştır. Dalga boyu da bu faktörlere bağlı olarak değişmiştir. Çekirdek ve kılıfa ait termo-optik katsayıların farklı olması sebebiyle çekirdek ve hayalet modlarının sıcaklığa karşı duyarlılığı dolayısıyla dalga boylarındaki doğrusal kaymalar birbirinden farklı olmuştur ve bu değerler Çizelge 4.4'te verilmiştir. 1°C'lik sıcaklık değişiminde çekirdek modunun dalga boyunda yaklaşık olarak

75 pm'lik, hayalet modunun dalga boyunda ise yaklaşık olarak 65 pm'lik bir kayma meydana geldiği görülmektedir.

Çizelge 4.4. Sıcaklık uygulanmış TFBI'nın çekirdek ve hayalet modlarına ait dalga boyları ve kayma miktarları

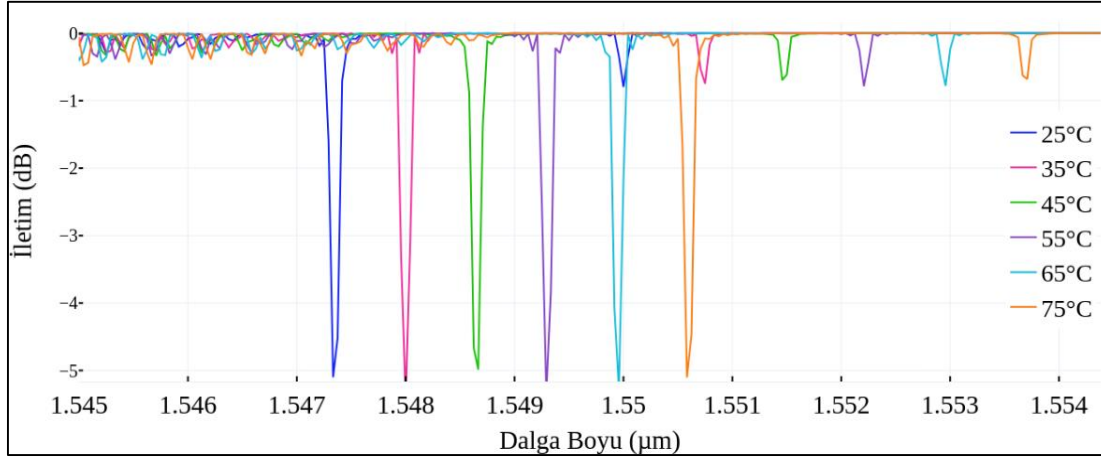
ΔT (°C)	$\lambda_{\text{çekirdek}}$ (μm)	λ_{hayalet} (μm)	$\Delta\lambda_{\text{çekirdek}}$ (μm)	$\Delta\lambda_{\text{hayalet}}$ (μm)
25	1,550000	1,54735	0	0
35	1,550750	1,54800	0,000750	0,00065
45	1,551475	1,54865	0,000725	0,00065
55	1,552225	1,54930	0,000750	0,00065
65	1,552950	1,54995	0,000725	0,00065
75	1,553700	1,55060	0,000750	0,00065

Şekil 4.2'deki grafiğe göre, doğrusal artışla uygulanan sıcaklık, çekirdek ve hayalet modlarının dalga boylarında doğrusal bir değişim göstermesine sebep olmuştur.



Şekil 4.2. Sıcaklık değişimine karşılık ve dalga boyu değişimi

Şekil 4.3'te çekirdek ve hayalet modlarına ait iletim spektrumları verilmiştir. Termo-optik ve ısı genleşme katsayılarının pozitif değerli olması, modlara ait spektrumların sağa doğru kaymasına sebep olmuştur.



Şekil 4.3. Farklı sıcaklıklarda çekirdek ve hayalet modlarının iletim spektrumları

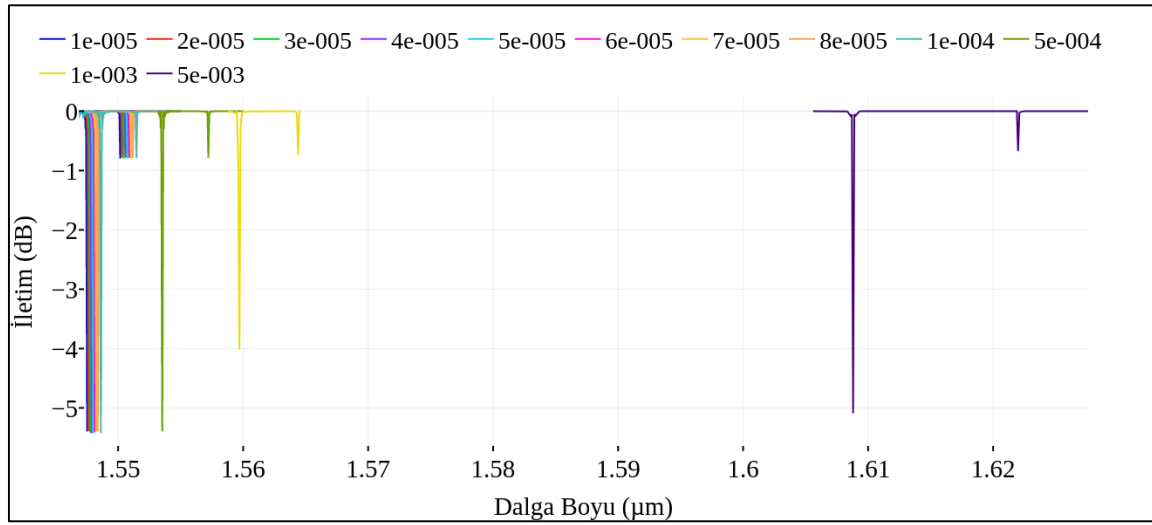
4.1.1. Termo-optik katsayısının dalga boyu değişimine etkisi

Çalışmanın bu bölümünde, termo-optik katsayısının, sıcaklık uygulanan TFBI'nın dalga boyundaki değişimine olan etkisi incelenmiştir. Fiber optik kılıfının ısı genleşme katsayısı değeri sabit tutularak $5,5e-007$ değeri ile çekirdeğe ait termo-optik katsayısı için farklı değerlerle çalışılmıştır (silika fiberler referans alınmıştır). $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık değişiminde, çekirdek ve hayalet modlarının değişen dalga boyları ve dalga boylarında meydana gelen doğrusal kayma miktarları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

