



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Düzensiz olmayan yapılar da fiber bragg ızgara sensör tasarımı ve uygulaması

## *Design and implementation of temperature sensor using non-uniform fiber bragg grating*

Yazar(lar) (Author(s)): Selin Ece KİPRİKSİZ<sup>1</sup>, Murat YÜCEL<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-3892-0489

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-0349-4013

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kipriksiz S. E., Yücel M., “Düzensiz olmayan yapılar da fiber bragg ızgara sensör tasarımı ve uygulaması”, *Politeknik Dergisi*, 24(3): 843-851, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.727105

# Düzgün Olmayan Yapılarda Fiber Bragg Izgara Sensör Tasarımı ve Uygulaması

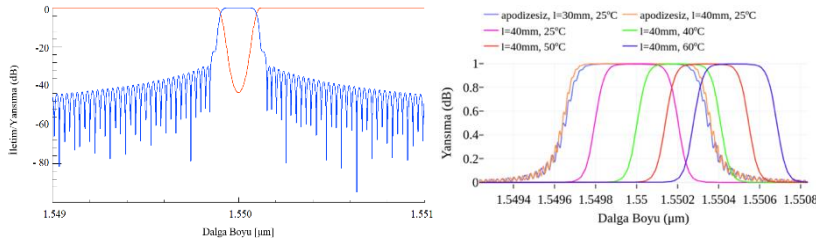
## Design and Implementation of Temperature Sensor using Non-Uniform Fiber Bragg Grating

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Tekdüze, apodize ve civıltılı FBG tasarımı/Uniform, apodized, and chirped FBG design
- ❖ FBG tabanlı sıcaklık sensörü/FBG based temperature sensor
- ❖ Farklı yapılardaki FBG spektrum analizi/Analysis of the FBG spectra on different structure

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Tekdüze, apodize ve civıltılı yapılardaki FBG tabanlı sıcaklık sensörleri tasarlanarak, apodize ve civıltılı yapılarının Bragg yansıtıcılığına ve band genişliğine olan etkileri incelenmiştir./ FBG-based temperature sensors in uniform, apodized and chirped structures were designed, and effect of apodized and chirped applications on Bragg reflectivity and wavelength was examined.



**Şekil.** Apodize ve civıltılı FBG'nin yansımaya spektrumu / **Figure.** Reflection spectrum of apodized and chirped FBG

### Amaç (Aim)

FBG çeşitlerinin sıcaklık sensörü olarak yansımaya spektrumlarının incelenmesi ve karşılaştırılması/ Analysis and comparison of reflection spectra of FBG types as temperature sensors

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

OptiGrating 4.2.3 yazılımı kullanılarak tekdüze, apodize ve civıltılı yapılardaki üç farklı FBG tasarımı yapılmıştır. Daha sonra OptiSystem 17 yazılımı kullanılarak tasarlanan her bir FBG, sensör olarak simüle edilmiş ve yansımaya spektrumları incelenmiştir./ Three different FBG designs were made in uniform, apodized and chirping structures using OptiGrating 4.2.3 software. Then, each FBG designed using OptiSystem 17 software was simulated as a sensor and reflection spectra were examined.

### Özgünlük (Originality)

Tekdüze, apodize ve civıltılı yapılardaki üç farklı FBG sıcaklık sensörü tasarlanmış ve karşılaştırılmıştır. / Three different FBG temperature sensors in uniform, apodized and chirped structures are designed and compared

### Bulgular (Findings)

Aynı ızgara parametreleri ile çalışıldığında tekdüze FBG'nin yansıtıcılığı en fazladır. Sensörün yansımaya spektrumları incelendiğinde apodize uygulanmış sensörün yan lobları bastırıldığı için Bragg dalga boyu etrafında daha keskin bir yansımaya şekli çizdiği görülmüştür. / When working with the same grating parameters, uniform FBG has the highest reflectivity. When the reflection spectra of the sensor is examined, it is seen that the apodized sensor draws a sharper reflection shape around the Bragg wavelength since the side lobes are suppressed.

### Sonuç (Conclusion)

Sıcaklık değişiminin meydana getirdiği dalga boyundaki kaymalar FBG parametrelerinden bağımsızdır ve sadece aynı ısıl genişleme ve termo-optik katsayısına bağlı olarak değişir. / The shifts in the wavelength caused by the temperature change are independent of FBG parameters and only change depending on the same thermal expansion and thermo-optic coefficient.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Düzgün Olmayan Yapılarda Fiber Bragg Izgara Sensör Tasarımı ve Uygulaması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Selin Ece KİPRİKSİZ<sup>1</sup>, Murat YÜCEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Müh. Böl., 06500, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Böl., 06500, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 26.04.2020 ; Kabul/Accepted : 08.05.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 13.05.2020)

## ÖZ

Bu çalışmada, Optigrating 4.2.3 yazılımı kullanılarak tekdüze, apodize ve cıvıtlı yapılardaki fiber Bragg ızgara (FBG) tabanlı sıcaklık sensörleri tasarlanmıştır. Maksimum yansıtıcılık elde edebilmek amacıyla parametre optimizasyonları yapılmış ve tasarlanan FBG'lerin iletim ve yansıma spektrumları analiz edilmiştir. Apodize ve cıvıtlı yapılarının Bragg yansıtıcılığına ve band genişliğine olan etkileri incelenmiştir. Tasarlanan FBG'lerin sıcaklıkları 30 °C ile 60 °C aralığında 10 °C'lik periyotlarla değiştirilerek ızgara periyotlarında ve dalga boylarında meydana gelen değişimler izlenmiştir. Daha sonra, tasarlanan FBG'lerin 25, 40, 50, 60 °C sıcaklıklarının yansıma ve iletim spektrumlarına ait veriler uygun formatta Optisystem 17 yazılımına aktarılmıştır ve bu yazılımda tasarlanmış olan tekdüze, apodize ve cıvıtlı FBG'lerin girişine geniş band lazer kaynağı bağlanarak her bir sıcaklık mertebesi için Bragg dalga boylarında meydana gelen kaymalar optik spektrum analizörü ile incelenmiştir. Farklı yapılardaki sensörlerin sahip oldukları özellikler sebebiyle birbirinden farklı spektrumlar sergilediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Fiber Bragg ızgara, tekdüze, apodize, cıvıtlı, sıcaklık sensörü.

