

# نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال سیزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، (پیاپی ۵۲): صص ۶۶-۵۵

علمی-پژوهشی

## معرفی و ارزیابی سامانه‌های حفاظت پیرامونی مبتنی بر حسگرهای فیبر نوری و کاربرد آن‌ها در مناطق مرزی

پویا حسین‌نیا<sup>۱\*</sup>، احمد معدنچی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰

### چکیده

روش‌های مختلف حفاظت از محیط اطراف مناطق مهم، همواره به شیوه‌های مختلفی از گذشته تا امروز انجام شده است. با گسترش فناوری‌های نوین در زمینه‌های گوناگون ارتباطی و حسگرهای جدید، لازم است تا در حفاظت از مناطق استراتژیک و مهم، از جمله مرزها نیز از این فناوری‌های جدید استفاده شود تا به‌طور هم‌زمان بتوان مناطق مهم را مورد پایش و بررسی حفاظتی قرار داد. یکی از این فناوری‌ها، سامانه‌های حفاظت پیرامونی مبتنی بر حسگرهای فیبر نوری هستند که با دقت بالا و عملکرد مناسب، قادر به پوشش محوطه پیرامونی وسیعی هستند. در پژوهش‌های انجام‌شده قبلی، ساختارها و تعاریف کلی این سامانه‌ها معرفی شده‌اند و یا به ازای یک ساختار خاص، شبیه‌سازی یا پیاده‌سازی یک نمونه آزمایشگاهی نشان داده شده‌اند. اما در این پژوهش تلاش شده است تا این سامانه‌ها و اصول عملکردشان و مزایا و ملاحظات عملی آن‌ها معرفی و بررسی شوند تا در صورت لازم در مناطق مهم از آن‌ها استفاده گردد. سپس با بررسی و مقادیر واقعی عددی برای فیبرهای نوری رایج مقدار حساسیت آن‌ها به تغییرات دمایی و فشار و کشش محاسبه شده است. در ادامه نیز در یک شبیه‌سازی در MATLAB نحوه محاسبه مکان رخداد اختلال در این سامانه‌ها به ازای ده نمونه به‌صورت تصادفی، نشان داده شده است که به ازای پارامترهای در نظر گرفته شده خطای تخمین تأخیر  $0/000003$  به دست آمد. همچنین نشان داده شد به ازای افزایش مقدار توان منبع ورودی خطای تخمین کاهش خواهد یافت.

**کلیدواژه‌ها:** سامانه‌های حفاظت پیرامونی، سامانه پایش جامع مرزها، حسگر فیبر نوری، حسگرهای OTDR

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مخابرات سیستم، دانشگاه گیلان، رشت، ایران نویسنده مسئول (p.hosseinia@yahoo.com)

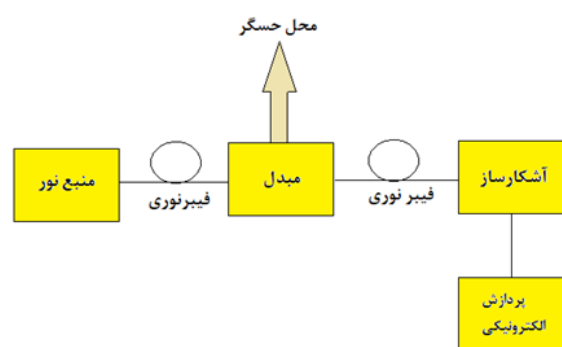
۲- کارشناس ارشد دانشگاه مالک اشتر، تهران، ایران.

## ۱- مقدمه

پیشنهادهایی، کاربردهای این سامانه‌ها در موقعیت‌های مختلف معرفی خواهند شد.

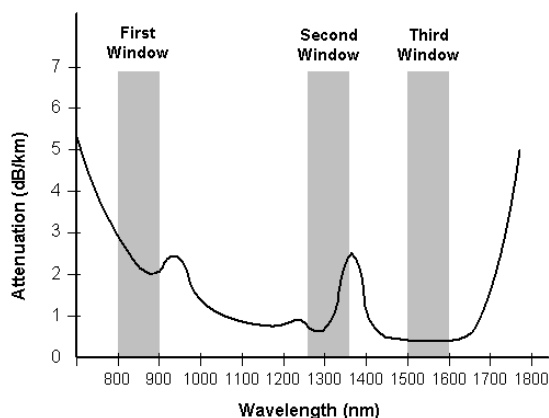
## ۲- اصول عملکرد

در این سامانه‌ها، از یک منبع نور لیزری، یک یا چند کابل فیبر نوری، گیرنده و بخش پردازشگر الکترونیکی استفاده می‌گردد. نمودار بلوکی کلی از اجزای یک سامانه حسگری مبتنی بر فیبر نوری در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است. لازم به ذکر است که در این نوع از حسگرها، مبدل حسگر، خود فیبر نوری خواهد بود.



شکل (۱): نمودار بلوکی کلی از اجزای یک سامانه حسگری مبتنی بر فیبر نوری

منبع نوری مورد استفاده، لیزرهای باکیفیت با کمترین میزان نویز شدت نسبی<sup>۱</sup> و در انتشار نور در طول موج  $1/55\mu\text{m}$ ، به دلیل کمینه بودن میزان تلفات توان موج نوری در این طول موج، خواهد بود. در شکل (۲)، نمودار تلفات توان نوری فیبر تک مود، برحسب طول موج، نشان داده شده است. از شکل مذکور مشخص می‌شود که کمترین میزان تلفات و کمترین شیب تغییرات تلفات برحسب طول موج، در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  رخ خواهد داد [۱].



شکل (۲): نمودار میزان تلفات بر کیلومتر فیبر نوری تک مود، برحسب طول موج [۱]

امروزه با گسترش فناوری در زمینه‌های مختلف و در نتیجه در زمینه فناوری‌های نفوذ به مراکز مهم، نیاز به افزایش حفاظت و سامانه‌های حفاظتی نیز گسترش یافته است. یکی از مهم‌ترین موارد در زمینه حفاظت و پایش، مرزهای یک کشور هستند. تاکنون در این زمینه روش‌های مختلفی برای حفاظت پیاده‌سازی شده و پیشرفت‌های زیادی در این زمینه رخ داده است. اما روش‌های قدیمی دیگر امروز کاربرد نداشته و نمی‌توان از نیروی انسانی برای پوشش تمام مرزهای یک کشور بزرگ استفاده کرد. روش‌هایی که تا به امروز رایج بوده است شامل استفاده از نیروهای انسانی، بالن‌ها و سامانه‌های پهبادی و دوربین‌های پیشرفته هستند. اما هیچ‌یک از این روش‌ها به خوبی قادر به پوشش توزیع شده یک محوطه مرزی نبوده و در برخی موارد نیز این سامانه‌ها برخط نبوده و قادر به اطلاع‌رسانی به موقع مراکز حفاظتی نیستند.

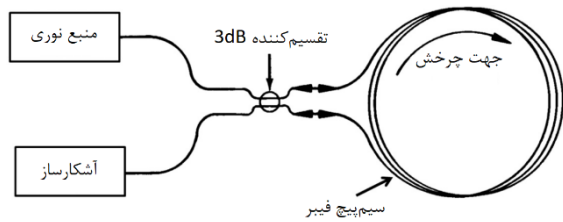
یکی از روش‌های کاربردی که قادر به ارتباط برخط و اطلاع‌رسانی و پایش زمان واقعی است، استفاده از سامانه‌های حسگرهای فیبر نوری است. فیبر نوری با حساسیت بسیار بالا نسبت به تغییرات و ارتعاشات محیطی قادر به مدوله‌سازی نور عبوری از درون خود بوده و می‌توان از آن برای آشکارسازی ارتعاشات و اختلالات پیش‌آمده در محیط اطراف فیبر استفاده نمود. این فناوری به خصوص در مناطقی که رفت‌وآمد سخت بوده و طول یک منطقه برای پوشش نیز زیاد باشد، کاربرد داشته و با پوشش سرتاسری و توزیع شده می‌تواند جایگزین هزاران حسگر پرهزینه باشد.

