


Investigation and Evaluation of a Method for Vibration Event Detection Using an Optical Fiber Sensor Based on Optical Frequency Domain Reflectometry

Mohammad Sadegh Kheiridoust, Gholamreza Baghersalimi * , Reza Hasanzadeh

*Associate Professor, University of Guilan, Rasht, Iran

(Received: 23/06/2024, Revised: 16/10/2024, Accepted: 23/02/2025, Published: 19/04/2025)

DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.1.4.8


ABSTRACT

In recent years, Distributed Fiber Optic Sensors (DFOS) have received attention due to advantages such as immunity to electromagnetic interference and distributed sensing capability. Among these methods, we can mention the sensors based on the Rayleigh scattering effect. DFOS based on the Rayleigh backscattering effect can be used for vibration sensing, which is a promising method for various applications such as perimeter security and monitoring of pipelines. The sensors based on the Rayleigh backscattering effect is classified into two categories: Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) and Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR). The OFDR method, despite its higher complexity, is proposed as an alternative technique to the conventional OTDR in order to improve the spatial resolution without sacrificing the SNR. In this article, a vibration sensing method based on OFDR, i.e., the average of the absolute magnitude of the difference between two signals obtained through optical frequency domain reflectometry with a resolution of 1.2 meters is investigated and evaluated. This method is investigated, evaluated and simulated using MATLAB software tool. According to the results, the proposed OFDR-based method, has been evaluated as a suitable method for detecting vibration events.

Keywords: Vibration Detection, Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR), Distributed Optical Fiber Sensor, Perimeter Security, Optical Fiber

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: bsalimi@guilan.ac.ir



دانشگاه غیرعال

سال شانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، (پیاپی ۶۱): صص ۵۹-۵۳

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۸۰۳۰-۲۹۸۰

علمی - پژوهشی

معرفی و ارزیابی یک روش برای آشکارسازی رویداد لرزشی با استفاده از حسگر فیبر نوری مبتنی بر بازتاب سنجی نوری حوزه فرکانس

محمدصادق خیری دوست لنگرودی^۱، غلامرضا باقرسلیمی^{۲*}، رضا حسن زاده پاک رضائی^۳

DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.1.4.8

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

چکیده

در سال‌های اخیر، روش‌های مبتنی بر حسگر فیبر نوری توزیع‌شده (DFOS) با توجه به مزایایی همچون ایمنی در برابر تداخل امواج الکترومغناطیسی و ایجاد امکان سنجش توزیعی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به حسگرهای مبتنی بر اثر پراکندگی رابلی اشاره کرد. از DFOS مبتنی بر اثر پس‌پراکندگی رابلی می‌توان برای حسگری لرزش که روشی امیدوارکننده برای کاربردهای مختلف، از جمله حفاظت پیرامونی و نظارت بر خطوط لوله است؛ استفاده کرد. حسگر مبتنی بر اثر پس‌پراکندگی رابلی در دو دسته بازتاب‌سنجی نوری حوزه زمان (OTDR) و بازتاب‌سنجی نوری حوزه فرکانس (OFDR) طبقه‌بندی می‌شود. روش OFDR، علیرغم پیچیدگی بالاتر، با توجه به مزایایی که در بهبود وضوح مکانی در کنار SNR مناسب دارد، به عنوان یک جایگزین برای OTDR معمولی مطرح است. در این مقاله، یک روش حسگری لرزش مبتنی بر OFDR یعنی روش میانگین قدرمطلق تفاضل دو سیگنال به روش بازتاب‌سنجی حوزه فرکانس با محدوده وضوح ۱/۲ متری معرفی و ارزیابی شده و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی و بررسی می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از بررسی، روش ارائه‌شده به عنوان روشی مبتنی بر OFDR برای آشکارسازی رویداد لرزشی مناسب ارزیابی شده است.

کلیدواژه‌ها: آشکارسازی لرزش، بازتاب‌سنجی نوری حوزه فرکانس، حسگر فیبر نوری توزیعی، حفاظت پیرامونی، فیبر نوری

^۱ کارشناس ارشد مخابرات سیستم، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۲ دانشیار، دانشگاه گیلان، رشت، ایران (bsalimi@guilan.ac.ir) - نویسنده مسئول