# Design and Implementation of Temperature Sensor using Non-Uniform Fiber Bragg Grating

## ABSTRACT

In this study, fiber Bragg grating-based temperature sensors in uniform, apodized and chirped structures were designed using the Optigrating 4.2.3 software. To obtain the maximum reflectivity, parameter optimization was performed, and the transmission and reflection spectra of the designed FBGs were analyzed. The effect of apodized and chirped applications on Bragg reflectivity was examined. The temperatures of the FBGs designed were changed between 30 °C and 60 °C with 10 °C periods, and the shifts occurring in the grating period and wavelengths were examined. The data of the transmission-reflection spectra of 25, 40, 50, and 60 °C temperatures of these FBGs were transferred to the Optisystem 17 software in the appropriate format and the study was maintained over Optisystem 17. The spectrum behavior and shifts occurring at the wavelengths for each temperature range of the broadband laser source examined at the input of the FBG were examined with an optical spectrum analyzer. These phases were repeated for the uniform, apodized and chirped FBGs designed. It was observed that the sensors in the uniform, apodized and chirped structures designed exhibited different spectra from each other due to their properties.

**Keywords:** Fiber Bragg grating, uniform, apodized, chirped, temperature sensor.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fiber optik ve lazer teknolojisinin sürekli olarak gelişmesiyle, fiber optik sensörler 1970'lerden bu yana geleneksel sensörlere alternatif olabilecek yeni bir sensör türü haline gelmiştir [1]. Geleneksel sensörlerle kıyaslandığında optik sensörlerin birçok avantajı mevcuttur. Yarı dağınık optik sensör çeşitlerinden olan, fiber Bragg ızgaralar sahip oldukları avantajlar sayesinde havacılık, uzay, demir yolları, yangın alarm sistemleri, biyomedikal, tüneller, bina sağlığı, köprü izlemeleri, petrol platformları gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır [2]. Hafif, sağlam ve küçük boyutlu olmaları sebebiyle algılama yapılacak nesnenin bütünlüğünü bozmadan yapıya kolayca gömülebilir veya yüzeye monte edilebilir. Sualtı gibi geleneksel sensörlerin çalışmadığı sert ortamlarda çalışabilir.

Telemetri ve uzaktan algılama uygulamalarında, optik fiberin bir bölümü sensör olarak kullanılabilirken, algılanan bilgiler uzak bir birime aktarılabilir. FBG'ler elektrik sinyallerini kullanmadıkları için herhangi bir kesintiden veya elektromanyetik girişimden etkilenmezler [3]. Yangın, ateş ya da kıvılcım riski yoktur. Bu sebeple patlayıcı ortamlarda kullanımı güvenlidir. Hızlı ve doğru ölçümler yapan FBG sensörler, lineer algılama özelliklerine ve düşük fiber kaybına sahiptir [3,4].

Khalid ve arkadaşları tarafından 2012'de MATLAB ve Optigrating kullanarak Gauss profili apodize FBG ile gerilme ölçümü yapılmıştır [6]. 2014 yılında Ashry ve arkadaşları, farklı apodizasyon profilleri (Sinc, Gaussian, Hamming, Tanh, Bartlett, Blackman, Cauchy, Raised sine) uygulanmış FBG'lerin performans değerlendirmesi yapılmış ve FBG'nin yansıtma, yan lob seviyeleri ve band genişlikleri incelenmiştir [7]. Elgaud ve arkadaşları 2016'da OptiGrating ile tasarlanmış oldukları dört adet FBG sensörü Optisystem ile zaman bölmeli çoğullama

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : muyucel@gazi.edu.tr

ile çoklayarak gerilme ölçümü yaparak sensör hassasiyetlerini hesapladılar [8]. Hisham 2017'deki çalışmasında, sayısal analiz kullanılarak, petrol ve gaz endüstrisi uygulamalarına uygun geniş bir band genişliği elde etmek için ızgara uzunluğu ve kırılma indisi değişimlerinin band genişliğine etkileri incelemiştir [9]. 2019 senesinde, Fathy ve arkadaşları, Kaskad model Hamming, Barthan and Nuttal Sinc and Proposed apodizasyon fonksiyonları sayısal olarak ele almıştır. Her kaskad mertebesi ve apodizasyon fonksiyonu için yansıtıcılık ve band genişlikleri hesaplanmıştır [10]. 2020'de Deepika Meena ve M. L. Meena dispersiyon dengeleme amacıyla OptiSystem 7.0 simülatörü ile cıvıltılı FBG modelleyerek 210 km uzun mesafeli optik iletişim hattını simüle etmişlerdir [11].

Bu çalışmada, OptiGrating 4.2.3 yazılımı kullanılarak tekdüze, apodize ve cıvıltılı yapılarıdaki üç farklı FBG tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımlarda, FBG üretim parametreleri optimize edilmiştir. Daha sonra OptiSystem 17 yazılımı kullanılarak tasarlanan her bir FBG sensör olarak simüle edilmiş ve yansıma spektrumları incelenmiştir. Makalenin ikinci bölümünde FBG ızgara çeşitleri ile ilgili kavramsal bilgiler verilerek teorik analiz yapılmış, üçüncü bölümünde ise FBG tasarımları yapılarak simülasyonları gerçekleştirilmiş ve son bölümde sonuçlar tartışılmıştır.

## 2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE TEORİK ANALİZ (CONCEPTUAL FRAMEWORK AND THEORETICAL ANALYSIS)

Bragg dalga boyu, sıcaklık, gerilme, nem, basınç ve kırılma indisi gibi fiziksel parametrelerdeki küçük değişikliklere karşı oldukça duyarlıdır [3]. Bu fiziksel parametreler FBG'nin Bragg dalga boyunu değiştirir. Bu değişikliklerin izlenmesi FBG tabanlı sensörlerin temel prensibidir [12-14].

Bragg dalga boyu Eşitlik 1'deki gibi ifade edilir. Burada,  $\Lambda$  ızgara periyodu ve  $n_{ef}$  çekirdek bölgesinin efektif kırılma indisidir. FBG'ye gerilme ve/veya sıcaklık uygulandığında  $\Lambda$  ve  $n_{ef}$  değişime uğrar. Buna bağlı olarak geri yansıyan Bragg dalga boyu ( $\lambda_B$ ) değişir. Bragg dalga boyunda meydana gelen kayma ile de sıcaklık ve/veya gerilmedeki değişim tespit edilir [14].

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda \quad (1)$$

Bragg dalga boyu kayması ( $\Delta\lambda_B$ ) ölçülen iki Bragg dalga boyu arasındaki farktır.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_{B,son} - \lambda_{B,ilk} \quad (2)$$

Eşitlik 2'de  $\lambda_{B,ilk}$  referans dalga boyu,  $\lambda_{B,son}$  ölçülmek istenen fiziksel parametrenin değişimi sebebiyle değişen dalga boyunun son değeri olarak ifade edilir [3]. Bu çalışmada üç tür FBG analiz edilmiştir. İlki tekdüze Bragg ızgaralar olup, FBG'nin en basit türüdür. Şekil 1'de görüldüğü üzere, ızgara periyodu ve kırılma indisi değişimi ızgara boyunca sabittir. Tekdüze ızgaralar, yansıma filtresi gibi kullanılabilir.

