



## Fiber Bragg ızgara sensör dizisi tabanlı sıcaklık ölçüm sistemi tasarımı ve uygulaması

Murat Yücel<sup>1\*</sup>, Nail Ferhat Öztürk<sup>2</sup>, Murat Torun<sup>3</sup>, Murat Yücel<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>TCDD Genel Müdürlüğü Sinyalizasyon ve Telekomünikasyon Şubesi, 06330, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup>Yenimahalle Mahalle Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, 06170, Ankara, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Fiber bragg ızgara tabanlı sensör dizisi tasarımı
- Lazer tarama tekniği
- Hassas ve hızlı sıcaklık ölçümü

### Makale Bilgileri

Geliş: 27.06.2016

Kabul: 15.11.2016

### DOI:

10.17341/gazimmfd.337650

### Anahtar Kelimeler:

Fiber bragg ızgara,  
sıcaklık sensörü,  
lazer tarama tekniği

### ÖZET

Bu çalışmada, Fiber Bragg ızgara (FBG) tabanlı sensörler ile tekli ve sensör dizisi oluşturularak sıcaklık ölçüm sistemi tasarlanmış ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. 1532,032 nm merkez dalgaboyuna sahip seramik kaplamalı ve 1536,674 nm merkez dalgaboyuna sahip metal kaplamalı FBG sensörler kullanılmıştır. Tekli ve dizi sensörlerin sıcaklıkları 30°C ile 100°C arasında değiştirilerek, lazer tarama tekniği ile çıkışdaki optik sinyal değişimleri incelenmiştir. Sonuç olarak, 0,5°C hassasiyetle doğru ve hızlı olarak sıcaklık ölçümü yapılmıştır.

## Design and application of a fiber Bragg grating array based temperature measurement system

### H I G H L I G H T S

- The design of fiber Bragg grating array based sensor
- Swept laser technique
- Precise and fast temperature measurement

### Article Info

Received: 27.06.2016

Accepted: 15.11.2016

### DOI:

10.17341/gazimmfd.337650

### Keywords:

Fiber bragg grating,  
temperature sensor,  
swept laser technique

### ABSTRACT

In this study, the temperature measurement system is designed and experimentally performed with a single and array Fiber Bragg Grating (FBG) based temperature sensor. A 1532.032 nm ceramic plated and a 1536.674 nm metal plated FBG sensors are used. The temperatures of the single and array sensors are changed between 30°C to 100°C and optic signal variations at the output are investigated with used swept laser technique. Consequently, temperatures are measured accurate and fast with the precision of 0.5°C.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fiber içerisinde ışık ilerlerken silikanın saf olmamasından kaynaklanan doğrusal veya doğrusal olmayan saçılmalar oluşmaktadır. Fiber optik sensör sistemlerinde genellikle Raman, Brillouin [1] ve Rayleigh [2] saçılmaları kullanılmaktadır [3]. Temel olarak, bir fiber optik sensör, yansıyan ışık dalgasının faz, polarizasyon, frekans gibi özelliklerinden bir veya birkaçını modüle ederek çalışmaktadır [4]. Saçılma tabanlı bu fiber optik sensör dağıtık sensör olarak sınıflandırmakta [5] ve gerilme, sıcaklık [6], basınç, vb. çevresel etkenleri ölçmek mümkün olmaktadır. Yaygın olarak kullanılan diğer optik sensör ise noktasal olarak sınıflandırılan FBG sensördür. Bu sensör ile sıcaklık [7] ve gerilmedeki değişimleri, yansıyan ışığın dalgalı boyundaki kayma ile yaklaşık olarak tespit etmek mümkün olmaktadır [8]. Geri dönen optik sinyaller çok zayıf geldiğinde [9] bu sinyaller erbiyum katkılı fiber optik yükselteçler kullanılarak yükseltilebilir [10]. Bu yükselteçlerinde sıcaklık bağımlılığı bulunmakta olup [11], sıcaklıktan bağımsız oldukları bölgelerde çalıştırılabilir [12]. FBG sensörler; sağlık, inşaat, havacılık, denizcilik, ulaşım, petrol ve akıllı sistemlerde geniş kullanım alanları bulmaktadır. FBG sensör sistemlerinde, yöntem olarak geniş bantlı lazerli ve ayarlanabilir lazer kaynaklı sistemler kullanılmaktadır [13]. İlk yöntemde, ayarlanabilir lazer kaynağı (TLS-Tunable Laser Source), dar bir bantta enerjiyi göndermektedir, böylelikle iyi bir sinyal gürültü oranına sahip (SNR), yüksek güçlü ışık sağlanmaktadır. Oluşturulan bu yüksek optik güç, bu mimaride bir tek kaynak ile çoklu fiber sensör hattını beslemeye imkan tanımaktadır. Bu da çok kanallı sorgulayıcılar için karmaşıklığı azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bu ayarlanabilir lazer mimarisinde sorgulayıcılar ışığın dar dalgalı boyu bandında taranması ile çalışmaktadır. TLS'nin dalgalı boyu FBG'nin dalgalı boyu ile eşleştiğinde, fotodetektör yansıyan ışığı algılamaktadır. Bu yansıyan ışığın dalgalı boyundaki değişimle de FBG'nin sıcaklığı ve gerilmesi ölçülebilmektedir [14]. Diğer yöntem ise geniş bantlı lazer kaynağı kullanılmaktadır. Bu yöntemle FBG sensör dizilerinde hızlı ve eş zamanlı ölçüm yapmak mümkün olmaktadır. Ancak sinyal gürültü oranında (SNR) [15] sınırlı bir çözünürlük sağlamaktadır [14]. Literatürde FBG sensörler ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Yongbo Dai ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada yapısal bütünlüğü izlemek için tasarlanan özgün bir FBG sensör sistemi incelenmiştir. Zaman bölmeli çoğullama tekniğine dayalı bir sensör sistemi tasarlanmıştır. Bu teknik, kazanç ortamı ve değişiklik için yarı iletken optik yükselteçleri kullanılmaktadır [16]. Qiang Wu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada bir kenar (Edge) filtresi ile FBG'nin Bragg dalgalı boyundaki kayma incelenmiştir [17]. Zhihui ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, zaman bölmeli ve dalgalı boyu bölmeli FBG sensör ağı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sensör ağının düşük giriş kaybı ve çoğullama yeteneği incelenmiştir [18]. Bo Dong ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ayarlanabilir bir darbeli lazer ile gerçekleştirilmiş FBG sensör sistemi, kombine zaman ve

