صنعت نفت
Oilindustry.ir
CLICK HERE

پیشرفت‌های اخیر در کاربرد شبکه‌های حسگری توزیعی فیبر نوری در صنعت نفت و گاز

اعظم میرزائی[1]، علیرضا بهرامپور[2]
دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
Azam.Mirzaei.fsf@gmail.com

چکیده

این مقاله بصورت خلاصه به معرفی تکنولوژی نشت‌یابی مبتنی بر حسگر فیبرنوری خطوط لوله‌ی سیالات مایع و گاز و پیشرفت‌های اخیر در کاربرد آن می‌پردازد. پیشرفت‌ها در تکنولوژی حسگر و ارتباطات بی‌سیم، چالش‌های جدیدی در این زمینه بوجود آورده‌اند. طی دهه‌های گذشته، استفاده از شبکه‌های حسگر به منظور نظارت بر محیط و جمع‌آوری اطلاعات، افزایش چشم‌گیری داشته است. استفاده از خطوط لوله، متداول‌ترین و ایمن‌ترین روش انتقال نفت و فرآورده‌های نفتی است. ایجاد نشتی و خرابی در خطوط لوله، علاوه بر زیان اقتصادی ناشی از هدر رفت مواد با ارزش، موجب اثرات مخرب زیست محیطی می‌گردد. قیمت روزافزون انرژی، دغدغه‌های زیست‌محیطی و نگرانی از ایمنی خطوط لوله در عبور از مناطق مسکونی، سیستم‌های دیدبانی و نشت‌یابی را جزء لاینفک تأسیسات زیربنایی خطوط انتقال قرار داده است. تشخیص سریع نشتی در خط لوله و همچنین مکان‌یابی دقیق آن، موجب جلوگیری از روی‌دادن حوادث و اتلاف مواد با ارزش نفتی می‌گردد. امروزه سیستم‌های نشت‌یابی بسیار متنوع هر کدام با استفاده از تکنیکی خاص، سعی در شناسایی دقیق و سریع محل نشتی دارند. روش‌های تشخیص سریع نشت، براساس تغییر عواملی مانند دما، فشار و... کار می‌کنند. بازرسی‌های دقیق از سطوح داخلی و خارجی لوله نیز برای تشخیص محل نشت بکار می‌روند. تکنولوژی حسگرهای نوری توزیعی، نسبت به روش‌های دیگر دارای خصوصیات برجسته‌ای در دیدبانی خطوط لوله هستند. توانایی اندازه‌گیری دما و کرنش در هزاران نقطه در طول فیبرنوری در یک سازه‌ی طولانی مثل خطوط لوله، چاه‌های نفت و... مورد توجه است. یکی از مؤثرترین روش‌های نشت‌یابی، سیستم اندازه‌گیری توزیعی دما بوسیله‌ی کابل‌های فیبرنوری می‌باشد. این سیستم با استفاده از کابل‌های فیبرهای نوری با اندازه‌گیری تغییر دما ناشی از نشت مواد محل نشتی را مشخص می‌کند. این مقاله با آوردن دو نمونه از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای خطوط لوله گاز و نفت، به معرفی این روش بعنوان یکی از سیستم‌های موفق نشت‌یابی می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: خطوط لوله‌ی گاز و نفت، سیستم نشت‌یابی، دیدبانی خطوط لوله، اندازه‌گیری توزیعی دما.

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.
۲- استاد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

۱- مقدمه

خطوط انتقال نفت و گاز یکی از مهم‌ترین ارکان سیستم انتقال نفت و فرآورده‌های نفتی به شمار می‌آیند، نگهداری مناسب از آن‌ها، عمر مفید تأسیسات و مدت بهره‌برداری از شبکه را افزایش داده و یا حداقل امکان کارکرد به اندازه‌ی عمر مفید طراحی را بیشتر می‌کند. به طور کلی خطوط انتقال نفت و گاز را می‌توان به دو دسته‌ی کلی تقسیم کرد: (۱) خطوط انتقال نفت و فرآورده‌های نفتی قدیمی، (۲) خطوط انتقال نفت و فرآورده‌های نفتی جدید.

به طور تقریبی دوره‌ی احداث این دو دسته، اختلافی حداقل در حدود ۳۰ تا ۴۰ سال را داشته و تکنولوژی ساخت و اجرای آن‌ها نیز به طور کامل متفاوت می‌باشد. ساخت و اجرای خطوط جدید براساس اصول فنی و با رعایت ضوابط خاص صورت گرفته ولی متاسفانه در اجرای خطوط قدیم به نوعی حساسیت کم‌تر بوده، لذا با اینکه هر دو دسته یک هدف مشترک را داشته‌اند (انتقال فرآورده‌های نفت به نقطه مورد نظر) اما از لحاظ کیفیت متفاوت از هم می‌باشند.

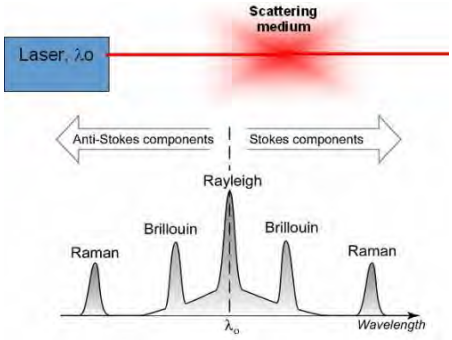
از آن گذشته، خطوط انتقال نفت و گاز اغلب از نواحی‌ای عبور می‌کنند که از نقطه‌نظر قرارگیری در معرض لغزش، نشت زمین و زمین‌لرزه خطرناکند. در ضمن مواردی چون خرابکاری عوامل انسانی (به صورت عمدی یا تصادفی) و انسداد مسیر عبور سیال به واسطه‌ی تشکیل یخ و... نیز می‌توانند بهره‌برداری از خط را مختل نمایند. این خطرات بالقوه به طور مؤثری می‌توانند منجر به آسیب، نشتی و یا شکستگی خط گردند. هزینه‌های جدی اقتصادی و اکولوژیکی از تبعات بعدی از مدار خارج شدن خطوط انتقال هستند. یکی از تحولات جدید در خطوط لوله انتقال فرآورده‌های پتروشیمی، "سیستم نشت‌یاب" می‌باشد که با هدف افزایش سرعت و دقت در شناسایی نشت محصول از خطوط لوله، تأثیر شگرفی بر جلوگیری از اتلاف انرژی، کاهش خسارات زیست‌محیطی و ممانعت از اخلال در سیستم انتقال و توزیع گاز و فرآورده دارد. هنگام بروز حوادث، تشخیص اولیه مهم‌ترین عامل در تعمیر لوله به شمار می‌رود. با توجه به اهمیت تشخیص محل نشت، ضرورت نشت‌یابی و برنامه‌ریزی مربوط، از اصول اولیه تعمیر و نگهداری می‌باشد. هدف اولیه و اصلی یک سیستم نشت‌یاب، تشخیص نشت در حد قابل قبول است و سیستم باید در صورت نشت غیرمجاز، اعلام خطر نماید. نشت‌های خط لوله را می‌توان به دو گروه دسته‌بندی کرد: نشت‌های ناشی از عوامل غیرمعمول (خارجی) مانند زلزله، جنگ، و...؛ و نشت‌های عملیاتی مانند نشت گاز از قطعات مورد استفاده.