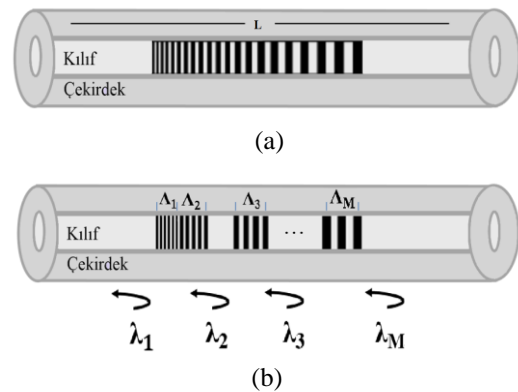
İkinci olarak apodize fiber Bragg ızgaralar incelenmiştir. Apodizasyon, ızgara ortasından başlayarak her iki uca

doğru kırılma indisi değişiminin belirli bir apodizasyon profili uygulanarak giderek azaltılması tekniğidir. Bu sebeple apodizasyon uygulanmış ızgaraların, kırılma indisinde meydana gelen değişim ızgara uzunluğu boyunca farklılık gösterir [5].

FBG'lerin spektrumlarında maksimum yansıtıcılığın olduğu Bragg dalga boyunun çevresinde konumlanmış yanal lob dizileri bulunur. Yan loblarda harcanan gücü minimize etmek için, çeşitli apodizasyon teknikleri kullanılır. Bu uygulama, yan lobları bastırırken, Bragg dalga boyundaki yansıtıcılığın azalmasına sebep olmaktadır [5-7].

Son olarak cıvıltılı fiber Bragg ızgaralar (CFBG) kullanılmıştır. CFBG'lerin, ızgara periyodu, ızgara uzunluğu boyunca değişim gösterir. Bu sebeple, ızgaranın her bir farklı bölümü, farklı bir dalga boyunu yansıtır buna bağlı olarak Bragg dalga boyu ızgara boyunca değişkenlik gösterir [11,15]. Diğer FBG'lerden daha geniş bir yansıma spektrumuna sahiptir.

CFBG'ler, dar bir spektrumu yansıtan FBG'lerin bir kaskat bağlanmış hali gibi davranır. Şekil 2'de de görüldüğü üzere, L uzunluğunda sahip cıvıltı ızgaranın, her biri  $L_g = L / M$  uzunluğunda her biri farklı Bragg dalga boyuna sahip M adet tekdüze FBG'ye ayrılarak, FBG zinciri olarak modellenilebilir. ızgaranın her bölümüne ait spektrum, FBG'nin toplam spektrumunu oluşturmaktadır. ızgara periyodu, uzunluk boyunca değiştiği için, spektrumda fiber boyunca ilerleyen farklı gecikmelere sahip farklı dalga boyları, farklı grup gecikmelerine maruz kalacaktır. CFBG'ler, dalga boyuna bağlı bir diferansiyel grup gecikmesi sağlayarak kromatik dispersiyonu telafi etmek için kullanılabilir [2,16].



**Şekil 1.** (a) Cıvıltılı FBG'nin yapısı (Structure of chirped FBG) (b) Artan periyotlu M adet tekdüze FBG kullanan CFBG modelinin yapısı. (Structure of CFBG model using M number of uniform FBGs with increasing period.)

Bu çalışmada FBG'ler sıcaklık sensörü olarak kullanılmıştır. FBG'ler de sıcaklığın etkisiyle, ısıl genleşme katsayısı ızgara periyodunda değişime, termo-optik etki ise fiberin efektif kırılma indisinde değişikliğe sebep olur.

Sıcaklık duyarlılığı, sıcaklık değişimine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır [13,14]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \left( n_{ef} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \Lambda \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} \right) \quad (3)$$

$n_{ef} = \lambda_B / 2\Lambda$  ve  $\Lambda = \lambda_B / 2n_{ef}$  olmak üzere, Eş. 3'te yerine konulduğunda aşağıdaki denklem elde edilir:

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

$\Delta T$ , uygulanan sıcaklıktaki değişim olmak üzere, Eş. 4 tekrar düzenlendiğinde;

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left( \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \Delta T \quad (5)$$

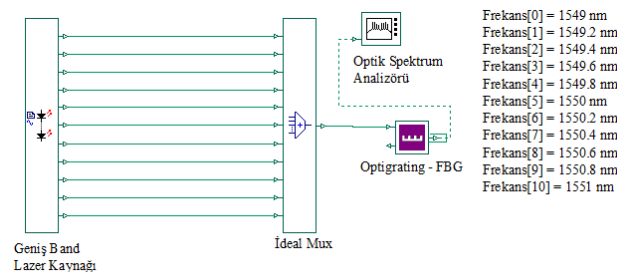
elde edilir.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi) \Delta T \quad (6)$$

Burada,  $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$  termal genleşme katsayısı ve  $\xi = \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$  termo-optik katsayıdır.

### 3. TEKDÜZE OLMAYAN FBG SICAKLIK SENSÖRÜ VE TASARIMLARI (NON-UNIFORM FBG TEMPERATURE SENSOR AND DESIGNS)

Üç farklı yapıdaki FBG sensör tasarımları ve tasarlanan bu FBG'lerin yansıma spektrumlarının incelenmeleri Optigrating 4.2.3 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tasarlanan FBG'lerin, uygulanmış olan 25, 40, 50, 60 °C sıcaklıklarının yansıma spektrumlarına ait veriler uygun formatta Optisystem 17 yazılımına aktarılmış ve çalışmaya Optisystem 17 üzerinden devam edilmiştir. Optisystem 17 yazılımında geniş band lazer kaynağı ve tasarlanan verileri Optigrating 4.2.3 yazılımından aktarılmış olan FBG kullanılarak kurulmuş olan düzenek Şekil 2'de görülmektedir. Bu çalışmada, lazer kaynakların çıkış güçlerinin, geniş band ışına kaynaklarına göre daha yüksek olması nedeniyle FBG'lerin analizlerinin daha net elde edilebilmesi için geniş band lazer kaynağı tercih edilmiştir.

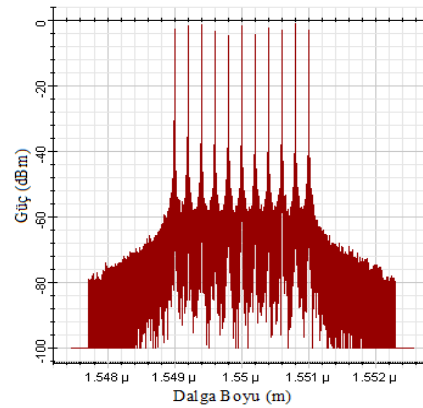


Şekil 2. Optisystem 17'de kurulan simülasyon düzeneği (Simulation setup in OptiSystem 17)

FBG'nin girişine geniş band lazer kaynağı (simülasyonda olmadığı için 1549 nm - 1551 nm aralığında 0.2 nm adım aralığıyla CW lazer dizisi

kullanılmıştır) her bir sıcaklık mertebesi için FBG merkez dalga boylarında meydana gelen kaymalar optik spektrum analizörü ile incelenmiştir. Tasarlanmış olan tekdüze, apodize ve cıvıtlı FBG'ler için bu aşamalar tekrarlanmıştır. Simülasyonda kullanılan 1549 nm - 1551 nm aralığında 0.2 nm adım aralığıyla CW lazer dizisi Şekil 3'te yer almaktadır. Bileşenlerin çıkış gücü 0 dBm (1 mW) seçilmiştir.

