

# $\Phi$ -OTDR sorgulayıcı tabanlı titreşim algılayıcılar için simülasyon aracı geliştirilmesi

## Development of a simulation tool for vibration sensors based on $\Phi$ -OTDR interrogator

Şamil Şirin  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
İzmir, Türkiye  
samilsirin@iyte.edu.tr

Kıvılcım Yüksel Aldoğan  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
İzmir, Türkiye  
kivilcimyuksel@iyte.edu.tr

**Özetçe**—Bu çalışmada, faza duyarlı zaman bölgesinde optik yansıtıcı ünitesi tarafından sorgulanan fiber optik titreşim sensörü simülasyon aracı geliştirilmesi amacıyla, literatürde yakın zamanda önerilen modüler bir yaklaşım uygulanmıştır. Geliştirilen model kullanılarak, demodüle edilen faz bilgisi üzerindeki faz sönümlenme etkisi incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler**— $\Phi$ -OTDR; faz zayıflaması; fiber optik sensör; titreşim algılayıcı; fotonik tabanlı haberleşme ve sensör sistem uygulamaları.

**Abstract**—This paper implements a recently reported modular approach to develop a simulation tool for the signals received in optical fiber vibration sensors interrogated by phase-sensitive optical time domain reflectometer. The phase fading effect on the demodulated phase information has been studied by using the developed model.

**Keywords**— $\Phi$ -OTDR; phase fading; fiber optic sensors; vibration sensor; photonic-based communication and system applications.

### I. GİRİŞ

Titreşim (vibrasyon) sensörleri; endüstriyel makinaların, petrol veya gaz boru hatlarının, tren yollarının izlenmesi, yapısal malzemelerdeki hasar tespiti ve sınır güvenliği gibi pek çok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tüm bu uygulamalarda, konvansiyonel (piezoelektrik ya da kapasitif özelliklere dayanan) sensörlerin elektriksel yalıtım ihtiyacı, sadece noktasal ölçüm alabilme, uzun mesafelere uygulama zorluğu gibi zayıf noktaları mevcuttur [1]. Bu nedenle fiber optik tabanlı sensörler, elektromanyetik alandan etkilenmemeleri, hafif ve ince bir yapıya sahip olmaları, uzak mesafelerden güvenli bir şekilde sorgulanmaları, elektriksel olarak pasif olmaları gibi avantajları ve en önemli unsur olarak da dağıtık ölçüme olanak sağlamaları sayesinde halihazırda kullanılan vibrasyon sensörlerine iyi bir alternatif sunar [1].

Fiber optik sensörlerin dağıtık ölçüm alabilme özelliğinin temelinde geri-yansıtıcı (reflectometric) sorgulama yöntemleri yer alır. Bu yöntemler arasında OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer, Zaman Bölgesinde Optik Geriyansıtıcı Ölçüm Tekniği), OFDR (Optical Frequency-Domain Reflectometer, Frekans Bölgesinde Optik Geriyansıtıcı Ölçüm Tekniği), P-OTDR (Polarizasyona

duyarlı OTDR), BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) sayılabilir.

Faza duyarlı OTDR ( $\Phi$ -OTDR) sensör sorgulama yöntemi, son yıllarda araştırmacıların ilgisini çeken ve kayda değer pek çok ilerlemenin raporlandığı bir araştırma konusudur. Bu teknikte dar-bantlı lazer kullanımı Rayleigh saçılımıyla geri yansıtılarak foto-algılayıcıya aynı anda ulaşan sinyallerin birbirleriyle girişime uğramasını sağlar. Böylece, geri yansıyan elektrik alanın dış etkilere karşı duyarlı faz bilgisi de korunmuş olur. Fakat birbiriyle girişime uğrayan sinyallerin aldıkları yollar, geri yansıma fenomeninin sebebi olan saçılım noktalarının fiber içerisindeki rastsal dağılımı dolayısıyla farklıdır. Bu yüzden girişen sinyallerin taşıdığı faz bilgisi de rastlantısal ve -bir dış etki (titreşim, sıcaklık değişikliği, vb.) olmadıkça- sabittir. Dış etkinin söz konusu olmasıyla değişen faz, belirli bir sıklıkla gönderilen her bir sorgulama vurumundan elde edilen izler (geri yansıyan sinyallerin gücünün fiberde yansıtıcıları konumun bir fonksiyonu olarak çizilmiş hali) kullanılarak demodüle edilir. Fakat geri yansıyan sinyaller yok edici girişime uğramış ise foto-algılayıcıdaki sinyal gürültü oranı düşer. Faz demodülasyonunda hatalara yol açan bu durum faz sönümlenmesi (*phase fading*) olarak bilinir [2].