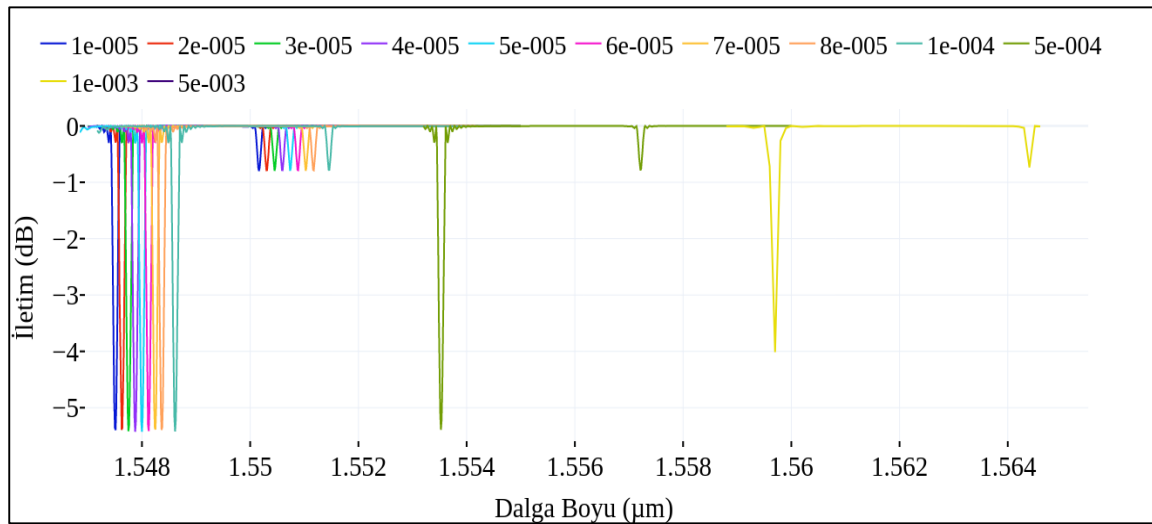
Çizelge 4.5. Değişen termo-optik katsayısının çekirdek ve hayalet modlarının dalga boyunda meydana getirdiği kayma

$\xi_{\text{çekirdek}}$	$\xi_{\text{kılıf}}$	$\lambda_{\text{çekirdek}} (\mu\text{m})$	$\lambda_{\text{hayalet}} (\mu\text{m})$	$\Delta\lambda_{\text{çekirdek}} (\mu\text{m})$	$\Delta\lambda_{\text{hayalet}} (\mu\text{m})$	$ \lambda_{\text{çekirdek}} - \lambda_{\text{hayalet}} (\mu\text{m})$
Referans	Referans	1,550000	1,547350	0,000000	0,000000	0,002650
1,00e-005	8,3e-006	1,550160	1,547500	0,000160	0,000150	0,002660
2,00e-005	8,3e-006	1,550300	1,547640	0,000300	0,000290	0,002660
3,00e-005	8,3e-006	1,550450	1,547750	0,000450	0,000400	0,002700
4,00e-005	8,3e-006	1,550590	1,547880	0,000590	0,000530	0,002710
5,00e-005	8,3e-006	1,550740	1,548000	0,000740	0,000650	0,002740
6,00e-005	8,3e-006	1,550880	1,548120	0,000880	0,000770	0,002760
7,00e-005	8,3e-006	1,551030	1,548240	0,001030	0,000890	0,002790
8,00e-005	8,3e-006	1,551170	1,548370	0,001170	0,001020	0,002800
1,00e-004	8,3e-006	1,551463	1,548612	0,001463	0,001262	0,002851
5,00e-004	8,3e-006	1,557220	1,553520	0,007220	0,006170	0,003700
1,00e-003	8,3e-006	1,564425	1,559700	0,014425	0,012350	0,004725
5,00e-003	8,3e-006	1,622000	1,608750	0,072000	0,061400	0,013250

Çalışılan her bir termo-optik katsayısı değeri için, 10 °C sıcaklık değişimindeki çekirdek ve hayalet modları için iletim spektrumu Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Termo-optik katsayısının artmasıyla çekirdek ve hayalet modları daha büyük dalga boylarında konumlanmıştır. Dolayısıyla iki modunda artan sıcaklıkla dalga boylarındaki kayma miktarları artmıştır. Çekirdek ve hayalet modlarının aralarındaki mesafenin termo-optik katsayısının artışı ile arttığı görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.4. (a) Bütün modlar (b) 1548 nm-1564 nm arasındaki (yakınlaştırılmış) modlar için $\xi_{\text{çekirdek}}$ değerleri için iletim spektrumu

4.1.2. Isıl genleşme katsayısının dalga boyu değişimine etkisi

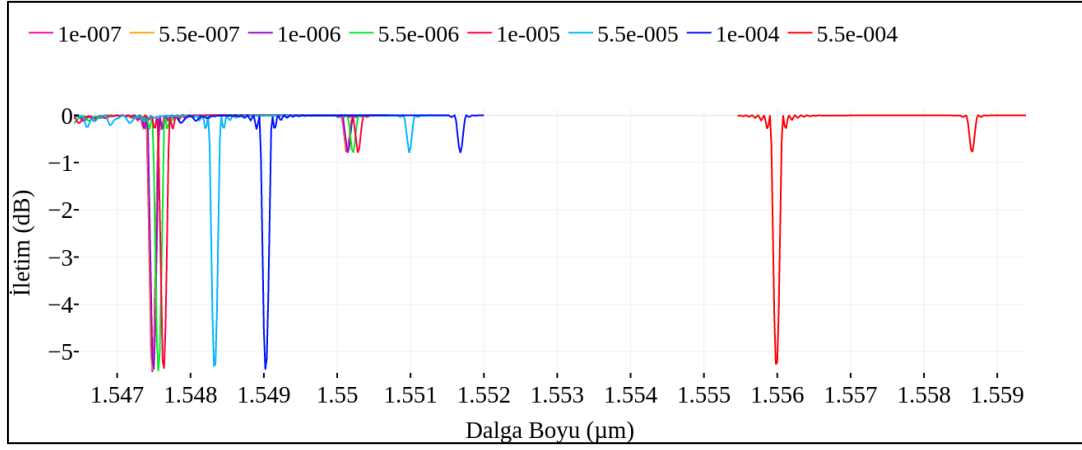
Çalışmanın bu bölümünde, ısı genleşme katsayısının, sıcaklık uygulanan TFBI'nın dalga boyundaki değişime olan etkisi incelenmiştir. Fiber optik kılıfına ait ısı genleşme katsayısı değeri sabit tutularak $5,5e-007$ değeri ile çekirdeğe ait ısı genleşme katsayısı için farklı değerlerle çalışılmış (silika fiberler referans alınmıştır). $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık değişimi için, çekirdek ve hayalet modlarının değişen dalga boyları ve dalga boylarında meydana gelen doğrusal kayma miktarları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çekirdeğin ısı genleşme katsayısı arttırıldıkça, çekirdek ve hayalet modları daha büyük dalga boylarında konumlanmıştır.