Şekil 3. Geniş band lazer kaynağının spektrumu (Spectrum of



the wideband laser source)

Tekdüze, apodize ve cıvıtlı FBG'lerin tasarımlarında kullanılan optik fibere ait parametreler Çizelge 1'de, sıcaklık sensörü termo-optik parametreleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Optik fiber parametreleri (Parameters of optical fiber)

Optik Fiber Parametreleri	Değer
Çekirdek yarıçapı	4.1 $\mu\text{m}$
Kılıf yarıçapı	62.25 $\mu\text{m}$
Çekirdeğin efektif kırılma indisi	1.46
Kılıfın efektif kırılma indisi	1.45

Çizelge 2. Sıcaklık sensörünün parametreleri (Parameters of the temperature sensor)

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

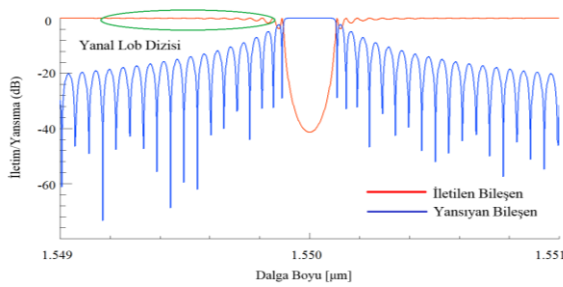
#### 3.1 Tekdüze Fiber Bragg Izgara Tasarımı ve Simülasyonu (Uniform Fiber Bragg Grating Design and Simulation)

Çizelge 1 ve Çizelge 3'teki fiber optik ve ızgara parametre değerleri kullanılarak tekdüze yapıda Bragg dalga boyu 1550 nm olan tekdüze FBG tasarlanmıştır (L: ızgara uzunluğu,  $\Delta n$ : indis modülasyon genliği). Bragg dalga boyundaki yansıtıcılık %99.992677'dir.

**Çizelge 3.** Tekdüze FBG tasarımında kullanılan parametreler (Used parameters at the uniform FBG design)

Tekdüze Izgara Parametreleri	Değer
L	15000 $\mu\text{m}$
$\Lambda$	0.53219353 $\mu\text{m}$
$\Delta n$	0.0002

Şekil 4’te, referans sıcaklıkta (25 °C) tasarlanan tekdüze FBG sensörün iletim-yansımaya spektrumu verilmiştir. Yansıtıcılığın maksimum olduğu Bragg dalga boyu (1550 nm) çevresinde yanıl loblar konumlanmıştır. Yanıl loblar Bragg dalga boyu çevresinde 1549.876 nm ve 1550.124 nm aralığında gözlemlenmiştir. Bragg dalga boyundan uzaklaştıkça yansıtıcılığın azaldığı, iletimin arttığı görülmektedir. Izgaranın, yarı maksimumdaki tam genişliği (Full width at half maximum-FWHM) 0.26 nm’dir.



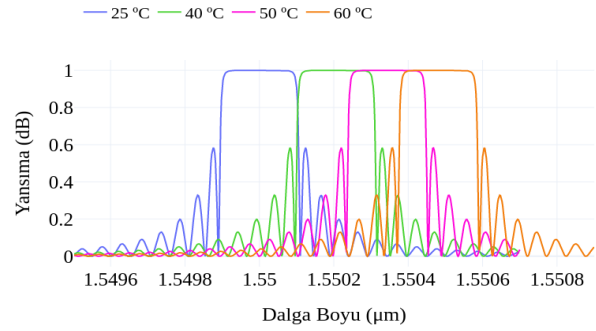
**Şekil 4.** 25 °C’deki tekdüze FBG için, iletim-yansımaya spektrumu (for uniform FBG at 25 °C transmission-reflection spectrum)

Referans sıcaklık 25 °C olmak üzere, sıcaklık 40-60 °C aralığında 10 °C periyotlarla değiştirilerek tekdüze FBG’ye uygulanmıştır. Çizelge 4’te her bir sıcaklık mertebesine ait, ızgara periyodu ve Bragg dalga boyu verilmiştir. Dalga boyu, sıcaklığın artmasıyla ısıl genişleme katsayısına bağlı olarak ızgara periyodunun genişlemesi ve termo-optik katsayıya bağlı olarak kırılma indisindeki artış sebebiyle değişmiştir. Dalga boylarındaki kayma miktarları 10 °C’lık değişimlerde 0.13 nm ve 0.14 nm mertebelerinde olmuştur. Optigrating yazılımının hassasiyetinden kaynaklanan bu farklılık göz ardı edilerek kaymalar doğrusal kabul edilmiştir.

**Çizelge 4.** Tekdüze FBG’de, sıcaklığın etkisiyle ızgara periyodu ve dalga boyunun değişimi (In uniform FBG, the change of grating period and wavelength due to the effect of temperature)

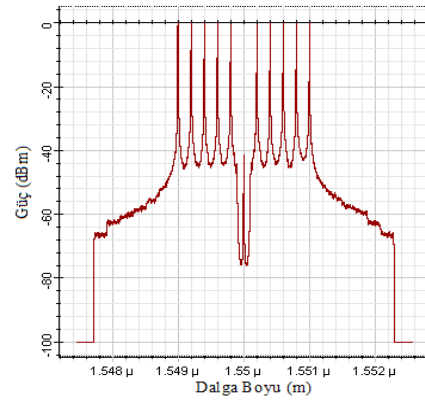
Uygulanan Sıcaklık C°	Izgara Periyodu	$\lambda_B$ (nm)
25	0.532194	1550.00
40	0.532198	1550.21
50	0.532201	1550.34
60	0.532204	1550.48

Şekil 5’te uygulanan her bir sıcaklık mertebesine ait tekdüze FBG sensörün yansımaya spektrumları verilmiştir. Isıl genişleme ve termo-optik katsayılarının pozitif değerli olması sebebiyle spektrum sağa doğru kaymıştır.