dalgalı boyu bölmeli çoğullama demodülasyon tekniği ile tasarlanmış ve deneysel olarak incelenmiştir [19]. Bu makale çalışmasında, tekli ve dizi olarak FBG ile sıcaklık sensörü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Apex Technologies firmasının yüksek çözünürlüklü optik spektrum analizörü (OSA) ve TLS kullanılarak sensör sistemi gerçekleştirilmiş, 30°C ile 100°C sıcaklık aralığında ölçümler alınmış ve optik sinyalin dalgalı boyundaki kaymalar Matlab programı kullanılarak analiz edilmiştir. Literatürdeki uygulamalardan farklı olarak, FBG'den yansıyan sinyalin dalgalı boyu-genlik dönüşümü için herhangi bir filtre kullanılmamış, daha basit bir düzenek kurularak OSA vasıtasıyla genlik ölçümü ile dalgalı boyu değişimi tespit edilmiştir. Dalgalı boyundaki bu değişim ile de sıcaklıktaki değişim hesaplanmıştır.

## 2. FBG SENSÖR SORGULAMA TEKNİKLERİ (FBG SENSOR INTERROGATION TECHNIQUES)

FBG optik algılama prensibi, ölçülen bilginin dalgalı boyu kodlamalı olmasına dayanmaktadır ve dalgalı boyundaki kayma, ölçülen büyüklüğe bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle FBG sensörlerinde temel çalışma konusu, Bragg yansımasındaki dalgalı boyunun tespitine dayanmaktadır. FBG algılama sisteminin ilk evrelerinden biri, FBG sensör sisteminde kesin dalgalı boyu ölçümü önemli bir konu olmuştur ve dalgalı boyu sorgulama için birçok teknik kullanılmıştır. Genellikle, dalgalı boyu ölçümü çok basit olmamaktadır. Bu nedenle, genel bir prensip olarak dalgalı boyundaki kayma, daha kolay ölçülebilen genlik, faz, frekans gibi büyüklüklere dönüştürülmektedir. Genlik ölçümü, fiber optik sensörlerde en yaygın kullanılan ve doğrudan ölçüm yöntemidir. Dalgalı boyundaki kaymayı genlik değişimine çevirmek, sorgulama sisteminin daha basit ve düşük maliyetli olmasını sağlamaktadır. Genlik ölçümü için farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; kenar filtresi, uyumlu fiber ızgara filtresi, fiber Fabry-Perot filtresi kullanılmaktadır. Dalgalı boyu-Frekans dönüşümü yaklaşımında kullanılan diğer bir yöntem, akustik-optik ayarlanabilir filtre (AOTF - acoustik optik tunable filter) kullanımınıdır. AOTF, uygulanan radyo frekansının kontrolü ile dalgalı boyuna bağımlı iletilen ışığı göstermektedir. Dalgalı boyu faz dönüşümü yaklaşımında en yaygın kullanılan yöntem Mach-Zehnder interferometresi kullanımınıdır. Mach Zehnder interferometresi bir dalgalı boyu ayırıştırıcı gibi çalışarak, FBG sensördeki dalgalı boyu kaymasını algılamaktadır. FBG sensör sistemleri, en az bir optik kaynak ve algılama biriminden oluşmak zorundadır. Bu algılama modülü aynı zamanda yansıyan ışığın dalgalı boyundaki değişimlerin tespiti ile sıcaklık ve/veya gerilmeyi de ölçülebilmektedir. Yansıyan bileşenin merkez dalga boyu Bragg dalga boyu ile ilişkilidir. Izzgara,  $\lambda_B$  Bragg dalgalı boyunda ışığı geri yansıtır. Bu ilişki Eş. 1'de verilmektedir.

$$\lambda_B = 2n_{eff}A \quad (1)$$

Burada  $\Lambda$  ızgara periyodu ve  $n_{eff}$  efektif kırılma indisidir. Gerilme ve sıcaklık ile  $A$  ve  $n_{eff}$  değiştiğinden geri yansıyan bileşenin dalga boyu da değişecektir. Yansıyan bileşenin

dalga boyundaki kayma ile de sıcaklık ve/veya gerilmadaki değişim tespit edilebilecektir. Sıcaklık ve gerilme ile Bragg dalgaboyundaki hassasiyeti hesaplamak için Eş. 1'den hareket edilir. Sıcaklık duyarlılığı, sıcaklık değişimine bağlı olarak aşağıdaki gibi bulunur [20].

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

$n_{eff}$  ve  $\lambda$  eşitlikleri Eş. 1'de bulunarak ( $n_{eff} = \lambda_B/2\lambda$  ve  $\lambda = \lambda_B/2n_{eff}$ ), Eş. 2'de yerine konulduğunda;

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial T} \lambda_B + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \lambda_B \quad (3)$$

Eş. 3 tekrar düzenlendiğinde;

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \left( \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \Delta T \quad (4)$$

Şeklinde elde edilmektedir ve aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir (Eş. 5).