Değişen termo-optik ve ısı genleşme katsayılarının, değişen sıcaklık sebebiyle çekirdek ve hayalet modlarının dalga boylarında meydana gelen kayma miktarları incelendiğinde (Bkz. Çizelge 4.5, Çizelge 4.6), termo-optik katsayısı değeri, ısı genleşme katsayısı değerinden daha büyük değerlerde olduğu için termo-optik katsayısı sıcaklık hassasiyeti ölçümünde baskın faktör olmuştur.

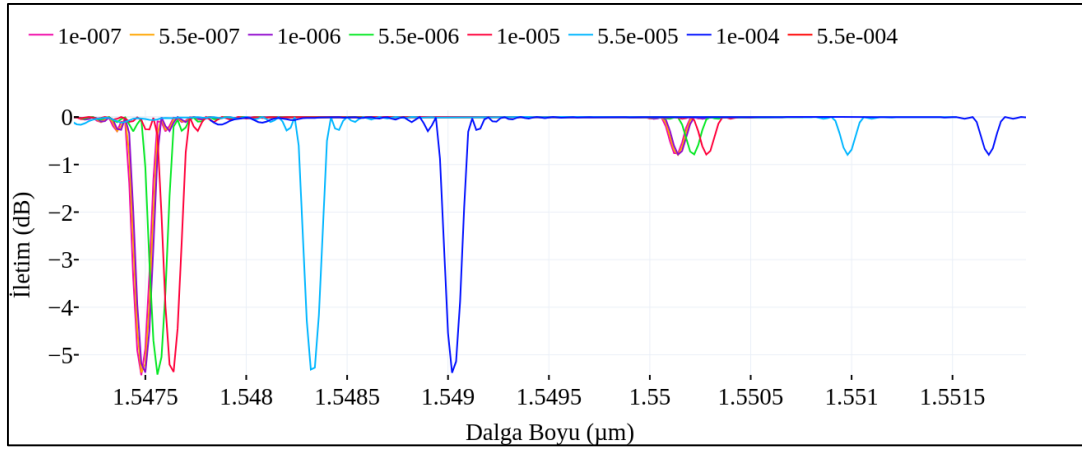
Çizelge 4.6. Değişen ısı genleşme katsayısının çekirdek ve hayalet modlarının dalga boyunda meydana getirdiği kayma

$\alpha_{\text{çekirdek}}$	$\alpha_{\text{kılıf}}$	$\lambda_{\text{çekirdek}}$ (μm)	λ_{hayalet} (μm)	$\Delta\lambda_{\text{çekirdek}}$ (μm)	$\Delta\lambda_{\text{hayalet}}$ (μm)	$ \lambda_{\text{çekirdek}} - \lambda_{\text{hayalet}} $ (μm)
Referans	Referans	1,550000	1,547350	0	0	0,00265
1,0e-007	5,5e-007	1,550140	1,547480	0,000140	0,000130	0,00266
5,5e-007	5,5e-007	1,550140	1,547480	0,000140	0,000130	0,00266
1,0e-006	5,5e-007	1,550140	1,547500	0,000140	0,000150	0,00264
5,5e-006	5,5e-007	1,550220	1,547560	0,000220	0,000210	0,00266
1,0e-005	5,5e-007	1,550280	1,547640	0,000280	0,000290	0,00264
5,5e-005	5,5e-007	1,550980	1,548320	0,000980	0,000970	0,00264
1,0e-004	5,5e-007	1,551680	1,549020	0,001680	0,001670	0,00266
5,5e-004	5,5e-007	1,558660	1,555980	0,008660	0,008630	0,00268

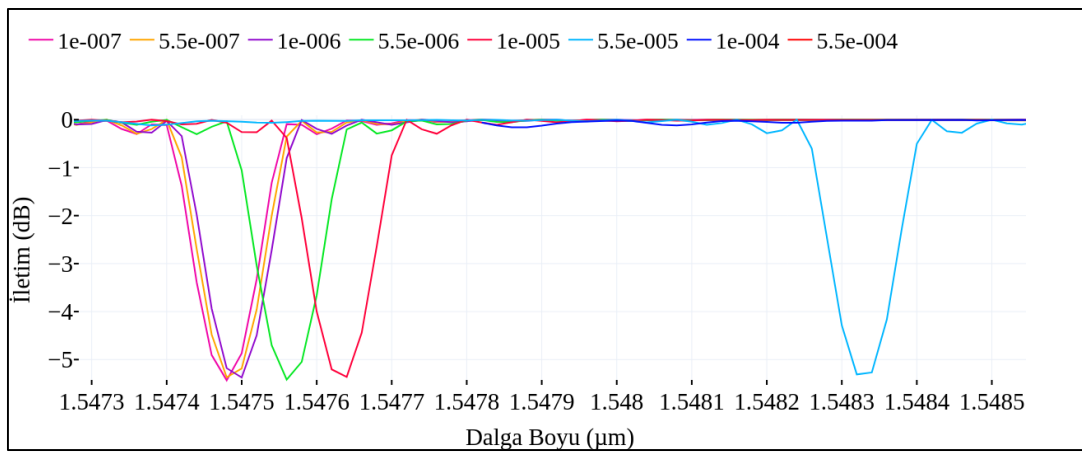
Şekil 4.5'te çalışılan her bir ısı genleşme katsayısı değeri için $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değişiminde çekirdek ve hayalet modlarına ait iletim spektrumu verilmiştir. Çekirdek ve hayalet modları ısı genleşme katsayısına ait değer artışıyla daha büyük dalga boylarında konumlanmışlardır. Fakat, ısı genleşme katsayısının artışı ile çekirdek ve hayalet modlarının aralarındaki mesafe ihmal edilebilecek düzeyde artmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.5. (a) Bütün modlar için (b) 1547,5 nm-1551,5 nm arasındaki modlar (yakınlaştırılmış) için (c) 1547,3 nm-1548,5 nm arasındaki modlar (yakınlaştırılmış) için $\alpha_{\text{çekirdek}}$ değerleri için iletim spektrumu

4.2. Tasarlanan TFBI'nın Gerilme Hassasiyeti

Gerilmenin TFBI üzerindeki etkisi, çekirdek ve hayalet modlarının sıcaklık hassasiyetleri hesaplanarak incelenmiştir. Sensör tasarımında kullanılan fotoelastik parametre değerleri, silika fiberler referans alınarak seçilmiştir. Çekirdek katmanına yapılan katkılama işlemi fotoelastik etkiyi ihmal edilecek düzeyde değiştirdiği için, fiber optiğin çekirdek ve kılıf katmanlarına ait fotoelastik parametre değerleri aynı seçilmiştir ve Çizelge 4.7'de verilmiştir. Gerilme, 0-500 $\mu\epsilon$ aralığında, 100 $\mu\epsilon$ periyotlarla değeri arttırılarak TFBI'ya uygulanmıştır.