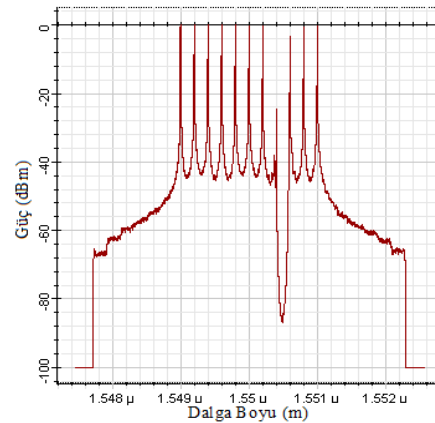


**Şekil 5.** 25, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için tekdüze FBG’nin yansımaya spektrumu (Reflection spectrum of uniform FBG for 25, 40, 50, 60 °C)

Optigrating 4.2.3 yazılımında tasarlanmış olan tekdüze FBG’nin 25 ve 60 °C’lerdeki spektrumlarına ait veriler Optisystem 17 yazılımına uygun formatta aktarılmış ve tekdüze FBG’ye ait olan çalışmaya Optisystem 17



(a)



(b)

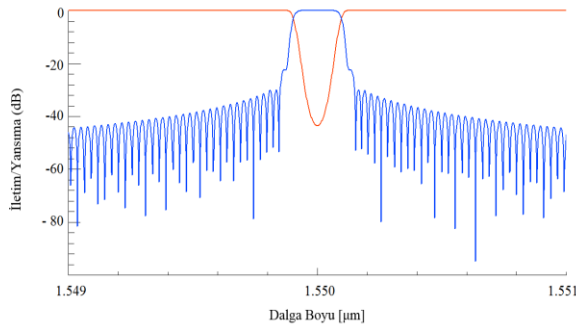
**Şekil 6.** (a) 25 °C için, (b) 60 °C için tekdüze FBG’nin yansımaya spektrumu (Reflection spectrum of uniform FBG (a) for 25 °C, (b) for 60 °C )

üzerinden devam edilmiştir. Şekil 6’da verilen, geniş band lazerin çıkışındaki tekdüze FBG’nin 25 ve 60 °C sıcaklıklarına ait yansımaya spektrumları incelendiğinde, geniş band kaynağı spektrumunun Bragg dalga boyuna

ait bölgeyi yansıttığı görülmüştür. Sıcaklık değişimiyle, Bragg dalga boyu sağa doğru kaydığı için geniş band lazer kaynağının çıkışındaki spektrumlarda Çizelge 4'te verilen Bragg dalga boylarını yansıtmıştır.

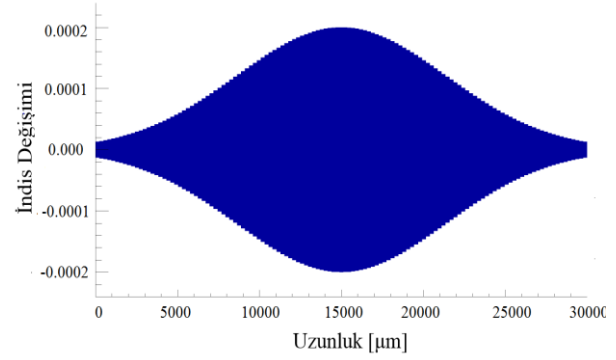
### 3.2. Apodize Fiber Bragg Izgara Tasarımı ve Simülasyonu (Apodized Fiber Bragg Grating Design and Simulation)

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 FBG tasarlanmıştır ve Bragg dalga boyundaki yansıtıcılık %98.668030 olarak elde edilmiştir. Bir önceki çalışmada tasarlanan tekdüze FBG'nin  $L=15000$ , indis modülasyon genliği 0.0002 Bragg dalga boyu 1550 nm olmak üzere, yansıtıcılığı %99.992677 olarak elde edilmişti. Buradan anlaşılıyor ki apodize uygulaması FBG'nin yansıtıcılığını azaltmaktadır. Aynı parametre değerleri için tekdüze izgaranın yansıtıcılığı apodize izgaraya göre daha yüksektir. Maksimum yansıtıcılık elde edebilmek amacıyla, apodize FBG'nin parametreleri değiştirilmiştir. Izgara uzunluğu  $30000 \mu\text{m}$ 'ye yükseltilecek %99.995505 yansıtıcılık elde edilmiştir. Şekil 7'deki apodize FBG'ye ait iletim-yansıma spektrumu incelendiğinde, tekdüze FBG'ye ait Şekil 4'te verilen spektrumda bulunan yan lobların apodize tekniği ile minimuma indiği görülmüştür. Yanal lob dizilerinin istenmediği uygulamalarda apodize teknikleri ile minimuma indirilebilir.



Şekil 7. 25 °C'de  $L=30000 \mu\text{m}$  apodize FBG için iletim-yansıma spektrumu (for  $L=35000 \mu\text{m}$  apodized FBG at 25 °C transmission-reflection spectrum)

Şekil 8'de, izgara uzunluğu boyunca, izgara periyodunun ve indis modülasyon genliği ilişkisi verilmiştir. Bu bölümde, tasarlanan izgara Gauss model apodize yapıda olduğu için geometrik olarak Gauss profilinde değişim göstermiştir. Indis modülasyon genliği değişimi izgara uzunluğunun orta noktasında en yüksek seviyededir ve izgaranın başına ve sonuna doğru azalım göstermiştir. Izgara periyodu, izgara uzunluğu boyunca sabittir. Sıcaklık artışı, Şekil 8'deki profil üzerinde geometrik olarak değişime sebep olmamıştır fakat izgara periyodunun artışına sebep olmuştur. 25 ve 60 °C'lerdeki izgara periyotları sırasıyla 0.532194 ve 0.532204  $\mu\text{m}$ 'dir.



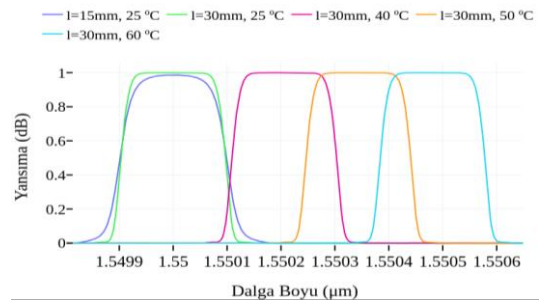
Şekil 8. Izgara uzunluğu boyunca, izgara periyodunun ve indis modülasyon genliği değişimi (Change of grating period and index modulation amplitude along the length of the grating)

Referans sıcaklık 25 °C olmak üzere, sıcaklık 40-60 °C aralığında 10 °C periyotlarla değiştirilerek apodize FBG'ye uygulanmıştır. Çizelge 5'te her bir sıcaklık mertebesine ait, izgara periyodu ve Bragg dalga boyları verilmiştir.

Çizelge 4. Apodize FBG'de, sıcaklığın etkisiyle izgara periyodu ve dalga boyunun değişimi (In apodized FBG, the change of grating period and wavelength due to the effect of temperature)

Uygulanan Sıcaklık C°	Izgara Periyodu	$\lambda_B$ (nm)
25	0.532194	1550.00
40	0.532198	1550.21
50	0.532201	1550.34
60	0.532204	1550.48

Şekil 9'da, uygulanan her bir sıcaklık mertebesine ait FBG sensörün yansıma spektrumları verilmiştir. Isıl genleşme ve termo-optik katsayıları pozitif değerli olduğu için spektrumlar sağa doğru kaymıştır. Yansıtıcılık izgara uzunluğunun artmasına bağlı olarak artmıştır.