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta) \Delta T \quad (5)$$

Burada  $\Delta \lambda_B$  Bragg dalgaboyundaki değişme,  $\alpha$  ve  $\eta$  sırasıyla ısıl genleşme ve termo-optik katsayılarıdır. Bu denklem kırılma indisinin sıcaklığa bağımlılığını göstermektedir ( $dn/dT$ ). Gerilme (strain) ile duyarlılığı ise, yer değiştirmeye bağımlı olarak Eş. 6 ile hesaplanabilir [20].

$$\frac{\lambda_B}{\Delta L} = 2n_{eff} \frac{\partial \lambda}{\partial L} + 2\lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \quad (6)$$

Sıcaklık duyarlılığında olduğu gibi Eş. 1'deki  $n_{eff}$  ve  $\lambda$ , Eş. 6'da yerine konulduğunda Eş. 7 elde edilmektedir.

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \left( \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \Delta L \quad (7)$$

Fiberin uzunluğuna göre ızgara periyodundaki gerilme Eş. 7'nin birinci kısmıdır. Eş. 7'nin ikinci kısmı ise foto elastik katsayı  $\rho_e$ 'dir. Bazı cisimler için foto elastik katsayı materyalin Poisson katsayısına bağımlıdır ve bu etki negatiftir. Yani optik fiber uzadığında, yansıma katsayısı materyalin yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak azalmaktadır. Bu nedenle fiberde uzama gerçekleştiğinde Eş. 7'deki her iki kısım zıt etkiler göstermektedir. Biri ızgaralar arasındaki mesafenin artmasına bağlı olarak Bragg dalgaboyunda artan yönde kayma oluşturmakta, diğeri kırılım indisini azaltarak Bragg dalgaboyunda azalan bir kayma oluşturmaktadır. Bu her iki durumun oluşturduğu etkilerin birleşimi, Bragg dalgaboyunda gerilme ile oluşacak kaymayı ifade etmektedir ve aşağıdaki şekilde yazılmaktadır [20].

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \varepsilon_z \quad (8)$$

Burada  $\rho_e$ , fiberin fotoelastik katsayısı ve  $\varepsilon_z$  ızgaranın boylamsal gerilmesidir. Eş. 5 ile Eş. 8 birleştirildiğinde Bragg dalgaboyunun sıcaklık ve gerilme hassasiyeti Eş. 9 ile formüle edilmektedir.

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \varepsilon_z + (\alpha + \eta) \Delta T \quad (9)$$

Eş. 9, Bragg yerdeğişiminin gerilme (strain) ile sıcaklığın bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Bu durumda sadece  $\Delta \lambda_B$  'yi gözlemlenmek Bragg dalgaboyundaki kaymanın sadece gerilmeye veya sadece sıcaklığa veya her ikisine bağlı olduğunu anlamak için yeterli olmamaktadır. Sadece sıcaklığı ölçmek için, FBG gerilmeye karşı korunmalıdır. Gerilmedeki bu değişim kompanse edildiğinde FBG ile sıcaklık değişimi Eş. 5 ile hesaplanacaktır. Bu kompanzasyon için çeşitli yöntemler kullanılmakla birlikte, en etkili yöntem aynı fiber üzerinde ikinci bir FBG kullanmaktır.

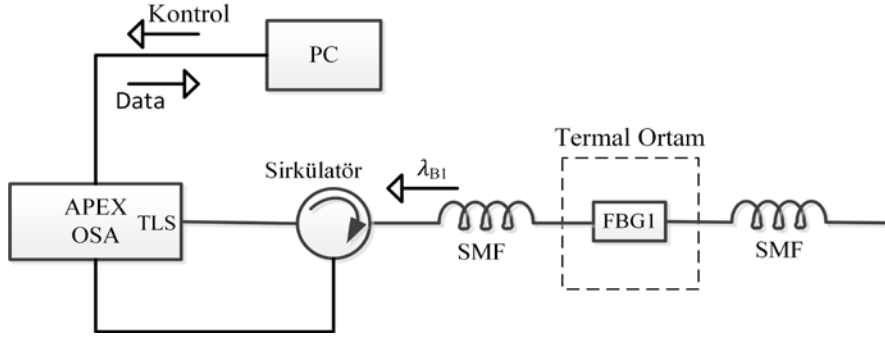
Bu durumda aynı fiber üzerindeki iki adet FBG'den iki farklı Bragg yansıması oluşacaktır ve kompanzasyon için FBG'lerden biri aynı zamanda sıcaklık ve gerilmeye, diğeri ise sadece sıcaklığa bağımlı olacaktır [20]. FBG dizilerinde yukarıdaki denklemler her bir FBG için ayrı ayrı geçerli olacaktır. Ancak, dizide kullanılacak FBG'lerin band genişliklerinin gözönüne alınarak bu bantlarda girişim oluşturmayacak şekilde seçilmeleri gerekmektedir. Aksi halde gözlemlenecek bandın hangi FBG'ye ait olacağı ayırt edilemeyecektir.

