بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فیزیک

پایان‌نامه تحصیلی جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته فوتونیک گرایش فیزیک

تحلیل تقویت‌کننده‌ی فیبر نوری بریلوئن و بهینه سازی حسگرهای نشت لوله‌های نفتی بر مبنای بریلوئن

اساتید راهنما :

دکتر فریده شجاعی

دکتر علیرضا بهرامپور

مؤلف :

مجتبی باغبان زاده

شهریور ماه ۱۳۹۲

این پایان‌نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش فیزیک

دانشکده علوم

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مذبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو :

اساتید راهنما :

استاد مشاور :

داور ۱ :

داور ۲ :

نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع :

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده :

حق چاپ محفوظ است و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به :

چکیده :

در این پایان نامه، سازوکار کلی حسگرهای نشت‌یابی لوله‌های نفتی را بررسی، و نحوه ثبت دما و کرنش در این حسگرها را تشریح می‌کنیم. استفاده از این حسگرهای فیبر نوری، به علت افت سیگنال درون آنها پس از طی مسافت مشخصی، محدود می‌باشد، بنابراین برای اینکه این حسگرها برای مسافت های طولانی‌تری کاربرد داشته باشند، باید افت سیگنال جبران شود. حسگرهایی را که به طور خاص بررسی می‌کنیم، حسگرهای مبتنی بر بریلوئن می‌باشند.

در ادامه، معادلات حاکم بر پراکندگی بریلوئن را معرفی، و راه حل‌های مختلفی که ارائه شده است را بررسی می‌کنیم و با مقایسه آنها با نتایج عملی، میزان صحت آنها را مشخص می‌نماییم. سپس مدلی را که به نسبت دیگر مدل ها، کاملتر و دقیقتر است را معرفی کرده و نتایج تئوری آن را مورد تحلیل قرار می‌دهیم.

سپس از معادلات مربوط به پراکندگی بریلوئن و اندرکنش بین امواج پمپ و کاوشی، برای بررسی سیستم‌های حسگری دما و کرنش توزیعی بر اساس پراکندگی بریلوئن استفاده می کنیم و راه‌کارهای مختلفی را برای افزایش دقت و طول حسگرهای فیبر نوری ارائه می‌دهیم.

فهرست مطالب :

فصل اول: مقدمه ۱

فصل دوم: پراکندگی نور، اساس حسگرهای لوله‌های نفتی ٤

۲-۱ معرفی ٥

۲-۲ انواع پراکندگی های نوری ٦

۲-۲-۱پراکندگی ریلی ٦

۲-۲-۲ پراکندگی می ٦

۲-۲-۳ پراکندگی رامان ٦

۲-۲-۴ پراکندگی بریلوئن ۷

۲-۳ مبانی حسگرهای توزیعی ۸

۲-۴ معماری سیستم نشت یابی مبتنی بر حسگر نوری ۱۱

۲-۵ طراحی کابل حسگر ۱۱

۲-۶ نحوه نصب کابل حسگر در طول خطوط لوله ۱۳

۲-۷ عوامل موثر بر سرعت تعیین وقوع نشتی ۱۵

۲-۸ دامنه ی کاربرد حسگر های نشت یاب لوله‌های نفتی ۱۵

فصل سوم: بررسی پراکندگی بریلوئن ۱۷

۳-۱ مقدمه ۱۸

۳-۲ تداخل موج پمپ و استوکس ۱۹

۳-۲-۱ الکتروتنگش ۲۱

۳-۳ پراکندگی القایی بریلوئن(القا شده توسط الکتروتنگش) و معادلات همبسته‌ی میدان ۲۳