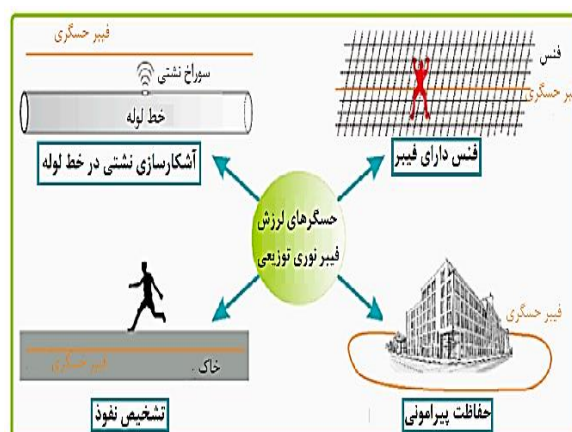
^۳ دانشیار، دانشگاه گیلان، رشت، ایران



۱- مقدمه

در سال‌های اخیر روش‌های مبتنی بر حسگر فیبر نوری با توجه به مزایایی چون امکان بهره‌برداری در شرایط سخت محیطی، ایمنی در برابر تداخل امواج الکترومغناطیسی، انعطاف پذیری، امن بودن، حسگری در محدوده طولانی و مقرون به صرفه بودن، وزن سبک و امکان حسگری توزیعی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷-۱]. یکی از مهم‌ترین کاربردهای حسگرهای فیبر نوری توزیعی^۱ (DFOS)، استفاده از آن‌ها در حفاظت پیرامونی^۲ است؛ که می‌تواند در مواردی مانند مرزها، محیط فرودگاه و خطوط لوله انتقال انرژی کاربرد داشته باشد [۸]. یکی از انواع حسگرهای توزیع شده، حسگر مبتنی بر اثر پراکندگی ریلی است که از این نوع حسگر می‌توان برای حسگری لرزش استفاده کرد [۹]. شکل (۱) کاربردهای حسگر لرزش مبتنی بر حسگر فیبر نوری توزیعی مانند آشکارسازی نشتی در خطوط لوله، حفاظت پیرامونی و نفوذ اشخاص غیر مجاز به ناحیه ممنوعه را نشان می‌دهد [۱۰].

حسگر مبتنی بر اثر ریلی در دو دسته بازتاب‌سنجی نوری حوزه زمان^۳ (OTDR) و بازتاب‌سنجی نوری حوزه فرکانس^۴ (OFDR) طبقه‌بندی می‌شود. در روش OTDR پالس نوری به داخل فیبر فرستاده و نور پراکنده شده به عقب بررسی می‌شود. برای افزایش وضوح مکانی در این روش، پهنای پالس کمتر لازم است و این امر منجر به کاهش نسبت سیگنال به نویز^۵ (SNR) می‌شود. روش OFDR جهت بهبود وضوح مکانی، بدون این که SNR کاهش یابد، به عنوان یک جایگزین برای OTDR معمولی



شکل (۱): کاربردهای حسگر فیبر نوری مبتنی بر لرزش [۱۰].

مطرح شده است [۱۱ و ۱۲].

در [۴] روشی برای آشکارسازی رویداد لرزشی مبتنی بر OFDR معرفی شد که به محدوده حسگری ۱۲ km و وضوح مکانی ۵ m متردست یافت. این روش مبتنی بر مقایسه یک حالت مرجع بدون وجود رویداد لرزشی و حالت اندازه‌گیری با رویداد است. در این روش برای مقایسه این دو حالت، از همبستگی متقابل روی محدوده‌های ۵ متری استفاده شده، سپس نتایج به مقدار حداکثر نرمالیزه و یک مقدار آستانه برابر نصف مقدار حداکثر در نظر گرفته شد. برای تعیین کمی میزان عدم شباهت، تعداد نقاط فراتر از آستانه شمارش شد که این مقدار از نقطه رویداد دچار جهش می‌شود. از آن‌جا که محدوده حسگری روش OFDR به چند ده متر محدود می‌شود [۱۳]؛ در [۴] برای جبران این امر و رسیدن به محدوده حسگری ۱۲ km، از روش نمونه‌برداری فرکانسی استفاده شد. در [۱۴] با تغییر روش جبرانی و استفاده از روش فیلتر Deskw، محدوده حسگری به ۴۰ km افزایش یافت. همچنین روش معرفی شده در [۱۴] به وضوح مکانی ۱۱/۶ m رسید. در دو روش اخیر، از تحلیل میزان شباهت با استفاده از همبستگی متقابل برای یافتن رویداد لرزشی استفاده شد. در [۱۵] از همان روش فیلتر Deskw استفاده شد اما روش یافتن رویداد لرزشی تغییر کرد که منجر به افزایش محدوده حسگری به ۹۲ km شد همچنین این روش وضوح مکانی ۱۳ m دارد. دسته دیگری از روش‌های مبتنی بر OFDR به روش OFDR دیجیتال با درجه (دروازه) زمانی^۶ (TGD-OFDR) معروف هستند [۱۶-۱۸]. در [۱۹] با استفاده از روش TGD-OFDR برای حسگری لرزش، محدوده حسگری ۴۰ km و وضوح مکانی ۳/۵ m شد. همچنین روش OFDR دروازه‌زده شده^۷ (G-OFDR) در [۲۰] معرفی شد که به محدوده اندازه‌گیری حدود ۱۰۱ km و وضوح مکانی ۱/۴ m دست‌یافت. در [۲۱] روشی مبتنی بر OFDR حساس به فاز^۸ (φ -OFDR) ارائه شد که توانایی حسگری رویداد لرزشی تکی یا به‌صورت دو رویداد هم‌زمان و اندازه‌گیری ارتعاش با شکل موج دلخواه را دارد. این روش در محدوده حسگری ۱۰۰ km بررسی شد.

از میان روش‌های معرفی شده؛ دسته‌ای از روش‌ها مبتنی بر دوبار اندازه‌گیری هستند، یک‌بار بدون رویداد لرزشی که سیگنال مرجع نامیده می‌شود و بار دیگر با وجود رویداد لرزشی و مقایسه سیگنال‌های حاصل در حوزه مکان. هرچند در این روش‌ها، نیاز

^۶Time-Gated Digital OFDR (TGD-OFDR).

^۷Gated-OFDR (G-OFDR).

^۸Phase-sensitive OFDR (φ -OFDR)

^۱Distributed Fiber Optic Sensors (DFOS).