Çizelge 4.7. TFBI tabanlı gerilme sensörü parametreleri

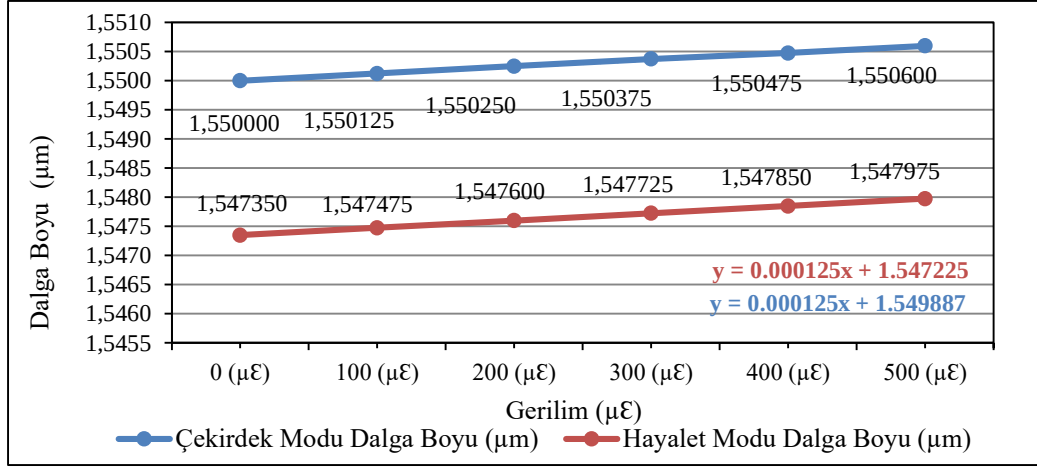
Gerilme Sensörü Fotoelastik Parametreleri	Değer
p_{11}	0,121
p_{12}	0,27
ν	0,17

Çizelge 4.8'deki değerlere göre, çekirdek ve kılıf katmanları için fotoelastik parametre değerlerinin aynı olması sebebiyle değişen gerilmeyle, çekirdek ve hayalet dalga boylarındaki kayma miktarları eşit olmuştur dolayısıyla gerilmeye karşı çekirdek ve kılıf modlarının duyarlılığı aynıdır. 1 $\mu\epsilon$ 'lik gerilme değişiminde, çekirdek ve hayalet modunun dalga boyundaki kayma yaklaşık 12,5 pm olmuştur.

Çizelge 4.8. Gerilme uygulanmış TFBI'nın çekirdek ve hayalet modlarına ait dalga boyları ve kayma miktarları

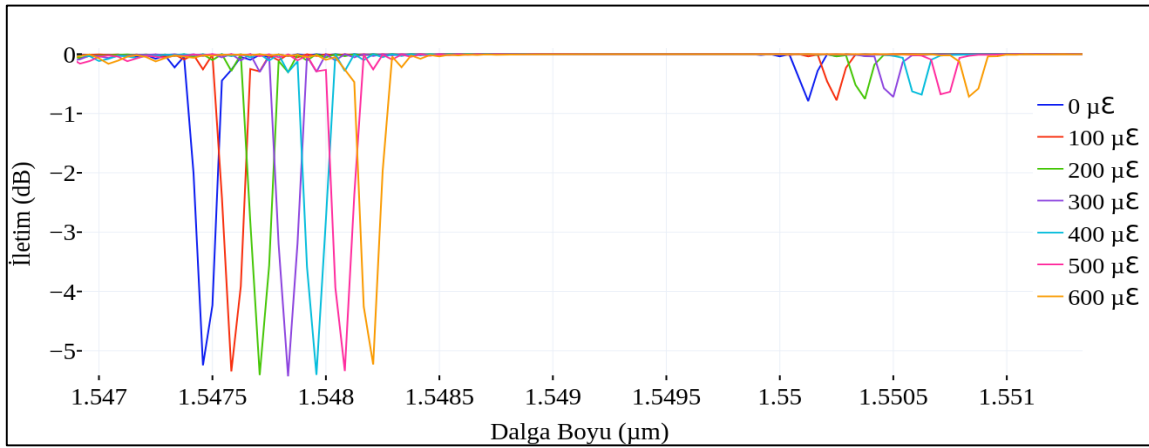
$\Delta\epsilon (\mu\epsilon)$	$\lambda_{\text{çekirdek}} (\mu\text{m})$	$\lambda_{\text{hayalet}} (\mu\text{m})$	$\Delta\lambda_{\text{çekirdek}} (\mu\text{m})$	$\Delta\lambda_{\text{hayalet}} (\mu\text{m})$
0	1,550000	1,547350	0	0
100	1,550125	1,547475	0,000125	0,000125
200	1,550250	1,547600	0,000125	0,000125
300	1,550375	1,547725	0,000125	0,000125
400	1,550475	1,547850	0,000100	0,000125
500	1,550600	1,547975	0,000125	0,000125

Şekil 4.6'daki grafiğe göre, doğrusal artışla uygulanan gerilmenin, çekirdek ve hayalet modlarının dalga boylarında doğrusal bir değişim göstermesine sebep olmuştur.



Şekil 4.6. Gerilme değişimine karşılık ve dalga boyu değişimi

Şekil 4.7' de TFBI'ya uygulanan her gerilme değeri, çekirdek ve hayalet modlarının iletim spektrumlarında sağa doğru doğrusal bir kaymaya sebep olmuştur.



Şekil 4.7. Değişen gerilme değerlerinde çekirdek ve hayalet modlarının iletim spektrumları