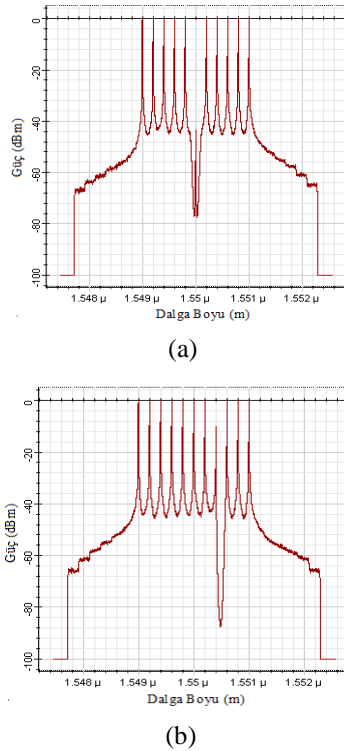


Şekil 9. 25, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için apodize FBG'nin yansıma spektrumu (Reflection spectrum of apodized FBG for 25, 40, 50, 60 °C)

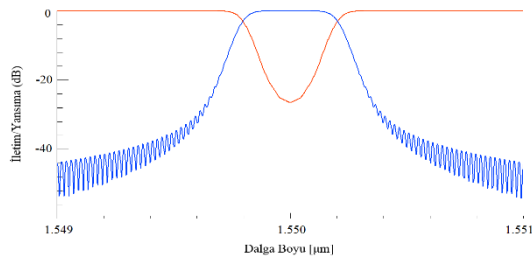
Optigrating 4.2.3 yazılımında tasarlanmış olan apodize FBG'nin 25, 60 °C sıcaklıklarının spektrumlarına ait veriler Optisystem 17 yazılımına uygun formatta aktarılmıştır ve apodize FBG'ye ait olan çalışmaya Optisystem 17 üzerinden devam edilmiştir. Şekil 10'da, geniş band lazerin çıkışındaki apodize FBG'nin 25 ve 60 °C sıcaklıklarına ait yansıma spektrumları görülmektedir. Şekil incelendiğinde, kaynak spektrumunun Bragg dalga boyuna ait bölgeyi yansıttığı görülmüştür. Dalgaboyundaki bu kayma sıcaklık arttıkça yükselmiştir.

### 3.3. Cıvıtlı Fiber Bragg Izgara Tasarımı ve Simülasyonu (Chirped Fiber Bragg Grating Design and Simulation)

Izgara periyodu  $L=30000 \mu\text{m}$ , indis modülasyon genliği  $0.0002$ , toplam cıvıtlı  $0.2 \text{ nm}$  ve Bragg dalga boyu  $1550 \text{ nm}$  olan cıvıtlı FBG sensör tasarlanmıştır. Bragg dalga boyundaki yansıtıcılık  $\%98.969786$  olarak elde edilmiştir. Bir önceki çalışmada tasarlanan apodize FBG'nin  $L=30000 \mu\text{m}$ , indis modülasyon genliği  $0.0002$  Bragg dalga boyu  $1550 \text{ nm}$  olmak üzere, yansıtıcılığı  $\%99.995505$  olarak elde edilmişti. Bu da cıvıtlı uygulamasının, FBG'nin yansıtıcılığını azalttığını göstermektedir. Aynı parametre değerleri için apodize izgaranın yansıtıcılığı cıvıtlı izgaraya göre daha yüksektir. Maksimum yansıtıcılık elde edebilmek amacıyla cıvıtlı FBG'nin izgara uzunluğu  $40000 \mu\text{m}$ 'ye çıkarılmıştır ve yansıtıcılık  $\%99.995505$  olarak elde edilmiştir.



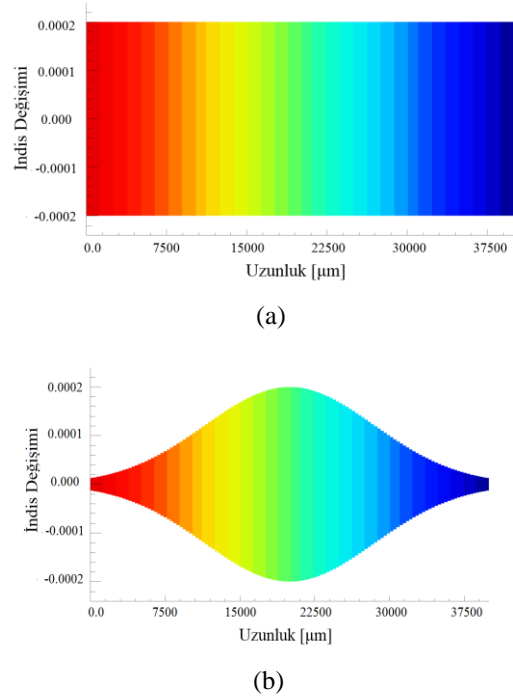
Şekil 10. (a) 25 °C için, (b) 60 °C için apodize FBG'nin yansıtım spektrumu (Reflection spectrum of apodized FBG (a) for 25 °C, (b) for 60 °C)



Şekil 11. 25 °C'de  $L=40000 \mu\text{m}$  cıvıtlı FBG için iletim-yansıtım spektrumu (for  $L=40000 \mu\text{m}$  chirped FBG at 25 °C reflection-transmission spectrum)

Şekil 11'de cıvıtlı FBG'nin 25 °C'deki iletim-yansıtım spektrumu görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, cıvıtlı FBG'nin band genişliğinin, tekdüze ve apodize yapıdaki FBG'lere göre daha geniş olduğu görülmektedir. Cıvıtlı uygulaması FBG'nin band genişliğini arttırmaktadır.

Şekil 12'de tasarlanan cıvıtlı FBG'nin izgara uzunluğu boyunca, izgara periyodunun ve indis modülasyon genliğinin değişimi verilmiştir. Cıvıtlı uygulaması sebebiyle, izgara periyodu, izgara uzunluğu boyunca değişim göstermiştir. Her bir renk, farklı izgara periyodu değerini ifade etmektedir. Şekil 12a'da verilen profile, apodize uygulanmamış cıvıtlı FBG'nin izgara uzunluğu boyunca, indis modülasyon genliği değişmemiş fakat izgara periyodu izgara uzunluğu boyunca değişim gösterilmiştir. Şekil 12b'de cıvıtlı FBG'nin Gauss profil apodizasyon uygulandığı için hem izgara periyodu hem de indis modülasyon genliği izgara uzunluğu boyunca değişim göstermiştir.