$\Phi$ -OTDR düzenekleri başlangıçta Rayleigh geri-yansıtmasını temel alırken [3], son bir kaç yıldır yansıtıcı olarak FBG (*Fiber Bragg Grating*) sensörlerin kullanılması fikri ağırlık kazanmaya başlamıştır [4]. Bu yaklaşımda fiber içine yazılan FBGler, konumu ve sinyal yansıtma katsayısı belli ve kontrol edilebilir yansıtıcı işlevini görmektedir. Bir başka yenilikçi yaklaşım ise frekansı doğrusal bir şekilde modüle edilmiş optik vurum (*chirped pulse*) kullanılmasıdır. Literatürde '*time-gated OTDR*' olarak anılan bu yaklaşımın en önemli avantajı sensör sisteminin ölçüm mesafesi ile uzaysal çözünürlük parametreleri arasındaki sınırlandırıcı ilintiyi ortadan kaldırmasıdır [5]. Bahsi geçen yaklaşımların tamamında gerçekçi bir sistem modeli ve kullanımı kolay simülasyon aracı oluşturulması kritik bir önem taşımaktadır. Saha testlerinden önce sistem eniyileştirilmesi, performans parametreleri hakkında gerçekçi hesaplamalar yapılması, ölçüm sonuçlarına uygulanması planlanan sinyal işleme ve sinyal sınıflandırma algoritmalarının test edilmesi, lineer olmayan etkilerin incelenmesi amacıyla, modüler yapıda oluşturulan bir simülasyon aracına ihtiyaç vardır.

Bu çalışma kapsamında,  $\Phi$ -OTDR temelli vibrasyon sensörü tasarımına olanak sağlayacak, modüler yapıda bir simülasyon aracı geliştirilmiştir. Nümerik modellemesi yapılan  $\Phi$ -OTDR sensör sistemi, evre uyumlu (coherent) algılayıcıya sahip olup faz bilgisinin elde edilmesi amacıyla iki ayrı fiber optik pasif bileşen içermektedir. Bu bileşenlerden ilki Mach-Zehnder interferometresi (*Imbalanced Mach-Zehnder Interferometer*, makale boyunca IMZI kısaltmasıyla anılacaktır) olup fiberin ardışıl iki bölgesinden yansıyan sinyaller arasında girişim yaratmak amacıyla kullanılmıştır. Diğer bileşen olan simetrik 3x3 koplörün görevi ise girişim tabanlı sinyal algılamada karşılaşılan sinyal sönümlenmesi sorununu en aza indirmektir.

Nümerik model kurgulanırken Masoudi ve diğ. tarafından önerilen modüler yaklaşım esas alınmıştır [6]. Simülasyon aracının geliştirilmesinin ardından faz sönümlenmesinin  $\Phi$ -OTDR ölçümleri üzerindeki bozucu etkisi analiz edilmiştir.

## II. KULLANILAN MODEL

Çalışmanın ilk aşamasında  $\Phi$ -OTDR için analitik model oluşturulmuştur. Daha sonra bu model temel alınarak  $\Phi$ -OTDR izinin hesaplandığı kullanıcı ara-yüzlü bir yazılım tasarlanmıştır. Bu yazılımda  $\Phi$ -OTDR sensör sisteminin tüm bileşenleri (lazer kaynağı, optik modülatör, optik fiber, IMZI, optik algılayıcı, faz demodülasyon birimi) ve sarsım kaynağı (pertürbasyon) ayrı öbekler halinde modellenmiştir. Bu sayede, sistem bileşenlerinin çıktıya etkisi birbirinden bağımsız bir şekilde simülasyonlar yoluyla gözlemlenmiştir.