۳-۳-۱ رفتار برداری میدان‌های فرودی ۲۳
۳-۳-۲ جفت شدگی امواج بر هم‌کنشی ۲۵
۳-۳-۳ توزیع توان های استوکس و پمپ ۲۹
۳-۴ بررسی معادلات حاکم بر پراکندگی بریلوئن با ضریب تضعیف ۳۳
۳-۴-۱ دینامیک پراکندگی القایی بریلوئن با درنظر گرفتن ضریب تضعیف ۳۳
۳-۴-۲ روش حل عددی معادلات همبسته میدان ۳٤
۳-۴-۳ روش حل جبری معادلات همبسته میدان ۳۷
۳-۴-۴ مقایسه نتایج عملی و عددی ٤۰
۳- ۵ بررسی معادلات حاکم بر پراکندگی بریلوئن با ضریب تضعیف و نویز ٤۷
۳-۵-۱ مقدمه ٤۷
۳-۵-۲ معادلات و مدل تحلیلی ٤۸
۳-۵-۲-۱ فرم عبارت نویز لانگوین ۵۰
۳-۵-۲-۲ استخراج معادلات همبسته ۵۲
۳-۵-۳ حل عددی معادلات میدان ۵٤
۳-۵-۴ مقایسه نتایج تجربی و تئوری ۵۷
فصل چهارم: انواع حسگرهای فیبر نوری مناسب جهت نشت یابی خطوط لوله ی نفت و گاز ٦۸
۴-۱ معرفی ٦۹
۴-۲ انواع حسگرهای بازتاب کننده حوزه زمان ۷۰
۴-۲-۱ $OTDR$ مبتنی بر پراکندگی ریلی: ۷۰
۴-۲-۲ $OTDR$ مبتنی بر پراکندگی رامان: ۷۱
۴-۲-۲-۱ وابستگی دمایی پراکندگی رامان: ۷۱
۴-۲-۳ $OTDR$ مبتنی بر پراکندگی بریلوئن: ۷۲

۴-۲-۳-۱ وابستگی پراکندگی بریلوئن به دما و کرنش: ۷۲
۴-۳ سیستم تجزیه و تحلیل زمانی (*OTDA*) : ۷۴
۴-۳-۱ اتلاف بریلوئن ۷۵
۴-۳-۲ بهره بریلوئن: ۷۷
۴-۴ مزیت روش های مبتنی بر پراکندگی بریلوئن نسبت به دیگر روش ها ۸۰
فصل پنجم: بهینه سازی حسگرهای توزیعی دما و کرنش بر مبنای پراکندگی بریلوئن ۸۲
۵-۱ مقدمه ۸۳
۵-۲ بهینه سازی و افزایش برد حسگرهای *BOTDA* با بهره گیری از تقویت رامان ۸۵
۵-۲-۱ سیستم *BOTDA* کمک گرفته از رامان ۸۶
۵-۲-۲ مدل تئوری حسگر توزیعی بریلوئن بهره گرفته از رامان ۸۷
۵-۲-۳ نتایج تئوری و تجربی ۹۲
۵-۲-۳-۱ اثر تقویت رامان روی پالس پمپ بریلوئن ۹۲
۵-۲-۳-۲ اثر تقویت رامان با حالات پمپاژ مختلف بر روی بهره بریلوئن ۹۴
۵-۲-۳-۳ اثر پمپاژ رامان روی کنتراست سیستم ۹۸
۵-۲-۳-۴ توزیع اختلاف فرکانس بریلوئن در طول فیبر برای حالات مختلف سیستم ۹۹
۵-۲-۳-۵ تشخیص نقطه داغ ۱۰۱
۵-۳ اثرات تغییر شکل مدولاسیون پالس بر روی حساسیت حسگرهای توزیعی بریلوئن ۱۰۳
۵-۳-۱ مقدمه ۱۰۳
۵-۳-۲ مدل تئوری و شبیه سازی ها ۱۰۴
۵-۳-۳ نتایج و مباحث ۱۰۶
۵-۴ اثر خود مدولاسیون فاز(*SPM*) بر روی حسگرهای تجزیه و تحلیل زمانی بریلوئن ۱۱۰
۵-۴-۱ مقدمه ۱۱۰

۵-۴-۲ مدل تئوری ۱۱۱
۵-۴-۳ اثبات تجربی ۱۱٤
۵-۵ اثر استفاده از باند دوگانه برای موج کاوشی بر روی عملکرد حسگر توزیعی بریلوئن ۱۱٦
۵-۵-۱ مقدمه ۱۱٦
۵-۵-۲ مدل تئوری ۱۱۷
۵-۵-۳ نتایج شبیه‌سازی ۱۱۸
نتیجه‌گیری ۱۲۳
منابع ۱۲٤

فصل اول:

مقدمه

صنعت نفت همواره از اهمیت بالایی برخوردار بوده‌است و به علت هزینه‌های بالا در امر استخراج، پالایش و انتقال مواد پتروشیمی، ایمنی در این صنعت به منظور کاهش اتلافات و خسارات احتمالی موضوعی مهم و مورد توجه است. یکی از مواردی که در این زمینه مهم است بحث ایمنی در انتقال این مواد توسط لوله‌ها است[۱].