Şekil 12. Izgara uzunluğu boyunca, izgara periyodu ve indis modülasyon genliğinin değişimi (a) Apodizesiz cıvıtlı FBG, (b) Cıvıtlı-apodize FBG (Change of grating period and index modulation amplitude along the length of the grating (a) nonapodized-chirped FBG (b) chirped FBG )

Referans sıcaklık 25 °C olmak üzere, sıcaklık 40-60 °C aralığında 10 °C periyotlarla değiştirilerek cıvıtlı-apodize FBG'ye uygulanmıştır. Şekil 12.b'de, uygulanan her bir sıcaklık mertebesindeki izgara uzunluğu boyunca, izgara periyodu ve indis modülasyon genliğinin değişimi geometrik olarak görülmektedir. Fakat, uygulanmış olan sıcaklık sebebiyle, izgara periyodu her bir periyod değişiminde artmış buna bağlı olarak da Bragg dalga boyunda kayma gözlemlenmiştir. Çizelge 6'da, 25 ve 60 °C için, izgara periyodunun, izgara uzunluğu boyunca



**Çizelge 6.** Sıcaklık değişimiyle, apodize uygulanmış cıvıtlı FBG'nin ızgara periyodu değişimi (Grating period change of chirped FBG applied to apodized with temperature change)

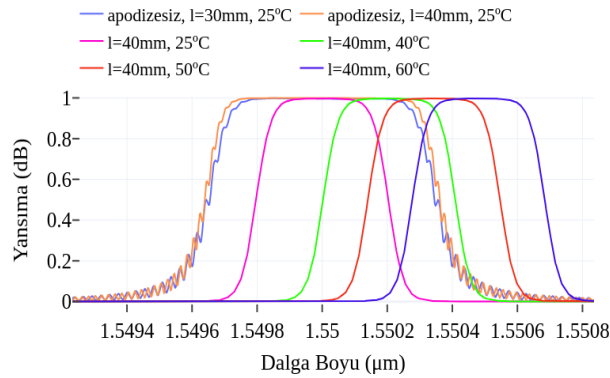
	Izgara Uzunluğu								
	0 $\mu\text{m}$	4875 $\mu\text{m}$	9750 $\mu\text{m}$	14625 $\mu\text{m}$	19500 $\mu\text{m}$	24375 $\mu\text{m}$	29250 $\mu\text{m}$	34125 $\mu\text{m}$	39000 $\mu\text{m}$
25 °C	0.53229	0.53227	0.53224	0.53222	0.53219	0.53217	0.53214	0.53212	0.53209
60 °C	0.53230	0.53228	0.53225	0.53223	0.53220	0.53218	0.53215	0.53213	0.53210

değişimleri verilmiştir. Çizelge 7'de 25, 40, 50 ve 60 °C için sıcaklıkla değişen Bragg dalga boyları verilmiştir.

**Çizelge 5.** Apodize uygulanmış cıvıtlı FBG'de, sıcaklığın etkisiyle dalga boyu değişimi (In apodized-chirped FBG, the change of wavelength due to the effect of temperature)

Uygulanan Sıcaklık C°	$\lambda_B$ (nm)
25	1550
40	1550.21
50	1550.34
60	1550.48

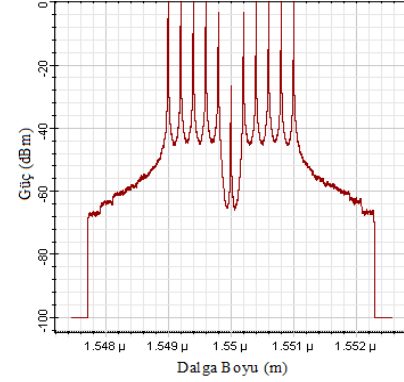
Şekil 13'te uygulanan her bir sıcaklık değerine ait cıvıtlı FBG sensörün yansıma spektrumları verilmiştir. Isıl genişleme ve termo-optik katsayılarının pozitif değerli olması sebebiyle spektrum yine sağa doğru kaymıştır. Apodize uygulaması band genişliğini azaltmıştır ve yan loblar minimize edilmiştir. Şekil 5,9 ve Tablo 8 incelendiğinde, cıvıtlı FBG'nin band genişliği, tekdüze ve apodize FBG'lerin band genişliklerinden daha fazla olduğu görülmektedir.

**Şekil 13.** 25, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için cıvıtlı FBG'nin yansıma spektrumu (Reflection spectrum of chirped FBG for 25, 40, 50, 60 °C)

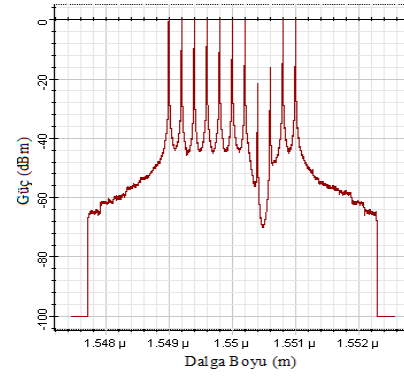
Daha sonra, Optigrating 4.2.3 yazılımında tasarlanmış olan apodize uygulanmış cıvıtlı FBG'nin 25 ve 60 °C sıcaklıklarının spektrumlarına ait veriler Optisystem 17 yazılımına aktarılmıştır. Şekil 14'te verilen, geniş band lazerin çıkışındaki cıvıtlı FBG'nin 25 ve 60 °C sıcaklıklarına ait yansıma spektrumları incelendiğinde,

**Çizelge 8.** Tasarlanan FBG'lerin spektrum analizi (Spectrum analysis of designed FBGs)

FBG Türü	L(mm)	FWHM(nm)	$\lambda_B$ '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	0.999955	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



(a)



(b)

**Şekil 14.** (a) 25 °C için, (b) 60 °C için cıvıtlı FBG'nin yansıma spektrumu (Reflection spectrum of chirped FBG (a) for 25 °C, (b) for 60 °C)

geniş band kaynağı spektrumunun Bragg dalga boyu çevresindeki bölgeyi yansıttığı görülmüştür. Sıcaklık değişimiyle, Bragg dalga boyu sağa doğru kaydığı için geniş band lazer kaynağının çıkışındaki spektrumda Çizelge 7'de verilen Bragg dalga boylarını yansıtmıştır. Cıvıtlı FBG'nin band genişliği, tekdüze ve apodize FBG'lere göre daha geniş olduğu için, geniş band lazer kaynağının spektrumun diğer FBG'lere göre daha geniş bir bölgesini yansıtmıştır.