Modellenen  $\Phi$ -OTDR sensör sisteminin bileşenleri Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.

$\Phi$ -OTDR'nin klasik OTDR'den en önemli farkı kullanılan lazer kaynağının evre-uyumlu olmasıdır. Fiberin herhangi bir  $z$  noktasından geri yansıyan optik güç,  $z-W/2$  ile  $z$  noktaları arasındaki bölgeden yansıyan bileşenlerin girişimine bağlıdır ( $W$ : optik vurumun uzunluğu).

### A. Sensör Fiber (SensFib)

Sensör fiberdeki binlerce saçılım noktasının modellenmesi için fiber kablo, optik vurum uzunluğundan ( $W$ ) çok daha küçük bölümlere ( $D$ ) ayrılmış ve her bir bölmenin içerisindeki yüzlerce saçılım noktası bir saçılma merkeziyle ifade edilmiştir. Saçılma merkezinin geri-yansıttığı sinyalin büyüklüğü Rayleigh dağılımlı bir rassal değişkendir.  $k$  numaralı bölmede bulunan saçılım merkezinin fiberdeki konumu (1) ile ifade edilir [7].

$$z_k = (k \cdot D) - \delta z_k \quad (1)$$

Burada saçılma merkezinin ilgili bölüm içerisindeki ( $[k \times D, (k+1) \times D]$ ) rölatif pozisyonu ( $\delta z_k$ ) üniform dağılımlı niceliktir.

### B. Optik Vurum

Modelimizdeki optik vurumun konumsal elemanları, bölme uzunluğu ( $D$ ) referans alınarak oluşturulmuştur. Buna ilaveten, lazer kaynağının bant genişliği ( $\Delta\nu$ ), belli bir dalga boyu aralığıyla örneklenmiş ve optik vurumun spektral elemanlarını meydana getirmiştir. Optik vurumun fazör gösteriminde, elektrik alan büyüklüğü vurumun şekliyle alakalıyken fazı (2)'deki gibi hesaplanabilir [6]:

$$\theta(\lambda_q, d_k) = \theta(\lambda_q, d_l) + k \frac{2\pi n}{\lambda_q} \Delta d \quad (2)$$

Burada  $\theta(\lambda_q, d_k)$ ,  $k$  indisli konum ve  $q$  indisli spektral elemanın fazını,  $n$  fiberin kırılma indisini,  $\lambda_q$   $q$  spektral bileşenin dalga boyunu, ve  $\Delta d$  iki ardışık konumsal eleman arasındaki uzaklığı ifade etmektedir.

### C. Uygulanan Sarsım

Fiber üzerindeki gerilme  $\varepsilon$  geri yansıyan elektrik alanın fazında  $\Delta\Phi$  kadar faz değişimine yol açar.  $\beta$  yayılım sabiti,  $L_0$  gerinimin fibere uygulandığı bölümün uzunluğu ve  $\Delta n$  gerinim kaynaklı kırılma indisinde bölgesel ve geçici değişim olmak üzere faz değişimi

$$\Delta\Phi = \beta L_0 \frac{\Delta L_0}{L_0} + L_0 \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir [8]. Kırılma indisinin (3)'te yerine konmasıyla faz kaymasıyla uygulanan gerinim arasındaki lineer ilişki (4)'teki gibi görülür [6]:

$$\Delta\Phi = 0.78 \times \beta L_0 \varepsilon \quad (4)$$

### D. Geri-yansıyan Elektrik Alan (GYEA)

GYEA optik vurumun elemanlarının fiberdeki saçılım merkezleriyle etkileşimi sonucu ortaya çıkar ve vurumun  $m$  adet konumsal elemanından geri-yansıyan elektrik alanların süperpozisyonu olarak modellenir.

