



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Fiber bragg ızgara sensörü için merkezi dalga boyu algılamaya hilbert dönüşümü yaklaşımı

## *Hilbert transform approach to central wavelength detection for fiber bragg grating sensors*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Zehra SARAÇ

*ORCID:* 0000-0003-3330-5196

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Saraç Z, “Fiber bragg ızgara sensörü için merkezi dalga boyu algılamaya hilbert dönüşümü yaklaşımı”, *Politeknik Dergisi*, 25(3): 1099-1111, (2022).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.880207

# Fiber Bragg Izgara Sensörü için Merkezi Dalga Boyu Algılamaya Hilbert Dönüşümü Yaklaşımı

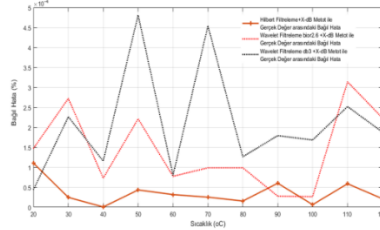
## Hilbert Transform Approach to Central Wavelength Detection for Fiber Bragg Grating Sensors

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Fiber Bragg Izgara Sıcaklık Sensörü/ Fiber Bragg Grating Temperature Sensor
- ❖ Hilbert Dönüşüm Yaklaşımı/Hilbert Transform Approach
- ❖ Wavelet Gürültü Arındırma Yaklaşımı/Wavelet Denoising Approach

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışma, Hilbert dönüşümü yaklaşımı ve X-BW metot birleşiminin FBG sıcaklık sensörünün merkezi dalga boyunun daha hassas tespit ettiğini ortaya koymaktadır./ In this study, it is revealed the combination of Hilbert transform approach and X-BW Method enables the more accurate the detection of central wavelength of the FBG temperature sensor.



Şekil. 9a /Figure. 9a

### Amaç (Aim)

FBG sensörlerinin yansımaya spektrumu gürültülü olduğu için merkezi dalga boyu belirleme doğru yapılamamaktadır. Bu gürültüyü minimize etmek ve böylece merkezi dalga boyu tespitini daha doğru yapmak için bu çalışmada Hilbert dönüşümü yaklaşımı önerilmektedir./ Since the reflection spectrum of the FBG sensors is noisy, the central wavelength determination cannot be made correctly. In order to minimize this noise and thus make the central wavelength determination more accurate, Hilbert transform approach is proposed in this study.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Yönteme gelince, spektrumdaki gürültüyü bastırmak için Hilbert dönüşümü yaklaşımı, Maksimum Metot ve X-BW Bant Genişliği Metot kullanılmaktadır./ As for the method, Hilbert transform approach, the Maximum Method and X-BW Bandwidth Method, are used to suppress the noise in the spectrum.

### Özgünlük (Originality)

Merkezi dalga boyunun tespit edilmesinde hataya sebep olan FBG Yansımaya Spektrumundaki gürültüyü bastırmak için ilk defa bu makalede Hilbert dönüşüm yaklaşımı kullanılmaktadır./ The Hilbert transform approach is used for the first time in this article to suppress the noise, which causes the error in determining the central wavelength, in the FBG Reflection Spectrum.

### Bulgular (Findings)

Kullanılan yöntemler ile elde edilen sonuçların gerçek merkezi dalga boyları ile karşılaştırılmıştır/ The results obtained with the used methods were compared with the real center wavelengths.

### Sonuç (Conclusion)

Hilbert dönüşümü yaklaşımı ile elde edilen sonuçların gerçek değerlere daha yakın olduğu görülmektedir. / It is seen that the results obtained with the Hilbert transform approach are closer to the real values.

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

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

# Fiber Bragg Izgara Sensörü için Merkezi Dalga Boyu Algılamaya Hilbert Dönüşümü Yaklaşımı

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Zehra SARAÇ\***

Istanbul Medeniyet Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34700, Üsküdar, İstanbul  
(Geliş/Received : 14.02.2021 ; Kabul/Accepted : 26.03.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 26.04.2021)

## ÖZET

Fiber Bragg Izgara sensörlerinin doğruluğu ve hassasiyeti, yansıma spektrumlarındaki merkezi tepenin dalga boyunu tespit eden işaret işleme yaklaşımlarına bağlıdır. Şu ana kadar yapılan çalışmalarda, bu tip sensörlerde yapılarındaki elektronik elemanlardan ve çalıştıkları çevreden dolayı ortaya çıkan, sistemi ciddi şekilde etkileyen çok çeşitli gürültüler vardır. Ayrıca kullanılan ışık kaynaklarının eş faz uzunluğuna ve şiddetine bağlı olarak özellikle yansıma spektrumunda istenmeyen girişim gibi etkiler gürültü oluşturmaktadır. Bundan dolayı FBG sensörünün yansıma spektrumu gürültülüdür. Son yıllarda bu gürültünün etkisini azaltmak için, filtreleme teknikleri ve eğri uydurma yöntemleri vb. giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışma, Hilbert dönüşümü yaklaşımının FBG sensörünün daha hassas merkezi dalga boyunun tespitini sağladığı ortaya konmaktadır. Bu yaklaşım oldukça pratiktir. Hilbert dönüşümü zaten bir filtre görevi gördüğünden, bu yaklaşım bir filtre tasarımı, ayrıştırma seviyeleri (Decomposition Levels) veya diğer yöntemlerde olduğu gibi başka herhangi bir karmaşık işlem gerektirmez. Önerilen yaklaşımın FBG sıcaklık sensörünün doğruluğunu ve ölçüm kabiliyetini geliştirdiğini göstermek için şimdiye kadar literatürde sunulan Dalgacık Gürültü Giderme Yaklaşımı ve önerilen yaklaşımın sonuçları karşılaştırılır. Sonuç olarak Hilbert dönüşümü yaklaşımının kesinlikle gerçek merkezi Bragg dalga boyu değerlerini daha iyi takip ettiği ve daha küçük bağıl hata gösterdiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Fiber bragg ızgara sıcaklık sensörü, optisyem 17, hilbert dönüşüm yaklaşımı, wavelet gürültü arındırma yaklaşımı.

# Hilbert Transform Approach to Central Wavelength Detection for Fiber Bragg Grating Sensors

## ABSTRACT

The accuracy and sensitivity of Fiber Bragg Grating sensors depends on signal processing approaches that detect the wavelength of the central peak in the reflection spectra. In the studies carried out so far, there are various noise that seriously affect the system, arising from the electronic elements in their structure and the environment in which they operate. In addition, depending on the coherence length and intensity of the light sources used, the effects such as unwanted interference in the reflection spectrum create noise. Therefore, the reflection spectrum of the FBG sensor is noisy. In recent years, filtering techniques and curve fitting methods etc. have become increasingly important to reduce the effect of this noise. In this study, it is revealed the Hilbert transform approach enables the detection of the more accurate central wavelength of the FBG sensor. This approach is very practical. Because the Hilbert transform already acts as a filter, this approach does not require a filter design, decomposition levels, or any other complex process as in other methods. To demonstrate that the proposed approach improves the accuracy and measurement capability of the FBG temperature sensor, the Wavelet Denoising Approach presented in the literature so far and the results of the proposed approach are compared. As a result, it is concluded that the Hilbert transform approach definitely follows better the true central Bragg wavelength values and shows smaller a relative error.

**Keywords:** Fiber bragg grating temperature sensor, optisyem 17, hilbert transform approach, wavelet denoising approach.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fiber Bragg Izgara (FBG) sensörün, ölçülmek istenen fiziksel büyüklüğün değerine bağlı olarak merkezi Bragg dalga boyunda bir kayma meydana gelir. Bu fiziksel büyüklüklere, kuvvet, sıcaklık, gerilim vb. örnek verilebilir [1-20]. Bu tip sensörler birçok avantaja sahiptir, örneğin elektromanyetik alanlardan etkilenmezler düşük fiyatlıdır, pasif yapıdadırlar,

buldukları yerde elektrik ihtiyacı duymazlar, periyodik bakım gerektirmezler vb.[20-24].

FBG'lerin doğruluğu iletim ya da yansıma güç spektrumlarındaki merkezi tepenin dalga boyunun doğru tespit edilmesine bağlıdır. Bu tip sensörlerde hem optik hem elektronik elemanlardan dolayı gürültüler meydana gelmektedir. Aynı zamanda FBG sensörün çalışmakta olduğu çevreden dolayı ortaya çıkan ve sistemi ciddi şekilde etkileyen çeşitli gürültüler de vardır. Genellikle sistemde ayarlanabilir Lazer kaynakları ya da SLED vb.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : zehra.sarac@medeniyet.edu.tr

ışık kaynakları kullanılmaktadır. Bu kaynakların eş faz uzunluğuna ve şiddetlerine bağlı olarak çeşitli gürültüler ortaya çıkabilmektedir. Örneğin bazı ışık kaynaklarının şiddeti yeterince yüksek olamayabilir bu da zayıflatıcı ve yansıma spektrumunu bastırıcı gürültünün ortaya çıkmasına sebep olabilir [15, 25- 27]. Daha birçok sistemden ve çevresinden kaynaklı etki ile ortaya çıkan gürültü, ölçülen fiziksel büyüklüğü tespit edeceğimiz işareti gittikçe bastırmaya başlar. Böyle durumlarda literatürde gürültünün etkisini azaltan çok çeşitli işaret işleme metotları önerilmektedir. Burada birkaç örnek verirsek; Wavelet gürültü bastırma, eğri uydurma ve özellikle son zamanlarda yapay sinir ağları gibi [28-50].

Bu çalışmada bir Fiber Bragg Izgara sıcaklık sensörü ile veriler (İşaretler) elde edilmiştir. Böyle bir sıcaklık sensörü Optiwave firmasının OptiSystem 17 optik ağ geliştirme sistemi ile tasarlanmıştır[51]. Bu tasarlanan sensörün referans sıcaklığı 20 (oC) alınmıştır. Sistemde bir SLED kullanılmıştır. Gücü (1 (mW)=0(dB)) kabul edilmiştir. Merkezi Bragg dalga boyu 1550(nm) alınmıştır. Optisystem simülasyon programının yetenekleri yıllardır test edilmektedir ve bu nedenle sistem çok kısa sürede oldukça gelişmiştir. Optiwave firması sistemin kapasitesinin genişletilmesi için OptiSystem programına erişilmesine izin vermektedir [12, 16,19, 39, 51-54].