### 3. DENEYSEL KURULUM (EXPERIMENTAL SETUP)

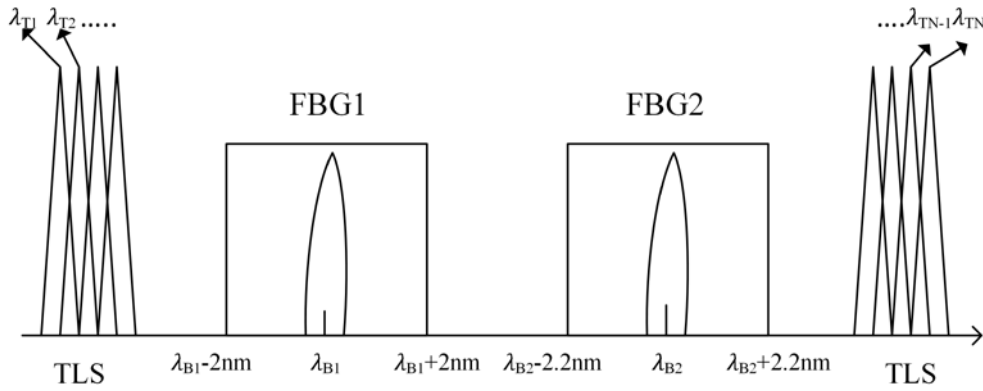
FBG ile sensör tasarımında OSA, FBG, sirkülatör ve sinyal işleme için PC ve Matlab programı kullanılmıştır. Deneysel olarak kurulan düzenek Şekil 1'de görülmektedir. Bu çalışmada lazer tarama tekniği kullanılmıştır. Şekil 2'de kullanılan tekniğin prensip şeması görülmektedir.  $\lambda_{B1}$  seramik kaplı FBG1 sensörü (merkez dalgaboyu 1532,032 nm),  $\lambda_{B2}$  metal kaplı FBG2 sensörü (merkez dalgaboyu 1536,674 nm),  $\lambda_{T1...TN}$  ise lazer kaynağının her bir tarama dalgaboyunu göstermektedir. Bu çalışmada lazer tarama adımı  $\lambda_{T2} - \lambda_{T1} = 3$  pm seçilmiştir. Her bir FBG'nin spektral aralığına göre lazerin taramaya başladığı ve bittiği dalgaboyları belirlenmiştir. Yüksek çözünürlüklü TLS sayesinde çok hassas ölçümler alınmıştır. Aynı zamanda yansıyan optik sinyaller OSA'dan bilgisayara gerçek zamanlı olarak aktarılmış ve Matlab yardımı ile işlenmiştir. FBG'deki hassas sıcaklık değişimleri gerçek zamanlı olarak monitör edilmiştir.

#### 3.1. FBG1 ile Sıcaklık Algılama (Temperature Sensing with FBG1)

Bu deneyde öncelikle 1532,032 nm dalgaboyundaki seramik kaplamalı FBG1'in sıcaklık karakterizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla FBG1, 30°C-100°C aralığında ayarlanabilir termal ortama konularak 10°C'lik adımlarla sıcaklık



Şekil 1. Tekli FBG sensörü için deney düzeneği (Experimental Setup for single FBG sensor)



Şekil 2. TLS ile laser tarama tekniği (Laser sweep technique with TLS)

ölçümleri gerçekleştirilmiştir. FBG'den yansıyan optik sinyalin dalgaboyundaki değişimler gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda FBG1'in çok hızlı bir şekilde gerçek zamanlı olarak sıcaklığı gösterdiği tespit edilmiştir. Seramik kaplamalı FBG1 için 30°C, 60°C ve 90°C'de yansıyan optik sinyallerin dalgaboyları arasındaki farklar ile sinyal güçleri Şekil 3'te gözlemlenmektedir. FBG1 için 30°C-100°C aralığında her 10°C'deki Bragg dalgaboyundaki değişimler ise Şekil 4'te görülmektedir. 22°C için FBG1'in merkez dalgaboyu 1532,032 nm olup, ölçüm sıcaklıkları için optik kayma hesaplamasında bu merkez dalgaboyu referans alınmıştır. 30°C-100°C aralığında, sıcaklık değişimi ile seramik kaplamalı bu FBG'nin dalgaboyundaki değişimin lineer olduğu Şekil 4'ten gözlemlenmektedir.

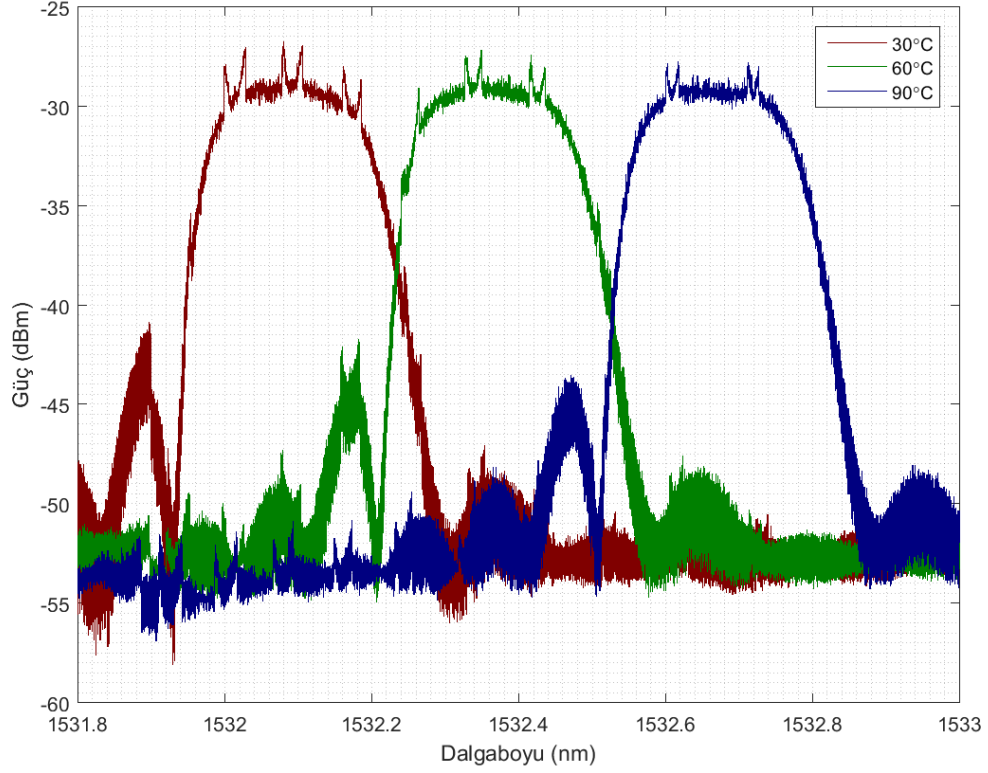
### 3.2. FBG2 ile Sıcaklık Algılama (Temperature Sensing with an FBG2)