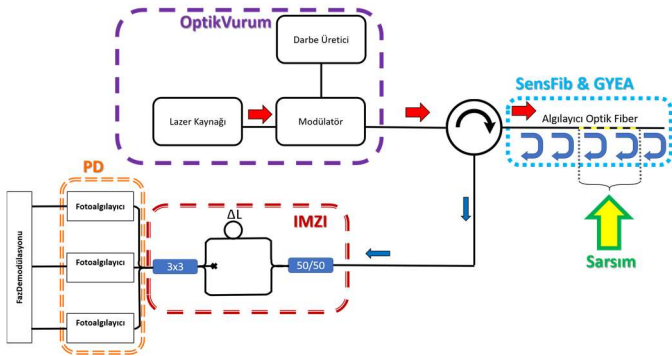
Fiberin  $p$  pozisyonundaki GYEA,  $q$  spektral bileşeni için (5)'teki gibi gösterilebilir [6]:

$$\sum_{u=1}^m R_{q(p+u)} \angle \delta_{q(p+u)} = a_{qp} \angle \phi_{qp} \quad (5)$$

Burada  $R$  ve  $\delta$  geri yansıran girişime uğrayan her bir sinyalin genliği ve fazını,  $a$  ve  $\phi$  girişim sonucu oluşan GYEA'nın genliği ve fazını ifade etmektedir.

### E. IMZI

$\Phi$ -OTDR yönteminde uygulanan titreşim, elektrik alanda titreşim büyüklüğüyle orantılı bir faz kayması yaratır. Fakat elektrik alandaki bu faz değişiminin direk olarak ölçülmesi mümkün değildir. Faz ölçümünün ilk aşaması olarak, 2x2 koplörün çıkışları, aralarında  $\Delta L$  kadar uzunluk farkı olan iki kola ayrılır. İki elektrik alanlardan birinin fazına koplörden gelen 90 derecelik faz kayması eklenirken diğeri  $\Delta L$  yolu



Şekil 1. Modeli oluşturulan  $\Phi$ -OTDR sensör sistemi; sağa bakan kalın oklar algılayıcı fibere gönderilen optik vurumu, ince oklar fiberden geri yansıyan sinyalleri, yukarı bakan büyük ok ise fiberdeki kesiklik gösterilen bölge boyunca uygulanan sarsımı ifade etmektedir.

kadar geciktirilir. Bu iki sinyal arasındaki faz farkının ölçülmesi durumunda sensör fiberdeki sarsıma maruz kalan ve kalmayan iki elektrik alan sinyalinin arasındaki -titreşimden kaynaklanan- faz farkı tespit edilebilecektir.

Mach-Zehnder interferometresinin iki kolundan gelen elektrik alanlar,  $A\angle\alpha$  ve  $B\angle\beta$ , simetrik 3x3 koplör sayesinde  $120^\circ$ 'şer derecelik faz kaymasına maruz kaldıktan sonra girişime uğrar. Bu şemada simetrik 3x3 koplör kullanılması sinyal sönümlenmesini azaltır [9].

#### F. Foto-algılayıcılar ve Faz Demodülasyonu

3x3'lük koplörün her bir çıkışındaki  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  sinyallerinin (bakınız Şekil 2), aralarında  $\Delta L$  kadar gecikme oluşturulan GYEA bileşenleriyle bağlantısı sabitler ihmal edilirse (6), (7) ve (8)'deki gibi ifade edilebilir.

$$C_1^2 \cong \frac{1}{3} [ 2 \cdot A \cdot B \cdot \cos(\alpha - \beta - 120^\circ) ] \quad (6)$$

$$C_2^2 \cong \frac{1}{3} [ 2 \cdot A \cdot B \cdot \cos(\alpha - \beta) ] \quad (7)$$

$$C_3^2 \cong \frac{1}{3} [ 2 \cdot A \cdot B \cdot \cos(\alpha - \beta + 120^\circ) ] \quad (8)$$