Bu çalışmanın işaret işleme metotları kısmında gürültü arındırma yaklaşımlarından: a-Wavelet Dönüşümü b-Hilbert Dönüşümü (literatürde ilk defa bir FBG sensörü için bu çalışmada kullanılmıştır) kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlarla gürültüsü bastırılmış FBG yansıma spektrumlarının maksimum tepesinin (peak) sahip olduğu merkezi dalga boyunun tespit edilmesi için iki doğrudan metot kullanılmıştır: a- Maksimum b- X-BW

[29, 33, 37, 44, 45]. Ayrıca wavelet gürültü arındırma yaklaşımı ile Hilbert dönüşüm yaklaşımının sonuçlarını karşılaştırmak için literatürde daha önce kullanılmış daubechies ailesinden db3 'level 10' [6] , ve burada ilk defa biortgonal wavelet ailesinden bior2.6 'level 9', soft thresholding kullanılmaktadır[55].

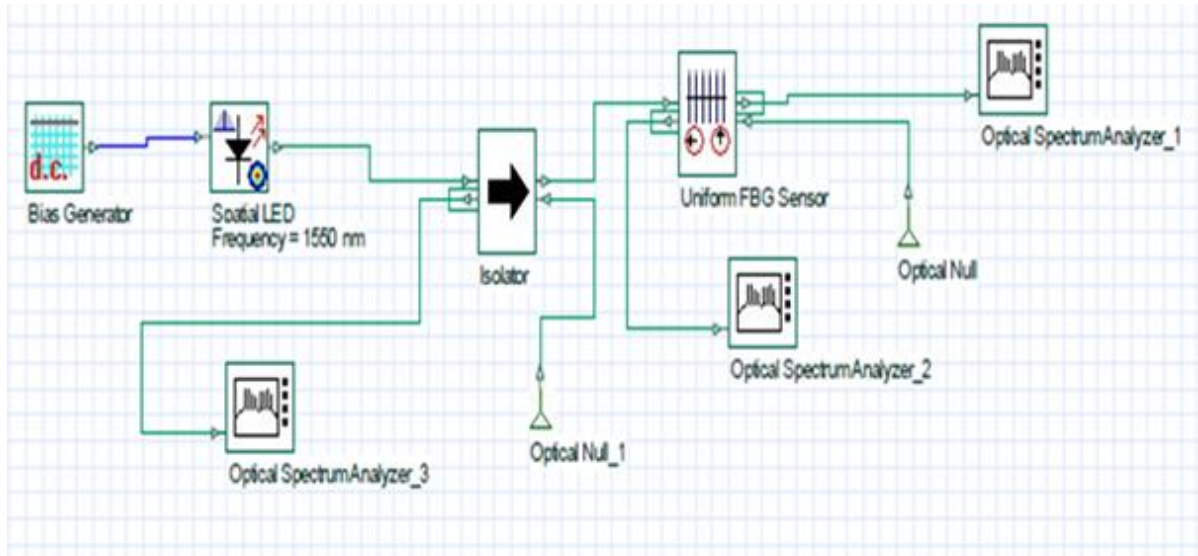
Bu çalışmanın son bölümü olan Sonuçlar ve Tartışma kısmında ise kullanılan yaklaşımların ve merkezi dalga boyunu tespit eden doğrudan metotların sonuçları ile gerçek Bragg dalga boyu kaymalarının (OptiSystem 17 ile tasarlanan FBG sıcaklık sensörünün verdiği değerler) karşılaştırılması için standart parametreler olan mutlak ve bağıl hata verilmektedir. Tartışma kısmında sonuçlar değerlendirilmektedir ve görülmektedir ki en küçük bağıl hatayı Hilbert dönüşümü yaklaşımı ve X-dB doğrudan metot kombinezonu vermektedir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

### 2.1 FBG Sıcaklık Sensörü Benzetimi (FBG Temperature Sensor Simulation)

FBG'ye dayalı bir sıcaklık sensörü, OptiSystem 17 optik ağ geliştirme sisteminde Şekil 1'deki gibi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde referans sıcaklık 20 (oC) alınmıştır. FBG'nin Bragg Dalga boyu 1550(nm) kabul yapılarak referans sıcaklıkta tepenin bu dalga boyunda olduğu varsayılmıştır. Bu dalgaboyuna karşı düşen zamansal frekansı 193.416(THz) olan 0(dBm) yani 1(mW) gücünde ve kuantum verimliliği, 0.09 olan bir SLED ışık kaynağı olarak seçilmiştir.

OptiSystem de tasarlanmış FBG sıcaklık sensöründe kullanılan FBG'nin etkin kırılma indeksi 1.42 ve gelen ışığı yansıtma miktarı 0.99 alınmıştır.



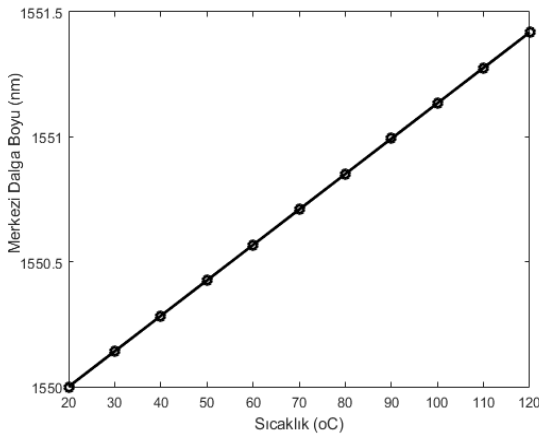
Şekil 1. OptiSystem 17 ile düzenlenen FBG sıcaklık sensörünün blok diyagramı (Block diagram of the FBG temperature sensor arranged with OptiSystem 17)

Sıcaklık değerleri 20 ila 120°C arasında 10'ar (°C) adımlarla değiştirilirken, optik spektrum analizörü ile FBG'nin yansımaya güç spektrumları elde edilmiştir. FBG'nin sıcaklık değişimlerine karşı verdiği tepkiyi ifade eden Bragg dalga boyunda meydana gelen kayma miktarları aşağıda Şekil 2'de verilmektedir. Bu değerler tüm makale boyunca gerçek merkezî dalga boyu değerleri kabul edilmektedir. Ayrıca 20, 50 ve 100 °C sıcaklıklar için elde edilen FBG optik yansımaya spektrumları Şekil 3'de sunulmaktadır.

Benzetimde FBG'nin termal uzama katsayısı  $\alpha_\Lambda = 0.55 \times 10^{-6} C^{-1}$ , birde termo-optik katsayı da  $\alpha_n = 8.6 \times 10^{-6} C^{-1}$  olarak alınmaktadır. Böylece Bragg dalga boyu kayma miktarı Denklem (1) ile hesap edilebilir [21] ve gerçek değerler elde edilebilir (Bak Şekil 2).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad \lambda_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (1)$$

Burada  $\Delta\lambda_B$  Bragg dalga boyunda kayma  $\lambda_B$  Bragg dalga boyu ve  $\Delta T$  sıcaklıktaki değişimdir. Ayrıca ızgara periyodu ( $\Lambda$ ) ve etkin kırılma indeksi  $n_{eff}$ 'dir. Sonuçta FBG'nin optik yansımaya spektrumundan Bragg dalga boyundaki kayma miktarını tespit edebilen birçok işaret işleme tekniği vardır. Bu çalışmada kullanılan teknik ve metodlar aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 2. OptiSystem 17 ile simülasyonu yapılan sıcaklık sensörünün verdiği sıcaklığa bağlı merkezî dalga boyları (Central wavelengths depending on the temperature obtained by the temperature sensor simulated with OptiSystem 17)

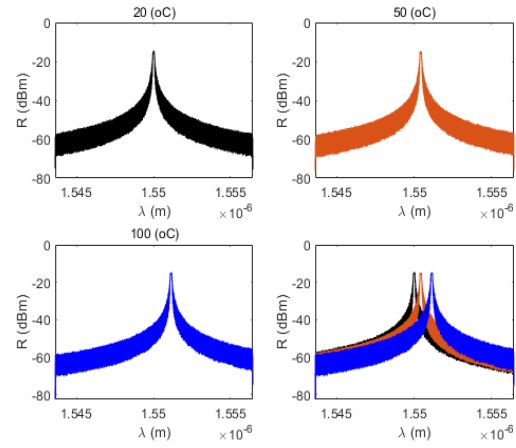
## 2.2 İşaret İşleme Teknikleri (Signal Processing Techniques)

Fiber Bragg ızgara sıcaklık sensöründen alınan optik yansımaya spektrumu çeşitli işaret işleme teknikleri ile değerlendirilmektedir. FBG Sensörün sıcaklığın etkisi ile ızgara periyodu ( $\Lambda$ ), etkin kırılma indeksi  $n_{eff}$  değişmektedir ve optik yansımaya spektrumunda Bragg dalga boyu kaymaktadır. İşte bu kaymanın miktarı tespit edilerek sıcaklık değeri ölçülmektedir [44]. FBG optik yansımaya spektrumunun (Bak Şekil 4) matematiksel denklemi (2)'deki gibi verilebilir [32].