لوله‌هایی که وظیفه ی انتقال مواد نفتی را بر عهده دارند باید همواره از لحاظ فیزیکی کنترل شوند تا از نشت و شکست‌های احتمالی آنها جلوگیری شود، در گذشته کنترل این لوله‌ها کار مشکل و هزینه‌بری بود و به صورت بازدید کارشناسان فنی از لوله‌های انتقال صورت می‌گرفت و علاوه بر اینکه عملا کنترل تمام خط لوله با دقت بالا غیر ممکن بود، این امر کاری زمان بر نیز محسوب می‌شد، لذا توجه به فیبرهای نوری در این زمینه موجب تسهیل در این امر شد و مزایای به مراتب بالاتری را نسبت به روش‌های سنتی ارائه داد[۲].

این قبیل حسگرهای فیبر نوری در طول خط لوله که حتی تا چند ده کیلومتر هم می‌رسد امتداد می‌یابند و با در نظر گرفتن پدیده‌های فیزیکی که در ادامه‌ی بحث مطرح می‌شوند، محل نشتی و یا ترکیدگی لوله‌های نفتی را با دقت حدود ۱ متر و در زمان کوتاهی مشخص می‌کنند و لذا ایمنی کار بالا می‌رود و از وقوع انفجارهای مهیب و خطرناک که گاها شاهد آن هستیم و هزینه‌های بالایی را به بار می‌آورد، جلوگیری می‌شود[۹].

اساس کار این حسگرها بر پایه‌ی پراکندگی نوری استوار است به گونه‌ای که سیگنالی به عنوان سیگنال کاوشی [۱] در یک فیبر نوری که عموما تک مد است فرستاده می‌شود و این سیگنال هنگامی که به محل نشتی می‌رسد به علت اختلاف دمای ایجاد شده در طول فیبر، تغییراتی در خواص فیزیکی فیبر نوری در این فاصله رخ می‌دهد که منجر به پراکندگی‌های نوری از قبیل پراکندگی‌های رامان و بریلوئن می‌شود که باعث پراکندگی نور به سمت عقب با یک شیفت فرکانسی مشخص که با دما و فشار وارده بر آن مقطع از فیبر متناسب است می‌شود که با مقایسه این سیگنال برگشتی، که در محل نشتی و یا ترکیدگی، نسبت به سیگنال اصلی تغییر کرده‌است، با سیگنال اصلی، محل نشتی مشخص می‌شود[۸]، اما همانطور که می‌دانیم فیبر های نوری دارای اتلاف هستند و شدت سیگنال کاوشی در طول فیبر ثابت نیست وکاهش می‌یابد، حال چنانچه طول مسیر خیلی زیاد باشد، عملا سیگنال کاوشی

[۱] Probe

نمی‌تواند تا فواصل بالا با شدت یکسانی منتقل شود و حسگر کارایی لازم را نخواهد داشت[۴۴]. بنابراین هدف در این پایان نامه، بررسی سیستمی است که بتوان با استفاده از آن، این سیگنال ضعیف شده را تقویت کرد و تا فواصل طولانی منتقل کرد تا بتوان لوله های انتقال نفتی که طول زیادی دارند را مانیتور کرد و عملا دامنه ی استفاده از این تکنیک را بالا برد.

تقویت کننده‌ای که ما در اینجا مورد بررسی قرار داده‌ایم، تقویت کننده‌ی بریلوئن[۲] نامیده می‌شود، این تقویت کننده بر اساس پراکندگی بریلوئن عمل می‌کند[۱۲]. پراکندگی بریلوئن رفتاری غیرخطی است که در فیبر نوری رخ می‌دهد و ناشی از فونون‌های آکوستیکی‌ای است که به علت تغییرات دمایی در فیبر رخ می‌دهد به گونه‌ای که موجی که در فیبر منتشر می‌شود حین اندرکنش با موج آکوستیکی دچار پراکندگی می‌شود و موج پراکنده شده با وجود موج صوتی تقویت می‌شود که اساس کار در تقویت کننده‌های بریلوئن است[۱۳].