علاوه بر این، از مزایای دیگر این سامانه‌ها می‌توان به ایمنی در برابر تداخل الکترومغناطیسی (یعنی امکان اختلال عملکرد آن توسط رقبای و دشمنان بیرونی وجود ندارد)، عدم نیاز به منابع الکتریکی در میدان عملی، ضد انفجار، اندازه کوچک و وزن کم، قابلیت کنترل و دسترسی از راه دور، دقت و اطمینان بالا، انتقال داده‌ای امن و امکان اتصال به سامانه‌های دیگر اشاره کرد.

امروزه سامانه‌ها و دستگاه‌های متنوع و کارآمدی در این زمینه ساخته شده و استفاده می‌شوند که قادر به پوشش چند ده کیلومتری مناطق مختلف با دقت بالا هستند.

در ادامه، ابتدا اصول عملکرد این سامانه‌ها توضیح داده شده، سپس به بررسی مثال‌های عددی برای اثبات میزان حساسیت فیبرهای نوری به تغییرات دمایی و کرنشی و فشاری و بررسی یک شبیه‌سازی برای نحوه محاسبه مکان این سامانه‌ها پرداخته خواهد شد. در پایان نیز با بررسی چالش‌ها و ارائه‌ی

<sup>1</sup> Relative Intensity Noise

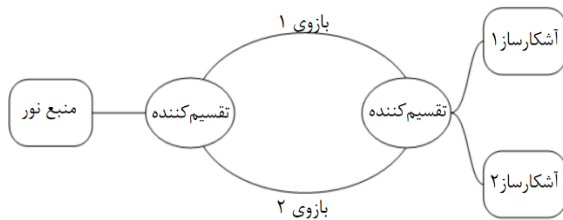


شکل (۶): ساختار اصلی تداخل‌سنج ساینک [۳]

به‌طور کلی روش آشکارسازی فاز به این شکل است که، زاویه فاز فیبر برای موج نوری جاری درون فیبر نوری به شکل زیر است:

$$\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda} = \frac{2\pi n_1 L}{\lambda_0} \quad (۱)$$

که در آن  $\lambda$  طول موج نور درون فیبر نوری،  $L$  طول فیبر نوری و  $n$  ضریب شکست درون‌هسته فیبر نوری است. با توجه به سادگی روش ماخ-زندر برای اثبات نحوه عملکرد این حسگرها، روابط اصلی مربوط به این پیکربندی برای توضیح نحوه آشکارسازی فاز در این سامانه‌ها ارائه خواهند شد. با فرض ساختار تداخل‌سنج ماخ-زندر همانند شکل (۳)، می‌توان این ساختار را به شکل واضح‌تری نیز ترسیم کرد که در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷): ساختار کلی تداخل‌سنج ماخ-زندر [۱۶]

میدان‌های نوری در هر خروجی تداخل‌سنج ماخ-زندر که از دو بازو سرچشمه می‌گیرد، بازوی ۱ و بازوی ۲ نامیده شده و برابر است با:

$$E_1 = \frac{E_0}{2} \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (۲)$$

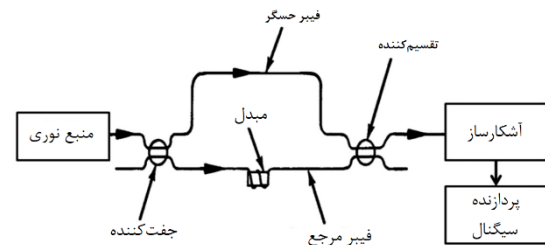
$$E_2 = \frac{E_0}{2} \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (۳)$$

که در آن  $E_0$  و  $\omega$  به ترتیب میدان نوری و فرکانس زاویه‌ای نور ورودی هستند. همچنین  $\varphi_1$  و  $\varphi_2$  به ترتیب تأخیر فاز نور جاری در بازوهای ۱ و ۲ بوده و در نتیجه شدت خروجی تداخل‌سنج ماخ-زندر را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

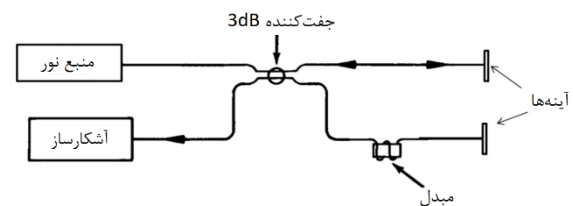
حسگرهای فیبر نوری از ویژگی‌های مختلفی برای اندازه‌گیری پارامتر موردسنجش استفاده می‌کنند. از جمله این ویژگی‌ها، می‌توان به‌شدت، طول موج، فرکانس، قطبش، پراکندگی و فاز اشاره کرد که از این بین بالاترین دقت متعلق به حسگرهای مبتنی بر مدولاسیون فاز و پراکندگی هستند که در این مقاله به معرفی و بررسی حسگرهای مبتنی بر مدولاسیون فاز پرداخته خواهد شد. روش کار این حسگرها به این شکل است که ابتدا از منبع نوری، نوری یکسان به فیبر(های) نوری اعمال شده، سپس پس از عبور از کل محوطه در فیبر نوری، در گیرنده تغییر فاز نور اولیه اعمالی بررسی شده و از روی تغییرات رخ داده در فاز نور دریافتی، تأخیر و در نتیجه مکان اختلال رخ داده کشف می‌شود. این نوع حسگرها، موسوم به تداخل‌سنج نیز هستند [۲ و ۳].

پیکربندی‌های مختلفی برای این سامانه‌ها وجود دارد که از آن جمله می‌توان به پیکربندی ماخ-زندر، مایکلسون، فابری پرو و ساینک اشاره نمود. ساختار کلی این پیکربندی‌ها در شکل‌های (۳)، (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده است.

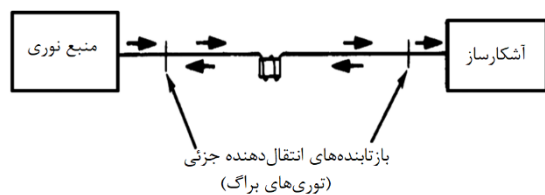
از بین پیکربندی‌های نامبرده شده، بالاترین دقت و پرهزینه‌ترین روش متعلق به فابری-پرو بوده و ساده‌ترین راه پیاده‌سازی نیز متعلق به روش ماخ-زندر است [۳].



شکل (۳): ساختار اصلی تداخل‌سنج ماخ-زندر [۳]



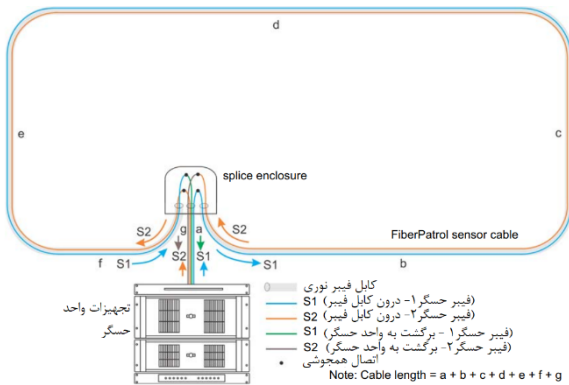
شکل (۴): ساختار اصلی تداخل‌سنج مایکلسون [۳]



شکل (۵): ساختار اصلی تداخل‌سنج فابری-پرو [۳]

### ۳- سامانه تشخیص نفوذ محیطی با استفاده از تداخل سنج ماخ-زندر (MZIPIDS)

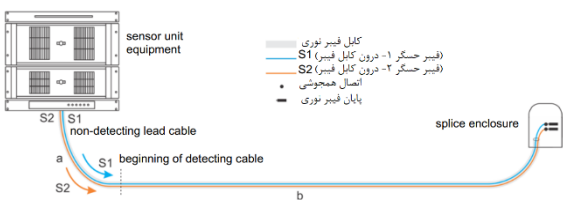
به‌طور کلی برای پیاده‌سازی این سامانه‌ها، چند نوع پیکربندی وجود دارد که شامل پیکربندی حلقه‌ای، پیکربندی تقسیم‌شده و پیکربندی خطی است. این سه پیکربندی در شکل (۹) به تصویر کشیده شده‌اند.