### 3.4. Tasarlanan FBG'lerin Karşılaştırması (Comparison of Designed FBGs)

Çizelge 8'de, tasarlanan FBG'lerin ( $\lambda_B=1.55 \mu\text{m}$ ) ızgara uzunluklarının değişimine bağlı olarak değişen FBG özellikleri incelenmiştir. Bragg dalga boylarındaki yansıtıcılıkların maksimum referans değeri 1 olmak üzere, ızgara uzunluğunun artışıyla arttığı görülmektedir. Apodize ve cıvıltı uygulamaları sebebiyle azalan yansıtıcılık, ızgara uzunluğu artırılarak, optimize edilmiştir. Artan ızgara uzunluğuna bağlı olarak band genişlikleri azalmıştır. Tekdüze ızgaranın Bragg dalga boyunun solunda bulunan yanal lob 1549.876 nm'den başlayarak spektrumun soluna doğru, Bragg dalga boyunun sağında bulunan yanal lob 1550.124 nm'den başlayarak spektrumun sağına doğru konumlanmıştır. Uygulanan gauss profil apodize tekniği ile, yanal 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 FBG'nin yansıtıcılığını olumsuz etkilemiştir. Cıvıltılı FBG, tekdüze ve apodize FBG türlerinden farklı olarak en geniş band genişliğine sahiptir ve yansıttığı alan daha geniştir. Cıvıltı uygulaması da apodize uygulaması gibi yansıtıcılığı azaltmıştır. Yansıtıcılığı arttırmak için artırılan ızgara uzunluğu yan lobların genliğini arttırmıştır.

### 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, tekdüze, apodize ve cıvıltılı FBG sensör tasarlanarak sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bragg dalga boyundaki yansıtıcılık %99-%100 olacak şekilde ızgara parametreleri optimize edilmiştir. Aynı ızgara parametreleri ile çalışıldığında tekdüze FBG'nin yansıtıcılığı en fazladır. Yapılan analizlerde gauss profilde apodize tekniği uygulaması yan lobları bastırması 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 sıcaklığın sensör spektrumlarının şeklini değiştirmemiş fakat sensörlerin ızgara periyodları artmış buna bağlı olarak dalga boylarında lineer kayma meydana gelmiştir. Optisystem 17 yazılımında geniş band lazer çıkışına konumlandırılan sensörün 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 boylarındaki kaymalar FBG parametrelerinden bağımsızdır ve sadece aynı ısıl genişleme ve termo-optik katsayısına bağlı olarak değişir. Pozitif değerli ısıl genişleme ve termo-optik katsayıları kullanıldığı için spektrumlardaki dalga boyu kaymaları sağa doğru olmuştur. Tüm FBG sensör

tasarımlarında aynı ısıl genişleme ve termo-optik katsayısı kullanıldığı için değişen sıcaklık sebebiyle dalga boylarındaki kayma miktarları aynı olmuştur. Termo-optik katsayısı, ısıl genişleme katsayısından yaklaşık 10 kat daha fazla olması sebebiyle, dalga boyu kaymasında baskın parametre termo-optik katsayısı olmuştur. Tekdüze, apodize ve cıvıltılı FBG 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 FBG sensörler tercih edilmelidir. Birden fazla tekdüze FBG dizisi gibi davranan geniş band genişliğine sahip cıvıltılı FBG sensörler, kromatik dispersiyonun istenmediği uygulamalarda tercih edilmelidir.

### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Selin Ece KİPRİKSİZ:** Teorik analiz ve simülasyonları yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

**Murat Yücel:** Simülasyon algoritmalarını oluşturmuş ve sonuçlarını analiz etmiştir.

### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Du Y., Sun B., Li J., Zhang W., "Fiber Bragg Grating Sensor", Optical Fiber Sensing and Structural Health Monitoring Technology", *Springer*, Singapore, (2019).
- [2] Kashyap R., "Fiber Bragg Gratings (Second Edition)", Ed. Kashyap R., *Academic Press*, (2009).
- [3] Daud S., Ali J., "Fibre Bragg Grating and No-Core Fibre Sensors", *Springer*, Cham, Switzerland, (2018).
- [4] Pehlivan C., "Optik Fiber Bragg Iızgara Algılayıcıların Analizi", *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye, (2007).
- [5] Navruz İ., "Uzun Mesafeli ve Yüksek Hızlı Fiber Optik Haberleşme Sistemleri İçin Optik Iızgara Tabanlı Dispersiyon Kompanzasyonu", *Doktora Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Türkiye, (2006).
- [6] Khalid K., Zafrullah M., Bilal S. M., Mirza M., "Simulation and analysis of Gaussian apodized fiber Bragg grating strain sensor", *Journal of Optical Technology*, 79(10): 667-673, (2012).
- [7] Ashry I., Elrashidi A., Mahros A. M., Alhaddad M., Elleithy K., "Investigating the performance of apodized Fiber Bragg gratings for sensing applications", *the 2014 Zone 1 Conference of the American Society for*

- Engineering Education*, 1-5, Bridgeport, CT, USA, (3-5 April 2014).
- [8] Elgaud M. M., Zan M. S., Abushagur A. A., Bakar A. A., Elshirkasi A. M., "Analysis and simulation of time domain multiplexed (TDM) fiber Bragg sensing array using OptiSystem and OptiGrating", **2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEESE)**, 301-304, Putrajaya, Malaysia, (14-16 November 2016).
- [9] Hisham H. K., "Bandwidth Characteristics of FBG Sensors for Oil and Gas Applications", *American Journal of Sensor Technology*, 4(1):30-34, (2017).
- [10] Fathy M., Mofreh T., Barakat T., "New simulation and analysis fiber Bragg grating: narrow bandwidth without side lobes", *International Journal of Applied Engineering Research*, 14(11): 2667-2674, (2019).
- [11] Meena D., Meena M. L., "Design and Analysis of Novel Dispersion Compensating Model with Chirp Fiber Bragg Grating for Long-Haul Transmission System", **2nd International Conference on Optical and Wireless Technologies**, 29-36, Jaipur, India (2018).
- [12] Yücel M., Öztürk N. F., "FBG algılama sistemlerinde Gaussian uyarılma yöntemi ile merkez dalgaboyunun belirlenmesi", *Politeknik Dergisi*, (2020).
- [13] Nandi S., Indumathi T. S., Priya R. V., Kori A., "Analysis of Fiber Bragg Grating Spectral Characteristics Using Couple Mode Theory for Sensor Applications", **The 13th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS-2019)**, Sydney, Australia, 868–879, (2019).
- [14] Yücel M., Öztürk N., Torun M., "Fiber Bragg ızgara sensör dizisi tabanlı sıcaklık ölçüm sistemi tasarımı ve uygulaması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32:957-964, (2017).
- [15] Gemzicky E., Mullerova J., "Apodized and chirped fiber Bragg gratings for optical communication systems: Influence of grating profile on spectral reflectance", *Photonics, Devices, and Systems IV*, 71380X.1-71380X.6 , Prague, Czech Republic, (27-29 August 2008).
- [16] Tosi D., "Review of Chirped Fiber Bragg Grating (CFBG) Fiber-Optic Sensors and Their Applications", *Sensors*, 18(7):2147, Switzerland, (2018).