Bu deneyde 1536,674 nm dalgaboyundaki metal kaplamalı FBG2 için sıcaklık karakterizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla FBG2, 30°C - 100°C aralığında ayarlanabilir termal ortama konularak 10°C'lik adımlarla sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Metal kaplamalı FBG için 30°C, 60°C ve 90°C'de yansıyan optik sinyallerin dalgaboyları arasındaki farklar ile sinyal güçleri Şekil 5'te gözlemlenmektedir. Metal kaplamalı FBG'de, birim sıcaklık başına düşen dalgaboyu kayması daha yüksek olduğundan, seramik kaplamalı FBG ile karşılaştırıldığında 30°C, 60°C ve 90°C'de dalgaboyları arasındaki fark daha net

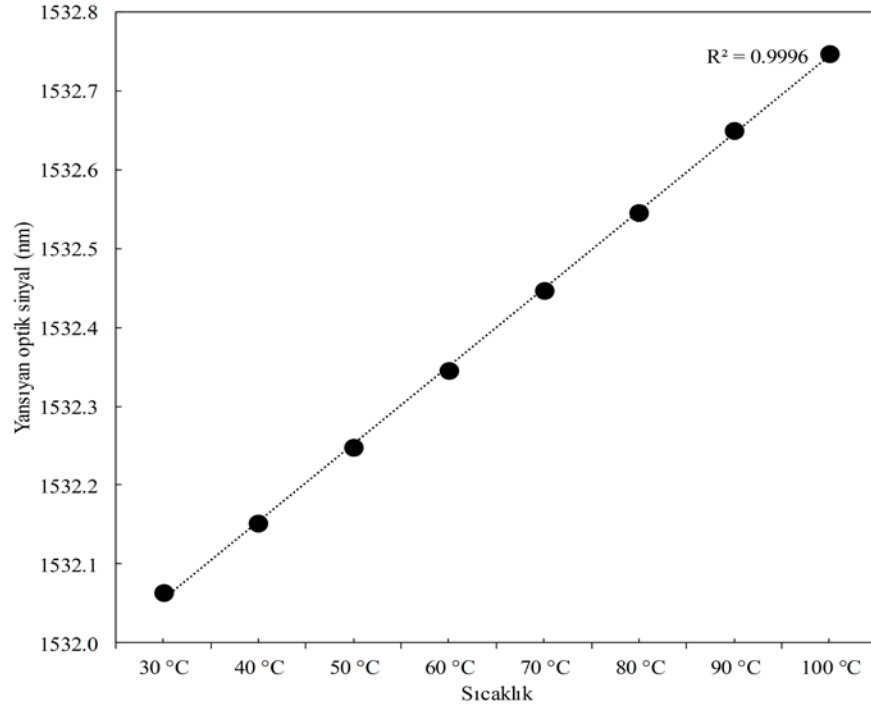
gözlemlenmektedir. 30°C-100°C aralığında, sıcaklık değişimi ile metal kaplamalı bu FBG'nin dalgaboyundaki değişimin lineer olduğu Şekil 6'dan gözlemlenmektedir. 22°C için FBG1'in merkez dalgaboyu 1536,674 nm olup, ölçüm sıcaklıkları için optik kayma hesaplamasında bu merkez dalgaboyu referans alınmıştır.