4.3. Tasarlanan TFBI ile Sıcaklık ve Gerilmenin Eş Zamanlı Ölçümü

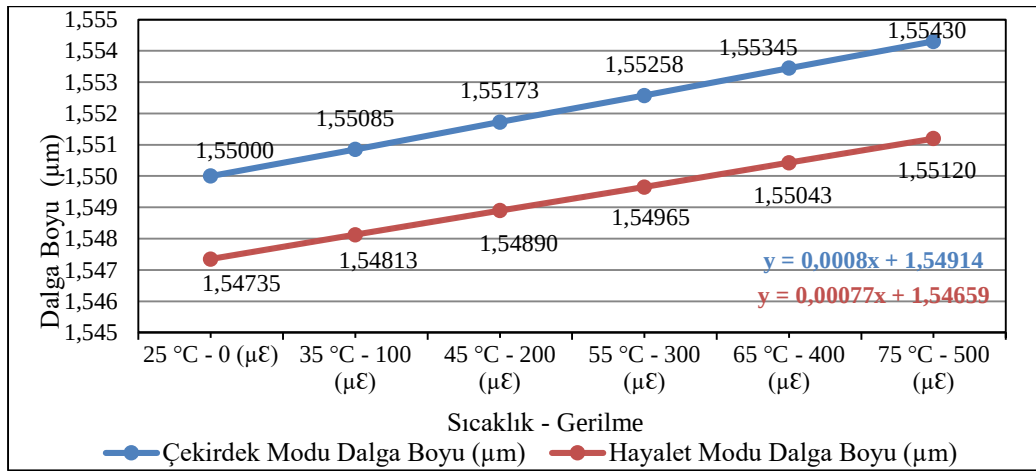
Tasarlanan TFBI'ya eş zamanlı uygulanan sıcaklık ve gerilme değerleri ve değişen sıcaklık ve gerilmenin etkisiyle TFBI'nın çekirdek ve hayalet modlarının değişen dalga boyları ve dalga boylarında meydana gelen doğrusal kayma miktarları Çizelge 4.9'da verilmiştir. Çekirdek ve kılıfa ait foto-elastik parametreleri aynı (Bkz. Çizelge 4.7) seçilerek çalışıldığı için, çekirdek ve kılıfın gerilmeye karşı duyarlılığı aynı olmuştur. Çekirdek ve kılıfa ait sıcaklık uygulamaları için baskın parametre olan termo-optik katsayıları (Bkz. Çizelge 4.3) bir birlerinden farklı seçilmiştir. Bu sayede, sıcaklığın çekirdek ve hayalet modlarındaki

hassasiyetinin farklı olması sağlanarak, çekirdek ve hayalet modlarının dalga boylarında farklı miktarlarda kayma elde edilmiştir.

Çizelge 4.9. Eş zamanlı sıcaklık ve gerilme uygulanmış TFBI'nın çekirdek ve hayalet modlarına ait dalga boyları ve kayma miktarları

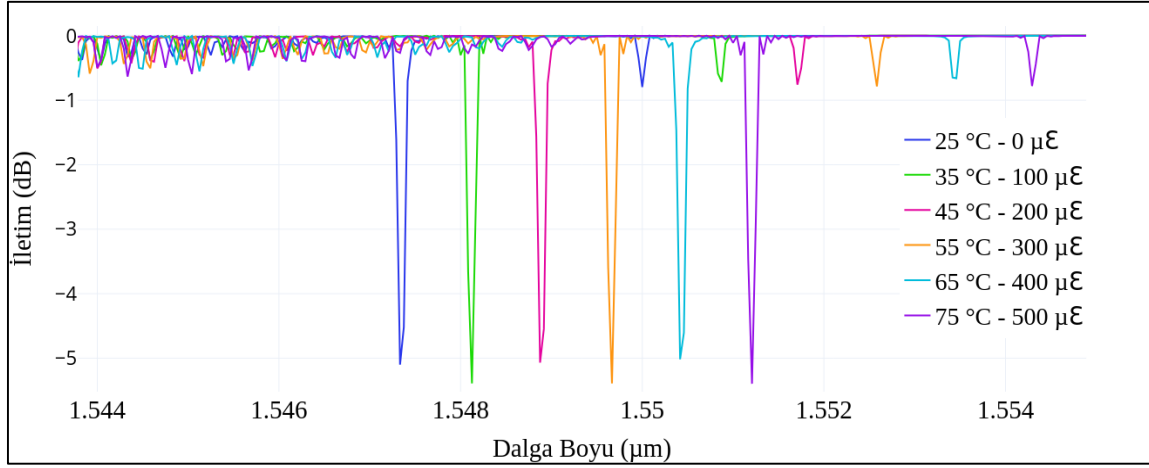
ΔT (°C)- $\Delta \varepsilon$ ($\mu\epsilon$)	$\lambda_{\text{çekirdek}}$ (μm)	λ_{hayalet} (μm)	$\Delta\lambda_{\text{çekirdek}}$ (μm)	$\Delta\lambda_{\text{hayalet}}$ (μm)
25 - 0	1,550000	1,547350	0,000000	0,000000
35 - 100	1,550850	1,548125	0,000850	0,000775
45 - 200	1,551725	1,548900	0,000875	0,000775
55 - 300	1,552575	1,549650	0,000850	0,000750
65 - 400	1,553450	1,550425	0,000875	0,000775
75 - 500	1,554300	1,551200	0,000850	0,000775

Şekil 4.8'de eş zamanlı uygulanan doğrusal artışlı sıcaklık ve gerilmenin çekirdek ve hayalet modlarının dalga boylarında doğrusal bir değişim göstermesine sebep olmuştur.



Şekil 4.8. Eş zamanlı sıcaklık ve gerilme değişimine karşılık dalga boyu değişimi

Şekil 4.9'da TFBI'ya eş zamanlı uygulanan sıcaklık ve gerilme değerleri için çekirdek ve hayalet modlarının iletim spektrumları görülmektedir. Spektrumlar sıcaklık ve gerilme parametrelerinin pozitif olması sebebiyle sağa doğru kaymıştır. Eş zamanlı sıcaklık ve gerilme uygulandığı için, spektrumda hem sıcaklık hem de gerilmenin meydana getirdiği toplam kayma gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. Eş zamanlı sıcaklık ve gerilme uygulanmış TFBI'nın spektrumu

10 °C lik sıcaklık değişiminin (Bkz. Çizelge 4.4) , 100 με gerilme değişiminin (Bkz. Çizelge 4.9) ve eş zamanlı 10 °C lik sıcaklık değişimi ve 100 με gerilme değişimi için dalga boyunda meydana gelen kayma miktarları hesaplanarak Çizelge 4.10'da derlenerek verilmiştir. Çekirdek ve hayalet modları için sadece sıcaklık ve sadece gerilme uygulanarak elde edilen veriler toplandığında ve eş zamanlı sıcaklık ve gerilme değişimlerine karşı TFBI'nın dalga boyundaki kayma miktarları ile aynı olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.10. TFBI'nın çekirdek ve hayalet modlarına ait lineer kayma miktarları

Değişen Parametre	$\Delta\lambda_{\text{çekirdek}} (\mu\text{m})$	$\Delta\lambda_{\text{hayalet}} (\mu\text{m})$
$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\epsilon = 100 \text{ } \mu\epsilon$	0,000850	0,000775
$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	0,000750	0,000650
$\Delta\epsilon = 100 \text{ } \mu\epsilon$	0,000125	0,000125

$$\begin{pmatrix} 0,000850 \text{ } \mu\text{m} \\ 0,000775 \text{ } \mu\text{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\text{çekirdek},T} & K_{\text{çekirdek},\epsilon} \\ K_{\text{hayalet},T} & K_{\text{hayalet},\epsilon} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 10 \text{ }^\circ\text{C} \\ 100 \text{ } \mu\epsilon \end{pmatrix}$$