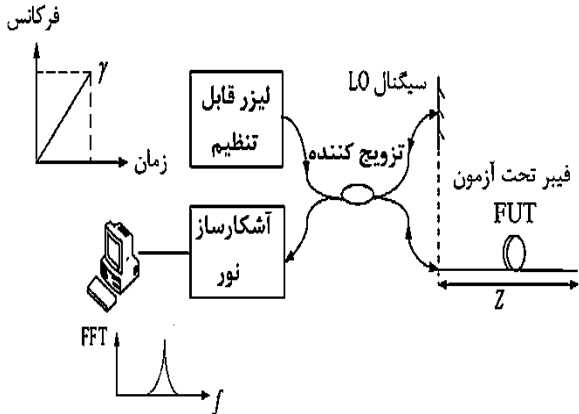
^۲Perimeter security.

^۳Optical Time Domain Reflectometry (OTDR).

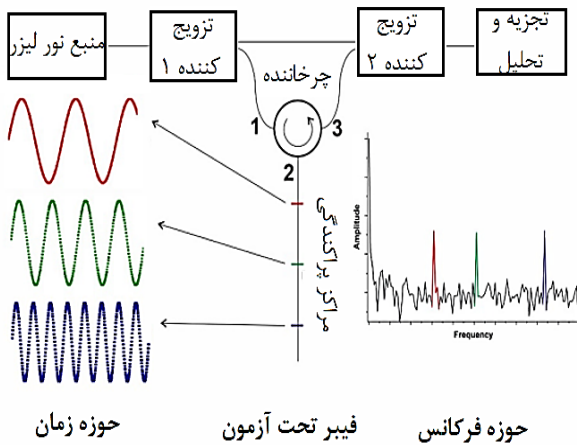
^۴Optical frequency Domain Reflectometry (OFDR).

^۵Signal-to-Noise-Ratio (SNR).

استفاده شدند. در حالت مرجع، سیگنال LO با معادله (۱) بیان



شکل (۲): ساختار پایه‌ای سیستم OFDR [۲۳].



شکل (۳): مشاهده قله به ازای هر مرکز بازتابی در طول فیبر در سیستم OFDR [۲۵].

شده است:

$$E_{LO}(t) = E_0 \exp\{j[2\pi f_0 t + \pi \gamma t^2]\} \quad (1)$$

$E_{LO}(t)$ میدان سیگنال LO است و توان آن نصف توان نوری است که از سمت منبع به تزیج‌کننده می‌رسد. توان سیگنال ارسالی به فیبر بستگی به لیزرهایی دارد که برای این نوع کارها استفاده می‌شود و مقدار ۱۰ mW مقدار معقولی برای توان نوری لیزر است. با مشتق گرفتن از فاز این سیگنال، جاروب فرکانس اولیه، γ سرعت تنظیم فرکانس است. برای سیگنال بازتابی در طول فیبر از معادله (۲) استفاده می‌شود:

$$E_{Sn}(t) = \int_0^L \sqrt{R(l)} E_0 \exp\left\{j\left[2\pi f_0 \left(t - \frac{2nl}{c}\right) + \pi \gamma \left(t - \frac{2nl}{c}\right)^2\right]\right\} dl \quad (2)$$

$E_{Sn}(t)$ تجمیع آثار میدان‌های بازتابی از کل طول FUT در حالت بدون وجود رویداد است. در این رابطه $R(\tau)$ ضریب

به دوبار اندازه‌گیری، زمان پردازش را افزایش می‌دهد [۲۲] اما به دلیل سادگی در این نوشتار مورد توجه هستند. در این نوع از روش‌ها بیان می‌شود که با وقوع رویداد از مکان رویداد، شباهت سیگنال مرجع و اندازه‌گیری با رویداد کاهش می‌یابد؛ به این ترتیب می‌توان با تعیین کمی میزان عدم شباهت^۱ (NSL) و مشاهده جهش در NSL به وقوع و مکان رویداد پی برد [۴ و ۱۴ و ۱۶]. همچنین برخی از روش‌ها به تغییرات فاز تک نقطه داده^۲ ناشی از رویداد توجه می‌کنند اما با افزایش محدوده حسگری، فاز تک نقطه به راحتی از عواملی چون نویز فاز لیزر آسیب می‌بیند؛ از طرفی برخی دیگر از روش‌ها تغییرات در یک محدوده (چندین نقطه) را در نظر می‌گیرند که این روش‌ها مقاومت بهتری در برابر نویز دارند [۱۵].

در مقاله حاضر یک روش آشکارسازی رویداد لرزشی مبتنی بر مقایسه سیگنال‌های مرجع و اندازه‌گیری با رویداد OFDR تعیین NSL در محدوده‌های ۱/۲ متری (چندین نقطه داده) معرفی می‌شود. نتایج حاصله نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به وضوح مکانی بهتری نسبت به چندین روش حسگری لرزش مبتنی بر OFDR دیگر دست می‌یابد و توانایی شناسایی چندین رویداد هم‌زمان را دارا است.

۲- شرایط و ساختار سیستم

پیکربندی یک سیستم OFDR در شکل (۲) نشان داده شده است [۲۳]. در این سیستم، نور یک لیزر با فرکانس متغیر با زمان توسط یک تزیج‌کننده به دو بخش تقسیم می‌شود؛ یک بخش به‌عنوان نوسان‌ساز محلی^۳ (LO) است و بخش دیگر به فیبر تحت آزمون^۴ (FUT) که عنصر حسگری است؛ فرستاده می‌شود. بازتاب نور از FUT (پس‌پراکندگی رایلی، بازتاب فرنل از اتصال‌گرها) جهت آشکارسازی همدوس با نور LO تداخل می‌کند و سیگنال ضربان به‌وجود می‌آید. OFDR همدوس تجزیه و تحلیل سیگنال ضربان را در بر دارد [۱۲ و ۲۴]. در این تجزیه و تحلیل، از ترکیب سیگنال برگشتی از فیبر و LO تبدیل فوریه گرفته که به ازای هر مرکز پراکندگی در طول فیبر یک قله مشاهده می‌شود. این مساله در شکل (۳) نشان داده شده است [۲۵].