### 3.3. FBG'ler ile Sensör Dizisinin Gerçekleştirilmesi (Implementation of Sensor Array with FBGs)

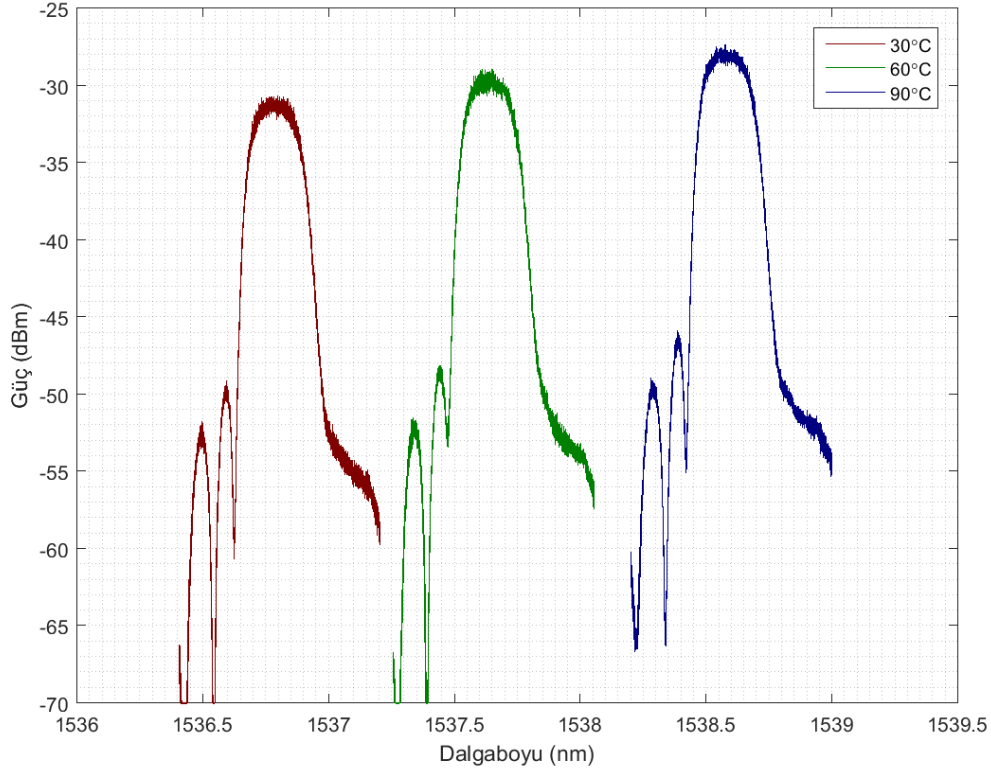
Pratik uygulamalarda FBG sensör uygulamaları genellikle sensör dizisi şeklinde kullanılmaktadır. Uygun sensör dizisi, dalgaboyu bölmeli çoğullama, zaman bölmeli çoğullama ya da her ikisi birden kullanılarak oluşturulmaktadır. Seçilen FBG'lerin dalgaboyu, kullanılan tekniğe göre seçilmektedir. Bu sensör dizisi uygulamasında dalgaboyu bölmeli çoğullama tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte, FBG'lerin dalgaboyu farklı seçildiği için sensörler birbirinden bağımsızdır. Bu da ölçüm sisteminin kalitesini artırmaktadır. Bir sensörde görülen ölçüm veya hesaplama hatası diğer sensördeki ölçümde hiçbir etki yaratmamaktadır. Fiber hat kopmadığı sürece sensörler, bağımsız bir şekilde çalışabilmektedir. Seramik kaplamalı 1532,032 nm dalgaboyu merkezli FBG1 ile metal kaplamalı 1536,674 nm dalgaboyu merkezli FBG2 seri bağlanarak, Şekil 7'de görüldüğü gibi FBG sensör dizisi için deney düzeneği oluşturulmuştur. Kullanılan FBG'lerin dalgaboyu merkezleri üretici firma tarafından 22°C ortam sıcaklığında ölçülmüştür.



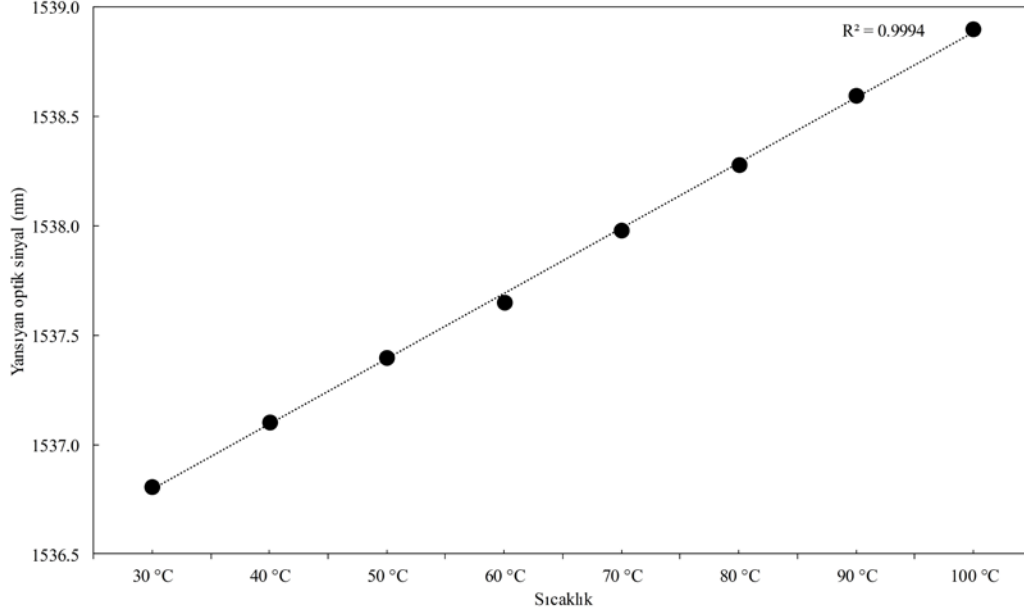
Şekil 3. FBG1 ile sıcaklık ölçüm sonuçları (Temperature measurement results with FBG1)



Şekil 4. FBG1 ile 30°C-100°C sıcaklık aralığında yansıyan optik sinyaldeki değişimler (Reflected optic signal changes at 30°C-100°C temperature range with FBG1)



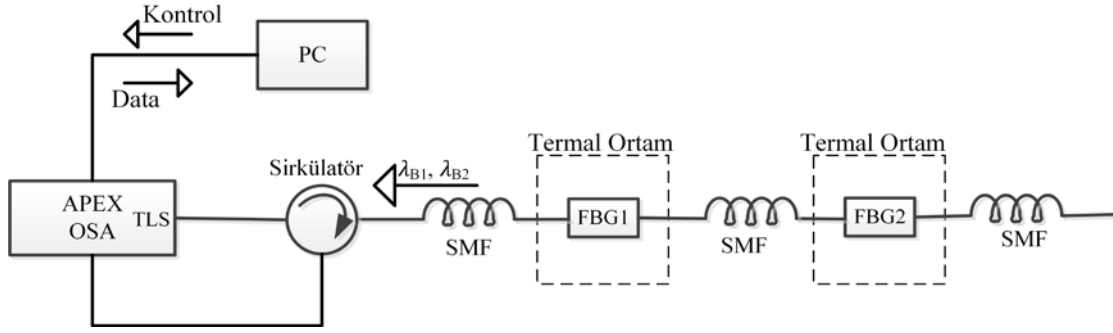
Şekil 5. FBG2 ile sıcaklık ölçüm sonuçları (Temperature measurement results with FBG2)