در فصل دوم، از این پایان نامه، ساز و کاری کلی از حسگرهای نشت لوله‌های نفتی را توضیح و تعریفی ابتدایی از پراکندگی‌های رامان و بریلوئن که در این حسگرها به کار می‌آیند را ارائه می‌دهیم[۳۹]. در فصل بعدی، به تفصیل، پراکندگی بریلوئن و معادلات و قوانین حاکم بر تقویت کننده‌های بریلوئن را بررسی می‌کنیم و حالاتی را در نظر می‌گیریم که در آن ضریب میرایی فیبر و نویز در نظر گرفته شده و تحلیل دقیق تری از سیستم را ارائه می‌دهیم[۲۵]- [۳۴]. در فصل چهارم انواع حسگرهای فیبر نوری مناسب جهت نشت یابی خطوط لوله نفتی را بررسی می‌کنیم و توجه خود را بیشتر معطوف به حسگرهای مبتنی بر بریلوئن قرار می‌دهیم[۴۴]. در فصل پنجم بحث بهینه‌سازی حسگرهای مبتنی بر بریلوئن را مطرح کرده و تعدادی از روش‌های انجام گرفته که به منظور بهینه‌سازی این قبیل حسگرها وافزایش دقت و حساسیت آنها صورت گرفته را بررسی می‌کنیم[۵۳]. نهایتا در بخش نتیجه‌گیری، نتایج کلی کار صورت گرفته را ارائه می‌دهیم.

[۲] Brillouin Fiber Amplifier

فصل دوم:

پراکندگی نور، اساس حسگرهای نشت لوله‌های نفتی

۲-۱ معرفی

قیمت روز افزون انرژی، دغدغه های زیست محیطی و نگرانی از ایمنی خطوط لوله در عبور از مناطق مسکونی، سیستم های مونیتورینگ و نشت یابی را جزء لاینفک تاسیسات زیرینایی خطوط انتقال قرار داده‌است. امروزه سیستم‌های نشت یابی بسیار متنوعی ارائه شده‌است که هر کدام با استفاده از تکنیکی خاص سعی در شناسایی دقیق و سریع محل نشتی دارند. ساختار عملکردی بسیاری از این سیستم ها ساده و برخی پیچیده می‌باشند. اما هنوز هیچ کدام از این سیستم ها نتوانسته‌اند به طور کامل همه انتظارات را برآورده کنند. این فصل به معرفی تکنولوژی نشت یابی خطوط لوله سیالات مایع و گاز مبتنی بر حسگر نوری می‌پردازد.

حسگرهای نوری گسترده دارای خصوصیات برجسته و منحصر به فردی در مونیتورینگ خطوط لوله هستند که نمونه آن در تکنیکهای متدوال موجود نیست. اساس این نوع حسگر ها، پراکندگی‌هایی است که در فیبر نوری رخ می‌دهند و قابلیت اندازه گیری دما و کرنش در هزاران نقطه در طول فیبر نوری به طور خاص جهت یک سازه طولانی مثل خطوط لوله ، خطوط جریان ، چاههای نفت و ... را فراهم می کنند[۱].

نوعی از اندرکنش بین میدان الکترومغناطیسی و یک جسم مادی که منجر به انحراف نور فرودی می‌شود، پراکندگی نور نامیده می‌شود[۲]. مواردی که برای مشخص‌کردن پراکندگی در ماده مهم هستند شامل: موج فرودی، جسم پراکننده و موج پراکنده‌شده می‌باشند. پراکندگی‌های نوری به دو نوع کشسان و غیرکشسان قابل تقسیم هستند. در حالتی که پراکندگی کشسان رخ می دهد، بسامد موج نوری فرودی دچار تغییر نمی‌شود اما هنگامی که پراکندگی ناکشسان رخ می دهد، در بسامد موج فرودی تغییر ایجاد می‌شود. از پراکندگی‌های کشسان نوری که در ماده رخ می‌دهد می‌توان به پراکندگی ریلی[۳] و پراکندگی می[۴] اشاره کرد[۲]. پراکندگی‌های بریلوئن و رامان نیز مثال‌هایی از پراکندگی‌های غیرکشسان نور می‌باشند. در ادامه فصل، این قبیل پراکندگی‌ها را به اختصار توضیح می‌دهیم.