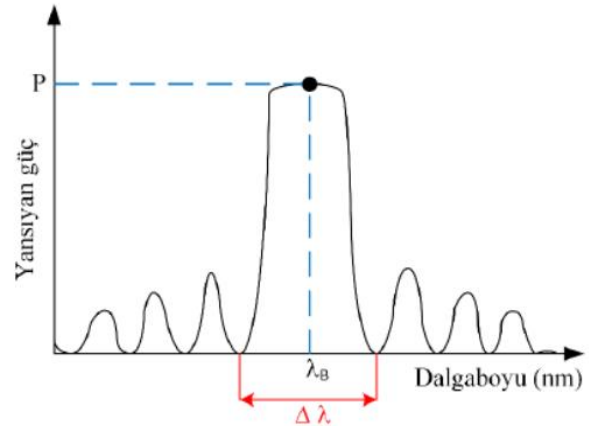
$$R(\lambda) = R_0 e^{\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\lambda_B}\right)^2\right]} \quad (2)$$

$R_0$  Bragg dalga boyundaki maksimum yansımaya miktarıdır. Optik Spektrum Analizör (OSA) de gözlenen optik yansımaya spektrumunun matematiksel ifadesi Denklem (3) ile verilir.

$$I_s(\lambda) = \frac{I_0}{4} R(\lambda) = \frac{I_0}{4} R_0 e^{\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\lambda_B}\right)^2\right]} \quad (3)$$



Şekil 3. 20, 50 ve 100 °C sıcaklıklar için elde edilen FBG optik yansımaya spektrumları (FBG optical reflection spectra obtained for temperatures of 20, 50 and 100 °C)



Şekil 4. Teorik FBG optik yansımaya spektrumu (Theoretical FBG optical reflection spectrum)

$I_0$  SLED ışık kaynağından gelen ışık şiddetidir. FBG sıcaklık sensör tasarımında 3 (dB)'lik bir fiber optik izolatör kullanılmış kabul edilmektedir (Bak Şekil 1). Bu nedenle  $I_0$  ışık şiddeti bu elemandan geçtiğinde  $\frac{1}{4}$  'üne düşer. Işık OSA üzerine düştüğünde gürültü tarafından bozulur. Yani OSA' da ki işaret Denklem (4) ile verilebilir. Eğer gürültü  $I_n(\lambda)$  ise,

$$g(x)|_{x=\lambda} = I_s(x) + I_n(x) \quad (4)$$

Burada  $I_n(\lambda)$  Denklem(5)'deki gibi verilebilir.



$$I_n(x)|_{x=\lambda} = \frac{I_0}{2} \sqrt{\alpha^2 R(x)} (1 - R(\lambda)) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} n\Delta L + \phi\right) \quad (5)$$

$g(\lambda)$  işareti, Optik Spektrum Analizör (OSA) ile elde edilmektedir. Ana (mother) wavelet olarak daubechies ailesinden db3 kullanılarak bu optik yansımaya spektrum işaretinin wavelet dönüşümü alınır. Aynı zamanda  $g(\lambda)$ , Hilbert dönüşümü yaklaşımı işleminden de geçirilir ve gürültüsü bastırılmış yansımaya spektrumları elde edilir. Sonra ölçülen sıcaklık değerini belirlemek için gürültüsü *bastırılmış spektrum*  $\{g(\lambda)\}$  işaretinin Bragg (merkezi) dalga boyundaki kayma miktarı belirlenir.

Aslında FBG Bragg dalgaboyu civarında dar bir yansımaya spektrumu veren dar bant optik filtre gibi davranır. Bu nedenle gürültü spektrumu çok etkilemektedir ve tepenin bulunduğu merkezi dalga boyunun tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelmeye çalışan çok çeşitli algoritmalar vardır. Bunlar genel olarak doğrudan yöntemler, eğri uydurma, korelasyon, wavelet gürültü arındırma (denoising) gibi gürültü bastırma teknikleri ve optimizasyona dayalı yapay sinir ağları yöntemleridir.

Bu çalışmada gürültü arındırma yaklaşımları ve doğrudan yöntemler olan Maksimum ve X-dB metotları kullanılmaktadır [44]. Aşağıda önce doğrudan merkezi dalga boyu belirleme metotlarının teorisi daha sonrada FBG optik yansımaya spektrumlarından gürültüsü bastırılmış işareti gürültüsü *bastırılmış spektrum*  $\{g(\lambda)\}$  yakalamak için kullanılan yaklaşımların teorisi verilmektedir.

### 2.2.1 Maksimum Metot (Maximum Method)

FBG'nin yansımaya spektrumundaki maksimum güce karşı düşen merkezi dalga boyu bulunması esasına dayalıdır. Denklem (6) ile matematiksel olarak bu metot ifade edilir [26, 44].

$$\lambda_B = \lambda |_{g(\lambda)=R_0=R_{max}} \quad (6)$$

### 2.2.2 X-BW Bant genişliği Metot (X-BW Bandwidth Method)

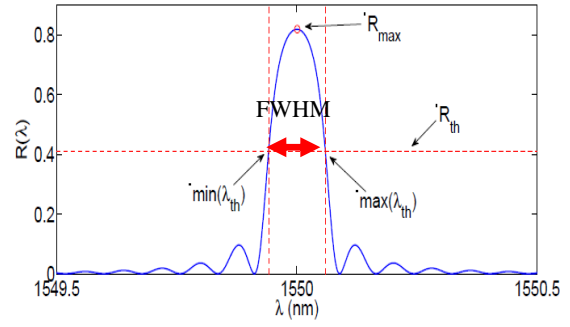
Bu metot en popüler tekniktir [26,44]. Ticari olarak çok sık kullanılmaktadır. Şekil 5 bu metodun analitik olarak nasıl uygulandığını göstermektedir ve aşağıda metodun denklemleri sunulmaktadır (7), (8).

$$R_{th} = \frac{R_{max}}{10 \log_{10} X}$$

$$\lambda_{th} = \lambda |_{R(\lambda) \geq R_{th}} \quad (7)$$

$$\lambda_{B,l} = \min(\lambda_{th}) + \frac{\max(\lambda_{th}) - \min(\lambda_{th})}{2} \quad (8)$$

İlk aşamada maksimum yansıtıcılığa ( $R_{max}$ ) karşı düşen  $I_s max$  tespit edilir. Daha sonra  $R_{th}$  değeri spektrum üzerinden hesap edilir.



Şekil 5. X-BW metodunun analitik olarak uygulanması (Analytical application of the X-BW method) [26]

$R_{max}$  değerinin yarıya düştüğü genlik değerinde olan kısım spektrumun bant genişliğidir ya da bu maksimum yarıya tam genişlik (Full width at half maximum-FWHM) olarak bilinir. Şekil 5 üzerinden konuşursak kırmızı ile belirtilmiş genişlik FWHM'dir. Denklem(8)'de yansımaya spektrumundan elde edilen değerler yerine konularak merkezi dalga boyu  $\lambda_B$  tespit edilir.

### 2.2.3 Wavelet Gürültü Arındırma Yaklaşımı (Wavelet Denoising Approach)

Wavelet gürültü arındırma MATLAB 2020b'de Wavelet denoising Toolbox üzerinden elde edilmiştir. Ana dalgacık daubechies ailesinden db3 alınarak FBG yansımaya spektrumu wavelet dönüşümü ile temel fonksiyonların kümesine dönüştürülür. Böylece yansımaya spektrumu daha pürüzsüz olur yani gürültüden arındırılması sağlanır. Bu wavelet dönüşümü yaklaşımı Denklem (9)'daki gibi verilebilir [26, 34, 40, 44].

$$gürültü \text{ bastırılmış spektrum } \{g(x)|_{x=\lambda}\} = A_N(\lambda) + \sum_j W_j \quad (9)$$

$W_j$  seçilen ana dalgacığa göre elde edilen wavelet katsayılarıdır. Dönüşümden sonra pürüzsüz elde edilen spektrumdaki tepenin dalga boyu, Maksimum (6) ve X-BW (8) metotları ile bulunmaktadır. Yukarıda belirtildiği gibi literatürde daha önce kullanılmış daubechies ailesinden db3 'level 10' [34] ve burada ilk defa biortogonal wavelet ailesinden bior2.6 'level 9', soft thresholding kullanılmaktadır. Burada  $N$  (decomposition level) ayrıştırma seviyesi sayısı demektir [26].

### 2.2.4 Hilbert Dönüşüm Yaklaşımı (Hilbert Transform Approach)

Hilbert dönüşümü gerçek değerli sinyallerin Fourier spektrumlarının simetrisi ile ilgili fazlalıkların üstesinden gelen bir yöntemdir. Özellikle hiç filtre tasarlamadan Fourier spektrasındaki tek yan bantı seçmesinden tek yan bant demodülasyon tekniğidir denilebilmektedir.  $G(f)$ 'i,  $g(x)|_{x=\lambda}$ 'nın 1 boyutlu Fourier spektrumunu olarak kabul edelim. Yardımcı bir sinyal olan  $A(x)$ ,  $g(x)$ 'in negatif frekans bileşenlerini keserek oluşturulur [56].

$$A(x) = 2 \int_0^{\infty} G(f) e^{-2i\pi f x} df = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) [\text{sign}(f) + 1] e^{-2i\pi f x} df \quad (10)$$

Burada sinyal enerjisi 2 faktörü ile korunmaktadır ve  $\text{sign}(f)$

$$\text{sign}(f) = \frac{|f|}{f} = \begin{cases} -1, & f < 0 \\ +1, & f \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$A(x)$ ,  $A(x) = g(x) + A'(x)$  olarak iki bileşen ile verilir. Burada yer alan  $A'(x)$  imajiner bileşen şu şekilde ifade edilmektedir.

$$A'(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) \text{sign}(f) e^{-2i\pi f x} df \quad (12)$$

$g(x)$ 'in Hilbert Dönüşümü reel bir sinyaldir ve Denklem (13) ile şu şekilde verilmektedir

$$\tilde{A}(x) = \frac{1}{i} A'(x) = \frac{1}{i} \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) \text{sign}(f) e^{-2i\pi f x} df \quad (13)$$

$A(x)$  sinyali, Denklem(14) ile verilebilir.

$$\text{gürültü bastırılmış spektrum} \{g(x)|_{x=\lambda}\} = A(x) = g(x) + i\tilde{A}(x) \quad (14)$$

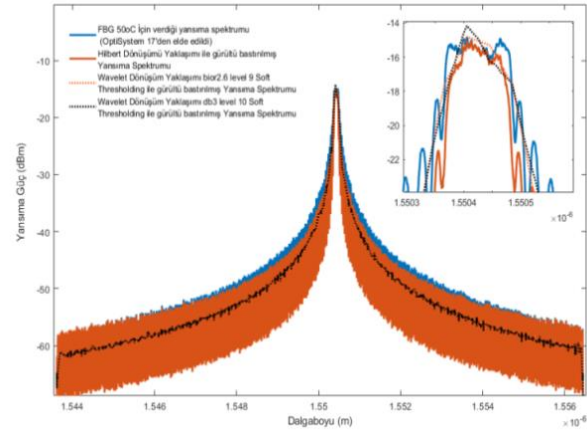
Burada  $A(x)$ , reel sinyal olan  $g(x)$ 'den üretilen karmaşık sinyaldir.  $A(x)$ 'in frekans spektrumu yalnızca negatif frekanslar için sıfırdır. Yani tek yan bant demodülasyona uğramış  $\text{gürültü bastırılmış} \{g(x)\}$  yansıma spektrumu elde edilir.