روابط مربوط به OFDR در مراجع گوناگون [۴ و ۲۶ و ۲۷] یافت می‌شود. روابطی که در ادامه ذکر می‌شود؛ در این مقاله برای حالت مرجع و حالت اندازه‌گیری با رویداد، در شبیه‌سازی

^۱Non-Similar Level (NSL)

^۲Single data point.

^۳Local Oscillator (LO).

^۴Fiber Under Test (FUT)

جدول (۱): برخی مقادیر مورد استفاده در شبیه‌سازی.

سرعت (شیب) جاروب فرکانس γ	۲ GHz/sec
ضریب شکست (هسته) فیبر n	۱/۵
سرعت نور در خلا c	3×10^8 m/s
کل تغییرات فرکانس در طول جاروب	۲ GHz
تضعیف	۰/۲۱ dB/km

۳- حسگری لرزش با تفاضل و میانگین‌گیری

اساس کار برخی از روش‌ها مبتنی بر دوبار اندازه‌گیری (مرجع و اندازه‌گیری با رویداد) و مقایسه این دو است. سوالی که مطرح می‌شود آن است که از چه طریق می‌توان این دو سیگنال را مقایسه کرد؟ برای پاسخ به این سوال یک روش مقایسه بین سیگنال مرجع و اندازه‌گیری با رویداد به عنوان پاسخ احتمالی در اینجا بررسی می‌شود. توضیح این‌که با به‌وجود آمدن رویداد، عدم شباهت بین دنباله مرجع و اندازه‌گیری با رویداد، افزایش می‌یابد. برای محاسبه این فاصله، در اینجا پیشنهاد می‌شود ابتدا دنباله قدر مطلق تفاضل دنباله دو حالت محاسبه و سپس روی محدوده‌های ۱/۲ متری میانگین گرفته شود. اگر سیستم متحمل یک تغییر ناگهانی ناخواسته شود میانگین‌گیری این امر را تعدیل می‌کند، درحالی‌که تفاضل ساده فاقد این کارایی است.

در شبیه‌سازی، سیگنال‌های حوزه زمان و حوزه تبدیل، به صورت دنباله‌ای از اعداد هستند. اگر ده برابر لگاریتم تبدیل فوریه دنباله مرجع و اندازه‌گیری با رویداد به ترتیب با $R = 10 \log(|FFT(I_r)|)$ و $V = 10 \log(|FFT(I_v)|)$ نمایش داده شوند؛ آنگاه دنباله قدر مطلق تفاضل با معادله (۶) بیان می‌شود.

$$Dif(i) = |R(i) - V(i)|, \quad i =:$$

$$1, 2, 3, \dots, end$$

(۶)

در این رابطه i شمارنده اعضای دو دنباله است؛ $R(1)$ و $V(1)$ نشان دهنده مقدار دو دنباله در مکان $l = 0$ هستند و $R(end)$ و $V(end)$ مقدار دو دنباله در انتهای فیبر یعنی $l = L$ را نشان می‌دهند. همچنین دنباله میانگین قدر مطلق تفاضل روی محدوده‌هایی در طول فیبر، با معادله (۷) توصیف می‌شود:

$$M(j) = \frac{\sum_{i=n-j-(n-1)}^{n-j} Dif(i)}{n}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, end$$

(۷)

بازتاب موثر در زمان تاخیر τ ، n ضریب شکست فیبر و C سرعت نور در خلا است. برای به‌دست آمدن سیگنال مرجع حاصل از آشکارسازی همدوس، از معادله (۳) تبدیل فوریه گرفته می‌شود [۲۸]:

$$I_r(t) = |E_{LO}(t) + E_{Sn}(t)|^2 \quad (۳)$$

در حالت اندازه‌گیری با رویداد، برای LO از همان رابطه (۱) و برای سیگنال حاصل از FUT در هر لحظه از معادله (۴) استفاده می‌شود

$$E_{sv}(t) = \int_0^{l_{vib}} \sqrt{R(l)} E_0 \exp \left\{ j \left[2\pi f_0 \left(t - \frac{2nl}{c} \right) + \pi\gamma \left(t - \frac{2nl}{c} \right)^2 \right] \right\} dl + \int_{l_{vib}}^L \sqrt{R(l)} E_0 \exp \left\{ j \left[2\pi f_0 \left(t - \frac{2nl}{c} \right) + \pi\gamma \left(t - \frac{2nl}{c} \right)^2 - \delta \sin(2\pi f_m t) \right] \right\} dl \quad (۴)$$