الف. ساختار پیکربندی حلقه‌ای [۵]



ب. ساختار پیکربندی تقسیم‌شده [۵]



پ. ساختار پیکربندی خطی [۵]

شکل (۹): معرفی و نمایش انواع ساختارهای پیکربندی‌های سامانه‌های تشخیص نفوذ محیطی

در پیکربندی حلقه‌ای، دو حسگر در جهت مخالف در کابل فیبر نوری مدنظر اجرا می‌شوند. در پیکربندی تقسیم‌شده، دو حسگر در جهت مخالف در دو کابل فیبر نوری مجزا اجرا می‌شوند. در پیکربندی خطی، هر دو حسگر در یک جهت در کابل فیبر نوری قرار داده می‌شوند.

پیکربندی حلقه، باعث ایمنی در برابر یک برش تک کابلی را فراهم می‌کند که به‌موجب آن در صورت ایجاد یک برش در کابل

$$I = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2 \langle E_1 E_2 \rangle \quad (۴)$$

که در آن علامت  $\langle \rangle$  نشان‌دهنده متوسط زمانی در طول دوره زمانی خیلی بزرگ‌تر از  $\frac{2\pi}{\omega}$  خواهد بود. بنابراین شدت‌های خروجی آشکارسازی شده توسط دو آشکارساز (PD) به ترتیب شدت آشکارساز ۱ و شدت آشکارساز ۲ نامیده شده و به شکل زیر نشان داده می‌شوند:

$$I_1 = I_0 \cos^2\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) = \frac{I_0}{2} (1 + \cos \Delta\varphi) \quad (۵)$$

$$I_2 = I_0 \sin^2\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) = \frac{I_0}{2} (1 - \cos \Delta\varphi) \quad (۶)$$

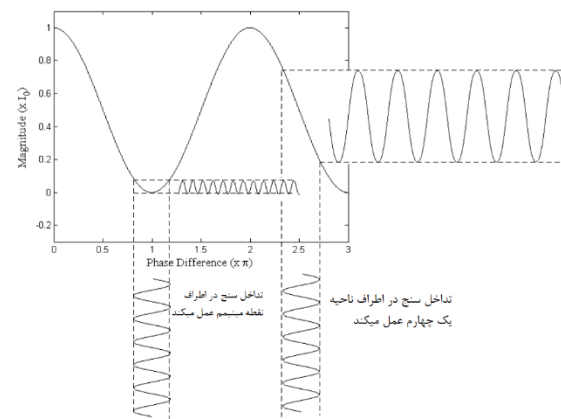
که در این رابطه  $I_0$  شدت نور ورودی، و  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  اختلاف فاز بین دو بازو هستند. اگر یکی از دو بازو دچار اختلالات خارجی شوند، فاز نوری نور، توسط میدان محیطی مدوله و آشکار می‌شود. فرض کنیم اختلاف فاز بین دو بازو به‌صورت یک سیگنال دامنه  $\varphi_s$  و فرکانس زاویه‌ای  $\omega$  و یک تغییر فاز با تغییرات آرام  $\varphi_d$  باشد؛ یعنی:

$$\Delta\varphi = \varphi_d + \varphi_s \sin \omega t \quad (۷)$$

در این صورت با جایگذاری معادله (۷) در معادله (۵) خواهیم داشت:

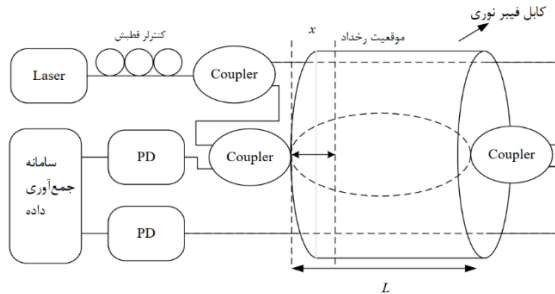
$$I_1 = \frac{I_0}{2} (1 + \cos(\varphi_d + \varphi_s \sin \omega t)) \quad (۸)$$

با توجه به معادله (۸) بسته به مقدار  $\varphi_d$  و  $\varphi_s$ ، مسئله‌ی محوشدگی سیگنال نیز ممکن است رخ دهد که در شکل (۸) نشان داده شده است [۱۶].



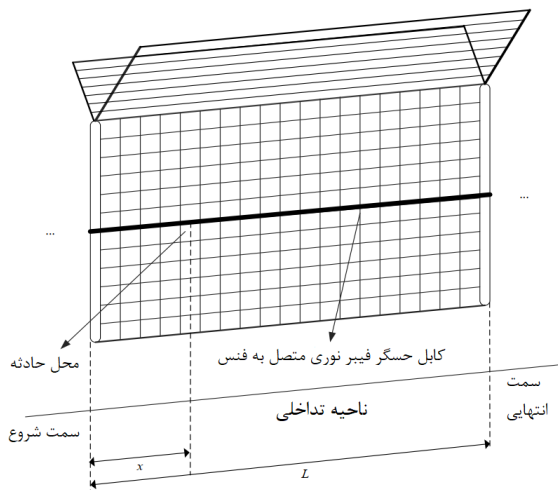
شکل (۸): بررسی پدیده محوشدگی در تداخل سنج [۱۶]

نوری ناحیه تداخلی را که روی فنس نصب می‌شود، نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): روش استفاده از یک کابل فیبر نوری در پیاده‌سازی

سامانه‌های تشخیص نفوذ محیطی مبتنی بر تداخل سنج ماخ-زندر [۱۶]



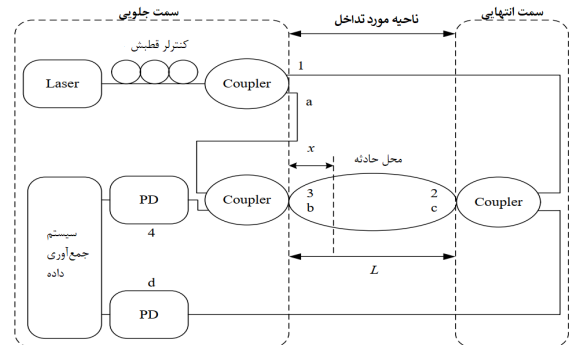
شکل (۱۲): پیاده‌سازی سامانه تشخیص نفوذ محیطی مبتنی بر تداخل سنج ماخ-زندر روی فنس [۱۶]

متجاوزهایی که تلاش کنند از روی فنس (یا دیوار یا زمین) در موقعیت رخ داده عبور کنند، باعث ایجاد سیگنال‌های مشخصی در خروجی به خاطر ارتعاش فنس می‌شوند. سپس این سیگنال توسط سامانه مدنظر آشکار می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۱۱) قابل‌مشاهده است، فرض کنیم که طول ناحیه تداخلی برابر  $L$  باشد. در این صورت، طول بین نقطه ۳ (یا نقطه  $b$  که شروع ناحیه تحت پوشش است) و موقعیت حادثه، برابر  $x$  است. در نتیجه سیگنال‌های تداخلی در مسیرهای موافق و مخالف عقربه‌های ساعت به دو آشکارساز، به ترتیب با طول‌های  $x$  و  $2L-x$  حرکت می‌کنند. بنابراین  $D$ ، تأخیر زمانی دلخواه بین دو سیگنال تداخلی را به‌صورت زیر می‌توان به دست آورد:

$$D = \frac{2L-x}{c/n} = \frac{x}{c/n} \quad (9)$$

حسگر، بازم امکان تشخیص در تمام طول محیط ادامه می‌یابد. در پیکربندی تقسیم‌شده، دو حسگر به‌طور مستقل کار کرده و تا دو برابر طول خطی محیط حفاظتی را در مقایسه با پیکربندی حلقه پوشش می‌دهند. با این حال، یک برش در کابل، باعث ناتوانی در تشخیص مکان از بعد از نقطه برش می‌شود. در پیکربندی خطی، دو حسگر در یک جهت در کابل حسگر کار کرده و برای تشخیص آلام‌های پشت سرهم به کار می‌روند. در این پیکربندی نیز تشخیص اختلال در نقاط بعد از برش کابل امکان‌پذیر نیست [۵].