Yukarıda verilen çapraz hassasiyet matrisine göre, tasarlanan TFBI'nın sıcaklık ve gerilme hassasiyetleri $K_{\text{çekirdek},T} = 75 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $K_{\text{hayalet},T} = 65 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $K_{\text{çekirdek},\epsilon} = 1,25 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $K_{\text{hayalet},\epsilon} = 1,25 \text{ pm}/\mu\epsilon$ olarak bulunmuştur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ilk aşamada OptiGrating yazılımı ile tekdüze, apodize ve cıvıltılı yapılarda FBI sensörler tasarlanarak sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bragg dalga boyundaki yansıtıcılık %99-%100 olacak şekilde ızgara parametreleri optimize edilmiştir. Aynı ızgara parametreleri ile çalışıldığında tekdüze FBI'nın yansıtıcılığı en fazladır. Yapılan analizlerde Gauss profilde apodize tekniği uygulaması yan lobları bastırmış fakat sensör yansıtıcılığını yaklaşık %1,5 oranında düşürmüştür. Bu sorunu çözmek için ızgara uzunluğu artırılarak maksimum yansıtıcılık mertebelerine ulaşılmıştır. Tasarlanan cıvıltılı ızgaranın band genişliğinin diğer tekdüze ve apodize sensörlere oranla daha geniş olduğu saptanmıştır. Bu sensörlerin her birine 40, 50 ve 60 °C sıcaklık uygulanmıştır. Uygulanan sıcaklık sensör spektrumlarının şeklini değiştirmemiştir fakat sensörlerin ızgara periyotları artmış buna bağlı olarak da dalga boylarında doğrusal kaymalar meydana gelmiştir. OptiSystem yazılımında SD lazer dizisinin çıkışına konumlandırılan sensöre ait yansıma spektrumları incelendiğinde apodize uygulanmış sensörün yan lobları bastırıldığı için Bragg dalga boyu etrafında daha keskin bir yansıma şekli çizdiği görülmüştür. Sıcaklık değişiminin meydana getirdiği dalga boyundaki kaymalar sadece ısı genleşme ve termo-optik katsayısına bağlı olarak değişir. Pozitif değerli ısı genleşme ve termo-optik katsayıları kullanıldığı için spektrumlardaki dalga boyu kaymaları sağa doğru olmuştur. Tüm FBI sensör tasarımlarında aynı ısı genleşme ve termo-optik katsayısı kullanıldığı için değişen sıcaklık sebebiyle dalga boylarındaki kayma miktarları aynı olmuştur. Tasarımda kullanılan termo-optik katsayısı değeri, ısı genleşme katsayısı değerinden yaklaşık 10 kat daha fazla olması sebebiyle, dalga boyu kaymasında baskın parametre termo-optik katsayısı olmuştur. Tekdüze, apodize ve cıvıltılı FBI sensörlerin değişen sıcaklıkla Bragg dalga boylarındaki kayma miktarlarının eşit olması sebebiyle sıcaklık hassasiyetleri eşit olmuştur. Yanal lob dizilerinin istenmediği ve spektrumlarda daha keskin yansıtıcılığın istendiği uygulamalarda apodize yapıdaki FBI sensörler tercih edilmelidir. Birden fazla tekdüze FBI dizisi gibi davranan geniş band genişliğine sahip cıvıltılı FBI sensörler, kromatik dispersiyonun istenmediği uygulamalarda tercih edilmelidir. Tasarlanan eğik yapıda olmayan bu FBI'lar tek başına sıcaklık ve gerilmeyi eş zamanlı ölçme yeteneğine sahip değildir. İki farklı parametre ölçümü için, iki farklı Bragg dalga boyuna gereksinim olmaktadır. Ancak iki adet FBI, sensör dizisi şeklinde modellenirse eş zamanlı ölçüm gerçekleştirilebilmektedir. İkinci aşamada, tasarlanan 5° eğim açılı TFBI ile bu iki FBI sensör ihtiyacını ortadan kaldırmıştır.

Çalışmada, TFBI'nın, iletim spektrumunda bulunan hayalet ve çekirdek modu rezonanslarının farklı hassasiyetlerde olması sağlanılarak eş zamanlı sıcaklık ve gerilme ölçümü yapılmıştır. TFBI'ya ilk aşamada değişen sıcaklık ve ikinci aşamada değişen gerilme uygulanarak çekirdek ve hayalet modlarının hassasiyetleri ayrı ayrı saptanmıştır. Böylece, eş zamanlı sıcaklık ve gerilme uygulamasından kaynaklı dalga boyu kaymalarının birbirinden ayırt edilmesi sağlanmıştır. Silika fiberler referans alınarak yapılan bu analizde, termo-optik katsayısının sıcaklık hassasiyeti ölçümünde ısı genleşme katsayısına göre baskın parametre olduğu görülmüştür. 25 ° C ile 75 ° C aralığında sıcaklık, 0 ile 500 μE aralığında gerilme ölçümleri yapılmıştır. Çekirdek ve hayalet modları farklı sıcaklık hassasiyetleri sergilerken, gerilme hassasiyetleri eşit olmuştur. Gerilme hassasiyeti çekirdek ve hayalet modu için 1,25 pm/ μE olarak, sıcaklık hassasiyeti, çekirdek modu için 75 pm/°C, hayalet modu için 65 pm/°C olarak hesaplanmıştır. TFBI sensör üretiminde kullanılan fiber optik malzemenin çekirdeğine yapılacak olan katkılama işleminde, çalışmada kullanılan ısı genleşme ve termo-optik katsayı değerleri referans alınarak katkı maddesi ve katkı maddesinin mol miktarı seçilebilir. Bu sayede TFBI üretiminde istenilen parametre değerleri tasarımcı tarafından belirlenebilir. TFBI tasarımı ile sensör düzeneğinin ve ölçümlerin karmaşıklığı azaltılarak ölçümlerin daha hızlı elde edilmesi sağlanmıştır. Sadece bir sensör kullanılarak birden fazla parametrenin ölçümünün yapılabilmesi gerçek uygulamalar için maliyeti oldukça düşürmektedir.