Daha sonra doğrudan metot olan Maksimum (6) ve X-BW (8) metotlar ile merkezi tepenin dalga boyu bulunmaktadır. Sonuçta gürültü bastırılmış yansıma spektrumunun maksimumu belirlenir. Bu tepe hangi dalga boyuna karşı düşer tespit edilir. Böylece FBG sensörü ile sıcaklık değeri belirlenir.

MATLAB R2020b' de sadece 50(°C) sıcaklık için gürültülü FBG yansıma spektrumu  $g(x)$  ve yukarıdaki Wavelet ve Hilbert dönüşüm yaklaşımları ile elde edilen  $\text{gürültü bastırılmış} \{g(x)\}$  spektrumlar Şekil 6'da sunulmaktadır.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

OptiSystem 17'de yapılan benzetim çalışmasında sıcaklık artışı ile FBG sensörün Bragg dalga boyunda meydana gelen kayma miktarları Şekil 2-2'de verilmektedir. Bu değerler tüm çalışma boyunca gerçek kayma değerleri olarak kabul edilmektedir. Önerilen Hilbert dönüşümü yaklaşımı ve wavelet dönüşümünün verdiği  $\text{gürültü bastırılmış} \{g(x)\}$  spektrumlar da Şekil 3-3'de 50(°C) sıcaklık için sunulmaktadır.



**Şekil 6.** MATLAB R2020b' de 50(°C) sıcaklık için elde edilen FBG yansıma spektrumu  $g(x)$  ve Wavelet ve Hilbert dönüşüm yaklaşımları ile elde edilen gürültü bastırılmış spektrum  $\{g(x)\}$  (FBG reflection spectrum  $g(x)$  obtained for 50 (°C) temperature and noise suppressed spectrum  $\{g(x)\}$  obtained by Wavelet and Hilbert transformation approaches in MATLAB R2020b )

Bu makalede optik yansıma spektrumundaki gürültüyü bastırmak için kullanılan yaklaşımları bir daha sırası ile yazarsak;

#### a-Wavelet Gürültü Arındırma Yaklaşımı

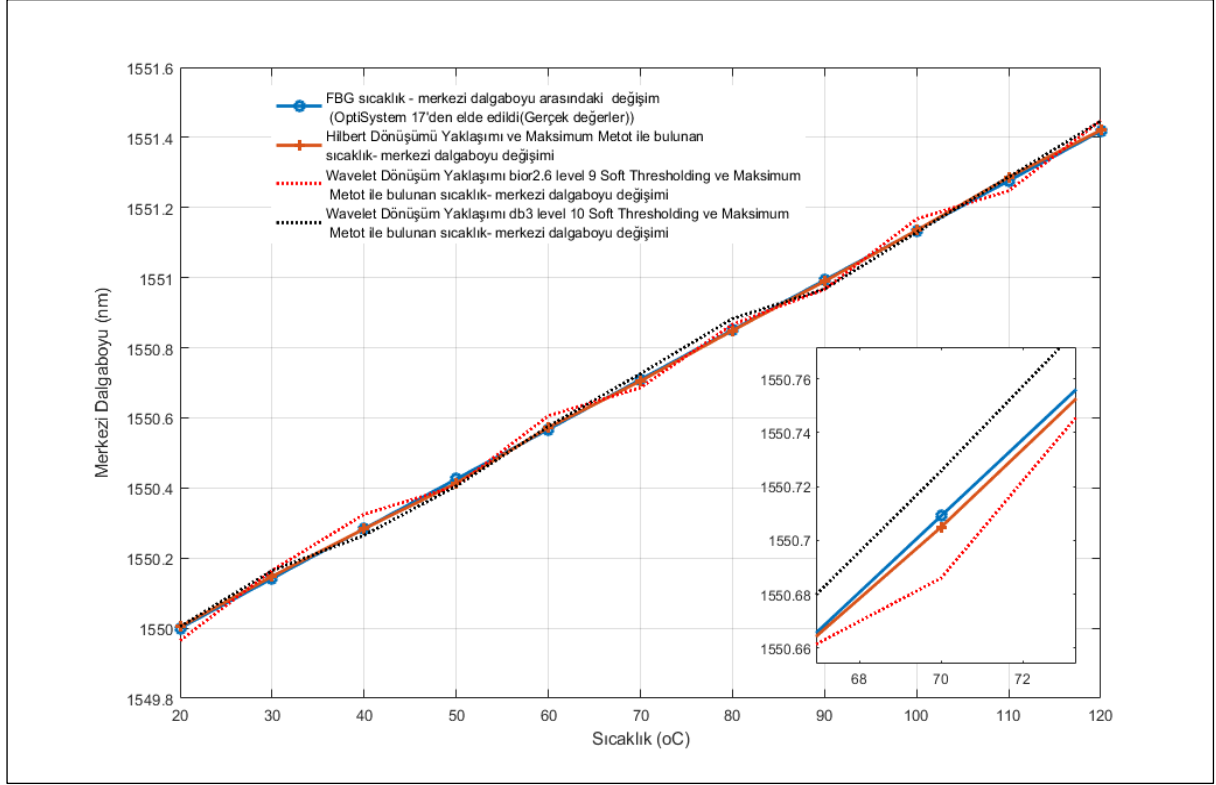
- 1- biortogonal wavelet ailesinden bior2.6 'level 9' soft thresholding ile
- 2- daubechies ailesinden db3 'level 10' soft thresholding ile

#### b-Hilbert Dönüşüm Yaklaşımı

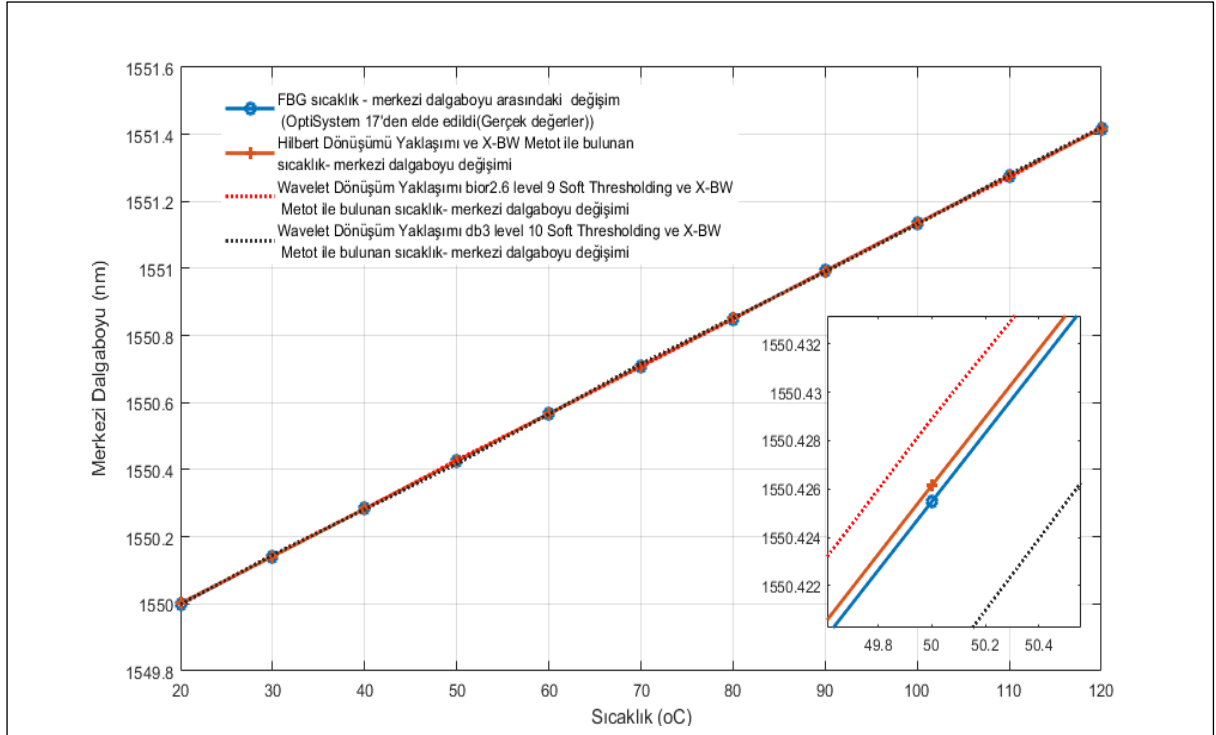
Bu yaklaşımlardan sonra elde edilen gürültü bastırılmış  $g(x)$  spektrumlarında tepe(peak) dalga boyunu belirlemek için kullanılan doğrudan yöntemler

- 1- Maksimum Metot
- 2- X-BW Metot

Burada a ve b de belirtilen gürültü bastırma yaklaşımlardan hemen sonra Maksimum Metot kullanılarak elde edilen sıcaklığa bağlı merkezi dalga boylarının, OptiSystem ile elde edilen gerçek merkezi dalga boylarını nasıl takip ettiğini anlamak için Şekil 7'de sonuçlar sunulmaktadır. Daha sonra belirtilen yaklaşımlardan hemen sonra X-BW Metot kullanılarak elde edilen sıcaklığa bağlı merkezi dalga boyları ile OptiSystem den elde edilen gerçek merkezi dalga boyu değerleri arasındaki ilişkiyi göstermek için Şekil 8 verilmektedir.