در این بخش نحوه آشکارسازی در پیکربندی حلقه توضیح داده می‌شود. شکل (۱۰) را به‌عنوان نمودار شماتیک سامانه‌های تشخیص نفوذ محیطی با استفاده از تداخل سنج ماخ-زندر در نظر بگیرید. نور خروجی لیزر، کنترل قطبش شده، به‌طور مساوی توسط یک جفت کننده<sup>۱</sup> تقسیم‌شده و وارد تداخل سنج ماخ-زندر دوگانه (DMZI) می‌شود. سپس دو پرتو نور در جهت‌های مخالف منتشرشده و به ترتیب در جفت‌کننده انتهایی با هم تداخل می‌یابند.

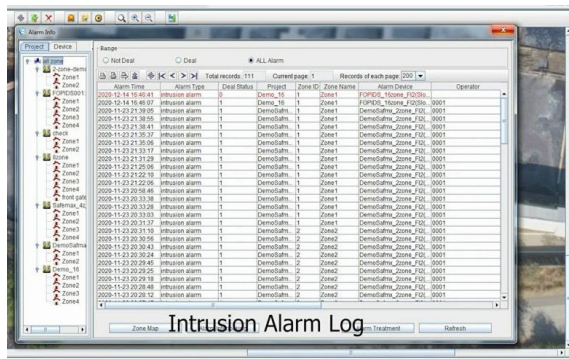


شکل (۱۰): نمودار شماتیک از سامانه‌های تشخیص نفوذ محیطی با استفاده از تداخل سنج ماخ-زندر دوگانه [۱۶]

همان‌طور که از شکل (۱۰) پیداست، یک پرتو نور، مسیر  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$  که در جهت عقربه‌های ساعت است، را طی کرده و پرتوی دیگر نور، مسیر  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$  که در خلاف جهت عقربه‌های ساعت است را می‌پیماید. درنهایت این دو سیگنال تداخلی توسط دو آشکارساز نوری، آشکارشده، نمونه‌برداری و توسط سیستم تحلیل داده (DAS) پردازش می‌شوند [16].

شکل (۱۱) کابل فیبر نوری را که حاوی ۴ فیبر نوری است، نشان می‌دهد که در پیاده‌سازی سامانه‌های موردنظر استفاده می‌شود. دوتا از چهار فیبر این کابل، به‌عنوان بازوهای حسگری ماخ-زندر استفاده می‌شود. همچنین تصویر شکل (۱۲) کابل فیبر

<sup>۱</sup> Coupler



شکل (۱۴): نمایش داده‌های دریافتی و اختلالات بر اساس تاریخ در نرم‌افزارهای سامانه‌های حفاظت پیرامونی [۷]

## ۵- ملاحظات عملی

در پیاده‌سازی سامانه‌های تشخیص نفوذ محیطی، ملاحظات زیر باید رعایت شوند تا این سامانه‌ها قابلیت پایداری و ماندگاری بالایی داشته باشند. در این بخش برخی از این ملاحظات بیان می‌شوند.

همان‌طور که در بخش قبلی هم اشاره شد، برای بالا بردن دقت و نمایش بهتر در نرم‌افزار، تمام طول یک محیط بزرگ را به چند منطقه<sup>۱</sup> تقسیم کرده و برای هر منطقه به‌صورت جدا محاسبات صورت گرفته و در زمان وقوع رخداد نیز سرعت محاسبات و اطلاع‌رسانی افزایش خواهد یافت.

طول فیبر نوری مدنظر در از طول محیط مدنظر باید بیشتر باشد؛ چون فاصله نوری بافاصله طولی کابل فیبر نوری مقداری اختلاف دارند. در برخی منابع توصیه شده است که طول فیبر باید ۱/۱۵ طول محیط باشند.

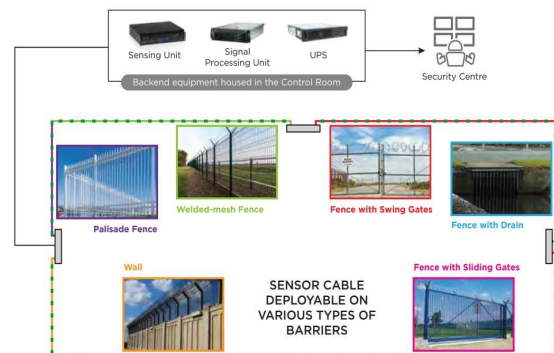
همان‌طور که قبلاً نیز عنوان شد، فیبر نوری در این سامانه‌ها هم می‌توانند روی فنس، هم زیرزمین و یا روی دیوار نصب شوند. در صورت نصب روی فنس، فیبر نوری باید در قسمت داخلی دیواره فنس قرار گیرد.

برای عبور فیبر از دروازه‌ها، اگر دروازه کشویی باشد، باید برای آن از یک حسگر دیگر در کنار این سامانه استفاده شود، اما اگر دروازه از نوع چرخشی باشد، قبل از رسیدن به دروازه ابتدا آن‌ها با گره‌های مهاربندی مناسب روی فنس محکم کرده و سپس از زیرزمین عبور داده و بعد از دروازه مجدداً به روی فنس بر خواهد گشت که در شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، این موضوع نشان داده شده است.

در این معادله،  $c$  سرعت نور در خلأ و  $n$  ضریب شکسته هسته فیبر نوری هستند. بنابراین موقعیت حادثه  $x$  را می‌توان با محاسبه تأخیر زمانی تخمین زده‌شده  $\bar{D}$  که بسیار به  $D$  نیز نزدیک است، محاسبه نموده و بنابراین موقعیت مزاحمان را تعیین نمود [۱۶].

## ۴- اجزاء سامانه

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده‌شده است، در پیاده‌سازی این سامانه‌ها، عموماً از یک منبع نور لیزری با طول موج مرکزی  $1550\text{nm}$ ، به همراه ماژول‌های کنترل‌گر ابتدایی و انتهایی، فیبر نوری و بخش پردازشی تشکیل شده است. در سامانه‌هایی که از ساختار فابری-پرو استفاده می‌شود، از فیبرهای نوری ویژه مخصوص به این کار استفاده خواهد شد، اما در دیگر ساختارها از فیبرهای نوری مخابراتی معمول تک مود استفاده می‌گردد. ساختار کلی این سامانه‌ها در شکل (۱۳) به تصویر کشیده شده است.



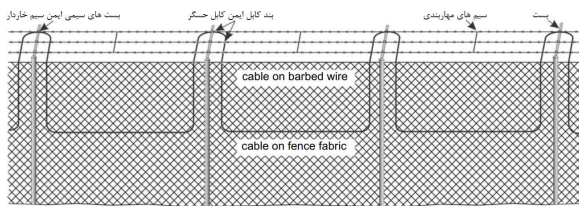
شکل (۱۳): ساختار کلی سامانه‌های حفاظت پیرامونی مبتنی بر حسگر فیبر نوری [۶]

وظیفه ماژول‌های کنترل‌گر ابتدایی و انتهایی، تبدیل و آماده‌سازی و تقسیم سیگنال‌های نوری و الکتریکی به یکدیگر بوده و وظیفه واحد پردازشی در اتاق مرکزی، تحلیل و محاسبه تأخیر و مکان رخداد اختلال در طول محوطه، و نمایش آن برای اتاق کنترل است [۵].