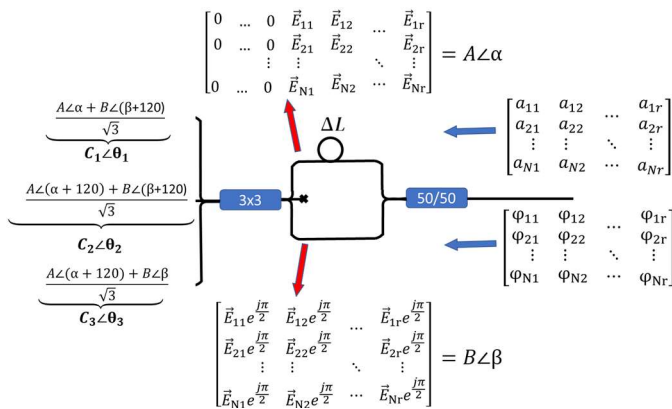
$$I_1 = M + K \cdot \cos(\alpha - \beta - 120^\circ) \quad (9)$$

$$I_2 = M + K \cdot \cos(\alpha - \beta) \quad (10)$$

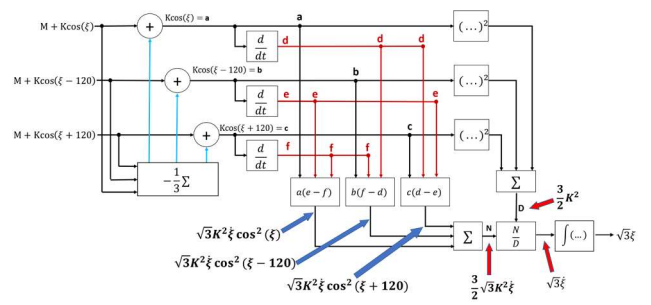
$$I_3 = M + K \cdot \cos(\alpha - \beta + 120^\circ) \quad (11)$$

Bu denklemlerde aynı zamanda, foto-algılayıcılarda ölçülen güçlerin, GYEA bileşenlerinin fazları ( $\alpha$  ve  $\beta$ ) ile ilişkisi ifade edilmiştir (sabit terimler için  $M$  ve katsayılar için  $K$  kullanılmıştır).

Eğer fibere yavaş zaman ekseninde değişen bir titreşim uygulanıyorsa, titreşimin uygulandığı bölgelerde  $\alpha - \beta$  fazının titreşimle uyumlu olarak değişmesi beklenir. Bu yüzden  $\alpha - \beta$ , yavaş zaman indisi  $t$ 'nin bir fonksiyonu olarak  $\xi(t)$  ile ifade edilebilir. Foto-algılayıcı çıkışlarından ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ), sarsımın karakterize edilmesi için aranan görece faz  $\xi(t)$ , blok diyagramı Şekil 3'te verilen simetrik faz demodülasyonu işlemi ile bulunabilir [10]. Bulunan faz daha sonra (4)'teki



Şekil 2. IMZI'ya ulaşan elektrik alan bileşenlerinin matris formunda gösterimi, matriste p pozisyonu q spektral bileşeni için GYEA, büyüklüğü  $a_{qp}$ , fazı  $\varphi_{qp}$  olan  $\vec{E}_{qp}$  elemanı ile temsil edilmiştir.



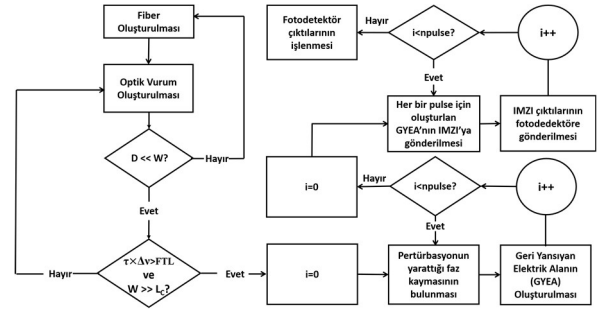
Şekil 3. Faz demodülör şeması

gerinim genliğini elde etmek için  $0.78 \times \beta L_0$  ile normalize edilir [11].