**Şekil 7.** Gürültü bastırma yaklaşımları ile elde edilen  $g(x)$  spektrumları ve Maksimum Metot kullanarak bulunan merkezi dalga boyları ve OptiSystem den elde edilen merkezi dalga boyları (gerçek dalga boyu değerleri) (Mavi) (the central wavelengths found by using the Maximum Method from the  $g(x)$  spectrums obtained by noise suppression approaches and the central wavelengths (true wavelength values) obtained from OptiSystem (Blue))



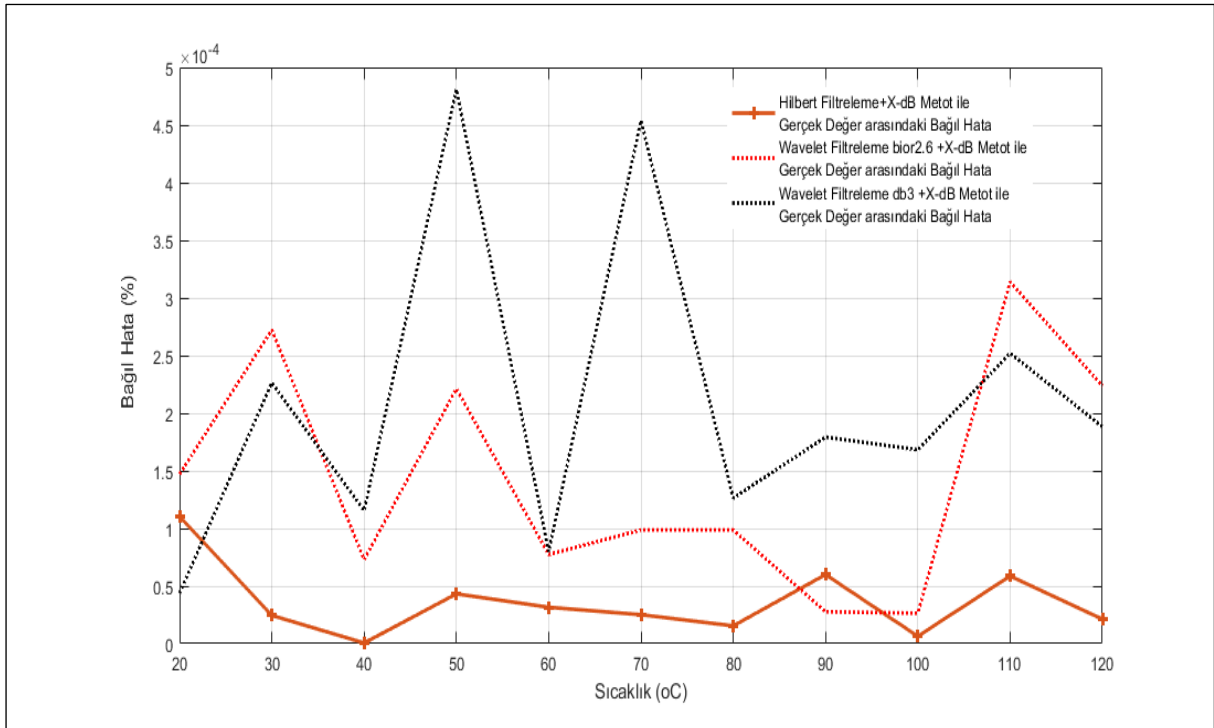
**Şekil 8.** Gürültü Bastırma yaklaşımları ile elde edilen  $g(x)$  spektrumları ve X-dB (BW) Metot kullanarak sıcaklığa bağlı bulunan merkezi dalga boyları ve OptiSystem de elde edilen dalga boylarının gerçek değerleri (Mavi) (the central wavelengths found by using the X-dB (BW) Method from the  $g(x)$  spectrums obtained by noise suppression approaches and the central wavelengths (true wavelength values) obtained from OptiSystem (Blue))



Neticede hangi yaklaşım ve metodun daha iyi yaptığını anlamak için bilinen standart hata parametreleri mutlak hata ve bağıl hata değerleri bu çalışmada sergilenmektedir. Bu değerler gürültü bastırma yaklaşımları ve merkezi dalga boyu bulma metotları kullanılarak elde edilen sonuçlar ile OptiSytemden elde edilen gerçek değerler arasındaki mutlak ve % bağıl farklardır.

Şekil 10a'da belirtilen yaklaşımlar ve X-BW merkezi dalga boyu belirleme metodu ile elde edilen değerler ve gerçek değerler arasındaki %bağıl hatalar sunulmaktadır.

Şekil 11b'de ise aynı sonuçların mutlak hatası  $nm$  olarak verilmektedir. Şekil 11b'ye bakıldığında Hilbert dönüşüm yaklaşımı ve Maksimum metot kombinasyonu en küçük mutlak hata değerini göstermektedir. Bu değerler  $5 \times 10^{-3}(nm)$  yani  $5(pm)$  civarında olup diğer yaklaşımlar için ise bu hata değeri  $40(pm)$ 'ye kadar çıkabilmektedir. Bağıl hataya gelince Hilbert dönüşüm yaklaşımı  $\% 0.8 \times 10^{-3}$  'den daha küçük bağıl hata göstermektedir (Bak Şekil 11a). Bu hata değeri diğer yaklaşımlar ve aynı (Maksimum) merkezi dalga boyu belirleme algoritması için  $\% 3 \times 10^{-3}$  'e kadar yükselmektedir.

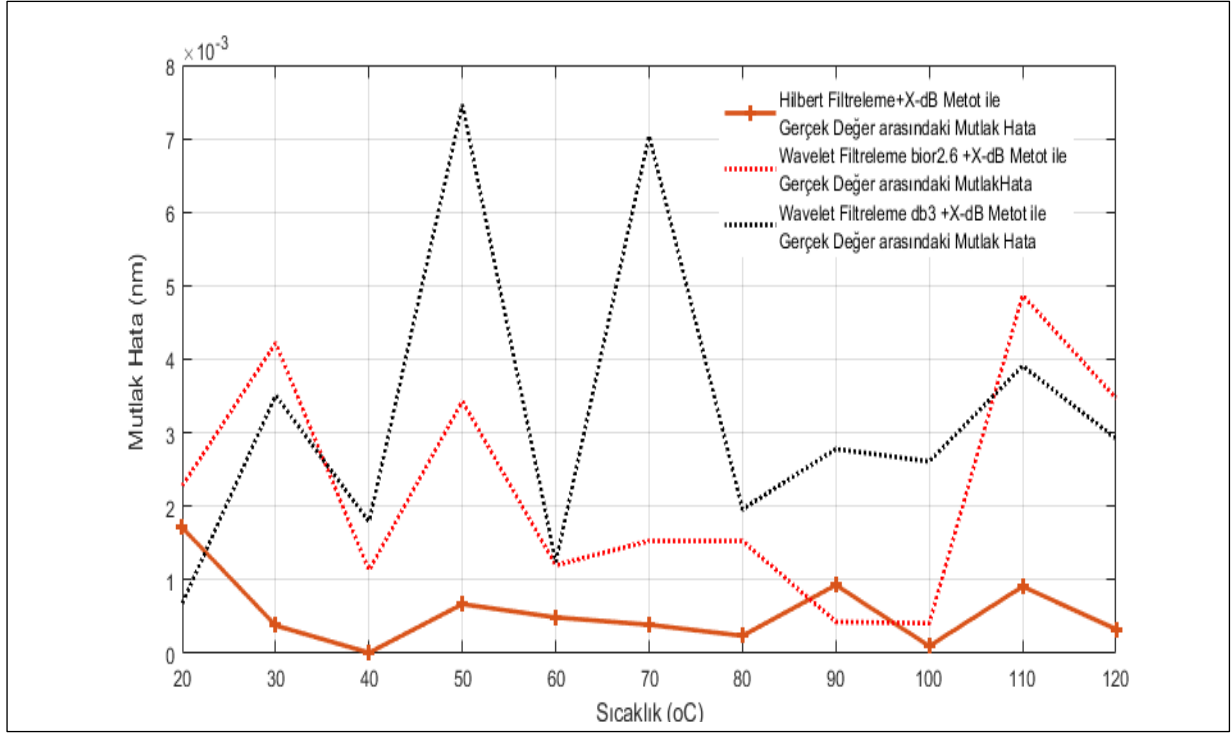


**Şekil 9a.** Gürültü bastırma yaklaşımları ile elde edilen  $g(x)$  spektrumları ve X-BW Metot kullanarak sıcaklığa bağlı bulunan merkezi dalga boyları ve OptiSystem de elde edilen gerçek değerler arasındaki % Bağıl Hatalar (% Relative Errors between the central wavelengths dependent on temperature calculated by the X-BW Method from noise suppressed spectrum  $\{g(x)\}$  found by using all approaches and the actual values obtained in OptiSystem)