[۳] Rayleigh Scattering
[۴] Mie Scattering

۲-۲ انواع پراکندگی های نوری

۲-۲-۱ پراکندگی ریلی

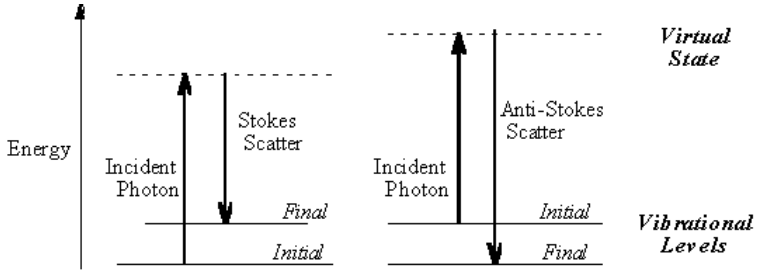
این پراکندگی در اثر برهم کنش امواج نوری با ذراتی که کوچکتر از طول موج می باشند رخ می دهد، این پراکندگی به علت وجود نوسانات چگالی غیرمتحرک است. رنگ آبی آسمان یا رنگ قرمز خورشید به هنگام طلوع وغروب به دلیل همین پراکندگی ریلی است[۳].

۲-۲-۲ پراکندگی می

چنانچه اندازه‌ی ذرات پراکننده در مقایسه با پراکندگی ریلی بزرگ‌تر باشد و از مرتبه طول موج نور فرودی باشد، پراکندگی می رخ می‌دهد. تفاوتی که این نوع پراکندگی با پراکندگی ریلی دارد این است که، پراکندگی ریلی در تمام جهات رخ می دهد ولی پراکندگی می، برای ذراتی که اندازه آنها بزرگتر است، شدت موج پراکنده شده در یک جهت بیشتر خواهد بود، سفیدی ابرها نمونه‌ای از این نوع پراکندگی است[۴]. در این نوع پراکندگی، شکل ماده تعیین‌کننده میزان پراکندگی است و برای اجسام کروی، شبه کروی و بیضوی کاربرد دارد و شدت این پراکندگی مستقل از طول موج نور فرودی است[۴].

۲-۲-۳ پراکندگی رامان

پراکندگی رامان در واقع پراکندگی نور از مدهای ارتعاشی مولکول‌های ماده است، در نتیجه این پراکندگی، موج پمپ دچار انتقال فرکانسی می‌شود و به امواج با فرکانس کمتر یعنی استوکس و یا با فرکانس بیشتر یعنی پاداستوکس تبدیل می شود، بخشی از انرژی آن هم به صورت فونون در محیط منتشر می گردد. جابجایی بسامدی که به علت پراکندگی رامان رخ می‌دهد برای ماده‌ای مثل سیلیکا، از مرتبه ۱۰ THz است[۵]. شدت امواج استوکس در مقایسه با پاداستوکس بیشتر است، چرا که برای ایجاد موج پاداستوکس، ترازهای مولکولی باید در ابتدا در حالت برانگیخته باشند، سپس به تراز پایه برگردند، اما موج استوکس با انتقال ترازهای مولکولی از حالت پایه به حالت برانگیخته و نهایتا تابش فوتون استوکس همراه است، و چون در حالت تعادل گرمایی، طبق توزیع بولتزمن،جمعیت حالت پایه از برانگیخته بیشتر است، لذا موج استوکس، شدت بیشتری خواهد داشت. شکل ۲-۴، امواج استوکس و پاداستوکس را با نمایش ترازهای انرژی ماده نشان می‌دهد[۵].



شکل ۲-۴، نمایش پراکندگی‌های استوکس و پاداستوکس حین پراکندگی رامان[۵].