### III. SİMÜLASYON BULGULARI

Geliştirilen simülasyon aracının akış diagramı Şekil 4'te verilmiştir. Akış diagramında belirtilen önemli bir unsur, vurum genişliğinin Fourier dönüşüm limiti ve lazer spektral genişliği ile belirlenen sınırlar arasında seçilmesi gerekliliğidir.

Simülasyonun Tablo 1'deki parametrelere yanıtı Gaussian profilli bir vurum için Şekil 5'te gösterilmiştir. Zaman (yavaş zaman) eksenini ardışık gönderilen her bir vurumdan elde edilen  $\Phi$ -OTDR izlerinin vurum gönderme sıklığına göre arka arkaya konulmasıyla elde edilmiştir. Titreşim genliğinin

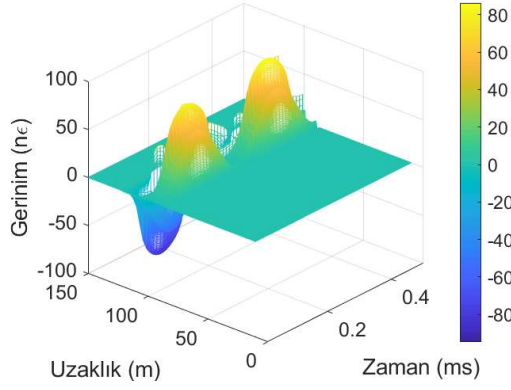


Şekil 4. Akış diagramı; FTL: Fourier Transform Limit,  $L_c$ : Bağdaşım boyu (Coherence Length)  $\tau$ : Vurumun zamansal uzunluğu,  $W$ : Vurumun konumsal uzunluğu,  $\Delta\nu$ : Vurumun spektral genişliği

TABLE I. SİMÜLASYON PARAMETRE DEĞERLERİ

Parametre	Değeri	Birim
$\Delta L$	20	m
Çözünürlük hücresi (Vurum genişliğinin yarısı)	10	m
Bant genişliği (Örnekleme aralığı $\times$ spektral eleman sayısı)	$1 \times 100$	fm
Vurum gönderme sıklığı	100	kHz
Gönderilen vurum sayısı	50	-
D (saçılma bölmesi uzunluğu)	0.05	m
Sarsımın uygulandığı aralık (her noktaya eşit halde)	85-95	m
Sarsımın frekansı	4	kHz
Sarsım genliği (min. ve maks. değerleri)	0-50	nc
Sarsım şekli	Sinüzoidal	-
Vurumun merkezî dalgaboyu	1552.67	nm

Tablo 1. Simülasyon parametreleri



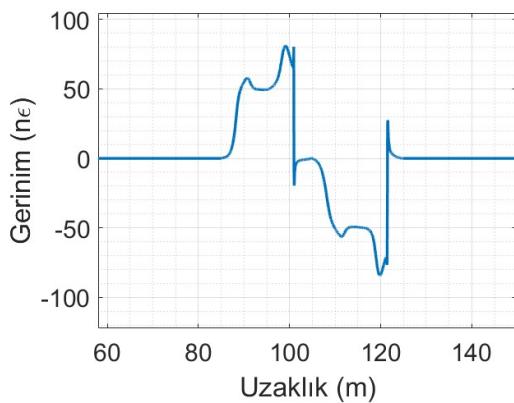
Şekil 5. Gaussian vuruyla sorgulandıktan sonra demodüle edilmiş fazın 3 boyutta gösterimi

maksimum olduğu bir yavaş zaman anından, uzaklık (hızlı zaman) eksenine paralel bir kesit alınarak elde edilen iz, faz sönümlenmesinin incelenmesi amacıyla Şekil 6'da gösterilmiştir. Aynı fiber, parametreleri değiştirilmeden fakat bu sefer karesel bir vuru profili kullanılarak sorgulandığında, önceki gibi bir kesit alınarak elde edilen iz Şekil 7'de gösterilmiştir.