یکی از بخش‌های مهم این سامانه‌ها، نرم‌افزارهای همراه آن‌ها هستند که وظیفه ذخیره و نمایش داده‌های دریافتی از واحد پردازشی را دارد. در این نرم‌افزار، نقشه‌ای از محوطه تحت پوشش بر اساس منطقه تعیین شده در مرحله نصب، تهیه شده و مکان رخداد بر اساس محاسبات روی این نقشه نمایش داده می‌شوند. نمونه‌ای از این نرم‌افزار در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

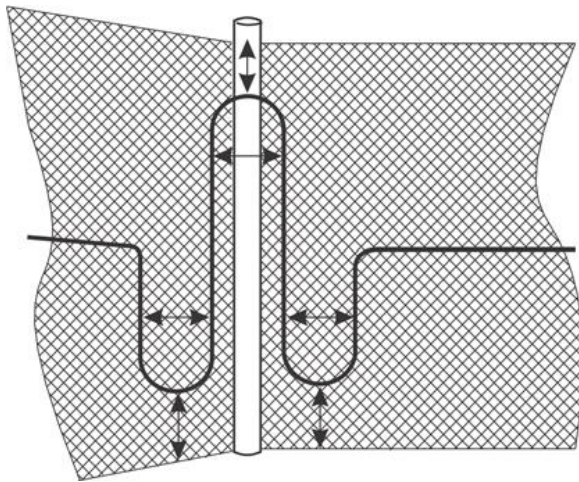
<sup>۱</sup> Zone

شکل (۱۹) نیز این موضوع نشان داده شده است.

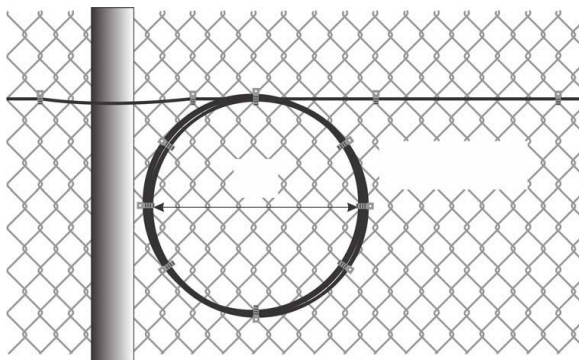


شکل (۱۹): ملاحظات ضروری استفاده از سیم خاردار [۵]

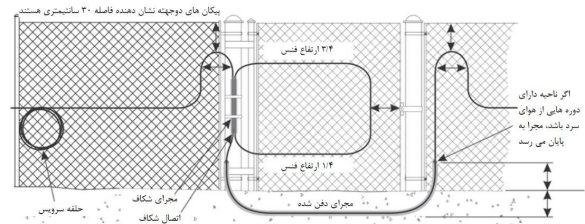
همچنین از دیگر ملاحظات عملی که باید در زمان نصب رعایت شوند، وجود حلقه‌های حساسیت در مناطق کنج و مناطقی که دارای تنش بیشتری هستند، حلقه‌های سرویس در هر ۳۰m برای وجود کابل حسگر اضافه برای تعمیرات آینده و اتصالات همجوشی هستند. این موارد در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) به تصویر کشیده شده‌اند. ذکر این نکته ضروری است که بهترین حالت نصب با کمترین میزان اتصالات کابل فیبر نوری سنجیده می‌شود. هرچه این اتصالات کمتر باشند، قابلیت اطمینان سامانه بالاتر خواهد بود [۳۵].



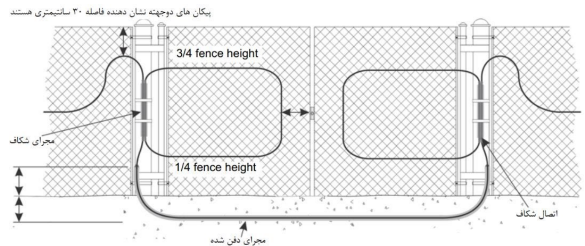
شکل (۲۰). نمونه‌ای از نحوه پیاده‌سازی حلقه حساسیت در کنج [۵]



شکل (۲۱): نمونه‌ای از حلقه سرویس [۵]



شکل (۱۵): عبور فیبر از دروازه در دیواره فنس [۵]



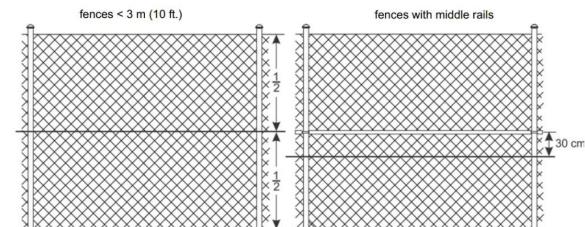
شکل (۱۶): عبور فیبر نوری از مقابل دروازه در محیط پیرامون [۵]

در صورت عبور فیبر از روی دیوار، آن‌ها روی لبه داخلی یا لبه بیرونی بالای دیوار قرار می‌دهند که در شکل (۱۷) نشان داده شده است.



شکل (۱۷): نحوه قرارگیری فیبر نوری روی دیوار [۵]

سامانه‌های تشخیص نفوذ مبتنی بر فیبر نوری به طول معمول سطح خوبی از تشخیص را برای فنس‌های تا ارتفاع ۳m با یک گذر کابل فراهم می‌کند. کابل تکی عبوری در نصف ارتفاع فنس نصب می‌شود؛ مگر اینکه فنس دارای ریل میانی باشد. برای فنس های دارای ریل میانی، کابل حسگر باید ۳۰cm زیر ریل میانی نصب شود. این موارد در شکل (۱۸) نیز مشخص شده‌اند.



شکل (۱۸): نحوه نصب کابل فیبر نوری روی ارتفاع مشخص روی فنس [۵]

همچنین در صورت وجود سیم‌خاردار روی فنس، باید کابل به‌خوبی روی این سیم نیز عبور داده شده و محکم شود که در

با در نظر گرفتن مقادیر  $p_{11}=0.126$ ,  $p_{12}=0.274$ ,  $n=1.444$  و  $\mu=0.1698$  برای فیبرهای سیلیکا می‌توان تغییر فاز در واحد کرنش در واحد طول فیبر را به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{\Delta\varphi}{\varepsilon L} \cong 4.6 \times 10^6 \text{ rad/m}$$

بنابراین می‌توان گفت، تغییر طول در فیبر نوری، نقش اصلی را در سنجش کرنش ایفا می‌کند.

#### ۶-۱-۲- حساسیت فشار

بازهم از معادله (۱۲) عبارت اول را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$k \cdot n \cdot dL = -\frac{knL}{E}(1-2\mu)\Delta P \quad (15)$$

که در آن  $E$ ، ضریب یانگ برای فیبر نوری سیلیکا پوشش داده شده، و  $\Delta P$  تغییر فشار آکوستیک (صوتی) است. همچنین عبارت دوم معادله (۱۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$k \cdot L \cdot dn = -\frac{kn^3L}{2E}(1-2\mu)(\rho_{11}+2\rho_{12})\Delta P \quad (16)$$

بنابراین معادله (۱۲) را به طور کلی به شکل زیر بر اساس تغییر فشار می‌نویسیم [۱۵]:

$$\frac{\Delta\varphi}{L\Delta P} = \frac{kn(1-2\mu)}{E} \left[ \frac{n^2}{2}(\rho_{11}+2\rho_{12})-1 \right] \quad (17)$$

با استفاده از مقادیر گفته شده برای فیبر نوری سیلیکا و ضریب یانگ برای این فیبر که برابر  $E = 72.37 \text{ Gpa}$  است، فرم پاسخگویی نرمالیزه فاز صوتی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\Delta\varphi}{L\Delta P} \approx -4.6744 \times 10^{-5} \text{ rad/(Pa.m)}$$

که در طول فیبر بالا و تغییر فشار زیاد، این تغییر فاز نمایان می‌شود. به عنوان مثال، در محصولات این حوزه، تشخیص فشار و لرزش ناشی از حرکت یک ماشین سنگین از فاصله حدود  $50 \text{ m}$  نیز اثر خود را روی فیبر نشان خواهد داد، درحالی‌که برای ماشین‌های سواری، این فاصله به حدود  $20 \text{ m}$  و برای قدم زدن یک انسان، این فاصله به مقدار حدود  $5 \text{ m}$  می‌رسد.