در اکثر موارد نشتی، سیستم با مشکلات زیر مواجه می‌شود: (۱) رفع نشت خطرناک، و همراه با ریسک بالای انفجار است، (۲) نشتی‌ها از نظر جانی، سرمایه‌ای و محیطی تهدیدکننده هستند، (۳) رفع نشت باید سریع و مطمئن انجام شود. حفاظت مستمر از خطوط لوله، تأسیسات و تجهیزات تحت فشار و مخازن مواد شیمیایی که در بسیاری از موارد در آن‌ها مواد آلاینده‌ی محیط زیست، مواد آتش‌زا و حتی مواد سمی وجود دارد، از اهمیت به سزایی در صنعت برخوردارند. بدیهی است که وجود نشتی در خطوط لوله، تأسیسات، تجهیزات و مخازن، به ویژه در مواردی که خطرات و محدودیت‌های زیست‌محیطی را به همراه دارند، می‌تواند موجبات هزینه‌های گزاف و صدمات ناخوشایند را فراهم آورد از طرفی هدر رفتن بخشی از مواد ارزشمند که جزء محصولات و یا مواد اولیه‌ی ما هستند، از لحاظ اقتصادی نیز ناخوشایند است. به طور کلی نتایج وجود نشتی عبارتند از: آلودگی محیط زیست، ایجاد مسمومیت در انسان و دیگر موجودات زنده، انفجار، هدر رفتن مواد ارزشمند، هزینه‌های زیست‌محیطی، هزینه‌های تعمیر و تعویض خط لوله، افزایش هزینه‌ها، از دست رفتن فرصت تولید و اتلاف وقت، و جرایم احتمالی قانونی. بنابراین دو عامل اقتصاد و محیط زیست، انگیزه‌ی کافی برای رفع چنین مشکلی در ما ایجاد می‌کنند. عواملی که باعث ایجاد نشتی می‌شوند عبارتند از: فرسودگی و خوردگی لوله‌ها و مخازن، عوامل محیطی مثل سرما، یخبندان، گرما و...، همچنین خسارت‌های عمدی و سهوی و نیز عملیات خارج از محدوده طراحی که ممکن است به لوله‌ها و مخازن آسیب برساند. فرسودگی لوله‌ها و مخازن یک عامل طبیعی است، خوردگی نیز معمولاً به خاطر وجود مواد خورنده یا سیالات ساینده به وجود می‌آید. عوامل محیطی مثل سرما، یخبندان، گرما و... نیز از عوامل طبیعی هستند که در بروز نشتی مؤثرند. خسارت‌های عمدی معمولاً شامل عملیات خرابکارانه است که ممکن است به خاطر مسایل صنفی و ... نیز به وجود آیند. خسارت‌های سهوی نیز ممکن است به وسیله‌ی برخورد اشیاء و یا در اثر حفاری به وجود آیند. عملیات خارج از محدوده طراحی نیز یکی از عوامل آسیب به لوله‌هاست. زیرا هرخط لوله برای محدوده‌ی خاصی از دما و فشار طراحی شده و اگر عملیات بهره‌برداری در خارج از

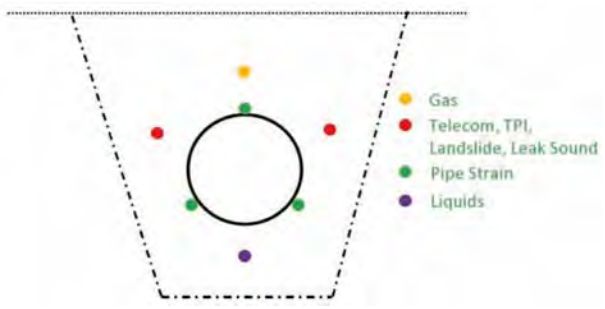
این محدوده انجام شود، باعث ایجاد نشتی و خرابی در خط لوله می‌شود. با توجه به متنوع بودن عواملی که می‌توانند نشتی را ایجاد کنند و همچنین هزینه‌ها و مخاطراتی که این پدیده در بر دارد، نشت‌یابی و جلوگیری از تداوم نشت، مساله بسیار مهمی است. با توجه به وسعت و گستردگی این پدیده، تشخیص نشتی و رفع آن به طور دقیق و سریع، کار بسیار لازم و حساسی می‌باشد. عملیات نشت‌یابی و رفع نشت، علاوه بر زمان کوتاه تعمیراتی، می‌تواند از صدمات اقتصادی و اتلاف انرژی بکاهد که مهم‌ترین مزیت آن به شمار می‌آید. عملیات نشت‌یابی و رفع نشت می‌بایست حتما توسط افراد مجرب و ماهر انجام پذیرد. ایمنی، دانش فنی چگونگی عملیات رفع نشت، فشار، دما، محصول و محل انجام عملیات از عمده عواملی هستند که می‌باید قبل از شروع، مورد بررسی قرار گیرند. نشت‌یابی و رفع نشت از خطوط لوله و تأسیسات تحت فشار، در حال سرویس بدون نیاز به قطع جریان، نشت‌یابی و رفع نشت از خطوط لوله تا قطرهای بالا، نشت‌یابی و رفع نشت بر روی تانک‌ها و مخازن تحت فشار از جمله اهداف مهم در نشت‌یابی‌ها می‌باشند.

دیدبانی ساختاری و عملکردی به طور مؤثری می‌تواند ایمنی و مدیریت خط لوله را بهبود بخشد. نشت‌یابی به موقع می‌تواند از بروز حوادث آینده که قطعی انتقال نفت یا فرآورده‌های نفتی و در نتیجه پرداخت هزینه‌های سنگین را در پی دارد، جلوگیری نماید. از آن‌جا که خطوط لوله در سراسر کره زمین وجود دارند، وجود نشتی از این خطوط به خصوص در مناطقی که از لحاظ زیست‌محیطی دارای حساسیت هستند، خطرات زیادی را برای موجوداتی که روی زمین زندگی می‌کنند فراهم می‌آورد. از طرفی هدر رفتن بخشی از مواد ارزشمند که جزء محصولات و یا مواد اولیه مورد نیاز می‌باشند از لحاظ اقتصادی خسارت‌آور است. به طور کلی مهم‌ترین نتایج وجود نشست عبارتند از: هدر رفتن مواد ارزشمند، آلودگی محیط زیست، ایجاد مسمومیت در انسان و موجودات زنده، انفجار و هزینه‌های تعمیر و تعویض خط لوله. بنابراین براساس مطالب فوق، نشت‌یابی لوله‌های انتقال جهت تصمیم‌گیری مناسب و جلوگیری از هدر رفتن نفت و گاز و دیگر فرآورده‌ها ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است (علاج واقعه قبل از وقوع باید نمود!). به این منظور باید پارامترهایی که نماینده‌ی شرایط عملکردی و ساختاری خط لوله هستند، گردآوری گردند. دیدبانی می‌تواند منجر به جلوگیری از شکستگی و از مدار خارج شدن خط لوله گردد؛ در زمان بروز اشکال، موقعیت دقیق آن را تشخیص دهد و برنامه‌های تعمیرات و نگهداری را بهینه سازد. در نتیجه با افزایش ایمنی، هزینه‌های بهره‌برداری بهینه شده و اتلاف منابع اقتصادی به حداقل می‌رسد.