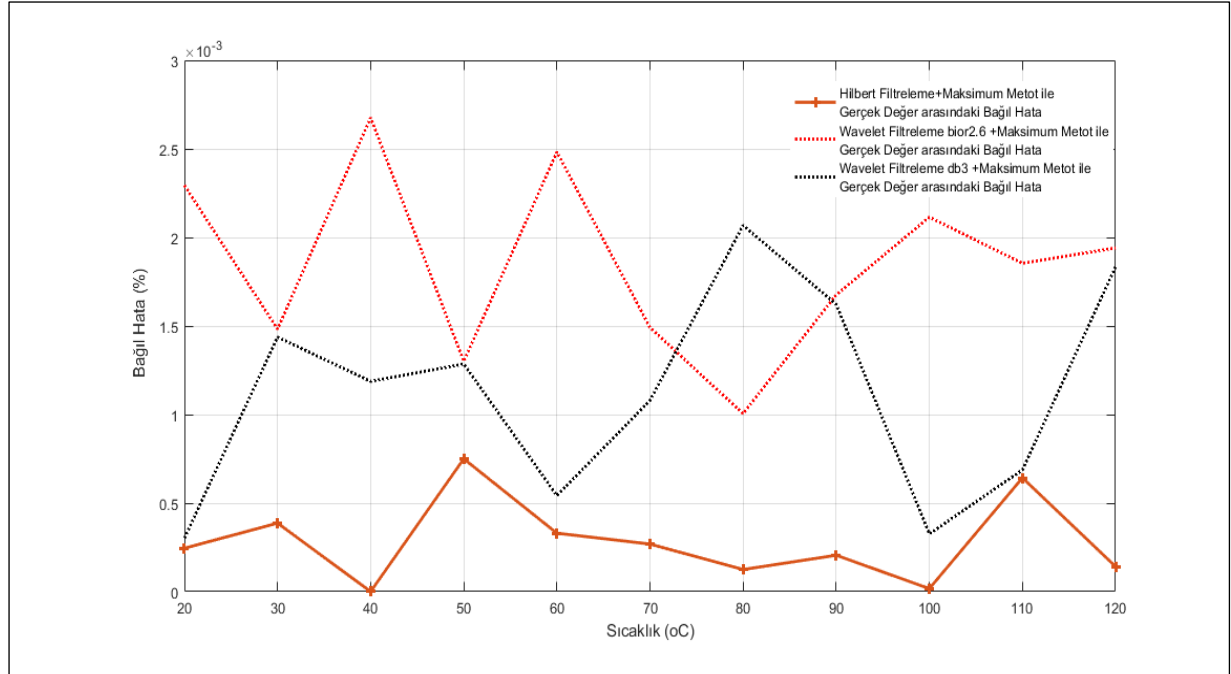
Şekil 10b'de ise aynı sonuçların mutlak hatası  $nm$  olarak verilmektedir. Şekil 10b'den görülmektedir ki Hilbert dönüşüm yaklaşımı ve X-BW kombinasyonu en küçük mutlak hata değerlerini göstermektedir. Bu değerler  $2 \times 10^{-3}(nm)$  yani  $2(pm)$  civarında olup diğer yaklaşımlar için ise bu hata değeri  $8(pm)$ 'ye kadar çıkabilmektedir. Bağıl hataya gelince Hilbert dönüşüm yaklaşımı  $\% 1 \times 10^{-4}$  'den daha küçük bir bağıl hata göstermektedir (Bak Şekil 10a). Bu hata değeri diğer yaklaşımlar ve aynı (X-BW) merkezi dalga boyu belirleme algoritması için  $\% 5 \times 10^{-4}$  'e kadar çıkmaktadır.

Şekil 11a'da belirtilen yaklaşımlar, maksimum merkezi dalga boyu belirleme metodu ile elde edilen değerler ve gerçek değerler arasındaki %bağıl hatalar sunulmaktadır.

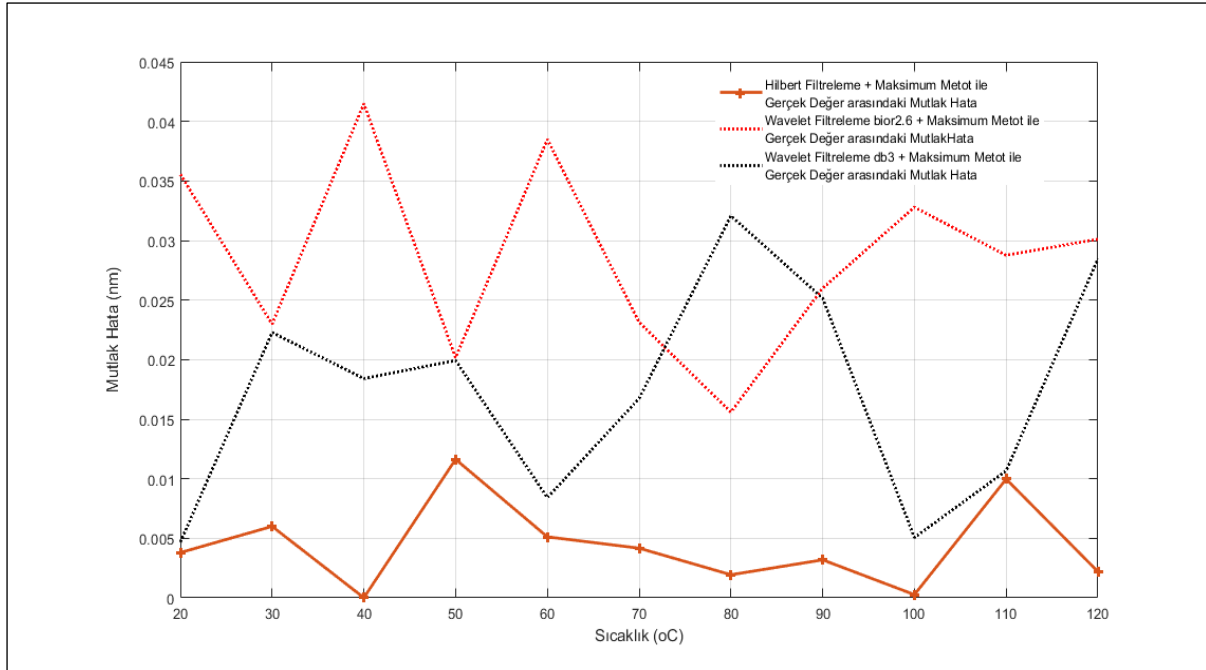
Hilbert dönüşümü yaklaşımı hem Maksimum Metot hem de X-BW Metot için oldukça iyi sonuç verdiğinden bu yaklaşıma dayalı sonuçları biraz daha özel incelemek yerinde olacaktır. Bu nedenle Şekil 11'de Hilbert dönüşüm yaklaşımı, Maksimum ve X-BW merkezi dalga boyu belirleme metotları ve gerçek değerler arasındaki bağıl ve mutlak hatalar sunulmaktadır. Ayrıca Maksimum ve X-BW metotlarının sonuçlarının arasındaki mutlak ve bağıl hatalar da verilmektedir. Böylece Hilbert dönüşümü yaklaşımı ile çalışılan hangi merkezi dalga boyu belirleme algoritması daha küçük hata yapıyor Şekil 11'e bakılarak söylenebilir. Şekil 11a'da bağıl hatalar (%) verilirken Şekil 11b'de aynı sonuçların mutlak hataları  $nm$  olarak sunulmaktadır.



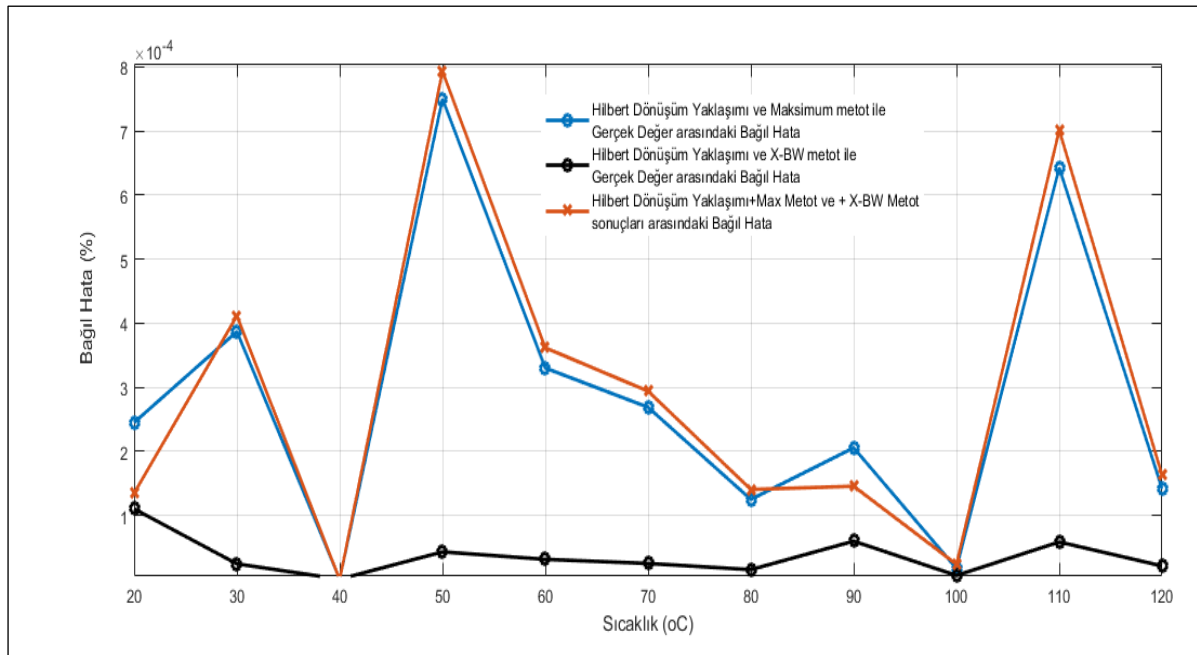
**Şekil 9b.** Gürültü bastırma yaklaşımları ile elde edilen  $g(x)$  spektrumları ve X-BW Metot kullanarak sıcaklığa bağlı bulunan merkezi dalga boyları ve OptiSystem de elde edilen dalga boylarının gerçek değerleri arasındaki Mutlak Hatalar (Absolute Errors between the central wavelengths dependent on temperature calculated by the X-BW Method from noise suppressed spectrum  $\{g(x)\}$  found by using all approaches and the actual values obtained in OptiSystem)