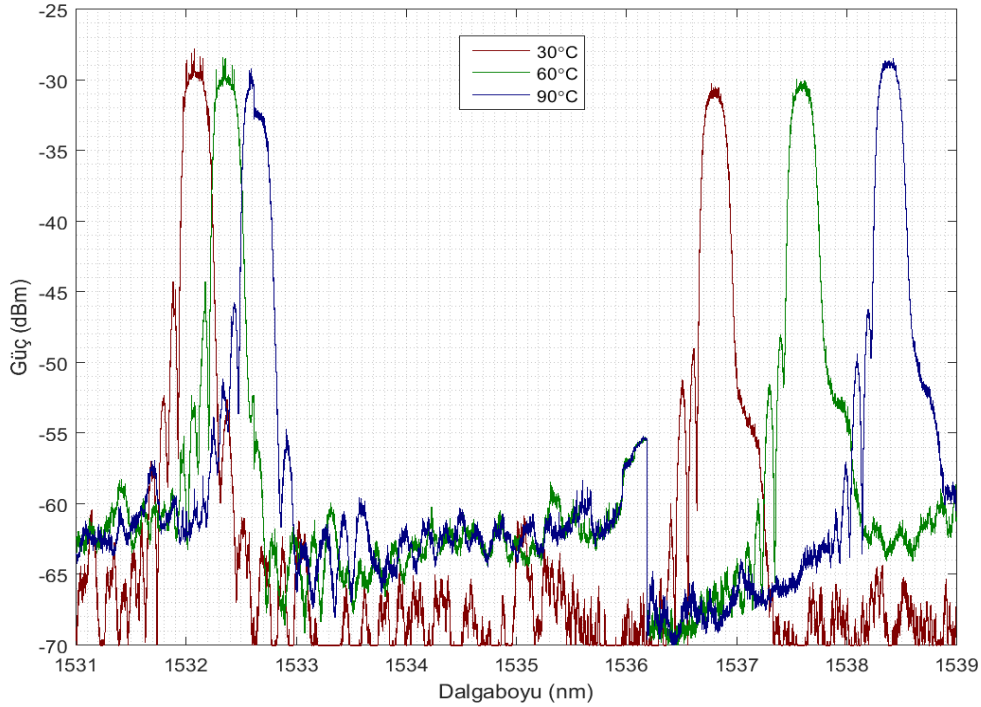
Şekil 6. FBG2 ile 30°C-100°C sıcaklık aralığında yansıyan optik sinyaldeki değişimler (Reflected optic signal changes at 30°C-100°C temperature range with FBG2)

Bu deneyde her iki FBG aynı ısıtıcı içine konularak, sıcaklık 30°C-100°C aralığında değiştirilmiş ve sonuçlar gözlemlenmiştir. FBG'lerin aynı ısıtıcı içerisinde, 30°C, 60°C ve 90°C sıcaklık değerlerinde geriye yansıyan optik dalgalınlardaki kaymalar Şekil 8'de görülmektedir. Bu her iki FBG arasında yeterli spektral aralık bulunduğundan,

sinyallerde herhangi bir girişim meydana gelmediği şekilde gözlemlenmektedir. FBG1 ve FBG2 için 30°C - 100°C aralığında her 10°C'deki Bragg dalgalınlardaki değişimler Tablo 1'de görülmektedir. Görüldüğü gibi FBG'lerin dalgalınlardaki değişimler doğrusallığını korumaktadır. Metal kaplamalı FBG'de, birim sıcaklık başına düşen



Şekil 7. FBG sensör dizisi için deney düzeneği (Experimental setup for FBG sensor array)



Şekil 8. FBG sensör dizisi ile sıcaklık ölçümü (Temperature Measurement with FBG sensor array)

dalgaboyu kayması daha yüksek olduğundan, seramik kaplamalı FBG ile karşılaştırıldığında farklı sıcaklıklardaki optik kaymaların metal kaplamalı FBG'de daha yüksek olduğu Tablo 1'den gözlemlenmektedir.

Sıcaklık	FBG1		FBG2	
	Yansıyan Optik Sinyal (nm)	Optik Kayma (nm)	Yansıyan Optik Sinyal (nm)	Optik Kayma (nm)
30°C	1532,064	0,032	1536,806	0,132
40°C	1532,152	0,120	1537,102	0,428
50°C	1532,248	0,216	1537,399	0,725
60°C	1532,346	0,314	1537,653	0,979
70°C	1532,447	0,415	1537,980	1,306
80°C	1532,546	0,514	1538,279	1,605
90°C	1532,650	0,618	1538,598	1,924
100°C	1532,747	0,715	1538,900	2,226

Bu dizi çalışması ile uygulamaya yönelik, doğrusalılığı yüksek, sensörleri birbirinden bağımsız ve hassasiyeti yüksek bir sensör ağı kurulmuştur.

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Tek bir FBG sensörün optik kaymasının bilgisayar ortamında analizi daha kolayken, aynı hatta bağlı birden fazla FBG'de meydana gelen farklı değişimleri algılamak çok daha zor olmaktadır. Bu amaçla bu çalışmada, sıcaklık artışı ile optik sinyallerdeki kaymalar her iki FBG için ayrı ayrı ve sensör dizisi şeklinde incelenmiştir. Seramik kaplamalı 1532,032 nm FBG1 ve metal kaplamalı 1536,674 nm dalgaboylarındaki FBG2 ile 30°C-100°C sıcaklık aralığında testleri yapılmıştır. Mevcut durumda laboratuvarımızda iki adet FBG bulunduğu için, FBG sensör dizisi iki adet FBG'den oluşturulmuştur. 30°C-100°C sıcaklık aralığındaki sıcaklık ölçümü için, 1530nm-1560 nm