#### ۶-۱-۳- حساسیت دمایی

هر تغییر در دمای فیبر به اندازه  $dT$ ، باعث تأخیر فاز نور می‌شود. به دلیل گسترش دمایی، تغییر در طول فیزیکی فیبر نوری هم به وجود می‌آید. تغییرات دمایی همچنین، منجر به اختلاف ضریب شکست نیز می‌گردد. در نتیجه تغییر در فاز نوری ناشی از اغتشاشات دمایی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

#### ۶- بررسی عددی و شبیه‌سازی

در این بخش برای اثبات میزان حساسیت فاز فیبر نوری به تغییرات دمایی و ارتعاشی و کرنشی، حساسیت فیبرهای نوری رایج را به ازای مقادیر پارامترهای رایج آن محاسبه کرده و سپس یک سامانه تشخیص نفوذ محیطی با تمام نویزهای خود را به صورت ریاضی مدل کرده و به تخمین زمان تأخیر و خطای تخمین پرداخته خواهد شد.

#### ۶-۱-۱- بررسی حساسیت

رابطه فاز نور جاری در فیبر نوری در معادله (۱) معرفی شد. اگر از این رابطه دیفرانسیل بگیریم، می‌توان اغتشاشی کوچک در تأخیر فاز نوری را به شکل زیر نوشت:

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = \frac{dk}{k} + \frac{dn}{n} + \frac{dL}{L} \quad (10)$$

با توجه به ثابت بودن عدد موج  $(\frac{2\pi}{\lambda})$  می‌توان این رابطه را به شکل زیر نوشت:

$$d\varphi = k \cdot (n \cdot dL + L \cdot dn) \quad (11)$$

که در این رابطه  $ndL$  متناظر با تغییرات در طول فیزیکی و  $Ldn$  متناظر با تغییرات در ضریب شکست هسته فیبر نوری است.

#### ۶-۱-۱-۱- حساسیت کرنش<sup>۱</sup>

$$d\varphi = k \cdot n \cdot dL + d \cdot L \cdot dn \quad (12)$$

عبارت اول در معادله (۱۲) بیانگر تغییر طول فیبر نوری در اثر کرنش به وجود آمده بوده و عبارت دوم نیز بیانگر تغییر ضریب شکست در داخل فیبر نوری در اثر کرنش است. می‌توان  $dn$  را به شکل زیر نوشت [۱۵]:

$$\begin{aligned} dn &= -\frac{n^3}{2} [-(\rho_{11} + \rho_{12})\varepsilon_d + \rho_{12}\varepsilon] \\ &= -\frac{n^3}{2} [\varepsilon(1-\mu)\rho_{12} - \varepsilon\mu\rho_{11}] \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن،  $p_{11}, p_{12}, \varepsilon, \varepsilon_d, \mu$  به ترتیب از چپ به راست، دو تانسور نوری کرنش، کرنش محوری، کرنش عرضی، و نرخ پواسون ( $\mu = -\frac{d\varepsilon_{trans}}{d\varepsilon_{axial}}$ ) هستند. با توجه به معادله (۱۳)، تغییر فاز نوری ناشی از دو اثر در اغتشاش کرنش برابر است با [۱۵]:

$$\frac{d\varphi}{\varepsilon L} = k \cdot n \cdot \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [(1-\mu)\rho_{12} - \mu\rho_{11}] \right\} \quad (14)$$

<sup>1</sup> Strain



که در آن  $I_0$  شدت خروجی لیزر،  $\alpha$  تلفات نوری،  $n_1$  نویز شدت لیزر،  $f(t)$  اختلاف فاز بین دو بازوی تداخل‌سنج که توسط عامل اغتشاش ایجاد شده،  $n_e(t), n_\alpha(t)$  نویز دید و نویز فاز ایجاد شده توسط تغییر فاز ناشی از قطبش (PIPS<sup>۲</sup>) و محوشدگی ناشی از قطبش (PIF<sup>۳</sup>)،  $n_p(t)$  نویز فاز لیزر و  $n_c(t)$  نویز فاز ایجاد شده توسط اغتشاشات محیطی هستند. لازم به ذکر است که نویزهای فاز  $n_e(t), n_p(t), n_c(t)$  از  $f(t)$  قابل تشخیص نبوده، به طوری که برای به دست آوردن تأخیر زمانی تخمینی  $\bar{D}$  که به  $D$  نزدیک است، این مقادیر باید نزدیک به صفر باشند؛ بنابراین کاهش اثرات این نویزها تنها با رعایت اصول صحیح نصب و کنترل امکان پذیر است.

خروجی‌های شدت در گیرنده باید توسط آشکارسازهای نوری به جریان الکتریکی تبدیل شوند؛ بنابراین مدل تأخیر زمانی ارائه شده برحسب جریان در خروجی آشکارسازهای نوری به شکل زیر درمی‌آید:

$$\begin{aligned} i_1(t) &= kI_1(t) + i_{1c}(t) \\ i_2(t) &= kI_2(t) + i_{2c}(t) \end{aligned} \quad (۲۰)$$

که در آن  $k$  ضریب پاسخدهی آشکارساز نوری و  $i_c(t)$  مجموع نویزهای جریان الکترونیکی است.

با استفاده از تقویت کننده ترانس امپدانس برای تبدیل جریان به ولتاژ، مدل تأخیر زمانی ارائه شده برحسب ولتاژ به شکل زیر درخواهد آمد:

$$\begin{aligned} V_1(t) &= R_f i_1(t) + V_{1c}(t) \\ V_2(t) &= R_f i_2(t) + V_{2c}(t) \end{aligned} \quad (۲۱)$$

که در این معادله  $V_c(t)$  بیانگر مقدار ریشه میانگین مربعات (RMS<sup>۴</sup>) مجموع نویز ولتاژ قطعات الکترونیکی است. در نهایت برای شبیه‌سازی سامانه موردنظر، فرض کنیم که مدل اختلاف فاز بین دو بازوی تداخل‌سنج ناشی از اختلال عامل مزاحم به شکل زیر باشد که در معادله (۲۱) عنوان شد:

$$f(t) = \frac{\pi}{2} + \sin(2\pi \cdot 300t) e^{-t/0.5} \quad (۲۲)$$

پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی مطابق جدول (۱) آورده شده است. با در نظر گرفتن این پارامترها در شبیه‌سازی در Matlab نتایج شبیه‌سازی در جدول (۲) و جدول (۳) به تصویر کشیده شده است.

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dT} &= k \left( n \frac{dL}{dT} + L \frac{dn}{dT} \right) \\ &= knL \left( \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right) \end{aligned} \quad (۱۸)$$

عبارت اول در رابطه (۱۸)، تغییر طول در اثر گسترش دمایی، و عبارت دوم تغییر ضریب شکست در اثر گسترش نوری است. معمولاً در فیبر نوری اثر گسترش دمایی در مقابل تغییر ضریب شکست قابل چشم‌پوشی است. به عنوان مثال، در فیبر سیلیکا داریم:

$$\begin{aligned} \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} &= 5 \times 10^{-7} \\ \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} &= 10^{-5} \end{aligned}$$

بنابراین برای فیبر سیلیکا داریم:

$$\frac{\Delta\varphi}{L\Delta T} \approx 43.46 \text{ rad}/(K \cdot m)$$

در اینجا ذکر این نکته ضروری است که تغییرات دمایی که به‌مرور در محیط اطراف رخ می‌دهد، مانعی برای دقت آشکارسازی در گیرنده نبوده و چون تغییرات دمایی محیط، به‌طور آهسته و پیوسته رخ می‌دهد، در هر دو فیبر این تغییرات لحاظ شده و در میانگین هر دو مقادیر تأثیر می‌گذارند [۴].