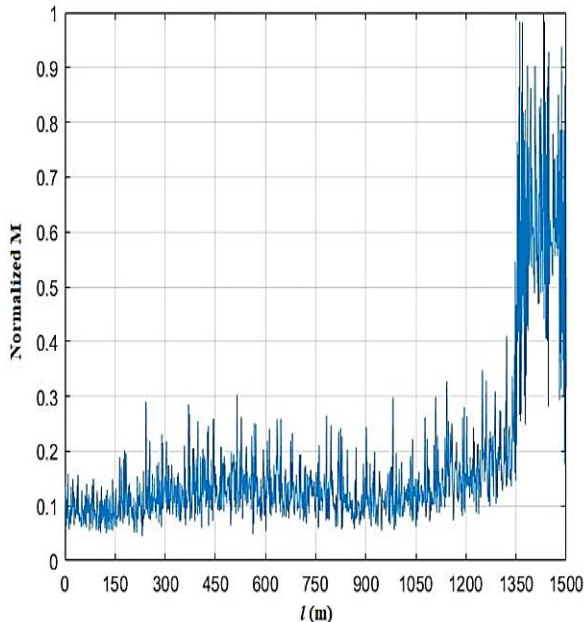
در معادله (۴)، l_{vib} نشان دهنده مکان رویداد لرزشی^۱، δ دامنه مدولاسیون فاز (مربوط به شدت رویداد) و f_m فرکانس رویداد است. در سیگنال برگشتی برای مکانی که رویداد اتفاق می‌افتد و بعد آن، عبارت $-\delta \sin(2\pi f_m t)$ به فاز ناشی از وقوع رویداد اضافه می‌شود. توضیح این‌که نور بازتابی از نقطه رویداد، متأثر از رویداد است. همچنین منشا نور بازتابی از نقاط بعد از رویداد نیز همین نوری است که از رویداد عبور کرده (در نقطه رویداد مانند سایر نقاط بازتابی بخشی از نور عبور کرده و بخشی بازتاب می‌شود) و متأثر از رویداد شده است؛ پس اثر رویداد برای نقاط بعد از رویداد هم لحاظ می‌شود [۴]. معادله (۵) رابطه‌ای است که از آن برای آشکارسازی همدوس در این حالت استفاده شده است:

$$I_v(t) = |E_{LO}(t) + E_{sv}(t)|^2 \quad (۵)$$

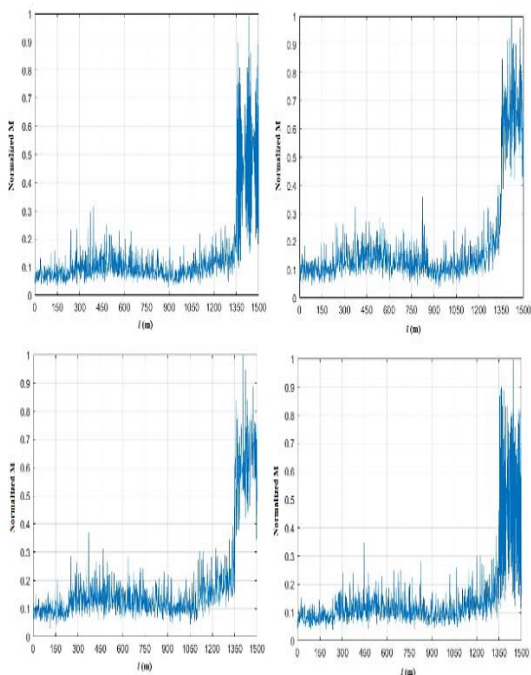
در این کار طول فیبر حدود ۱/۵ km است. ضمناً فرض بر این است که از روش‌های سرکوب نویز فاز استفاده شده و در عین حال طول حسگری جهت اطمینان بیشتر، بسیار کمتر از حد توانایی این نوع از روش‌ها در نظر گرفته شده است. جدول (۱) حاوی مقادیری است که با توجه به آن‌ها شبیه‌سازی انجام شده است.

^۱Vibration event

شکل (۶) بررسی روش ارائه شده برای مقادیر مختلف f_m را نشان می‌دهد. مقادیر δ و l_{vib} در حین تغییر f_m ثابت باقی می‌مانند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این روش در تمام فرکانس‌های مختلف آزمایش شده، قادر به شناسایی رویداد است.



شکل (۵): آشکارسازی رویداد و مکان آن با روش میانگین قدر مطلق تفاضل روی محدوده‌های ۱/۲ متری. در مکان رویداد یک جهش مشاهده می‌شود.



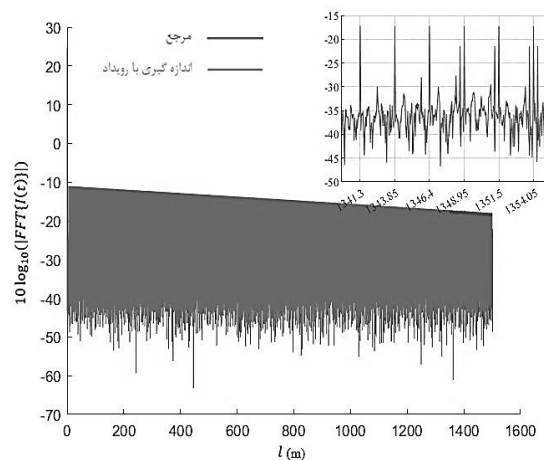
شکل (۶): بررسی کارایی روش ارائه شده در فرکانس‌های مختلف برای فرکانس رویداد برابر الف (۴۰ Hz ب) ۴۷ Hz ج) ۵۲ Hz د) ۶۰ Hz

در این معادله n تعداد نقاط موجود در ناحیه مقایسه است. مثلاً اگر مقدار میانگین در محدوده‌های ۱/۲ متری محاسبه شود (محدوده مقایسه) و فاصله بین داده‌ها در حوزه تبدیل برابر ۵ cm باشد آنگاه $n=25$ می‌شود.