پارامترهای ساختاری خطوط که می‌توانند نظارت شوند عبارتند از کرنش و انحنا، و پارامترهای کارکردی مورد توجه عبارتند از توزیع دما، نشتی و ورود متجاوز (Third Party) به حریم خطوط دفن شده (در خاک) [۱]. از آن جایی که خطوط جریان دارای ساختار لوله‌ای با طول‌هایی در گستره‌ی چندین کیلومتر هستند، دیدبانی کل طول ساختار سازه خود یک مسأله است. استفاده از حسگرهای مجزا تقریباً غیرعملی است، زیرا این کار نیازمند نصب هزاران حسگر و کابل‌کشی پیچیده است، که علاوه بر هزینه‌ی اولیه، هزینه‌ی بهره‌برداری بسیار زیادی به همراه دارد. بنابراین کاربرد حسگرهای مجزا با شرایط فوق، صرفاً محدود به بخش‌های کوچکی از خط لوله می‌گردد و قابل تعمیم به کل طول خط نیست. روش متداول دیگر مبتنی است بر اندازه‌گیری دبی سیال در ابتدا و انتهای خط لوله است که تفاوت اعداد قرائت شده، به عنوان نشانه‌ای از وجود نشتی در یک مکان نامشخص در طول خط تلقی می‌گردد. پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های اندازه‌گیری دما و کرنش با استفاده از حسگر فیبرنوری توزیعی مبتنی بر اثر پراکندگی بریلوئن، ابزاری اقتصادی به دست می‌دهد که امکان دیدبانی در طول مسیرهای چندین کیلومتری را فراهم می‌سازد [۲-۴]. بنابراین، با استفاده از تعداد محدودی از حسگرهای بسیار طویل، پارامترهای ساختاری خطوط لوله (کرنش، خمش و...) [۵، ۶] و پارامترهای عملکردی (توزیع دما، نشتی و...) [۷، ۸] با دقت و تفکیک‌پذیری فاصله‌ای بسیار خوب و با هزینه‌ای قابل قبول نظارت می‌گردند [۹].



شکل (۱) پاشش نور ناشی از پدیده‌های فیزیکی پاشش نور بریلوئن و رامان



شکل (۲) موقعیت‌های خاص قرار گرفتن کابل حسگر فیبر نوری در اطراف خط لوله

۲- مبانی حسگرهای توزیعی فیبر نوری

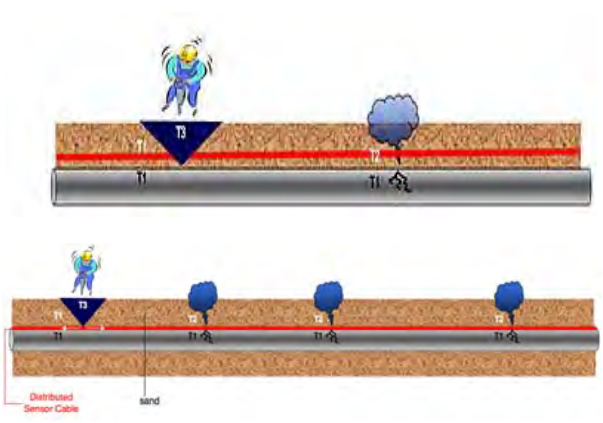
فیبرنوری یکی از محیط‌های انتقال داده با سرعت بالا است. از فیبر نوری در موارد متفاوتی نظیر: شبکه‌های تلفن شهری و بین شهری، شبکه‌های کامپیوتری، و اینترنت، و همچنین برای انتقال اطلاعات و ارسال سیگنال‌های نوری در مسافت‌های طولانی استفاده می‌شود. فیبرنوری، رشته‌ای از تارهای بسیار نازک شیشه‌ای بوده که قطر هر یک از تارها نظیر قطر یک تار موی انسان است. این تارهای فوق در کلاف‌هائی سازماندهی و کابل‌های نوری را به وجود می‌آورند. فیبرنوری در مقایسه با سیم‌های مسی دارای مزایای زیادی است از جمله: ارزان‌تر بودن (هزینه‌ی چندین کیلومتر کابل نوری نسبت به سیم‌های مسی کم‌تر است)، نازک‌تر بودن (قطر فیبرهای نوری به مراتب کم‌تر از سیم‌های مسی است)، ظرفیت بالا (پهنای باند فیبر نوری به منظور ارسال اطلاعات به مراتب بیش‌تر از سیم مسی است)، تضعیف ناچیز (تضعیف سیگنال در فیبرنوری به مراتب کم‌تر از سیم مسی است)، سیگنال‌های نوری (برخلاف سیگنال‌های الکتریکی در یک سیم مسی، سیگنال‌های نوری در یک فیبر تأثیری بر فیبر دیگر نخواهند داشت، تلفات سیگنال در آن‌ها کم و در نتیجه فاصله‌ی بین تقویت‌کننده‌ها زیاد می گردد)، مصرف برق پایین (با توجه به اینکه سیگنال‌ها در فیبرنوری کم‌تر ضعیف می‌گردند، بنابراین می‌توان از فرستنده‌هائی با میزان برق مصرفی پایین نسبت به فرستنده‌های الکتریکی که از ولتاژ بالائی استفاده می‌نمایند، استفاده کرد)، سیگنال‌های دیجیتال (فیبرنوری مناسب برای انتقال اطلاعات دیجیتالی است)، غیراشتعال‌زا (با توجه به عدم وجود الکتریسیته و پالس الکتریکی در آن‌ها، امکان بروز آتش‌سوزی وجود نخواهد داشت)، حجم و وزن سبک (وزن یک کابل فیبر نوری به مراتب کم‌تر از کابل مسی (قابل مقایسه) است)، انعطاف‌پذیر (با توجه به انعطاف‌پذیری فیبرنوری و قابلیت ارسال و دریافت نور از آنان، در موارد متفاوت نظیر دوربین‌های دیجیتال با موارد کاربردی خاص مانند: عکس‌برداری پزشکی، لوله‌کشی و... استفاده می‌گردد) و همچنین فراوانی مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها، مصون بودن از اثرات القاهای الکترومغناطیسی مدارات دیگر، مصون بودن در مقابل عوامل جوی و رطوبت، سهولت در امر کابل‌کشی و نصب، استفاده در شبکه‌های مخابراتی آنالوگ و دیجیتال، مصونیت در مقابل پارازیت. با توجه به مزایای فراوان فیبرنوری، امروزه از این نوع کابل‌ها در موارد متفاوتی استفاده می‌شود. اکثر شبکه های کامپیوتری و یا مخابرات از راه دور نیز در مقیاس وسیعی از فیبرنوری استفاده می‌نمایند [۱۰].