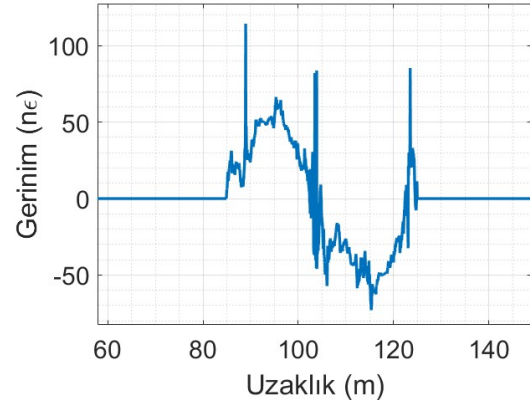
#### IV. TARTIŞMA VE SONUÇ

Kullanılan modelde bağıl faza, IMZI modülünde bir koldan gelen elektrik alanın geciktirilmesiyle ulaşılır. Bu nedenle de gözlemlenmesi beklenen sarsımın yanısıra, geciktirme miktarı ( $\Delta L$ ) kadar ötelenmiş ve ters polariteli halinin de faz demodülasyonu çıktısı olarak gözlemlenmesi beklenir. Şekil 5'teki örnek durum için, 105-125 metreler arasındaki faz değişimi, 85-105 metreler arasında görülen faz değişiminin  $\Delta L=20$  metre kadar ötelenmişinin ters polaritelisidir. Ayrıca 10 metrelik vuruğun ters sarsım bölgesine girişi ve çıkışı, 10 metrelik sarsımın bir polaritesinin 20 metre boyunca gözlemlenmesine sebep olur. Simülasyon çıktılarının bu beklentilere paralel olduğu ve genliklerdeki faz sönümlenmesinden kaynaklanan dalgalanmalara rağmen elde edilen gerininin uygulanan pertürbasyon büyüklüğüne yaklaştığı Şekil 6 ve 7'den görülebilir.

Faz sönümlenmesinin istatistiksel [12] ve deneysel [13] olarak irdelendiği çalışmalar literatürde mevcuttur. Bunlara ilaveten, sönümlenmede rolü olan çeşitli parametrelerin (polarizasyon, saçılım merkezlerinin konum ve



Şekil 6. Gaussian şekle sahip bir vuru ile sorgulanan fiberin yavaş zamanda 0.13 ms'den alınmış bir kesiti



Şekil 7. Karesel şekle sahip bir vuru ile sorgulanan fiberin yavaş zamanda 0.13 ms'den alınmış bir kesiti

büyükliklerinin rastlantısallığı, analog-sayısal çeviricinin alçak-geçiren karakteristiği, ideal olmayan lazer frekansında zamanla kayma vb.) simülasyonlar yardımıyla incelendiği çalışmalar da bulunmaktadır [8,14,15]. Fakat bahsi geçen araştırmalarda sadece karesel profilli optik vuru kullanılmıştır. Bizim çalışmamızda ise tasarladığımız simülasyon ile optik vuru şeklinin de faz sönümlenmesi üzerinde etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Gaussian profilli bir vuru şekli kullanıldığında demodüle edilen fazdaki ani değişimlerin önlenmesi görülmüştür (bakınız Şekil 6).

Bu araştırmada oluşturulan  $\Phi$ -OTDR modeli, güncel pek çok metroloji uygulamasına uyarlanabilir. Bu uygulamalardan başlıcaları: izinsiz girişlerin (intrusion) tespit edilmesi ve yerinin saptanması [16], petrol kuyuları kontrol ve takibi (düşey sismik profil eldesi) [17], tren ve demiryolları takibi [18, 19] olarak listelenebilir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma 1919B011800699 başvuru numarasıyla TÜBİTAK BİDEB 2209-A Programı tarafından desteklenmiştir.