۴- تحلیل نتایج

در شکل (۴) سیگنال مرجع و سیگنال اندازه‌گیری با وجود رویداد حاصل از شبیه‌سازی آورده شده است. برای تولید $I_v(t)$ و $I_r(t)$ از روابط و شرایطی که بیان شده استفاده شده، سپس از آن‌ها FFT گرفته و اندازه آن نمایش داده می‌شود. برای نمایش بهتر از مقادیر روی محور عمودی $10 \log$ گرفته شد. در اندازه‌گیری با رویداد، مکان رویداد در ۱۳۵۱/۵ متری، فرکانس رویداد $f_m = 57$ Hz و دامنه مدولاسیون فاز $\delta = 0.83$ rad در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود؛ بازتاب‌ها از مراکز پراکندگی خود را به صورت قله‌هایی نشان می‌دهند؛ این قله‌ها برای حالت مرجع و اندازه‌گیری با رویداد در نواحی قبل از رویداد برهم منطبقند اما از نقطه رویداد، قله‌های اندازه‌گیری با رویداد پایین‌تر از قله‌های مرجع و دارای قله‌های جانبی هستند.

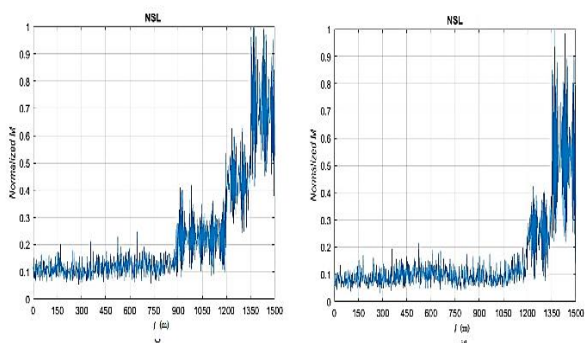
شکل (۵) مقدار میانگین محاسبه شده در محدوده‌های ۱/۲ متری روی قدر مطلق تفاضل مرجع و اندازه‌گیری با رویداد را نشان می‌دهد. در این شکل مقدار نسبت داده شده به هر مکان، نشان دهنده میانگین قدر مطلق تفاضل برای آن نقطه و ۲۴ نقطه بعد از آن است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود؛ مقدار میانگین از مکان رویداد دارای یک جهش می‌شود چرا که در پی وقوع رویداد میزان عدم شباهت بین سیگنال مرجع و اندازه‌گیری با رویداد برای مکان‌های مربوط به بعد از رویداد افزایش می‌یابد. این جهش معیاری برای آشکارسازی رویداد و مکان آن است.



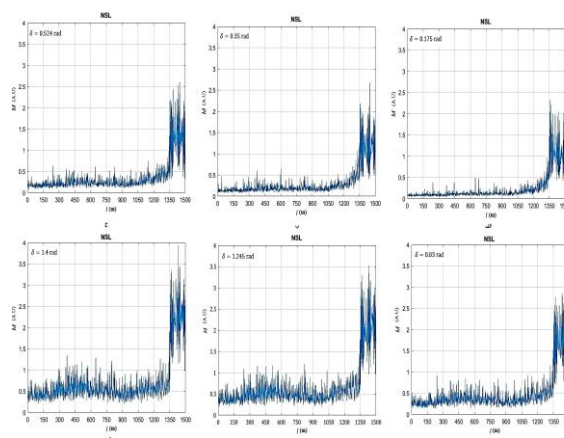
شکل (۴): سیگنال بدون وجود رویداد (پر رنگ) و با وجود رویداد (کم رنگ) بر حسب مکان. در اینجا اندازه تبدیل فوریه $I_r(t)$ و $I_v(t)$ رسم شده است.

نیست اما در مجموع ملاحظه می‌شود که همگی به وضوحی در حد یک تا چند متر دست یافته‌اند. روش معرفی شده در این مقاله، یعنی میانگین‌گیری روی قدرمطلق تفاضل دو حالت بدون و با رویداد در محدوده‌هایی در طول فیبر، نیز روشی ساده اما در عین حال کارآمد و به دور از پیچیدگی برخی از روش‌ها به همان وضوح در حد متر دست می‌یابد.

از آنجا که میانگین‌گیری باید روی بازه‌ای انجام شود این امر منجر به آن خواهد شد که به هر چند متر (در اینجا هر $m/1/2$) فقط یک مقدار نسبت دهیم و در واقع تمام آن ناحیه را یکی ببینیم. هرچقدر که ناحیه را کوچک‌تر کنیم، کار به همان تفاضل ساده نزدیک‌تر خواهد شد که فاقد کارایی لازم است. بنابراین نمی‌توان وضوح را با روش این مقاله تا حد دلخواه کوچک کرد (بهبود بخشید). یکی از مواردی که می‌توان در ارزیابی یک روش به آن توجه کرد؛ توانایی روش برای شناسایی وقوع چند رویداد در مکان‌های مختلف و به صورت هم‌زمان است. توضیح این که وقتی رویداد به وقوع می‌پیوندد؛ قله‌های بازتابی از نقطه رویداد به بعد پایین‌تر از قله‌های مرجع و دارای قله‌های جانبی هستند. وقتی رویداد بعدی رخ می‌دهد قله‌های بازتابی پایین‌تر آمده و تعداد قله‌های کناری حتی نسبت به رویداد اول بیشتر می‌شود، یعنی عدم شباهت بین مرجع و اندازه‌گیری با رویداد مجدداً چشم می‌یابد [۴ و ۱۵]. شکل (۸) نتیجه بررسی روش ارائه شده در این مقاله برای دو و سه رویداد هم‌زمان را نشان می‌دهد. در شکل (۸-الف) مکان رویداد اول در $m/1198/5$ و مکان رویداد دوم در $m/1351/5$ و در شکل (۸-ب) مکان رویداد اول، دوم و سوم به ترتیب در $m/897/6$ ، $m/1198/5$ و $m/1351/5$ در نظر گرفته شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مکان رویداد اول یک چشم وجود دارد یعنی رویداد اول شناسایی می‌شود. همچنین در مکان رویداد دوم و سوم نیز چشم وجود دارد، بنابراین رویدادهای دوم و سوم نیز شناسایی می‌شوند. با توجه به توضیحات، این روش قادر به شناسایی چند رویداد هم‌زمان است.