حسگر توزیعی، ابزاری با اندازه‌گیری خطی است، که قادر به اندازه‌گیریِ پارامتر اندازه‌گیری در هر نقطه از طول خود می‌باشد. حسگرهای توزیعی فیبرنوری شامل یک رشته فیبرنوری هستند که دارای حساسیت اندازه‌گیری در تمام طول خود می‌باشند. بنابراین یک رشته از فیبرنوری جایگزین هزاران حسگر مجزا (Point Sensor) می‌گردد [۱۱]. تضعیف کم فیبرنوری امکان دیدبانی فواصل بسیار طولانی (تا چند ده کیلومتر) را فراهم می‌کند، این طول نماینده‌ی تعداد قابل توجهی از نقاط اندازه‌گیری است. توسعه‌ی سیستم حسگرهای نوری توزیعی، مبتنی بر روش‌های شناخته شده و تکرارپذیری است که در آن تغییرات پارامتر اندازه‌گیری، با نور منتشر شده در داخل رشته‌ی نوری مرتبط است [۱۲]. فرایند پاشش نور یک ویژگی ذاتی

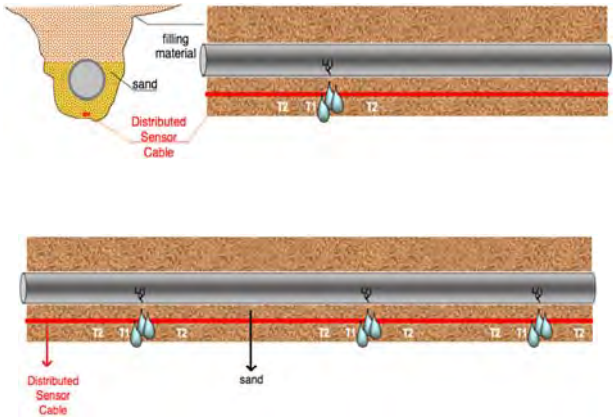
انتشار نور درون ماده‌ی سیلیکا است. این ماده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی اصلی رشته‌های حسگر نوری می‌باشد. اثر موسوم به پراکندگی بریلوئن، پاسخی شناخته شده و تکرارپذیر به پارامترهای اندازه‌گیری خارجی مثل کرنش و خمش و دما نشان می‌دهد (شکل (۱)). اندازه‌گیری دما با آنالیز پاشش نور ناشی از اثر پراکندگی رامان انجام می‌شود. در سیستم دیدبانیِ دمای توزیعی، نور لیزر تابیده شده در حسگر نوری در محلی که از لحاظ پروفایل دمایی متفاوت از باقی مسیر است، دچار شیفت فرکانسی می‌شود [۱۲]. شیفت فرکانسی با تغییرات دمایی (در رنج دمایی حسگر نوری) رابطه‌ی کاملاً خطی دارد [۱۳]. از آن‌جایی که فرایند تغییر دما به واسطه‌ی نشت سیال حادث گردیده است، این تغییر دما (شیفت فرکانسی) به صورت اعلام خطر (آلارم) نشت سیال در سیستم ثبت و گزارش می‌گردد. الگوریتم تشخیص محل نشت براساس مقایسه‌ی پروفایل دمایی برداشت شده با پروفایل دمایی مرجع استوار است [۱۴]. پروفایل دمایی مرجع در شرایط نرمال و به هنگام راه‌اندازی در دیتابیس سیستم ثبت می‌گردد. در پروفایل نسبی دما، قله یا دره‌ی دمایی نشان از ناهنجاری نقطه‌ای دما (افزایش یا کاهش دما) در بخشی از طول خط لوله می‌باشد که ممکن است به دلیل نشت سیال یا خاک‌برداری در طول مسیر خط (متجاوز خارجی) حادث شده باشد (شکل (۳)).

۳- طراحی سیستم نشت‌یابیِ حسگر فیبرنوری و نحوه‌ی نصب کابل حسگر در طول خط لوله

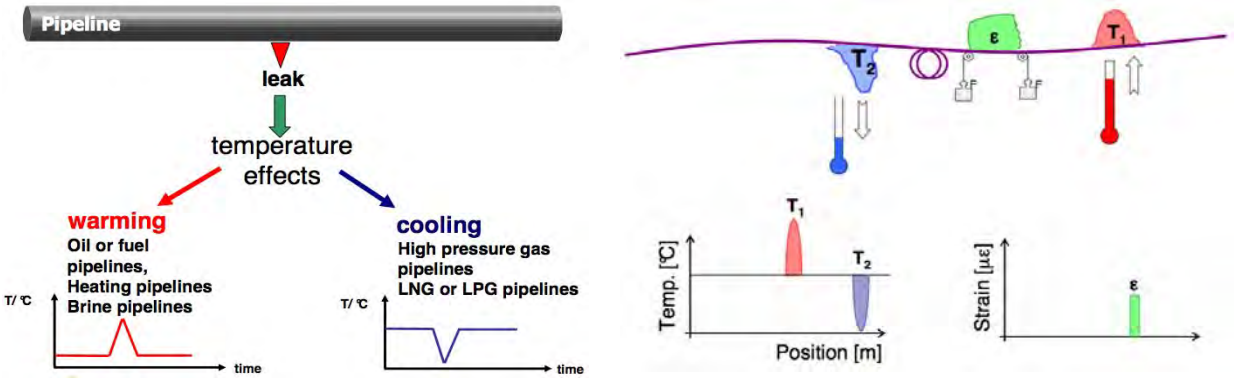
حفاظت فیبرنوری از هر گونه اثر خارجی، اساس طراحی کابل نوری بوده است. مشخصاً لازم است که کابل از نفوذ رطوبت، فشار جانبی، کرنش طولی، شکستگی حفاظت شود. در طراحی کابل طول فیبرنوری به نحوی انتخاب می شود که تفاوت ضریب انبساط حرارتی استیل و شیشه باعث کشیدگی یا فشردگی رشته‌های نوری نگردد. می‌توان کابل نوری مناسبی جهت کاربری‌های طولانی مدت در شبکه‌های مخابراتی و دیدبانی دما در گستره‌های ۶۰- تا ۶۰+ درجه‌ی سانتیگراد با توجه به اثر پراکندگی بریلوئن و پراکندگی رامان طراحی کرد. در مورد سیستم‌های مبتنی بر پراکندگی بریلوئن، لازم است تفکیک صحیحی از پاشش نور ناشی از تغییرات دمایی و کرنش انجام شود. حساسیت بالای پراکندگی بریلوئن در شناسایی کرنش، آن را در دیدبانی تغییر شکل‌های محلی در طول سازه‌های طویل مانند خط لوله مناسب می‌سازد. در این موارد کابل باید کاملاً و عیناً کرنش سازه را به فیبرنوری منتقل کند. این هدف با تجاربی که در طراحی کابل‌های نوری مخابراتی وجود دارد، کاملاً متناقض است؛ زیرا در مورد این کابل‌ها حفاظت کابل نوری از هر گونه عامل خارجی از جمله کرنش هدف اصلی در طراحی است. در نهایت، زمانی که اندازه‌گیری کرنش توزیعی مورد نیاز است، باید به صورت همزمان دما نیز اندازه‌گیری شود تا بتوان



شکل (۳) تشخیص و تعیین گاز انتشار یافته توسط کابل فیبر نصب شده در قسمت فوقانی لوله. با این روش نصب می‌توان عوامل خارجی (خطای انسانی، خرابکاری) را نیز تشخیص داد. در مواردی که چندین نشت به طور همزمان رخ دهد، باز هم حسگر فیبرنوری قادر به تشخیص می‌باشد.