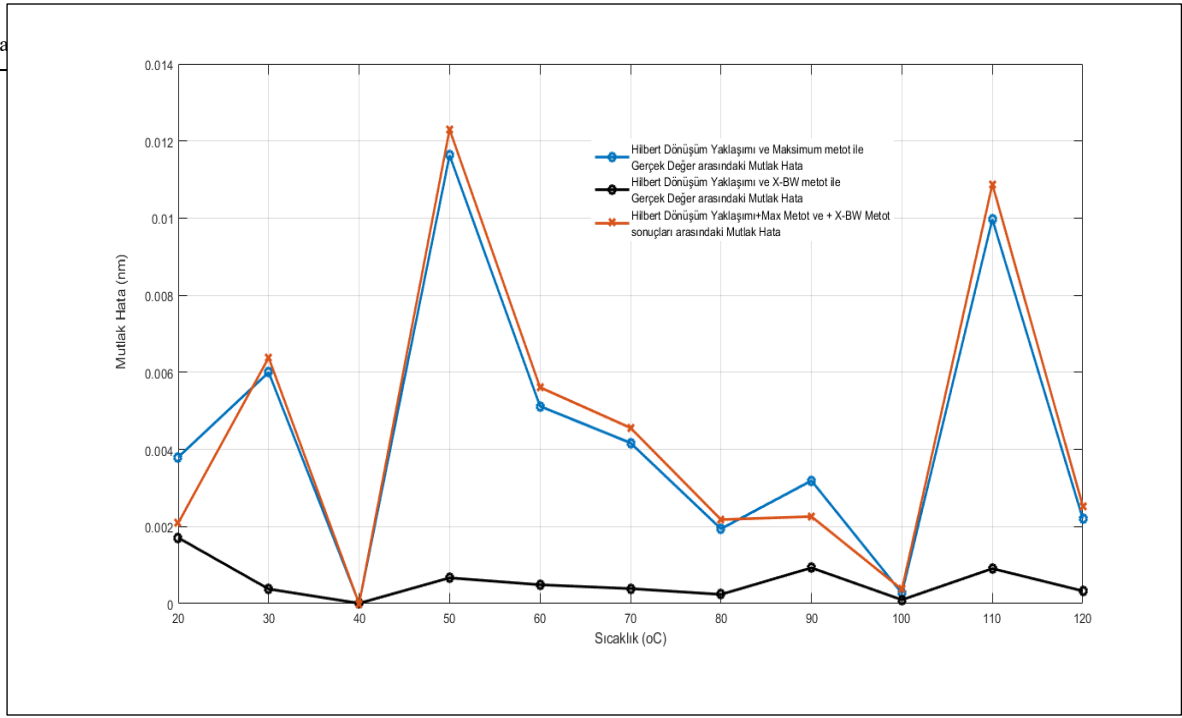
**Şekil 10a.** Gürültü bastırma yaklaşımları ile elde edilen  $g(x)$  spektrumları ve Maksimum Metot kullanarak sıcaklığa bağlı bulunan merkezi dalga boyları ve OptiSystem de elde edilen dalga boylarının gerçek değerleri arasındaki % Bağıl Hatalar (% Relative Errors between the central wavelengths dependent on temperature calculated by the Maximum Method from noise suppressed spectrum  $\{g(x)\}$  found by using all approaches and the actual values obtained in OptiSystem)



**Şekil 10b.** Gürültü bastırma yaklaşımları ile elde edilen  $g(x)$  spektrumları ve maksimum metot kullanarak sıcaklığa bağlı bulunan merkezi dalga boyları ve OptiSystem de elde edilen dalga boylarının gerçek değerleri arasındaki Mutlak Hatalar (Absolute Errors between the central wavelengths dependent on temperature calculated by the Maximum Method from noise suppressed spectrum  $\{g(x)\}$  found by using all approaches and the actual values obtained in OptiSystem)



**Şekil 11a.** Gürültü bastırma yaklaşımı Hilbert Dönüşümü ile elde edilen  $g(x)$  spektrumu Maksimum ve X-BW Metot kullanarak sıcaklığa bağlı bulunan merkezi dalga boyları ve OptiSystem de elde edilen gerçek dalga boyları arasındaki % Bağıl Hatalar. Ayrıca Hilbert Dönüşüm Yaklaşımı+Maksimum Metot ile Aynı yaklaşım + X-BW metot için bulunan sonuçlar arasındaki % bağıl hata (Bordo) (% Relative Errors between the central wavelengths dependent on temperature calculated by the Maximum and X-BW Methods from noise suppressed spectrum  $\{g(x)\}$  obtained using Hilbert Transform and the actual values obtained in OptiSystem. In addition, % relative error between results of Hilbert Transform Approach + Maximum Method and same approach + X-BW method (Maroon) )



**Şekil 11b.** Gürültü Bastırma yaklaşımı Hilbert Dönüşüm yaklaşımı ile elde edilen  $g(x)$  spektrumu Maksimum ve X-BW Metod kullanarak sıcaklığa bağlı bulunan Merkezi dalga boyları ve OptiSystem de elde edilen gerçek dalga boyları arasındaki Mutlak Hatalar. Ayrıca Hilbert Dönüşüm +Maksimum Metod ile Aynı yaklaşım + X-BW metod için bulunan sonuçlar arasındaki Mutlak Hata (Bordo) (Absolute Errors between the central wavelengths dependent on temperature calculated by the Maximum and X-BW Methods from noise suppressed spectrum  $\{g(x)\}$  obtained using Hilbert Transform and the actual values obtained in OptiSystem. In addition, absolute error between results of Hilbert Transform Approach + Maximum Method and same approach + X-BW method (Maroon))

Şekillerden görülmektedir ki Hilbert dönüşüm yaklaşımı ve X-BW metod kombinezonu en küçük bağıl ve mutlak hata değerlerini göstermektedir. Bağıl hata değeri  $1 \times 10^{-4}$  'den daha küçükken (Bak Şekil 11a), mutlak hata değeri 0.002 (nm) yani 2(pm)'den daha küçüktür (Bak Şekil 11b).

Sonuç olarak Hilbert Filtreleme yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar gerçek değerleri yakın şekilde takip ediyor denilebilir. Pratikdir yani filtre tasarımı gerektirmez. Bu nedenle diğer geleneksel filtreleme tekniklerinden daha iyidir sonucuna varılabilir. Buradaki uygulamada elde edilen hata değerlerinden en başarılı yöntem olduğu söylenebilir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada özellikle Fiber Bragg Izgara sıcaklık sensöründe gürültü bastırma yaklaşımı olarak ilk defa Hilbert Dönüşümü yaklaşımı kullanılmaktadır. Daha sonra gürültüsü bastırılmış spektrumlarda merkezi dalga boyunu tespit eden doğrudan yöntemler olan maksimum ve X-BW metodlar uygulanmaktadır. Ayrıca literatürdeki gürültü arındırma tekniklerinden olan wavelet yaklaşımı da ele alınmaktadır. Böylelikle yeni yaklaşımın literatürdeki en iyi yöntemden (wavelet gürültü arındırma +doğrudan yöntemler) daha iyi mi? sorusuna cevap aranmıştır.

Sonuçta literatürde şimdiye kadar kullanılan gürültü bastırma tekniği olan wavelet daubechies ailesinden db3 ve biortogonal wavelet ailesinden bior2.6 ile elde edilen gürültüsü bastırılmış spektrumlar ve Hilbert dönüşüm yaklaşımı ile elde edilen spektrum ve hem maksimum hem de X-BW metod ile elde edilen merkezi dalga boyları ile gerçek değer olarak kabul edilenler (OptiSystemden elde edilen) karşılaştırılmıştır. Sırası ile Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'dan görüldüğü gibi en iyi sonuçları Hilbert dönüşüm yaklaşımı ile elde edilen spektrum vermektedir. Yani bu spektrum kullanılarak bulunan merkezi dalga boyları gerçek değerlere çok yakındır.

Şekil 11'den de en iyi sonucu Hilbert Dönüşüm Yaklaşımı + X-BW metod ikilisinin verdiği görülmektedir. Sonuçta bu ikili  $10^{-4}$ 'den daha küçük bir bağıl hata ve 2(pm)'den daha küçük bir mutlak hata göstermektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazar, Optiwave firmasına OptiSystem 17 (Trial License) deneme sürümü için ve Mathworks şirketine MATLAB 2020b (Trial License) deneme sürümü için çok teşekkür eder.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmada kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder. / The author of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and legal-special permission.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Zehra SARAÇ:** Simülasyonu yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kisala, P., Cieszyk, S., "Method of simultaneous measurement of two direction force and temperature using FBG sensor head", *Applied Optics* 54(10), 2677-2687, (2015).
- [2] Zimmerman, A. C., Veiga, C. L. N., Encinas, L. S., "un ambiguous Signal Processing and Measuring Range Extension for Fiber Bragg Gratings Sensors Using Artificial Neural Networks-A Temperature Case", *IEEE Sensors Journal*, 8(7), 1229-1235, (2008).
- [3] Cusano, A., Cutolo, A., Nasser, J., Giordano, M., Calabro, A., "Dynamic strain measurements by fiber Bragg Grating Sensor", *Sensors and Actuators a-Physical*, 110(1), 276-281, (2004).
- [4] Leandro, D., Ams, M., Lopez-Amo, M., Sun, T., Grattan, K. T. V., "Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Using a Single Emission Line", *Journal of Lightwave Technology*, 33(12), 2426-2431, (2015).
- [5] Roman, M., Balogun, D., Zhuang Y., Gerald II, R. E., Bartlett, L., O'Malley R. J., and Huang, J., "A Spatially Distributed Fiber-Optic Temperature Sensor for Applications in the Steel Industry", *Sensors*, 20(14), (2020).
- [6] Gupta, S., Mizunami, T., Yamao, T., and Shimomura, "Fiber Bragg Grating Cryogenic Temperature Sensors", *Appl. Opt.*, 35, 5202, 5205, (1996).
- [7] Lin, G., Wang, L., Yang, C., Shih, M., and Chuang, T., "Thermal performance of metal-clad fiber Bragg grating sensors", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 10, 406-408, (1998).
- [8] Li, X., Prinz, F., and Seim, J., "Thermal behavior of a metal embedded fiber Bragg grating sensor", *Smart Mater. Struct.*, 10, 575-579, (2001).
- [9] Guan, B. O., Tam, H. Y., Tao, X. M., Dong, X. Y., "Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg Grating", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 12, 675-677, (2000).
- [10] Patrick, H., Williams, G., Kersey, A., Pedrazzani, J., Vengsarkar, A., "Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 8, 1223-1225, (1996).
- [11] Hoffmann, L., Müller, M. S., Kraemer, S., Giebel, M., Schwotzer, G., and Wieduwilt, T., "Applications of fibre optic temperature measurement", *Proc. Estonian Acad. Sci Eng.*, 13(4), 363-378, (2007).
- [12] Rosman, N. A., Rashidi, M. B. C., Aljunid, S. A., and Endut, R., "Temperature monitoring system using fiber Bragg grating (FBG) Approach", *AIP Conf. Proc.*, 2203 (020065), (2020).
- [13] Mikolajek, M., Martinek, R., Koziorek, J., Hejduk, S., Vitasek, J., Vanderka A., Poboril, R., Vasinek, V. And Hercik R., "Temperature Measurement Using Optical Fiber Methods: Overview and Evaluation", *Hindawi Journal of Sensors*, \*(\*) : \*, (2020).
- [14] Pehlivan C., "Optik Fiber Bragg Algılayıcıların Analizi", *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [15] Wild, G., Richardson, S. and Hinckley, S., "Numerical simulation of optoelectronic sensors: Fiber Bragg grating and noise," *2016 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD)*, 167-168, (2016).
- [16] Kipriksiz S. E., Yücel, M., "Düzensiz olmayan yapılar da fiber Bragg Izgara sensör tasarımı ve uygulaması", *Politeknik Dergisi*, \*(\*) : \*, (2021).
- [17] Burunkaya, M., and Yücel, M., "Measurement and Control of an Incubator Temperature by Using Conventional Methods and Fiber Bragg Grating (FBG) Based Temperature Sensors", *Journal of Medical Systems*, 44,(2),( 2021).
- [18] Yücel, M., Ozturk, N., and Goktas, H., "Implementation and design of fiber Bragg grating based rail strain measurement system", *2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1-4, (2018).
- [19] Zrelli, A., "Control and Measurement of Pressure, Temperature, and Strain Variation by Modeling Bragg Sensor", *Conference: International Conference on Automation, Control Engineering & Computer Science*, (2016).
- [20] Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K., Bharracharya, D. K., "Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-Present status and applications", *Sensors and Actuators A-Physical*, 147(1):150-164, (2008).
- [21] Karaman L., Ünverdi, N.O., "Fiber Bragg Izgara Tabanlı Optik Sensörün Analizi" , *IV. Ulusal İletişim Teknolojileri Sempozyumu*, (1997).
- [22] Alkoçak, S., Ünverdi, N.Ö., "Analysis and applications of fiber Bragg gratings", *26th Signal Processing and Communications Applications Conference*, (2018).
- [23] Wei, H., Cheng, H. B., Mei, J. C., Jiang, D. S., "Direct measurement of strain-optic effect in fiber Bragg gratings", *Ofs 2002:15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 171-174, (2002).