KAYNAKLAR

1. Othonos, A. (2000). Optical Fiber Sensor Technology: Advanced Applications - Bragg Gratings and Distributed Sensors. In K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt (Eds.), *Bragg Gratings in Optical Fibers: Fundamentals and Applications*. US: Springer, pp. 79-187.
2. Du, Y., Sun, B., Li, J., and Zhang, W. (2019). *Optical Fiber Sensing and Structural Health Monitoring Technology*. Singapore: Springer, 1-147.
3. Daud, S., and Ali, J. (2018). *Fibre Bragg Grating and No-Core Fibre Sensors*. Cham: Springer, 5-71.
4. Nogueira, R., Bilro, L., Alberto, N., Lima, H., and Pinto, J. L. (2012). Optical Fiber Sensors. In K. Iniewski (Ed.), *Optical, Acoustic, Magnetic, and Mechanical Sensor Technologies (Devices, Circuits, and Systems)* (First edition). Boca Raton: CRC Press, pp. 3-26.
5. Domingues, M. F. F., and Radwan, A. (2017). Principles of Optical Fiber Sensing. In *Optical Fiber Sensors for IoT and Smart Devices*. Cham: Springer, 1-23.
6. Zhang, L., Zhang, W., and Bennion, I. (2008). In-Fiber Grating Optic Sensors. In S. Yin, P. B. Ruffin and F. T. S. Yu (Eds.), *Fiber Optic Sensors* (Second edition). Boca Raton: CRC Press, pp. 109-162.
7. Pehlivan, C. (2007). *Optik Fiber Bragg Izgara Algılayıcıların Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
8. Kashyap, R. (2010). *Fiber Bragg Gratings* (Second edition). Burlington: Academic Press, 1-450.
9. Deniz, A. (2014). *The Investigation of Interfaces of Multilayer Multiaxis Fiber Reinforced Composites by Fiber Bragg Grating Sensors*, Master's Thesis, Sabancı University School of Engineering and Natural Sciences, İstanbul.
10. Kipriksiz, S., ve Yücel, M. (Baskıda). Düzgün Olmayan Yapılarda Fiber Bragg Izgara Sensör Tasarımı ve Uygulaması. *Politeknik Dergisi*.
11. Yücel, M., Öztürk, N., 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.
12. Khalid, K., Zafrullah, M., Bilal, S. M., and Mirza, M. (2012). Simulation and analysis of Gaussian apodized fiber Bragg grating strain sensor. *Journal of Optical Technology*, 79(10), 667-673.
13. Ashry, I., Elrashidi, A., Mahros, A. M., Alhaddad, M., and Elleithy, K. (2014). *Investigating the performance of apodized Fiber Bragg gratings for sensing applications*. Paper presented at Proceedings of the The 2014 Zone 1 Conference of the American Society for Engineering Education, USA.

14. Elgaud, M. M., Zan, M. S., Abushagur, A. A., Bakar, A. A., and Elshirkasi, A. M. (2016). Analysis and simulation of time domain multiplexed (TDM) fiber Bragg sensing array using OptiSystem and OptiGrating. In R. Nordin (Ed.), *Proceedings of the 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering*. Washington: IEEE, pp. 1-3.
15. Hisham, H. K. (2017). Bandwidth Characteristics of FBI Sensors for Oil and Gas Applications. *American Journal of Sensor Technology*, 4(1), 30-34.
16. Fathy, M., Mofreh, T., Barakat, T. (2019). New simulation and analysis fiber Bragg grating: narrow bandwidth without side lobes. *International Journal of Applied Engineering Research*, 14(11), 2667-2674.
17. Meena, D., and Meena, M. L. (2018). Design and Analysis of Novel Dispersion Compensating Model with Chirp Fiber Bragg Grating for Long-Haul Transmission System. In V. Janyani, G. Singh, M. Tiwari and A. d'Alessandro (Eds.), *Optical and Wireless Technologies*. Singapore: Springer, pp. 29-36.
18. Frazao, O., and Santos, J. L. (2004). Simultaneous measurement of strain and temperature using a Bragg grating structure written in germanosilicate fibres. *Journal of Optics A Pure and Applied Optics*, 6(6), 553-556.
19. Elgaud, M. M., Zan, M. S. D., Abushagur, A. A. G., and Bakar, A. A. A. (2016). Analysis of independent strain-temperature fiber Bragg grating sensing technique using OptiSystem and OptiGrating. In A. A. A. Bakar (Ed.), 2016 IEEE 6th International Conference on Photonics. Washington: IEEE, pp. 1-3.
20. Chehura, E., James, S. W., and Tatam, R. P. (2007). Simultaneous independent measurement of temperature and strain using a tilted fibre Bragg grating. In A. Cutolo, J. M. L. Higuera, and B. Culshaw (Eds.), the Third European Workshop on Optical Fibre Sensors. Bellingham: SPIE, pp. 66190I-4.
21. Miao, Y., Liu, B., and Zhao, Q. (2008). Simultaneous measurement of strain and temperature using single tilted fibre Bragg grating. *Electronics Letters*, 44(21), 1242.
22. Zhang, W., Yang, B., Tong, Z., Miao, Y., Liu, B., and Dong, X. (2010). Temperature and strain sensing characteristics of the tilted fiber Bragg grating. *Optoelectronics Letters*, 6(5), 355-358.
23. Cheng, D., Yan, F., Feng, T., Bai, Z., Zhang, L., Wang, W., Liu, S., Zhou, H., and Hou, Y. (2018). Single weakly tilted FBI in 2- μ m band capable of measuring temperature, axial strain, and surrounding refractive index. *Optical Engineering*, 57(9), 1.
24. Wang, Q., Li, X., Zhao, X., and Zhao, C. (2015). Characterization of Temperature and Strain Using a Tilted Fiber Bragg Grating. *Instrumentation Science & Technology*, 43(2), 244-254.
25. Gao, Y. F., Liu, C., and Mu, H. W. (2014). Effects of Temperature Changes on the Transmission Spectra of Tilted Fiber Bragg Grating. *Advanced Materials Research*, 926–930, 462–465.