۲-۲-٤ پراکندگی بریلوئن

پراکندگی بریلوئن، همانند پراکندگی رامان، اثری غیر خطی در ماده است که به صورت پراکندگی موج نوری منتشر شده در ماده، از فونون های صوتی تعریف می شود. موج نوری که در ماده منتشر می شود، چنانچه به یک موج صوتی برخورد کند، بخشی از انرژی خود را به صورت امواج با فرکانس پایین تر استوکس و یا با فرکانس بالاتر پاد استوکس پراکنده می کند، که طبق توزیع بولتزمن، نظیر پراکندگی رامان، شدت امواج استوکس بیشتر است و این امواج در تقویت کننده بریلوئن اهمیت بیشتری دارند. جابجایی فرکانسی ایجاد شده ناشی از پراکندگی بریلوئن برای ماده سیلیکا، از مرتبه ۱۰ GHz است[۶].

چنانچه موج سیگنالی که با موج استوکس تولید شده همفاز باشد در محیط منتشر شود، به پراکندگی صورت گرفته، پراکندگی القایی بریلوئن گفته می شود، که باعث تقویت سیگنال ورودی می گردد.

علاوه بر تفاوت ماهیتی پراکندگی بریلوئن و رامان، تفاوت دیگری که در این دو پدیده وجود دارد این است که در پراکندگی بریلوئن، موج پراکنده شده به سمت عقب منتشر می شود بنابراین برای تقویت موج سیگنال ورودی، موج پمپ فقط در خلاف جهت سیگنال ورودی می تواند در فیبر منتشر شود. این پدیده به تفصیل در فصل های بعدی بررسی خواهد شد.

در جدول ۱-۱، مقایسه ای بین پراکندگی های رامان، بریلوئن و ریلی که جزو پراکندگی های غالب در فیبر نوری هستند انجام شده است[۶].

جدول ۱-۱، مقادیر نوعی پارامترهایی که برخی فرآیندهای نوری را توصیف می کنند[۶].

فرآیند	جابجایی (cm^{-1})	پهنای باند (cm^{-1})	طول عمر (sec)	بهره (m/MW)
رامان	۱۰۰۰	۵	$۱۰^{-۱۲}$	۵×۱۰^{-۵}
بریلوئن	۰.۱	۵×۱۰^{-۳}	$۱۰^{-۹}$	$۱۰^{-۴}$
ریلی	۰	۵×۱۰^{-۴}	$۱۰^{-۸}$	$۱۰^{-۶}$

۲-۳ مبانی حسگرهای توزیعی

پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی فیبرهای گسترده امکان مونیتورینگ بیش از ۶۰ کیلومتر از طول خط لوله را تنها به کمک یک وسیله اندازه‌گیری ممکن می سازد. این طول با استفاده ازتقویت کننده های نوری تا ۳۰۰ کیلومتر نیز قابل گسترش است. لازم به ذکر است برخی از کابل‌های مخابراتی برای اندازه‌گیری دما در رنج نرمال قابل استفاده هستند. مونیتورینگ دماهای بالا یا پایین و همچنین کرنش در طول سازه چالش‌های جدیدی به شمار می‌روند که نیازمند طراحی ویژه ای برای کابل هستند. [۷]

خطوط لوله و خطوط انتقال گاز اغلب از نواحی‌ای عبور می‌کنند که از نقطه نظر قرارگیری در معرض لغزش، نشت زمین و زمین‌لرزه خطرناکند. ضمناً مواردی چون خرابکاری عوامل انسانی (به صورت عمدی یا تصادفی) و انسداد مسیر عبور سیال به واسطه تشکیل یخ و ... نیز می‌توانند بهره‌برداری از خط را مختل نمایند.

این خطرات بالقوه به طور موثری 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. مونیتورینگ ساختاری و عملکردی به طور موثری می‌تواند ایمنی و مدیریت خط لوله را بهبود بخشد. به این منظور باید پارامترهایی که نماینده شرایط عملکردی و ساختاری خط لوله هستند گردآوری گردند. مونیتورینگ 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. نتیجتاً با افزایش ایمنی، هزینه‌های بهره‌برداری بهینه شده و اتلاف منابع اقتصادی به حداقل می‌رسد.