شکل (۴) تشخیص و تعیین نشت مایع به وسیله‌ی کابل فیبر نوری تعبیه شده در زیر لوله. در مواردی که چندین نشت به طور همزمان رخ دهد، باز هم حسگر فیبرنوری قادر به تشخیص می‌باشد.

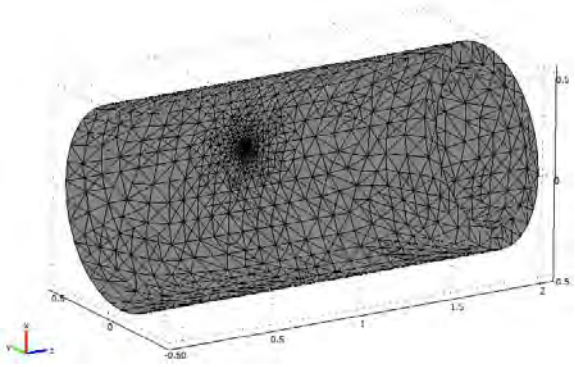


شکل (۵) رفتار دمایی سیال گرم و سرد در محل بروز نشتی

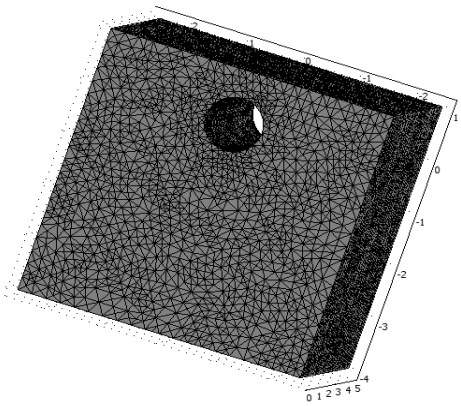
هنگام آنالیز اطلاعات خام گردآوری شده، پاشش نور ناشی از این دو پارامتر را تفکیک نمود [۱۵]. معمولاً این اندازه‌گیری همزمان از طریق نصب دو حسگر مجزا جهت دما و کرنش به دست می‌آید شکل (۲). بدیهی است ترکیب این دو تابع در یک مجموعه بایستی مطلوب باشد. الگوریتم شناسایی نشتی در این روش براساس اندازه‌گیری پروفایل دمایی در طول خط لوله می‌باشد. پروفایل دمایی نسبی که از مقایسه‌ی پروفایل مرجع با پروفایل اندازه‌گیری شده به دست می‌آید، در محل بروز نشتی دارای قله یا دره دمایی می‌باشد. چنانچه افزایش یا کاهش دما به تغییرات آستانه‌ی دمایی تنظیم شده در نرم‌افزار سیستم برسد، هشدار خطری (آلارمی) مبنی بر بروز نشتی در سیستم ثبت می‌گردد [۱۶]. به هنگام بروز نشتی بسته به سیال و نوع خط لوله (واقع در ساحل (Onshore)، دور از ساحل (Offshore))، جهت حرکت سیال نشتی، تعیین‌کننده‌ی محل نصب کابل حسگر می‌باشد (شکل (۲)). در خطوط لوله گاز و خطوط لوله‌ی دور از ساحل، جهت حرکت سیال به سمت بالاست [۱۷] و کابل حسگر مشابه شکل (۳) در بالای خط لوله نصب می‌گردد. در خطوط لوله‌ی مایعات، چون جهت حرکت به سمت پایین است [۱۸]، نصب کابل مشابه شکل (۴) در پایین خط لوله انجام می‌گردد. این سیستم‌ها برای موقعیت‌یابی چند نشت به طور همزمان نیز کاربرد دارند.

رفتار دمایی به هنگام بروز نشتی نیز وابسته به تفاوت دمایی سیال نشتی و محیط پیرامون خط لوله می‌باشد. به عنوان مثال گاز آزاد شده بر اثر افت فشار در محل وقوع نشتی، باعث خنک شدن محیط پیرامون خود می‌شود [۱۹]. در خطوط لوله نفت و سیالات مایع نیز عمدتاً سیال گرمتر از محیط اطراف پیرامون خود می‌باشد [۲۰]. در مورد خطوط لوله‌ای که سیال دو فازی درون آن در جریان است، تلفیقی از تغییرات یاد شده مشاهده می‌گردد (شکل (۵)).

هنگامی که در لوله ضایعه‌ای رخ می‌دهد و سبب ایجاد نشت در خاک اطراف لوله می‌شود، سیال نشتی منجر به تغییر ویژگی‌های دمایی خاک اطراف لوله می‌گردد و در نتیجه سیکل روزانه‌ی دمای خاک در منطقه‌ی اطراف محل نشت، متفاوت از سیکل طبیعی تغییرات در سایر بخش‌های مسیر خط لوله می‌گردد و به این ترتیب محل تغییر دما و بالطبع محل نشت تشخیص داده می‌شود. پارامترهای مؤثر بر زمان نشت‌یابی، میزان نشتی، تفاوت دمایی بین دمای سیال و دمای خاک، فاصله‌ی بین محل نشت و حسگر (فاصله افقی و عمودی)، میزان فشردگی (Compaction) خاک [۲۱]، نفوذپذیری (Permeability) خاک (نوع خاک) [۲۲] می‌باشد.



شکل (۶) طراحی لوله با یک محل ترک بر روی آن و مش‌بندی.



شکل (۷) طراحی خاک اطراف لوله و مش‌بندی آن (برای دیده شدن محل لوله، کمی محیط چرخانده شده است).

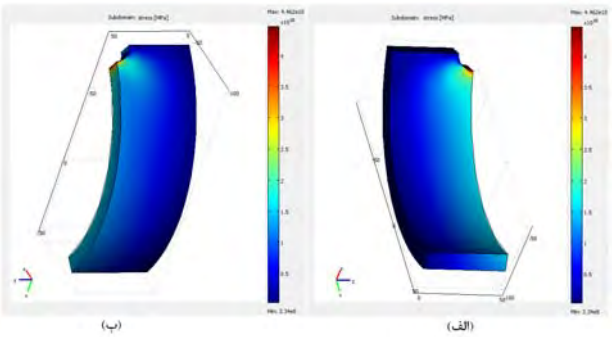
۴- شبیه‌سازی‌های صورت گرفته براساس سیستم طراحی شده

از آن‌جا که در این سیستم حس شدن پارامتر دما توسط کابل حسگر فیبرنوری یک پارامتر مهم برای اثبات برتر بودن این روش نسبت به روش‌های دیگر است، باید مقدار تغییر دمای خاک نسبت به قبل از نشت محاسبه گردد. هر چه زمان تغییر دمای حس شده توسط فیبرنوری کم‌تر باشد، سیستم سریع‌تر به نشت پاسخ می‌دهد. پس با شبیه‌سازی تغییرات حرارت در خاک [۲۳] به ابعاد ۵×۵×۵ متر در اطراف لوله (شکل (۶)) و محل نشت (شکل (۷))، می‌توان در هر زمان و در هر نقطه از خاک، مقدار گرما را به دست آورد. در این‌جا برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار Comsol Multiphysics 3.5 که یک نرم‌افزار قدرتمند برای شبیه‌سازی براساس آنالیز المان محدود است، استفاده شده است.