#### KAYNAKÇA

- [1] X. Liu, B. Jin, Q. Bai, Y. Wang, D. Wang ve Y. Wang, "Distributed fiber-optic sensors for vibration detection," *Sensors*, Vol.(16), p. 1164, 2016.
- [2] A. Masoudi ve T. P. Newson, "Contributed review: Distributed optical fibre dynamic strain sensing," *Review of Scientific Instruments*, Vol.(87), p.011501, 2016.
- [3] A. H. Hartog, "Chapter 1: Introduction," *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors* içinde kitap bölümü, ISBN:13: 978-1-4822-5957-5, CRC Press, p.15-p.16, 2018
- [4] C. Wang, Y. Shang, W-A.Zhao, X-H. Liu ve G-D. Peng "Distributed acoustic sensor using broadband weak FBG array for large temperature tolerance" *IEEE Sensors Journal*, Vol.(18), p. 2796-2800, 2018.
- [5] Q. Liu, X. Fan ve Z. He "Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6-m spatial resolution over entire 110-km range," *Optics Express*, Vol.(23), pp. 25989-25993, 2015.
- [6] A. Masoudi ve T. P. Newson, "Analysis of distributed optical fibre acoustic sensors through numerical modelling," *Optics Express*, vol.(25) pp. 32021-32040, 2017.
- [7] L. B. Liokumovich, N.A.Ushakov, O. I. Kotov, M.A. Bisyarın ve A. H. Hartog, "Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: signal model under static fiber conditions," *Journal of Lightwave Technology*, vol.(33), pp. 3660-3671, 2015.
- [8] M. Brown, "Simulation of coherent phase optical time-domain reflectometry," Master of Science, Department of Electrical and

Computer Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, 22844, 2017.

- [9] S. K. Sheem, T. G. Giallorenzi, ve K. Koo, "Optical techniques to solve the signal fading problem in fiber interferometers," *Applied Optics* Vol(21), p.689–p.693 1982.
- [10] C. B. Cameron, R. M. Keolian ve S. L. Garrett, , "A symmetric analogue demodulator for optical fiber interferometric sensors," *Proceedings of the 34th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 14-17 May 1992*, Monterey, CA, ABD, 1992.
- [11] A. Masoudi ve T.P. Newson, "High spatial resolution distributed optical fiber dynamic strain sensor with enhanced frequency and strain resolution," Vol. (42), p.290-p.293,2017.
- [12] A.K. Wojcik, "Signal statistics of phase dependent optical time domain reflectometry", Texas A&M University, 2006.
- [13] F.Uyar, T. Kartaloglu, I. Ozdur ve E. Ozbay, "Field test and fading measurement of a distributed acoustic sensor system over a 50 km-long fiber" *Proc. SPIE 10654, Fiber Optic Sensors and Applications XV, 106540D, 14 Mayıs 2018* Orlando/ABD, 2018.
- [14] X. He, M. Zhang, S. Xie, L. Gu, F. Liu, Z. Chen ve Q. Tao, "Identification and observation of the phase fading effect in phase-sensitive OTDR", *OSA Continuum*, Vol.(1), p.963-p.970, 2018.
- [15] M. Aktas, H. Maral ve T. Akgun, "Analysis of optical fading in phase-OTDR distributed acoustic sensing systems: the effects of fading in threat detection" *Proc. SPIE 10787, Environmental Effects on Light Propagation and Adaptive Systems, 107870F, 9 Ekim 2018* Berlin/Almanya, 2018.
- [16] H. F. Taylor ve C. E. Lee, "Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing," ed: Google Patents, 1993.
- [17] K. N. Madsen, M. Thompson, T. Parker ve D. Finfer, "A VSP field trial using distributed acoustic sensing in a producing well in the North Sea," *First Break*, Vol.(31), pp. 51-56, 2013.
- [18] Z. Wang, B. Lu, H. Zheng, Q. Ye, Z. Pan, H. Cai, ve ark., "Novel railway-subgrade vibration monitoring technology using phase-sensitive OTDR," *Optical Fiber Sensors Conference (OFS), 24-28 Nisan 2017*, Jeju/Güney Kore, 2017.
- [19] J. Jason, K. Yuksel ve M. Wuilpart "Laboratory evaluation of a phase-OTDR setup for railway monitoring applications," *IEEE Photonics Society, 22nd Annual Symposium, 27-28 Kasım 2017* Delft/Hollanda, 2017.