شکل (۸): بررسی روش ارائه شده در این مقاله برای (الف) دو و (ب) سه رویداد هم‌زمان. این روش قادر به شناسایی چند رویداد هم‌زمان است.



شکل (۷): بررسی کارایی روش ارائه شده در شدت لرزش مختلف برای دامنه مدولاسیون فاز برابر: الف) 0.175 rad (ب) 0.35 rad (ج) 0.524 rad (د) 0.83 rad (ه) 1.245 rad (و) 1.4 rad . همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این روش توانایی تشخیص رویداد در δ های مختلف را دارا است.

برای رسیدن به عمل‌کرد مشابه با لرزش ایجاد شده در اثر وقوع رویداد، بعضاً از مبدل پیزوالکتریک^۱ (PZT) استفاده می‌شود. برای بررسی سیستم در شدت لرزش‌های گوناگون باید ولتاژ PZT را تغییر داد که این کار منجر به تغییر دامنه مدولاسیون فاز δ می‌شود [۴].

شکل (۷) این آزمایش را برای مقادیر مختلف δ نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این روش در مقادیر مختلف δ به درستی عمل می‌کند.

جدول (۲) وضوح مکانی چند روش مختلف برای حسگری لرزش مبتنی بر OFDR را نشان می‌دهد. هرچند شرایطی که هر کدام از این روش‌ها به‌ازای آن حاصل شده‌اند؛ کاملاً یکسان

جدول (۲): روش‌هایی برای حسگری لرزش مبتنی بر OFDR.

شماره	مرجع	روش	وضوح مکانی (رزولوشن)
۱	Ding و همکاران [۴]	روش CCSA + نمونه-برداری فرکانسی	۵ m
۲	Liu و همکاران [۱۴]	روش CCSA + فیلتر Deskew	۱۱/۶ m
۳	Ding و همکاران [۱۵]	روش M-CCSA	۱۳ m
۴	Wang و همکاران [۱۹]	TGD-OFDR	۳/۵ m
۵	Steinberg و همکاران [۲۰]	G-OFDR	۱/۴ m
۶	Zhang و همکاران [۱۸]	φ -OFDR	۱۰ m
۷	کار جاری	میانگین تفاضل در هر محدوده	۱/۲ m

^۱ Piezoelectric transducer.

- [11] T.S.Y. Francis and Y. Shizhuo, *Fiber Optic Sensors*, Marcel Dekker, Inc. 2002.
- [12] J. P. Von der Weid, R. Passy, G. Mussi et al, "On the characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometry," *J. Lightw. Tech.*, vol. 15, no. 7, pp. 1131-1141, 1997.
- [13] Y. Du, T. Liu, Z. Ding et al, "Method for improving spatial resolution and amplitude by optimized deskew filter in long-range OFDR," *IEEE Photonics Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 1-11, 2014. DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2352622.
- [14] T. Liu, Y. Due, Z. Ding et al, "40-km OFDR-based distributed disturbance optical fiber sensor," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 28, no. 7, pp. 771-774, 2016.
- [15] Z. Ding, D. Yang, K. Liu et al, "Long-range OFDR-based distributed vibration optical fiber sensor by multicharacteristics of Rayleigh scattering," *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 5, pp. 1-10, 2017. DOI:10.1109/JPHOT.2017.2752281.
- [16] Q. Liu, X. Fan and Z. He, "Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6-m spatial resolution over entire 110-km range," *Opt. Express*, vol. 23, no. 20, pp. 25988-25995, 2015. DOI:10.1364/OE.23.025988.
- [17] D. Chen, Q. Liu and Z. He, "Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR," *Opt. Express*, vol. 25, no. 7, pp. 8315-8325, 2017. <https://doi.org/10.1364/OE.25.008315>.
- [18] K. Kishida, K. Nishiguchi, C. Li, et al, "Development of real-time Time Gated Digital (TGD) OFDR method and its performance verification," *Sens.*, vol. 21, no. 14, p. 4865, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21144865>.
- [19] S. Wang, X. Fan, Q. Liu et al, "Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from time-gated digital OFDR," *Opt. Express*, vol. 23, no. 26, pp. 33301-33309, 2015. DOI:10.1364/OE.23.033301.
- [20] I. Steinberg, L. Shiloh, H. Gabai et al, "Over 100km long ultra-sensitive dynamic sensing via Gated-OFDR," *In24th International Conference on Optical Fibre Sensors (SPIE)*, vol. 9634, pp. 121-124, 2015.
- [21] Z. Zhang, X. Fan and Z. He, "Long-range and wide-band vibration sensing by using phase-sensitive OFDR to interrogate a weak reflector array," *Opt. Express*, vol. 28, no. 12, pp. 18387-18396, 2020. <https://doi.org/10.1364/OE.390592>.
- [22] D. Arbel and A. Eyal, "Dynamic optical frequency domain reflectometry," *Opt. express*, vol. 22, no. 8, pp. 8823-8830, 2014. DOI:10.1364/OE.22.008823.
- [23] Z. Ding, C. Wang, K. Liu et al, "Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: A review," *Sens.*, vol. 18, no. 4, p. 1072, 2018.
- [24] M. Wegmuller, J. P. Von der Weid, P. Oberson et al, "High resolution fiber distributed measurements with coherent OFDR," *in Proc. ECOC'00*, vol. 11, no. 4, p. 109, 2000.
- [25] N. R. Poddubrovskii, I. A. Lobach and S. I. Kablukov, "Signal Processing in Optical Frequency Domain Reflectometry Systems Based on Self-Sweeping Fiber Laser with Continuous-Wave Intensity Dynamics," *Algorithms*, vol. 16, no. 5, p. 260, 2023. <https://doi.org/10.3390/a16050260>.
- [26] Z. Ding, X. S. Yao, T. Liu et al, "Compensation of laser frequency tuning nonlinearity of a long range OFDR using deskew filter," *Opt. express*, vol. 21, no. 3, pp. 3826-3834, 2013.
- [27] U. Glombitza and E. Brinkmeyer, "Coherent Frequency-Domain reflectometry for characterization of Single-Mode integrated-optical Waveguides," *J. Lightw. Tech.*, vol. 11, no. 8, pp. 1377-1384, 1993.
- [28] A. V. Faustov, A. Gusarov, L. B. Liokumovich et al, "Comparison of simulated and experimental results for distributed radiation-induced absorption measurement using OFDR reflectometry," *Proc. of SPIE* vol. 8794, pp. 583-588, 2013. DOI: 10.1117/12.2026786.