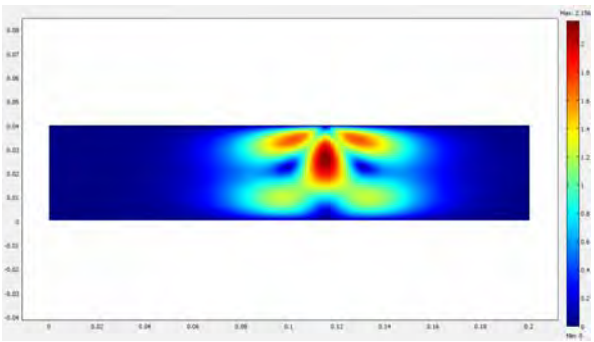
از آن‌جا که فشار سیال در داخل لوله بیش‌تر از فشار محیط می‌باشد، با ایجاد ترک بر روی لوله، فشار سیال بر روی ترک بسیار زیاد شده و ناگهان تنش بزرگی به سطح لوله وارد می‌شود (شکل (۸)). این تنش ایجاد شده در هر دو لوله‌ی سیال مایع و گاز ایجاد می‌شود و لوله بعد از یک زمانی مقاومت خود را در برابر این تنش ایجاد شده از دست داده و لوله شکسته شده و پاره می‌گردد و سبب آتش‌سوزی می‌شود.

با شبیه‌سازی نفوذ نفت در خاک زیر لوله‌ی نفت و اطراف محل نشت، می‌توان در هر زمان و در هر نقطه از خاک، مقدار جرم مایع نشتی و در نتیجه مقدار جرارت خاک را بدست آورد. بر اساس مقدار دبی ورودی گاز نشتی، گاز به سطوح بالاتر خاک رسیده و باعث سرد شدن خاک و ایجاد یخزدگی می‌شود. در نتیجه به دست آوردن مقدار حرارت خاک در هر زمان می‌تواند یک پارامتر مهم در نشت‌یابی لوله‌های سیال مایع به ویژه نفت باشد (شکل‌های (۹) و (۱۰)).

با شبیه‌سازی پخش گاز در خاک بالای لوله گاز و اطراف محل نشت، می‌توان در هر زمان و در هر نقطه از خاک، مقدار



شکل (۸) شدت تنش ایجاد شده به لوله در محل ترک، الف) سطح داخلی لوله، ب) سطح بیرونی لوله.



شکل (۹) نفوذ نشت در خاک زیر لوله (برش عمودی از زیر محل ترک)

غلظت گاز و در نتیجه دمای خاک را به دست آورد. بر اساس مقدار دبی ورودی گاز نشتی، گاز به سطوح بالاتر خاک رسیده و باعث سرد شدن خاک و ایجاد یخزدگی می‌شود. هاله قرمز رنگ بالای سوراخ همان مرز قیفی شکل است که یخزدگی خاک را نشان می‌دهد. در نتیجه به دست آوردن مقدار غلظت گاز در هر زمان می‌تواند یک پارامتر مهم در نشت‌یابی لوله‌های گاز باشد (شکل (۱۱)).

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از سیستم دیدبانی و نظارتِ مبتنی بر حسگر فیبرنوری توزیعی، امکان دیدبانی پیوسته و همچنین مدیریت خط لوله، بهبود شاخص‌های ایمنی خطوط و اجازه تصمیم‌گیری‌های بهره‌برداری و تعمیراتی مبتنی بر اطلاعات آنلاین را به دست می‌دهد. به طور خاص سیستم فیبرنوری توزیعی، وظایف دیدبانی را به شرح زیر ممکن می‌کند:

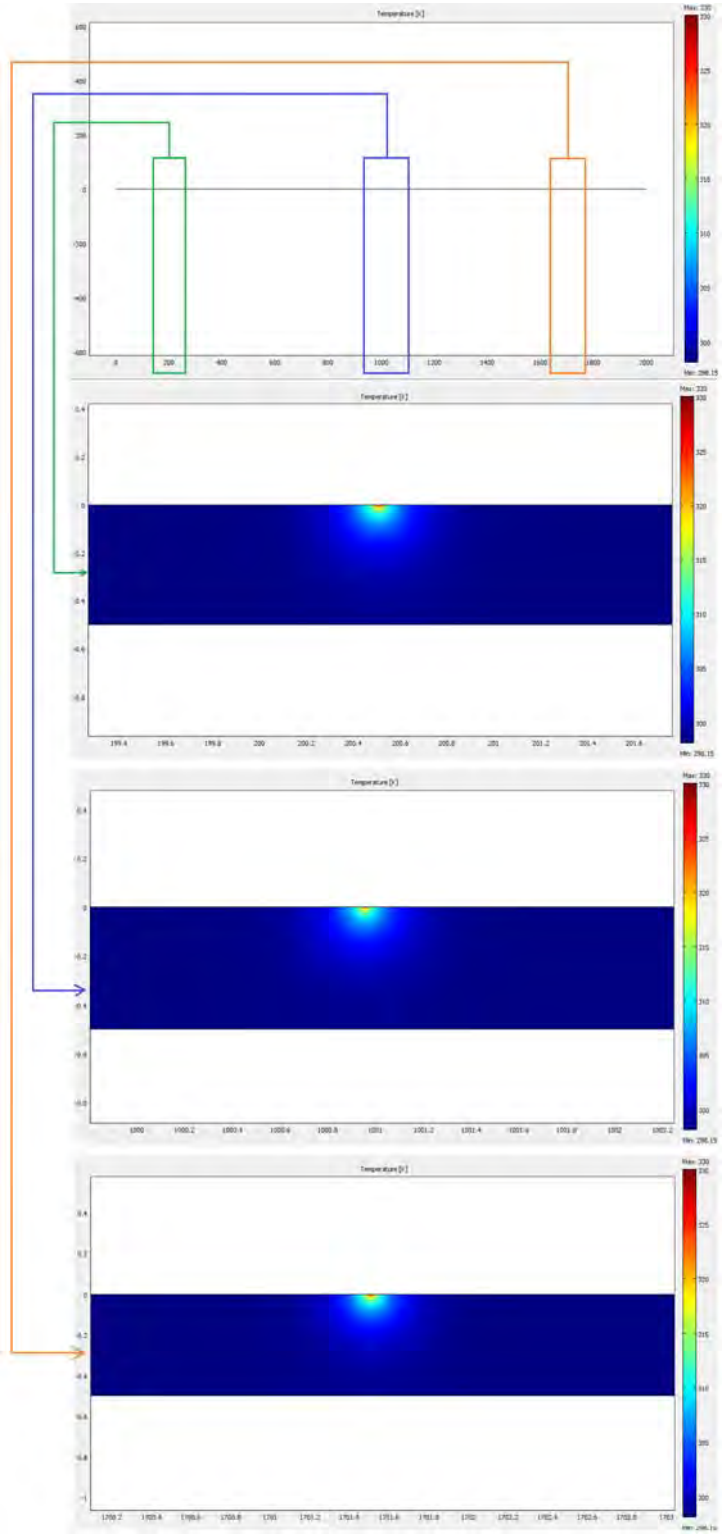
دیدبانی پروفایل دمایی توزیع شده: اندازه‌گیری پروفایل دما در طول خط لوله و در نتیجه دیدبانی تغییرات دمایی سیال انتقالی به دست می‌آید. از این اطلاعات می‌توان جهت بهینه‌سازی پارامترهای بهره‌برداری و شناسایی محل تشکیل یخ، تجمع wax و غیره استفاده شود.