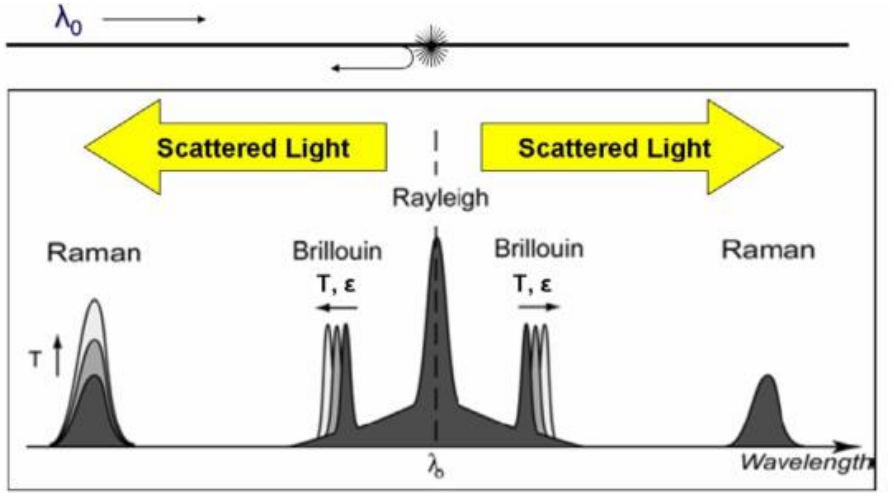
پارامترهای ساختاری خطوط که باید مونیتور شوند عبارتند از کرنش و انحنا و پارامترهای کارکردی مورد توجه عبارتند از توزیع دما ، نشتی و ورود متجاوز به حریم خط دفن شده. از آنجایی که خطوط جریان دارای ساختار لوله‌ای با طولهایی در رنج چندین کیلومتر هستند، مونیتورینگ کل طول ساختار سازه خود یک مساله است. استفاده از سنسورهای مجزا تقریباً غیر عملی است، زیرا این کار نیازمند نصب هزاران سنسور و کابل‌کشی پیچیده و طراحی یک سیستم جمع آوری اطلاعات است، که علاوه بر هزینه اولیه، هزینه بهره‌برداری بسیار زیادی به همراه دارد. بنابراین کاربرد سنسورهای مجزا با شرایط فوق صرفاً محدود به بخش‌های محدودی از خط لوله می گردد و قابل تعمیم به کل طول خط نیست. روش متداول دیگر مبتنی است بر اندازه گیری دبی سیال در ابتدا و انتهای خط لوله که تفاوت اعداد قرائت شده به عنوان نشانه ای از وجود نشتی در یک مکان نامشخص در طول خط تلقی می گردد [۸].

پیشرفتهای اخیر در تکنیک‌های اندازه گیری دما و کرنش با استفاده از سنسور فیبر نوری گسترده مبتنی بر اثر پراکندگی بریلوئن، ابزاری اقتصادی به دست می‌دهد که امکان مونیتورینگ در طول مسیرهای چندین کیلومتری را فراهم می سازد. بنابراین، با استفاده از تعداد محدودی از سنسورهای بسیار طویل، پارامترهای ساختاری خطوط لوله (کرنش ، خمش و ...) و پارامترهای عملکردی (توزیع دما، نشتی و ...) با دقت و رزولوشن فاصله ای بسیار خوب و با هزینه ای قابل قبول مونیتور می گردد [۹].

سنسور گسترده، ابزاری است با اندازه گیری خطی، که قادر به اندازه گیری پارامتر اندازه گیری در هر نقطه از طول خود می باشد. سنسورهای گسترده فیبر نوری شامل یک رشته فیبر نوری هستند که دارای حساسیت اندازه گیری در تمام طول خود می باشند. بنابراین یک رشته از فیبر نوری جایگزین هزاران سنسور مجزا[۵] می گردد. تضعیف کم فیبر نوری امکان مونیتورینگ فواصل بسیار طولانی (تا ۲۵ کیلومتر) را فراهم می کند، این طول نماینده تعداد قابل توجهی از نقاط اندازه گیری است . توسعه سیستم سنسورهای نوری گسترده، مبتنی بر روش شناخته شده و تکرار پذیری است که در آن تغییرات پارامتر اندازه گیری با نور منشر شده در داخل رشته نوری مرتبط است[۱۰].

[۵] Point sensor

اندازه‌گیری دما با آنالیز پاشش نور ناشی از اثر پراکندگی رامان انجام می شود. در شکل ۱-۱، پراکندگی های بریلوئن،رامان و ریلی در محل نشتی نشان داده شده اند [۱۰].