۵- نتیجه گیری

اساس روش مطرح شده در این نوشتار مبتنی بر دو بار اندازه‌گیری برای دو وضعیت با و بدون وجود رویداد است. در این گونه از روش‌ها، میزان عدم شباهت دو سیگنال در طول فیبر محاسبه و جایی که این مقدار به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد؛ به عنوان نقطه رویداد شناسایی می‌شود. در این نوشتار روش میانگین‌گیری از اعضای دنباله قدرمطلق تفاضل دو حالت روی محدوده‌های ۱/۲ متری برای محاسبه میزان عدم شباهت، بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده جهش در مقدار میانگین محاسبه شده ناشی از یک یا چند رویداد، ملاحظه شد که روش ارائه شده به عنوان یک روش مبتنی بر OFDR برای آشکارسازی رویداد لرزشی مناسب ارزیابی می‌شود.

۶- مراجع

- [1] M. Nikles, "Long-distance fiber optic sensing solutions for pipeline leakage, intrusion, and ground movement detection," *Proc. SPIE*, vol. 7316, pp. 731602-731613, 2009. DOI: 10.1117/12.818021.
- [2] Q. Wang, L. Han, X. Fan et al, "Distributed fiber optic vibration sensor based on polarization fading model for gas pipeline leakage testing experiment," *J. Low Freq. Noise, Vib. Act. Control*, vol. 37, no. 3, pp. 468-476, 2017. DOI: 10.1177/1461348417725949.
- [3] S. C. Huang, W. Lin, M. Tsai et al, "Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks," *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 135, no. 2, pp. 570-579, 2007.
- [4] Z. Ding, X. S. Yao, T. Liu et al, "Long-range vibration sensor based on correlation analysis of optical frequency-domain reflectometry signals," *Opt. Express*, vol. 20, no. 27, pp. 28319-28329, 2012.
- [5] A. Malakzadeh, R. Pashaei and M. MansourSamaei, "Phase-Sensitive Distributed Fiber Optic Sensor in Passive Defense Measures," *Passive Defense Quarterly*, vol. 9, no. 4, pp. 93-103, 2019. (In Persian).
- [6] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, R. Pashaei et al, "Fiber Bragg grating sensor as the most effective distributed optical fiber sensor in defense applications of civil structures," *Passive Defense Quarterly*, vol. 10, no. 3, pp. 15-24, 2019. (In Persian).
- [7] P. Hosseinnia and A. Madanchi, "Investigation and Evaluation of Peripheral Intrusion Detection Systems Based on Fiber Optic Sensors & Their Application in Border Areas," *Passive Defense Quarterly*, vol. 13, no. 4, pp. 55-66, 2023. (In Persian).
- [8] D. Anderson, "Optical fiber sensors for perimeter and IT protection," *Application Notes FSI TP 02, Fiber SenSys*, 2012.
- [9] A. Bianchini, A. Guzzini, M. Pellegrini et al, "Natural gas distribution system: Overview of leak detection Systems," *Proc. XXI Summer School 'Francesco Turco'—Industrial Systems Eng.*, Naples, Italy, PP. 13-15, 2016.
- [10] X. Liu, B. Jin, Q. Bai et al, "Distributed fiber-optic sensors for vibration detection," *Sens.*, vol. 16, no. 8, p. 1164, 2016. DOI:10.3390/s16081164.