## ۲-۶- شبیه‌سازی

برای اثبات نحوه تخمین زمان تأخیر دریافت دو سیگنال نوری در گیرنده، ابتدا نویزهای موجود در سیستم را در نظر گرفته و به‌صورت رابطه ریاضی مدل کرده، در گیرنده، ابتدا از یک آشکارساز نوری برای تبدیل توان نور دریافتی به جریان و سپس از یک مدار ترانس امپدانس برای تبدیل جریان به ولتاژ استفاده کرده و سپس از یک پالایه پایین‌گذر برای حذف نویزها استفاده می‌کنیم. در نهایت برای تشخیص تأخیر زمانی سیگنال‌های دریافتی، از روش همبستگی متقابل (CC<sup>۱</sup>) استفاده خواهیم نمود. فرض کنیم جریان دریافتی در ورودی آشکارساز نوری مطابق رابطه زیر باشد [۱۶]:

$$\begin{aligned} I_1(t) &= I_0 \alpha_1 [1 + n_{1l}(t)] \times \\ &\quad \{1 + n_{1a}(t) \times \cos[f(t) + n_{1e}(t) + n_{1p}(t) + n_{1c}(t)]\} \\ I_2(t) &= I_0 \alpha_2 [1 + n_{2l}(t)] \times \\ &\quad \{1 + n_{2a}(t) \times \cos[f(t - D) + n_{2e}(t) + n_{2p}(t) + n_{2c}(t)]\} \end{aligned} \quad (۱۹)$$

<sup>۲</sup> Polarization Induced Phase Shift

<sup>۳</sup> Polarization Induced Fading

<sup>۴</sup> Root Mean Square

<sup>۱</sup> Cross Correlation

جدول (۱): مقادیر پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی

واحدها	مقدار	پارامتر
$\mu W$	6	$I_0\alpha$ شدت نور دریافتی
A/W	0.9	K پاسخدهی آشکارسازهای نوری
nA	0.6	idark جریان تاریک آشکارسازهای نوری
$K\Omega$	500	Rf مقاومت پس خور تقویت کننده ترانس امیدانس
$fA/\sqrt{Hz}$	10	in چگالی نویز جریان ورودی تقویت کننده
$nV/\sqrt{Hz}$	5.8	en چگالی نویز ولتاژ ورودی تقویت کننده
MHz	90	GBW پهنای باند تقویت کننده
mV	5	Vth مقدار RMS ولتاژ نویز حرارتی
mV	36	Vsn مقدار RMS ولتاژ نویز ساچمه ای
$\mu V$	1.58	Vin مقدار RMS نویز ولتاژ جریان ورودی تقویت کننده
$\mu V$	78	Ven مقدار RMS نویز ولتاژ ورودی تقویت کننده
mV	36.35	Vc مقدار RMS نویز ولتاژ الکترونیکی کل
Km	40	L طول ناحیه تداخلی تحت سنجش
m/s	$3 \times 10^8$	c سرعت نور در خلأ
-	1.444	n ضریب شکست فیبر نوری
$\frac{Sample}{sec}$	$2 \times 10^6$	Fs نرخ نمونه برداری در سامانه جمع آوری داده

در این شبیه سازی، ۱۰ نمونه به صورت تصادفی از محوطه ۴۰ km انتخاب شده در نتیجه به ازای این ده نمونه میزان میانگین خطا و انحراف معیار که از روابط زیر به دست می آیند محاسبه شده اند:

$$\overline{error} = \frac{1}{10} \sum |D - \bar{D}| \quad (23)$$

$$\sigma_{error} = \sqrt{\frac{\sum (error - \overline{error})^2}{10}} \quad (24)$$

جدول (۲): نتایج شبیه سازی تخمین تأخیر و مکان اغتشاش با الگوریتم همبستگی متقابل

خطای مطلق تخمین (s)	زمان تأخیر تخمینی (s)	زمان تأخیر فرضی (s)
۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱۰۷	۰/۰۰۰۱۰۷
۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲۷۸	۰/۰۰۰۳۸۱
۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳۱۴	۰/۰۰۰۳۱۷
۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۲۵	۰/۰۰۰۰۲۸
۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳۰۰	۰/۰۰۰۳۰۳
۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۰۰۷۹
۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳۸۰	۰/۰۰۰۳۸۳
۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۱۴
۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱۰۷	۰/۰۰۰۱۱۰
۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳۴۸	۰/۰۰۰۳۵۱

همچنین برای بررسی تأثیر میزان نرخ قدرت سیگنال به نویز در محاسبه تأخیر فاز، شبیه سازی به ازای مقادیر مختلف سیگنال به نویز انجام گرفت که برنامه شبیه سازی و نتایج آن در جدول (۳) به تصویر کشیده شده اند.

جدول (۳): نتایج تأثیر تغییرات نرخ سیگنال به نویز روی دقت تخمین تأخیر زمانی

انحراف معیار خطا تخمین	میانگین خطای تخمین	SNR(dB)	$I_0\alpha$
۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۷	۴/۸۷	۰/۰۰۰۰۰۱
۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۴	۱۰/۸۸	۰/۰۰۰۰۰۲
.	۰/۰۰۰۰۰۴	۱۴/۴	۰/۰۰۰۰۰۳
.	۰/۰۰۰۰۰۴	۱۶/۹	۰/۰۰۰۰۰۴
.	۰/۰۰۰۰۰۳	۱۸/۸۴	۰/۰۰۰۰۰۵
.	۰/۰۰۰۰۰۳	۲۰/۴۲	۰/۰۰۰۰۰۶

## ۷- ارزیابی اقتصادی

در سامانه های تشخیص نفوذ پیرامونی مبتنی بر حسگرهای فیبر نوری، ارزیابی اقتصادی اهمیت زیادی در انتخاب و کاربردهای مختلف آن ها دارد. در این سامانه ها همان طور که در بخش اجزای این سامانه ها بیان شد، با توجه به اینکه اکثر قطعات و دستگاه های استفاده شده به صورت نوری هستند، این سامانه ها پرهزینه بوده و بیشتر هزینه نیز به ماژول های کنترل گر و نرم افزار مورد استفاده برمی گردد؛ بنابراین استفاده از آن ها در مناطق با

## ۹- مراجع

- [1] G. P. Agrawal, "Fiber-optic communication systems," John Wiley & Sons, vol. 222, 2012.
- [2] Udd. Eric and Spillman Jr. William B. , "Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists," John Wiley & Sons, 2011.
- [3] D. Krohn, T. MacDougall and A. Mendez, "fiber optic sensors: fundamentals and applications," Bellingham, WA: Spie Press, 2014.
- [4] Y. T. Lin, T. L. Jong and C. W. Hsieh, "Simulation of a modified dual Mach-Zehnder interferometric perimeter intrusion detection system," 7<sup>th</sup> International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), 2018.
- [5] Senstar, "Product Guide and Site Planning and Installation," [https://senstar.com/wpcontent/uploads/FP1100\\_Product\\_Guide\\_Site\\_Planning\\_and\\_Installation\\_FPDA0102\\_EN.pdf](https://senstar.com/wpcontent/uploads/FP1100_Product_Guide_Site_Planning_and_Installation_FPDA0102_EN.pdf), 2021.
- [6] Agilfence, "Perimeter Intrusion Detection System," <https://agilfence.com/pids/>, 2021.
- [7] Tvsss Foss, "Perimeter Intrusion Detection System (FO-PIDS)," <https://tvsss-foss.com/perimeter-intrusion-detection-system-fopids/>, 2021.
- [8] S. D. S. Baby, A. Aparna, A. Unnikrishnan, and M. Poornima, "Temperature Sensors Based on FBG and Folded Mach-Zehnder Interferometry," 3<sup>rd</sup> International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2018.
- [9] H. Wu, Q. Ya, Z. Wei, H. Li, and X. Xin, "Intelligent detection and identification in fiber optical perimeter intrusion monitoring system based on the FBG sensor network," Photonic Sensors, vol. 5, no. 4, pp. 365-375, 2015.
- [10] Y. Sun, D. Liu, P. Lu, Q. Sun, W. Yang., S. Wang, L. Liu and W. Ni, "High sensitivity optical fiber strain sensor using twisted multimode fiber based on SMS structure," Optics Communications, vol. 405, 416-420, 2017.
- [11] G. Allwood, G. Wild, and S. Hinckley, "Optical fiber sensors in physical intrusion detection systems: A review," IEEE Sensors Journal, vol. 16.14, pp. 5497-5509, 2016.
- [12] Hsieh. H., Hsu. K.S., T.L. Jong and Wang. L., "Multi-Zone Fiber-Optic Intrusion Detection System With Active Unbalanced Michelson Interferometer Used for Security of Each Defended Zone," IEEE Sensors Journal, vol. 20(3), pp. 1607-1618, 2020.
- [13] M. Fajkus, J. Nedoma, P. Siska, L. Bednarek, S. Zabka, and V. Vasinek, "Perimeter system based on a combination of a Mach-Zehnder interferometer and the bragg gratings," Advances in Electrical and Electronic Engineering, vol. 14.3, pp. 318-324, 2016.

