

مروری بر روش‌های شناسایی نشتی گاز در تأسیسات و خطوط لوله گاز

مهدی احمدی^۱، سروش برادران^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، سازمان جهاد دانشگاهی تهران

۲- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، سازمان جهاد دانشگاهی تهران

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۰۳

پیام‌نگار: S.baradaran@ut.ac.ir

چکیده

نشتی گاز طبیعی از تأسیسات و خطوط انتقال، علاوه بر مشکلات ایمنی و اقتصادی، پیامدهای زیست‌محیطی مانند تشدید اثر گلخانه‌ای خواهد داشت. به منظور پیشگیری و شناسایی زود هنگام نشتی گاز، روش‌های مختلفی ابداع شده که بر حسب سازوکار و فناوری به کار رفته، قادر به تشخیص، تعیین مکان و حتی برآورد میزان نشت گاز خواهند بود. در این پژوهش، این روش‌ها در قالب دو دسته کلی، روش‌های فنی و غیرفنی، بررسی و مقایسه شده‌اند. اساس روش‌های غیرفنی بر پایه تغییرات محیطی استوار است، در حالی که روش‌های فنی عموماً دارای حسگر یا آشکارسازند، که به محض تماس با گاز، تغییر مشخصی در سیستم را برای اندازه‌گیری اعمال کنند. در پایان، سیستم‌های نشتی یابی به صورت کیفی بر اساس قابلیت تعیین مکان نشتی، سرعت تشخیص، برآورد میزان نشتی، سهولت و هزینه بررسی شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: نشتی گاز، روش‌های تشخیص نشتی، تعیین مکان نشتی، خطوط لوله گاز، حسگر متان.

۱. مقدمه

قانونی را نیز در پی دارد، به تحمیل هزینه‌های تعمیر و تعویض خط لوله و هدر رفتن بخشی از محصول یا خوراک می‌انجامد. از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۶ بیش از ۸۰ مورد نشتی از خطوط لوله در خلیج مکزیک گزارش شده است، که بر این اساس احتمال شکستگی و گسیختگی خطوط در سال ۴۳٪ است [۱]. بر اساس گزارش دیگری، در فاصله سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵، ۱۳۲۶ مورد نشتی در آلبرتای کانادا اعلام شده است. این گزارش‌ها و گزارش‌های مشابه گویای این نکته است که در خطوط با طول بیش از ۱۲۸۰ کیلومتر، دست‌کم سالی یک حادثه مرتبط با نشتی رخ داده است [۱].

نشتی گاز از تأسیسات انتقال و توزیع گاز، علاوه بر آسیب‌های انسانی و هدر رفتن سرمایه، از عوامل مؤثر در افزایش گازهای

با وجود پیش‌بینی‌ها برای جلوگیری از نشت گاز از تجهیزات و خطوط لوله در مرحله طراحی، به دلایل گوناگونی مانند مسائل طراحی، فرسودگی و خوردگی لوله‌ها و مخازن، عوامل محیطی چون سرما، یخبندان، گرما و دیگر عوامل محیطی، در کنار خسارت‌های عمدی و سهوی وارد شده به شبکه و تأسیسات و نیز عملیات خارج از محدوده طراحی که ممکن است به لوله‌ها و مخازن آسیب برساند، احتمال بروز نشتی پیش می‌آید. نشت گاز علاوه بر ایجاد مخاطرات زیست‌محیطی و ایمنی مانند انفجار و مسمومیت آدمیان و دیگر موجودات زنده که احتمال محکومیت به پرداخت جریمه‌های

* تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، جهاد دانشگاهی مرکز خدمات تخصصی نفت، گاز و پتروشیمی

ورودی‌های مشخصی از اپراتور انسانی و سپس پردازش آن داده‌ها هستند (مانند روش‌های آماری یا پردازش سیگنال دیجیتالی).

- تشخیص دستی^۴: سامانه و ابزارهایی که باید مستقیماً توسط شخص به کار گرفته شوند. (مانند تصویربرداری گرمایی یا ابزارهای LIDAR).

اساس اغلب فناوری‌های تشخیص نشتی، اندازه‌گیری یک کمیت فیزیکی یا ظهور یک پدیده فیزیکی خاص، مانند: تغییر در صوت، شدت جریان، فشار، غلظت گاز، نور و گاهی ترکیب درصد است. بنابراین، تفکیک نوع پدیده اندازه‌گیری شده نیز روش دیگری برای دسته‌بندی خواهد بود.

روش‌های تشخیص نشتی را از لحاظ تماس با نشتی به صورت مستقیم یا نامستقیم نیز دسته‌بندی می‌کنند [۷ و ۱]. در برخی مقالات به دلیل تنوع زیاد روش‌های نوری، اغلب روش‌های تشخیص نشتی را به نوری و غیرنوری نیز تقسیم‌بندی کرده‌اند [۸ و ۹]. در پژوهش حاضر، مطابق شکل (۱)، روش‌ها بر مبنای سازوکار عملکردی، به دو دسته روش‌های غیرفنی (زیستی) و فنی تقسیم شده‌اند. روش‌های فنی به دلیل تنوع بیشتر روش‌های نوری، به دو زیرمجموعه روش‌های نوری و غیرنوری تقسیم‌بندی می‌شوند.