aralığında, her bir FBG için 4 nm spektral aralık bırakıldığı düşünüldüğünde en az 6 adet FBG ile sensör dizisi oluşturulabilecektir. Sonuç olarak, FBG1 ile 1°C'lik sıcaklık değişimi için optik sinyalin dalgaboyundaki kaymanın yaklaşık 9,6 pm olduğu gözlenmiştir. FBG2'de ise bu değer yaklaşık 29 pm olarak ölçülmüştür. Her iki FBG için de 0,5°C hassasiyetle sıcaklık ölçümleri gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Optik spektrum Analizörü (OSA) kullanılarak gerçekleştirilen FBG sensör sistemi özgün bir çalışma olmakla birlikte, sensör sisteminde bir OSA'nın bulunması maliyeti artırmaktadır. Ancak, OSA'nın lazer tarama adımı olarak 3 pm'ye kadar aralıklar seçilebildiğinden, FBG'nin sıcaklık cevabı hızlı olmaktadır ve gerçek zamanlı sıcaklık ölçümüne imkan tanımaktadır. Ayrıca ölçüm sonuçları ile FBG'lerin verileri analiz edildiğinde 1'e çok yakın korelasyon katsayıları elde edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu bildiriye 7150746 nolu projeden destek sağlayan TÜBİTAK'a ve 07/2017-03 nolu projeden destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yücel M., Göktas H. H., Yücel M., Öztürk N.F., The fiber optical sensing based on Brillouin scattering, IEEE 22nd Signal Process. Commun. Appl. Conf., SIU 2014, Trabzon, Turkey, 2014.
2. Yücel M., Yücel M., Öztürk N.F., Göktas H. H., The analyzes of the Brillouin scattering for the different fiber types, IEEE 23rd Signal Process. Commun. Appl. Conf., SIU 2015, Malatya, Turkey, 2015.
3. Yücel M., Yücel M., Gündüz A.E., Öztürk N.F., Torun M., Göktas H.H., Effect of EDFA power on Brillouin power spectrum, 4th Int. Conf. on Electr. Electron. Eng., ICEEE 2017, 18-22, 2017, Ankara, Turkey.
4. Durak F.E., Navruz İ., Altuncu A., Design and production of long period fiber grating using electrical arc technique, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (1), 27-32, 2013.
5. Yücel M., Yücel M., Öztürk N.F., Göktas H.H., Gemci C., Celebi F.V., The effects of signal level of the microwave generator on the Brillouin gain spectrum in BOTDA and BOTDR, ICOFS 2016: 18th Int. Conf. Optical Fiber Sensors, Singapore, 2016.
6. Yücel M., Yücel M., Gündüz A.E., Göktas H.H., Öztürk N.F., Using single-mode fiber as temperature sensor, IEEE 24th Signal Process. Commun. Appl. Conf., SIU 2016, Zonguldak, Turkey, 2016.
7. Yücel M., Öztürk N.F., Gemci C., Design of a fiber Bragg grating multiple temperature sensor, The Sixth Int. Conf. Digital Inf. & Commun. Technol. & its Appl., DICTAP2016, Konya, Turkey, 6-11, 2016.
8. Yücel M., Öztürk N.F., Yücel M., Göktas H.H., Gündüz A.E., Design of a fiber Bragg grating based temperature sensor, IEEE24th Signal Process. Commun. Appl. Conf., SIU 2016, Zonguldak, Turkey, 2016.
9. Yücel M., Göktas H.H., Examination of temperature dependence of double pass L band erbium doped fiber amplifier, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27 (2), 237-243, 2012.
10. Yücel M., Göktas H.H., Design of gain flattened ultra-wide band hybrid optical amplifier, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 22 (4), 863-868, 2007.
11. Yücel M., Göktas H.H., Özkaraca O., Temperature dependence of noise figure in the erbium doped fiber amplifier, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (3), 635-641, 2010.
12. Yücel M., Mustafa D.A., Optimization with genetic algorithm of temperature-dependent fiber length of L-band EDFA gain, Turk J Elec Eng & Comp Sc., 24 (3), 1034-1043, 2016.
13. Chan J.C.C., Interrogation of a fiber Bragg grating sensor with a tunable laser source, Phd Thesis, Polytechnic University, Hong Kong, 2000.
14. Rajan G., Optical fiber sensors: Advanced techniques and applications, CRC Press, London, 208-245, 2015.
15. Yücel M., Torun M., Burunkaya M., Improvement of signal to noise ratio in fiber Bragg grating based sensor systems, IEEE 25th Signal Process. Commun. Appl. Conf., SIU 2017, Belek, Antalya, Turkey, 2017.
16. Dai Y., Zhang Z., Leng J., Asundi A., A novel fiber Bragg grating sensor interrogator based on time division multiplexing technique, 2nd Int. Conf. on Smart Materials and Nanotechnology in Eng. Weihai, China, 7493, 2009.
17. Wu Q., Wang P., Semenova Y., Farrell G., A study of the effect of the position of an edge filter within a ratiometric wavelength measurement system, Meas. Sci. Technol., 21, 2010.
18. Luo Z., Wen H., Guo H., Yang M., A time and wavelength division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings, Optics Express, 21 (19), 22799-22807, 2013.
19. Dong B., He S., Hushu Y., Tianda W., Lvjun F., Guo T., Zhao Q., combined time and wavelength division multiplexing demodulation technique of fiber grating sensor arrays using a tunable pulsed laser, Appl. Opt., 46 (7), 1015-1018, 2007.
20. Werneck M.M., Allil R.C.S.B, Ribeiro B.A., Nazare F.V.B., A guide to fiber Bragg grating sensors, Intech Press, 1-24, 2013.