نشت‌یابی: با شناسایی تغییرات غیر عادی دما، محل‌یابی مقادیر بسیار کم نشتی امکان‌پذیر است. نشتی‌های قابل اندازه‌گیری با سیستم مبتنی بر حسگر نوری با تکنیک‌های سنتی اندازه‌گیری حجمی مقدور نیست. توانایی تعیین دقیق محل نشت در زمان بسیار کم، منجر به عملکرد سریع زمان بروز نشتی و به حداقل رسیدن تبعات از مدار خارج شدن خط و نیز اثرات سوء زیست محیطی می گردد.

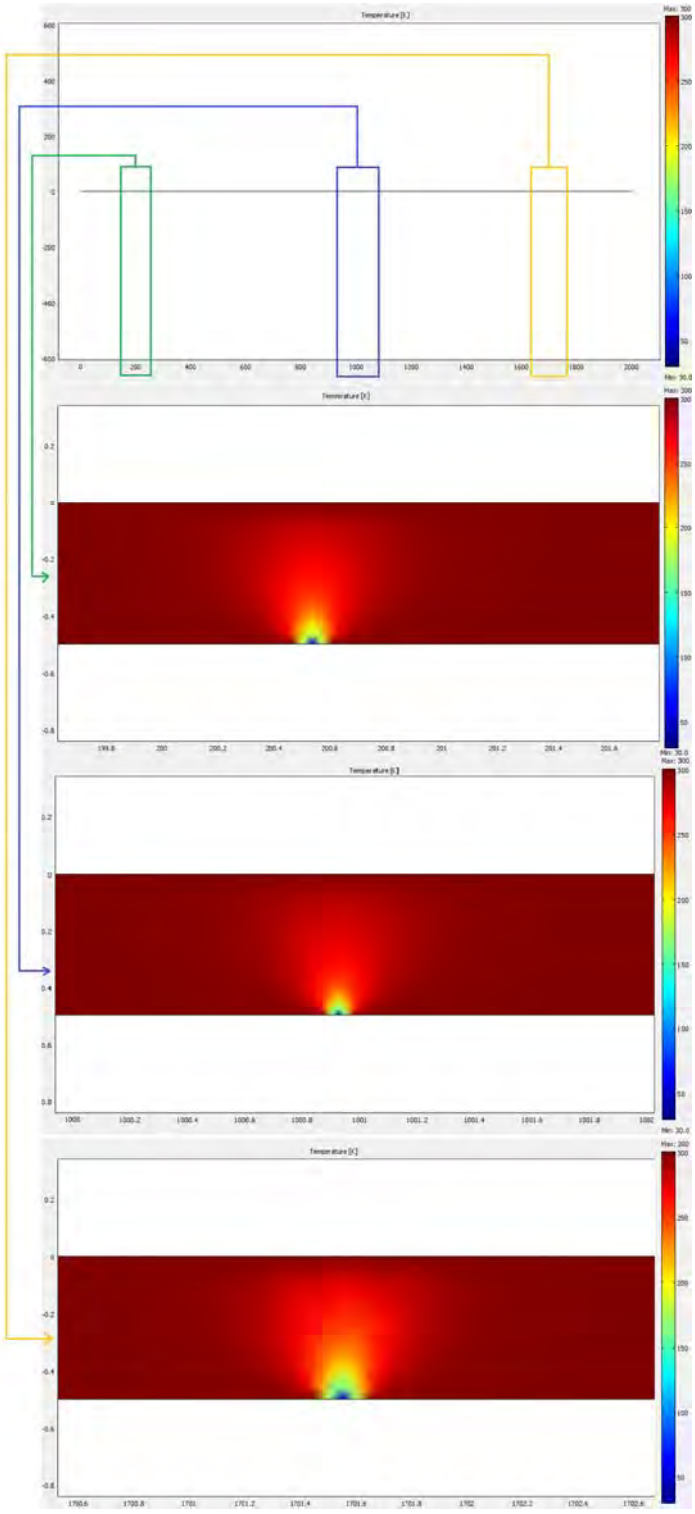
شناسایی ورود عامل خارجی به حریم خط لوله دفنی: با تمرکز بر تنش‌های محلی و تغییرات دمایی، محل ورود تصادفی یا عمدی به حریم خط لوله قابل شناسایی است. بنابراین می‌توان قبل از اینکه متجاوز خسارت جدی به خط لوله وارد کند، وارد عمل شد.

دیدبانی توزیع تنش و خمش: حسگر فیبرنوری با ساختاری خاص چنانچه با خط لوله هم‌بندی شود امکان جمع‌آوری اطلاعات تنش سه بعدی در امتداد خط لوله را به دست می‌دهد و این قابلیت به طور خاص در نواحی بحرانی که امکان بروز زمین لرزه، رانش زمین، نشست زمین یا فعالیت‌های انسانی وجود دارد، بسیار مفید است. دیدبانی توزیعی تنش شناسایی شرایط این‌چنینی را در زمان بسیار کمی ممکن می‌سازد، این سیستم ابزاری خوب برای مدیریت خط لوله و تعمیرات در زمان سرویس می‌باشد. دیدبانی توزیعی تنش دارای پتانسیل شناسایی تغییرات ضخامت دیواره در امتداد طول خط لوله را داراست. این تغییرات به دلیل خوردگی و یا ساییدگی به وجود می‌آیند. به طور خاص این سیستم قابلیت دیدبانی و نظارت همزمان دما و تنش خط را به دست می‌دهد. عموماً، توزیع تنش/ خمش و اندازه‌گیری دما ابزاری مفید است که به طور ایده‌آلی فعالیت‌های مرتبط با دیدبانی و بازرسی فنی را پوشش می‌دهد و به کمک این سیستم، طیف وسیعی از پارامترهای عملیاتی و ایمنی قابل گردآوری است. در این روش، اندازه‌گیری در هر نقطه از طول خط انجام می‌شود و صرفاً اندازه‌گیری محدود به بخش و یا موقعیت خاصی نمی‌گردد. علاوه بر این، دیدبانی، کاملاً پیوسته و بدون هیچگونه تداخلی با خطوط لوله معمولی اجرا می‌شود.

پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی حسگرهای نوری توزیعی دیدبانی خطوط لوله با طولی بیش از ۶۰ کیلومتر را با استفاده از تقویت‌کننده‌های نوری (Optical Amplifier) را فراهم می‌کنند. برای دستیابی به اهداف فوق‌الذکر و حصول تمامی مزایای این تکنولوژی، نکته اساسی انتخاب و نصب کابل‌های حسگر متناسب با نیازمندی‌های خاص هر پروژه می‌باشد، عموماً اجرای حسگر در فاز نصب خط لوله، آسان‌ترین روش اجرای این سیستم است. با این‌حال امکان اجرای این سیستم بر روی خطوط اجرا شده نیز وجود دارد. در برخی موارد امکان استفاده از فیبرهای نوری مربوط به ارتباطات مخابراتی که به موازات خط لوله اجرا شده‌اند نیز وجود دارد. این فیبرها به منظور اندازه‌گیری پروفایل دما در امتداد خط، و نشت‌یابی خطوط قابل استفاده هستند.



شکل (۱۰) شبیه‌سازی خاک زیر لوله برای یک سیال مایع مانند نفت، در سه نقطه از محل نشت. تغییرات دما از زیر محل نشت تا رسیدن به فیبر نوری (مرز پایینی) به وضوح مشخص است (رنگ آبی تیره دمای پایین‌تر را نشان می‌دهد). خاک زیر لوله گرم‌تر شده است.



شکل (۱۱) شبیه‌سازی خاک بالای لوله برای یک گاز، در سه نقطه از محل نشت. تغییرات دما در بالای محل نشت (فیبرنوری روی لوله قرار دارد) تا سطح خاک (مرز بالایی) به وضوح مشخص است (رنگ قرمز تیره دمای بالاتر را نشان می‌دهد). خاک در مرز قیفی شکل یخ زده است.

۶- مراجع

[1] Inaudi, D., et al., *Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optics Sensing*, 6th International Pipeline Cnoference, September 25 - 29, Calgary, Alberta, Canada, (2006).

[2] Fakhraei, L., **Mirzaei, A.**, et al., *Deconvolution Method for Spatial Resolution Enhancement in Brillouin Distributed Fiber Optic Temperature and Strain Sensor"*, International Conference on Optics and Photonics (ICOP 2012), Venice, Italy, November 14 - 16, (2012).

[3] Thévenaz, L., et al., *Monitoring of Large Structure using Distributed Brillouin Fiber Sensing*, SPIE, OFS-13, 13th International Conference on Optical Fiber Sensors, Kyongju, Korea, Vol. 3746, pp. 345-348, (1999).

[4] **A. Mirzaei**, et al., *Time Response of Oil Pipeline Fiber Optic Leak Detector with Brillouin Effect*", 17th Iranian Conference on Optics and Photonics (ICOP 2011), International Center for Science, High Technology and Environmental Sciences (ICST), Kerman, Graduate University of Technology (KGUT), Kerman, Mahan, Iran, February 8 - 10, (2011).

[5] Thévenaz, L., et al., *Truly Distributed Strain and Temperature Sensing using Embedded Optical Fibers*, SPIE conference on Smart Structures and Materials, Vol. 3330, pp. 301-314, (1998).

[6] Glisic, B., et al., *Sensing Tape for Easy Integration of Optical Fiber Sensors in Composite Structures*, 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, October 13- 17, Nara, Japan, Vol. 1, pp. 291-298, (2003).

[7] Niklès, M., et al., *Leakage Detection using Fiber Optics Distributed Temperature Monitoring*, 11th SPIE Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, March 14-18, San Diego, USA, (2004).

[8] Bahrampour, A.R., et al., *Fiber Optic Leak Detection of Buried Oil Pipelines in Soil Based on the Distributed Temperature Measurement*", 4th Iranian Pipe & Pipeline Conference, Razi Intl. Conference Center, Tehran, Iran, September 29 - 30, (2012).

[9] Niklès, M., et al., *Greatly Extended Distance Pipeline Monitoring using Fiber Optics*, Proceedings of OMAE05, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 12-17, Halkidiki, Greece, (2005).

[10] Arrigo, P., et al., *Neural Networks: Computer Simulations and Biomedical Applications*, Proc. of second Italian Workshop on Parallel Architectures and Neural Networks, World Scientific Publishing Co, (1990).

[11] **Mirzaei, A.**, et al., *The Rise Time of Optical Fiber Sensors for Leak detection of Buried Oil Pipelines*, International Conference on Optics and Photonics (ICOP 2012), Venice, Italy, November 14 - 16, (2012).

[12] **Mirzaei, A.**, et al., *An Analytical Method to Calculate the Coupled Heat and Moisture Transfer in Soil for Time Response of Buried Oil Pipeline Fiber Optic Leak Detector*", 18th Iranian Conference on Physics, Urmia University, Urmia, Iran, September 5 - 8, (2011).

[13] Chang, W. J., et al., *An Analytical Solution to Coupled Heat and Moisture Diffusion Transfer in Porous Materials*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 43, pp. 3621–3632, (2000).

[14] **Mirzaei, A.**, et al., *The Measurement of the Temperature Parameter in Optical Fiber Leak Detection of Buried Oil and Gas Pipelines*", 19th Iranian Conference on Physics, Yazd University, Yazd, Iran, August 27 - 30, (2012).

[15] Shurbaji, A.R.M, et al., *Application of a Numerical Model for Simulating Water Flow, Isotope Transport, and Heat Transfer in Unsaturated Zone*, J. Hydrol., Vol. 171, pp. 143–163, (1995).

[16] Baladi, J.Y., Transient *Heat and Mass Transfer in Soils*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 24, pp. 449–458, (1981).

[17] Hartley, J.A.G., Black, W.Z., *Transient Simultaneous Heat and Moisture Transfer in Moist Unsaturated Soils*, ASME J. Heat Transfer, Vol. 103, pp. 376–382, (1981).

[18] Kaviany. M., *Prinicple of Heat transfer*, University of Michigan, Ann Arbor. (2002).

[19] Parlange, M.B., et al., *Review of Heat and Water Movement in Field Soils*, Soil & Tillage Research, Vol. 47, (1998).

[20] Chounet, L.M., et al., *Simulation of Water Flow and Heat Transfer in Soils by Means of a Mixed Finite Element Method*, Advances in Water Resources, Vol. 22, No. 5, pp. 445–460, (1999).

[21] Fuentes, C., et al., *Parameter Constraints on Closed-Form Soil–Water Relationships*. J. Hydrol., Vol. 134, pp. 117–142, (1992).

[22] Landau. L .D et al., *Fluid Mechanics*, Second Edition, Pergomon Press, (1998).

[23] Das. Braja M, *The Principle of Geothechnical and Soil Mechanics*, 5th .ed. (2002).