26. Sun, X., Zeng, L., Du, H., Dong, X., Chang, Z., Hu, Y., and Duan, J. (2020). Phase-shifted gratings fabricated with femtosecond laser by overlapped two types of fiber Bragg gratings. *Optics & Laser Technology*, 124, 105969.
27. Kumar, R., and Sharma, A. (2019). A new method to analyze fiber Bragg gratings. *Optical Fiber Technology*, 53, 102017.
28. Pala, D. (2014). *Analysis and Modelling Of Novel Approach for The Interrogation Unit of Fiber Bragg Grating Sensors Using Optical Frequency Domain Reflectometry Techniques*, Master's Thesis, School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, İzmir.
29. Hartog, A. A. (2017). *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. Boca Raton: CRC Press, 31-49.
30. Öztürk, N. F. (2018). *Demiryolu güvenliği için fiber optik sensör tasarımı*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
31. Giaccari, P. (2003). *Fiber Bragg Grating Characterization By Optical Low Coherence Reflectometry And Sensing Applications*, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne, Au Département De Microtechnique, Fédérale de Lausanne, Suisse.
32. Ghatak, A., and Thyagarajan, K. (2017). Modes in Optical Fibres. In S. Bhadra and A. Ghatak (Eds), *Guided Wave Optics and Photonic Devices*. Boca Raton: CRC Press, pp. 13-24.
33. Okamoto, K. (2006). Wave theory of optical waveguide. In K. Okamoto (Ed.), *Fundamentals of Optical Waveguides* (Second edition). New York: Academic Press, pp. 1-3.
34. Kasap. S. O., and Sinha, R. K. (2013). *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices* (Second edition). Boston: Pearson, 117-119.
35. Pfrimer, F. W. D. (2013). *Temperature measurement technique in fiber Bragg gratings networks using optical feedback*, Doctoral Thesis, School of Electrical and Computer Engineering, Campinas.
36. Özcan, İ. H. (2014). *Fiber Bragg Izgara (FBI) Sensör Tabanlı Fiber Optik İzleme Sistemleri Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
37. Karaman, L. (2009). *Fiber Bragg Izgara Tabanlı Optik Sensörlerin Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
38. Akki, J. F. (2015). *Fabrication of Fiber Grating Sensors their Characterization and Application in Chemical*, Doctoral Thesis, Karnatak University Department of Physics, Dharwad.
39. Navruz, İ. (2006). *Uzun Mesafeli ve Yüksek Hızlı Fiber Optik Haberleşme Sistemleri İçin Optik Izgara Tabanlı Dispersiyon Kompanzasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

40. Handerek, V. A. (1998). Fiber gratings: principles, fabrication and properties. In K. T. V Grattan and B. T. Meggitt (Eds.), *Optical Fiber Sensor Technology*. Boston: Springer, 329-353.
41. Werneck, M., Allil, C. S. B., Ribeiro, A. B., and Nazare, F. B. V. (2013). A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors. In C. Cuadrado-Laborde (Ed.), *Current Trends Short- and Long-Period Fiber Gratings*. London: Intechopen, pp. 1–24.
42. Othonos, A. (1997). Fiber Bragg gratings. *Review of Scientific Instruments*, 68(12), 4309–4341.
43. McMillan, B. W. (2007). *Self-Powered Fiber Bragg Grating Sensors*, Master's Thesis, University of Pittsburgh The School of Engineering, Pennsylvania.
44. Othonos, A., Kalli, K., Pureur, D., and Mugnier, A. (2006). Fibre Bragg Gratings. In H. Venghaus (Ed.), *Wavelength Filters in Fibre Optics*. Heidelberg: Springer, pp. 189-269.
45. Sengupta, D. (2015). Fiber Bragg Grating Sensors and Interrogation Systems. In G. Rajan (Ed.), *Optical Fiber Sensors, Advanced Techniques and Applications*. Boca Raton: CRC Press, pp. 207-256.
46. Yucel, M., Ozturk, N. F., Yucel, M., Goktas, H. H., and Gunduz, A. E. (2016). *Design of a Fiber Bragg Grating based temperature sensor*. Paper presented at the 2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference, Zonguldak.
47. Russell, P. S. J., Archambault, J. L., and Reekie, L. (1993). Fibre gratings. *Physics World*, 6(10), 41-46.
48. Tosi, D. (2018). Review of Chirped Fiber Bragg Grating (CFBG) Fiber-Optic Sensors and Their Applications. *Sensors*, 18(7), 2147.
49. Gemzicky, E., and Müllerova, J. (2008). *Apodized and chirped fiber Bragg gratings for optical communication systems: Influence of grating profile on spectral reflectance*. Paper presented at the International Conference on Photonics, Devices, and Systems IV, Prague.
50. Korganbayev, S., Orazayev, Y., Sovetov, S., Bazyl, A., Schena, E., Massaroni, C., Gassino, R., Vallan, A., Perrone, G., Saccomandi, P., Arturo, M., Palumbo, G., Campopiano, S., Iadicicco, A., and Tosi, D. (2018). Detection of thermal gradients through fiber-optic Chirped Fiber Bragg Grating (CFBG): Medical thermal ablation scenario. *Optical Fiber Technology*, 41, 48–55.
51. Li, R. (2014). *Polarization-dependent Strain and Twist sensors based on tilted fiber Bragg grating*, Master's Thesis, Carleton University Ottawa-Carleton Institute, Ottawa.
52. Jafari, A. (2006). *Tilted Fiber Grating Refractive Index Sensor and Interrogation Device*, Master's Thesis, Carleton University Ottawa-Carleton Institute, Ottawa.
53. Chen, C., Shevchenko, Y. Y., and Albert, J. (2008). Novel Sensing Mechanisms Using Tilted Fiber Bragg Gratings. In W. J. Bock, I. Gannot and S. Tanev (Eds.), *Optical Waveguide Sensing and Imaging NATO Science for Peace and Security Series*. Dordrecht: Springer, pp. 25-49.

54. Chen, C., and Albert, J. (2006). Strain-optic coefficients of individual cladding modes of single mode fibre: Theory and experiment. *Electronics Letters*, 42(18), 1027-1028.
55. Chen, C., Caucheteur, C., Megret, P., and Albert, J. (2007). The sensitivity characteristics of tilted fibre Bragg grating sensors with different cladding thicknesses. *Measurement Science and Technology*, 18(10), 3117–3122.
56. Nandi, S., Indumathi, T. S., Priya, R. V., and Kori, A. (2019). Analysis of Fiber Bragg Grating Spectral Characteristics Using Couple Mode Theory for Sensor Applications. In L. Barolli, F. Xhafa and K. Hussain (Eds.), *13th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*. Cham: Springer, pp. 868–879.
57. Dreyer, U., Sousa, K., Somenzi, J., Junior, I., Silva, J. C. C., Oliveira, V., and Kalinowski, H. J. (2013). A technique to package fiber bragg grating sensors for strain and temperature measurements. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 12(2), 638–646.
58. Campanella, C. E, Cuccovillo, A., Yurt, A., and Passaro, V. (2018). Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications. *Sensors*, 18(9), 3115.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KİPRİKSİZ, Selin Ece
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 03.06.1991, Samsun
 Medeni hali : Bekar
 e-mail : selinecekipriksiz@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik Elektronik Müh.	Devam ediyor
Lisans	Uludağ Üniversitesi / Elektronik Müh.	2015
Lise	Samsun Milli Piyango Anadolu Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Adalet Bak. Bilgi İşlem Genel Müd.	Ağ Mühendisi
2015-2016	Step Teknoloji ARGE Hizmetleri.	PCB Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Kipriksiz, S ve Yücel, M. (Baskıda). Düzgün Olmayan Yapılarda Fiber Bragg Izgara Sensör Tasarımı ve Uygulaması. *Politeknik Dergisi*.

Hobiler

Outdoor spor aktiviteleri



GAZİ GELECEKTİR..