- [24] Yücel, M., Öztürk, N. F., and Gemci, C., "Design of a fiber Bragg grating multiple temperature sensor", *Sixth International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP)*, 6-11, (2016).
- [25] Sun, A., Farrell G., Semenova Y., Chen, B., Li, G. Y., Lin, Z. Q., "The distributed dynamic combined-stresses measurement of ship thruster inner-skin using fiber Bragg grating sensor rosette array", *Optic-International Journal for Light and Electron Optics*, 122(19), 1779-1781, (2011).
- [26] Chan C. C., Ni, N., Sun, J., Chu, Y. C., Tang, Y., Poh, C. L., "Interferometric noise suppression in fiber Bragg grating sensors by using wavelet filter", *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 12(6), 1241-1246, (2010).
- [27] De Pauw, B., Lamberti, A., Rezayat, A., Ertveldt, J., Vanlanduit, S., Van Tichelen, K., "Signal-to-Noise Ratio Evaluation of Fibre Bragg Gratings for Dynamic Strain Sensing at Elevated Temperatures in a Liquid Metal Environment", *Journal of Lightwave Technology*, 33(12), 2378-2385, (2015).
- [28] Li, Y., Xie, Y., Yao, G., "Comparison of Peak Searching Algorithm for Wavelength Demodulation in Fiber Bragg Grating Sensors" *2nd International Conference on Information Engineering Computer Science*, 1(4), (2010).
- [29] Bodendorfer, T., Muller, M. S., Hirth, F., and Koch, A. W., "Comparison of different peak detection algorithms with regards to spectrometric fiber Bragg grating interrogation systems," *2009 International Symposium on Optomechatronic Technologies*, 122-126, (2009).
- [30] Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K. P., Askins, C. G., Putnam, M. A., and Friebele, J., "Fiber Grating Sensors", *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1442-1463, (1997).
- [31] Lim, J., Yang, Q., Jones, B. E., and Jackson, P. R., "Strain and Temperature Sensors Using Multimode Optical Fiber Bragg Gratings and Correlation Signal Processing", *IEEE Trans. on Instr. and Mes.*, 51(4), 622-627, (2002).
- [32] Yücel, M., Torun, M. and Burunkaya, M., "Improvement of signal to noise ratio in Fiber Bragg Grating based sensor systems", *25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1-4, (2017).
- [33] Yücel, M., Öztürk, N., "FBG Algılama Sistemlerinde Gaussian Uyarılma Yöntemi ile Merkez Dalgaboyunun Belirlenmesi", *Politeknik Dergisi*, 24(1), 63-68, (2021).
- [34] D. Harasim and G. Kashaganova and Nazym Kussambayeva, "Accuracy improvement of Fiber Bragg Grating peak wavelength demodulation using wavelet transform and various center wavelength detection algorithms", *Przegład Elektrotechniczny*, (2016).
- [35] Caucheteur, C., Chah, K., Lhomme, F., Blondel, M., Megret, P., "Autocorrelation demodulation technique for fiber Bragg grating sensor", *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 16(10), 2320-2322, (2004).
- [36] Harasim, D., Gulbahar, Y., "Improvement of FBG peak wavelength demodulation using digital signal processing algorithms", *Photonics App. in Astronomy, Comm., Industry and High Energy Physics Experi.*, 9662, (2015).
- [37] Yücel, M., Torun, M., "Simplified fiber Bragg grating-based temperature measurement system design with enhanced high signal-to-noise ratio", *Microwave and Optical Technology Letters*, 60, 965-969, (2018).
- [38] Gong, J., Chan, C., Jin, W., MacAlpine, J., Zhang, M., Liao, Y.B., "Enhancement of wavelength detection accuracy in fiber Bragg grating sensors by using a spectrum correlation technique", *Optics Communications*, 212(1), 155-158, (2002).
- [39] Naim, N. F., Siti, S., Suzi, S., Norsuzila, Y., Latifah, S., "Design of fiber bragg grating (FBG) temperature sensor based on optical frequency domain reflectometer (OFDR)", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 10, 3158-3165, (2020).
- [40] Majkowski, A., Kolodziej, M., Rak, R. J., "Joint time-frequency and wavelet analysis- an introduction", *Metrology and Measurement Systems*, 21(4), 741-758, (2014).
- [41] Possetti, G. R. C., Kamikawachi, R. C., Muller M., Fabris, J. L., "Metrological Evaluation of Optical Fiber Grating-Based Sensors: An Approach Toward the Standardization", *Journal of Lightwave Technology*, 30(8), 1042-1052, (2012).
- [42] Patterno, A. S., Silva, J. C. C., Milczewski, M. S., Arruda, L. V. R., Kalinowski, H. J., "Radial-basis function network for the approximation of FBG sensor spectra with distorted peaks", *Meas. Sci., Technol.*, 17, 1039-1045, (2006).
- [43] Wen, X., Zhang, D., Qian, Y., Li, J., Fei, N., "Improving the peak wavelength detection accuracy of Sn-doped H<sub>2</sub>-loaded FBG high temperature sensors by wavelet filter and Gaussian curve fitting", *Sensors and Actuators A:Physical*, 174, 91-95, (2012).
- [44] Tosi, D., "Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors", *Sensors*, 17, 2368-2403, (2017).
- [45] Dyer, S.D., Williams, P.A., Espejo, R.J., Kofler, J.D., Etzel, S.M., "Fundamental limits in fiber Bragg grating peak wavelength measurements", *Proc. SPIE*, 5855, 88-93, (2005).
- [46] Gill, A., Peters, K., Studer, M., "Genetic algorithm for the reconstruction of Bragg grating sensor strain profiles", *Meas. Sci. Technol.*, 15, 1877, (2004).
- [47] Huang, C., Jing, W., Liu, K., Zhang, Y., Peng, G., "Demodulation of fiber Bragg grating sensor using cross-correlation algorithm", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 19, 707-709, (2007).
- [48] Lamberti, A., Vanlanduit, S., de Pauw, B., Berghmans, F. A., "Novel fast phase correlation algorithm for peak wavelength detection of fiber Bragg grating sensors", *Opt. Express*, 22, 7099-7112, (2014).
- [49] Chan, C.C., Shi, C.Z., Jin, W., Wang, D.N., "Improving the wavelength detection accuracy of FBG sensors using an ADALINE network", *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 15, 1126-1128, (2003).
- [50] Negri L., Nied, A., Kalinowski, H. & Paterno, A., "Benchmark for Peak Detection Algorithms in Fiber Bragg Grating Interrogation and a New Neural Network for its Performance Improvement", *Sensors*, 11, 3466-3482, (2011).
- [51] Optiwave, Optisystem 17, <https://optiwave.com/>

- [52] Elgaud, M. M., Zan, M. S. D., Abushagur, A. G., Bakar, A. A. A., and 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 (ICAEEES)**, 301-304, (2016).
- [53] Elgaud, M. M., Zan, M. S. D., Abushagur, A. A. G., and Bakar, A. A. A., "Analysis of independent strain-temperature fiber Bragg grating sensing technique using OptiSystem and OptiGrating", **2016 IEEE 6th International Conference on Photonics (ICP)**, 1-3, (2016).
- [54] Gözğöz, U., Gül, E., Karaman, İ., Özkan, H., ve Kılıç, N., "Dağınık Fiber Optik Sensörler ile Efektif Alanın Rayleigh Saçılmasına Etkisinin OptiSystem Programı Kullanılarak İncelenmesi", **Conference: 3rd International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA'20)**, (2020).
- [55] R2020b, Wavelet Denoising Toolbox, [https://www.mathworks.com/?s\\_tid=gn\\_logo](https://www.mathworks.com/?s_tid=gn_logo)
- [56] Saraç Z., Birkök H.G. , Taşkın H., Öztürk E., "Evaluation of thermal lens fringes using Hilbert and Fourier transform methods", **IET Science, Measurement and Technology**, (5), 81 – 87, (2011).