شکل ۱-۱، پاشش نور ناشی از پدیده فیزیکی پراکندگی بریلوئن و رامان[۱۰].

سیستم مانیتورینگ پیوسته دما[۶]، توسعه داده شده توسط کمپانی اسمارتک[۷] سوئیس بر اساس پدیده فیزیکی پراکندگی رامان،تغییرات محلی دما را جهت شناسایی نشتی، آنالیز می نماید. طبق این اصل نور لیزر تابیده شده در سنسور نوری در محلی که از لحاظ پروفایل دمایی متفاوت از باقی مسیر است دچار شیفت فرکانسی می شود. شیفت فرکانسی با تغییرات دمایی (در رنج دمایی سنسور نوری) رابطه کاملاً خطی دارد. بر اساس طیف سنجی صورت گرفته محل این شیفت فرکانسی با دقت ۱ تا حداکثر ۲ متر در زمان بسیار کمی (۱ تا ۸۰ دقیقه) تشخیص داده می شود. ار آنجایی که تغییر دما به واسطه نشت سیال فرایندی حادث گردیده است این تغییر دما (شیفت فرکانسی) به صورت آلارم نشت سیال درسیستم ثبت و گزارش می‌گردد. الگوریتم تشخیص محل نشت بر اساس مقایسه پروفایل دمایی برداشت شده با پروفایل دمایی مرجع استوار است. پروفایل دمایی مرجع در شرایط نرمال وبه هنگام راه اندازی در پایگاه داده سیستم ثبت می گردد. در پروفایل نسبی دما قله یا دره دمایی نشان از ناهنجاری نقطه ای دما در بخشی از طول خط لوله می باشد که ممکن است به دلیل نشت سیال یا خاک برداری در طول مسیر خط (متجاوز خارجی) حادث شده باشد [۱۱].

[۶] Distributed temperature monitoring system
[۷] Smartec

۲-٤ معماری سیستم نشت یابی مبتنی بر حسگر نوری

بخش‌های اصلی سیستم شامل دستگاه قرائت (تحلیل‌گر) و کابل حسگر است. تحلیل‌گر به انتهای کابل سنسور وصل می شود، امکان نصب تحلیل‌گر در فضایی دور از ناحیه نصب حسگر نیز وجود دارد، در این حالت بخشی از کابل فیبر نوری به عنوان کابل هادی[۸]، وظیفه اتصال و انتقال اطلاعات حسگر به آنالایزر را دارد. استفاده از تقویت کننده، امکان مونیتورینگ بیش از ۳۰۰ کیلومتر خط لوله را با یک سیستم اندازه‌گیری فراهم می‌کند [۱۱]. پارامترهای عملکردی سیستم نمونه متعلق به کمپانی اسمارتک سوئیس در جدول ۱ ذکر شده است[۱۰].

جدول ۱-۱، عملکرد سیستم نشت یابی خطوط لوله به صورت نوعی (اطلاعات جدول مربوط به سیستم مانیتورینگ پیوسته دمای شرکت اسمارتک است) [۱۰].

رنج اندازه گیری	تا ۳۰۰ کیلومتر
تعداد خطوط لوله موازی قابل قرائت با یک دستگاه قرائت	۶۰ خط لوله موازی
رزولوشن دمایی سیستم	۰/۱ °C
سرعت تعیین وقوع نشتی	۱ تا ۸۰ دقیقه
تعیین محل دقیق بروز نشتی	دقتی بهتر از ۲ متر
رنج دمایی کابل سنسور	-۲۷۰° C -- +۵۰۰° C

۲-۵ طراحی کابل حسگر

حفاظت رشته نوری از هر گونه اثر خارجی اساس طراحی کابل نوری سنتی بوده است. مشخصاً لازم است که کابل از نفوذ رطوبت، فشار جانبی، کرنش طولی، شکستگی حفاظت شود. این طراحی‌ها کابل نوری مناسبی جهت کاربری‌های طولانی مدت در شبکه‌های مخابراتی و مونیتورینگ دما در رنج ۲۰- تا ۶۰ + درجه سانتیگراد با اثر پراکندگی بریلوئن و رامان، به دست می‌دهد[۱۰].

[۸] Lead cable