طول محیط کمتر از حدود ۱۰ km، به دلیل هزینه‌های چند صد هزار یورویی مربوط به هر تحلیلگر پردازشی و نرم‌افزار کل سامانه، صرفه اقتصادی نخواهد داشت. در مسافت‌های کوچک، راه بهتر، استفاده از دیگر سامانه‌ها، نظیر فسن الکتریکی است. یکی از مزایای سامانه‌های حفاظت پیرامونی مبتنی بر فیبر نوری، امکان اتصال به دیگر سامانه‌های مخابراتی است و این موضوع امکان یکپارچگی کل سامانه‌های حفاظتی پیرامونی را میسر می‌کند. در طول محیط‌های بیشتر از ۳۰ m استفاده از این سامانه‌ها توصیه می‌شود؛ چون هزینه برای این مسافت‌ها کاهش یافته و با دقت بالا قادر به پوشش تمام محیط خواهد بود.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا اصول عملکرد سامانه‌های حفاظت پیرامونی مبتنی بر حسگرهای فیبر نوری شرح داده شد. سپس به‌طور خاص اصول عملکرد تداخل‌سنج‌های ماخ-زندر معرفی و شیوه آشکارسازی مکان اختلال توضیح داده شد. در ادامه اجزای اصلی این سامانه‌ها و ملاحظات عملی نیز بیان شده و با بررسی مثال‌های عددی از فیبرهای نوری رایج، میزان حساسیت فاز نور جاری در فیبر نوری به تغییرات کرنش، فشار و دما محاسبه شد. در انتها نیز شبیه‌سازی از محاسبات در گیرنده برای تعیین مکان اختلال رخ داده انجام شده و میانگین خطای تخمین تأخیر سیگنال‌های نوری دریافتی به ازای ۱۰ نمونه تصادفی محاسبه شد. در بخش آخر نیز به بررسی ارزیابی اقتصادی این سامانه‌ها پرداخته شد تا میزان صرفه اقتصادی استفاده از آن‌ها مشخص شود. با توجه به تمامی مطالب گفته شده، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سامانه‌های حفاظت پیرامونی حسگرهای مبتنی بر فیبر نوری، در مناطق مهم و حیاتی با طول محیط زیاد بسیار مناسب بوده و با دقت بالا قادر به پوشش و پایش کل محوطه بیرونی خواهد بود. از آنجاکه هزینه‌های این سامانه‌ها زیاد بوده، استفاده از آن‌ها برای مناطق بزرگ توصیه می‌شود. همچنین با ترکیب این سامانه‌ها با دیگر حسگرها و سامانه‌های ارتباطی دیگر، می‌توان سامانه جامعی برای پایش مرزها به‌طور یکپارچه ایجاد و به‌طور هم‌زمان از رخدادهای تمام مناطق مهم باخبر شد. با توجه به اینکه هنوز در ایران در بسیاری از مناطق از روش‌های قدیمی برای حفاظت از مرزها استفاده می‌شود، لازم است برای به‌روزرسانی و استفاده از روش‌های جدید دقت بیشتری شده و موارد گفته‌شده در این پژوهش موردتوجه قرار گیرند.

- conditions,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33.17, pp. 3660-3671, 2015.
- [19] M. Shakeri, and S. Nouri, F. Sohbatzadeh, and A. Hemmati, "Construction of peripheral protection sensor based on Mach-Zander interferometer using twin optical fiber," 9th International Conference on Acoustics and Vibrations, Tehran, 2019. (in Persian)
- [20] S. Asadi, M. Ruhollaminejad, and H. Ruhollaminejad, "Simulation of  $\varphi$ -OTDR-based fiber optic distribution sensor for detection and location of the aggressor," Second International Conference on Physical and Mathematical Sciences, 2015. (in Persian)
- [21] A. Malekzadeh, R. Pashaei and M.M. Samaei, "Phase Sensitive Fiber Optic Distribution Sensor in Passive Defense Measures," *Passive Defense Quarterly*, No. 4, pp. 103-93, 2018. (in Persian)
- [22] Q. Sun, D. Liu, J. Wang, and H. Liu, "Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring MachZehnder interferometer," *Optics Communications*, vol. 281(6), pp. 1538-1544, 2008.
- [14] M. N. Zahid, J. Jiang, and S. Rizvi, "Reflectometric and interferometric fiber optic sensor's principles and applications," *Frontiers of Optoelectronics*, pp. 1-12, 2019.
- [15] Y. T. Lin, T. L. Jong., and C. W. Hsieh, "Simulation of a modified dual Mach-Zehnder interferometric perimeter intrusion detection system," 7<sup>th</sup> International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), 2018.
- [16] T. E. Wu, T.L. Jong, and C. W. Hsieh, "Modeling and Simulation of a Fiber Optic Dual Mach-Zehnder Interferometric Intrusion Detection System," *Journal of Engineering and Science Research*, vol. 1(2), pp. 101-109, 2017.
- [17] D. Zan, A.A.G. Abushagur, and A.A.A. Bakar, "Analysis of independent strain-temperature fiber Bragg grating sensing technique using OptiSystem and OptiGrating," 6th International Conference on Photonics (ICP), 2016.
- [18] M. M. Elgaud, M. S. Liokumovich, B. Leonid , N. A. Ushakov, O.I. Kotov, M.A. Bisyarin, and A.H. Hartog, "Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: Signal model under static fiber

# Investigation and Evaluation of Peripheral Intrusion Detection Systems Based on Fiber Optic Sensors & Their Application in Border Areas

P. Hosseinnia\*, A. Madanchi

## Abstract

Different methods of protecting the environment around important areas have always been done in different ways from the past to today. With the expansion of new technologies in various fields of communication and new sensors, it is necessary to use these new technologies in the protection of strategic and important areas, including borders, so that important areas can be monitored and protected at the same time. One of these technologies is perimeter protection systems based on optical fiber sensors, which are able to cover a wide area with high accuracy and proper performance. In previous researches, the structures and general definitions of these systems have been introduced, or for a specific structure, simulation or implementation of a laboratory sample has been shown. But in this research, an effort has been made to introduce and examine these systems and their principles of operation, their advantages and practical considerations, so that they can be used in important areas if necessary. Then, by checking and actual numerical values for common optical fibers, their sensitivity to temperature changes, pressure and tension has been calculated. In the following, in a simulation in MATLAB, it is shown how to calculate the location of the disruption in these systems for ten random samples, and the delay estimation error of 0.000003 was obtained for the considered parameters. It was also shown that the estimation error will be reduced by increasing the power of the input source.

**Key Words:** *Perimeter Intrusion Detection Systems(PIDS), Mach-Zander Interferometer(MZI), Fiber Optic Sensor, OTDR Systems, Comprehensive Border Monitoring System*

---

\* Master's student of telecommunication system, Damghan University, Damghan, Iran. (p.hosseinnia@yahoo.com) -Writer-in-Charge