۲. انواع روش‌های شناسایی نشتی بر اساس کمیت اندازه‌گیری

۲-۱ روش‌های غیرفنی (زیستی)^۵

اساس این روش بر درک تغییرات محیطی ناشی از نشت گاز مانند: رنگ، بو، صدا و دیگر تغییرات محیطی، توسط انسان‌ها یا حیوانات آموزش دیده مانند سگ‌های حساس به بو برای یافتن محل نشتی در طول خط یا تجهیزات استوار است. تجربه و آموزش بازرس دو عامل تأثیرگذار در موفقیت این روش به شمار می‌آیند. بنابراین، گازها با مرکپتان و سایر بودارکننده‌ها بودار می‌شوند، تا افراد در غلظت مناسبی زیر حدود انفجاری به وجود نشتی پی ببرند. معمولاً غلظت مواد بودارکننده در گاز بین ۰/۵ تا ۱ درصد حجمی است، که این مقدار ممکن است بر مبنای قوانین محلی تغییر کند. بوی گاز یکی از روشهای متداول و مؤثر نشان دادن نشتی است. این روش

گلخانه‌ای به شمار می‌رود. تحقیقات انجام شده تا سال ۲۰۰۸ نشان می‌دهد که، نشتی گاز متان از مراکز انتقال و توزیع گاز و پالایشگاه‌های گازی ایالات متحده تا آن سال به ایجاد انحراف ۴۶ درصدی از اهداف برنامه سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده منجر شده است [۴-۲]. بر همین اساس و در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای پس از نشست ناکام کپنهاگ (۲۰۰۹)، سرانجام در اجلاس پاریس، سران ۱۸۹ کشور عضو سازمان ملل تعهداتی را در خصوص کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای خود به منظور مهار افزایش دمای دو درجه سلسیوسی تا سال ۲۱۰۰ به تصویب رساندند. در این میان، جمهوری اسلامی ایران با سهم ۱/۷ درصدی به عنوان هشتمین کشور گسیلنده گازهای گلخانه‌ای، ملزم شد که حجم انتشار خود را در صورت رفع کامل تحریم‌های هسته‌ای تا ۱۲ درصد کاهش دهد. در پی این تعهد، سازمان‌های زیست‌محیطی در سال‌های آتی بر حجم بازرسی‌ها و کنترل انتشار از واحدهای صنعتی خواهند افزود [۵]. بنابراین، دو حامل اقتصادی و زیست محیطی عوامل رویکرد جدی و علمی برای حل این مسئله مهم‌اند. از آنجا که نخستین گام برای حل هر مسئله تعریف صورت مسئله است، تبیین وضعیت موجود کشور از نظر میزان انتشار سالیانه در بخش‌های مختلف با ابزار مناسب امری ضروری است. به این منظور، در پژوهش حاضر با تمرکز بر این موضوع به دسته‌بندی، ارزیابی و مقایسه کیفی انواع روش‌ها و فناوری‌های به کار رفته در نشتی‌یابی تأسیسات پرداخته شده است. به طور کلی، دسته‌بندی روش‌های نشتی‌یابی با سه معیار زیر انجام می‌شود:

الف. میزان نیاز به مداخله انسانی

ب. کمیت فیزیکی اندازه‌گیری شده

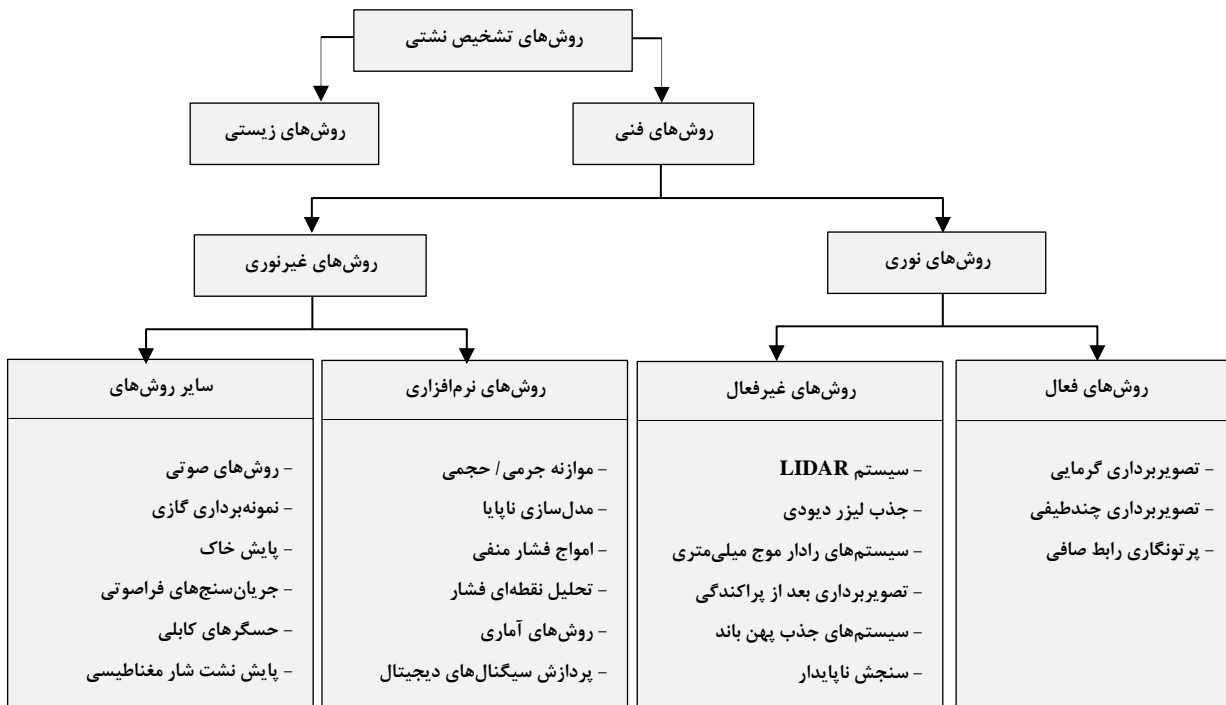
ج. نوع فناوری

از لحاظ میزان نیاز به مداخله انسانی، می‌توان این روش‌ها را در چند دسته زیر گنجاند [۶ و ۱]:

- تشخیص خودکار^۱: در این حالت سامانه پایش^۲ بدون نیاز به اپراتور انسانی، نشتی گاز را تشخیص می‌دهد (مانند: تارهای نوری و سایر حسگرهای کابلی).
- تشخیص نیمه خودکار^۳: روش‌هایی که نیازمند گرفتن

1. Automated Detection
2. Monitoring
3. Semi-Automated Detection

4. Manual Detection
5. Biological Methods



شکل ۱. دسته‌بندی روش‌های تشخیص نشتی.

با این وجود، اساساً برای تجهیزات روی زمین مفید و از سویی نیازمند بازرسی‌های مداوم دوره‌ای برای حصول اطمینان است [۹۱۰].

رشد گیاهان اطراف یک نشتی بسته به نوع خاک، گیاه، محیط، اقلیم و حجم و مدت نشتی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، تغییر رنگ گیاهان اطراف یک دستگاه یا خط لوله را می‌توان به عنوان یک تشخیص اولیه، نشتی، قلمداد کرد. در این روش تشخیص نشتی به دلیل روند کند تغییر گیاهان نیازمند زمان بیشتری خواهد بود. از سوی دیگر، این روش در مراکز توزیع و سایر تأسیسات متمرکز گازی به دلیل تجمع گاز امکان پذیر نیست [۹۱].

استفاده از سگ‌های تربیت شده حساس به بوی گاز روش دیگری برای یافتن نشتی است. میزان حساسیت این حیوانات در یافتن نشتی حدود ۱۰ ppb تا ۵۰۰ ppt برآورد شده است. از معایب استفاده از سگ‌ها این است که نمی‌توان بیش از ۳۰ تا ۱۲۰ دقیقه به صورت پیوسته آن‌ها را برای این منظور به کار گرفت. موفقیت این روش وابستگی زیادی به مهارت مربی در برآورد اولیه حوزه نشتی و مناطق جستجو و نیز بازه‌های زمانی بازرسی هم دارد. اجرای این روش در خطوط لوله و تأسیسات قابل دسترسی امکان‌پذیر خواهد بود [۹].

مستلزم بازرسی مداوم پرسنل در طول خطوط برای مشاهده آثار نشتی مانند تغییر رنگ گیاهان یا خشک شدن آنها در اطراف تجهیزات، بوی گاز و یا شنیدن صدای خروج گاز از قسمت‌های نشتی است. در مواردی مانند خطوط دفن شده زیر خاک یا نزدیکی مرداب و فاضلاب‌ها بوی گاز غیرقابل تشخیص خواهد بود و این روش مناسب نیست [۹ و ۸۱].

صدای نامتعارف از یک دستگاه که معمولاً به دلیل وجود نقص در اتصال، شکستگی لوله و یا یک حفره خوردگی است، روش متداول دیگری برای شناسایی نشتی گاز به‌شمار می‌آید. این روش هزینه و پیچیدگی خاصی ندارد و جزئی از کار روزمره بازرسان است؛ با این حال، از توانایی شناسایی نشتی‌های کوچک با تولید صدای کم برخوردار است [۹ و ۱].

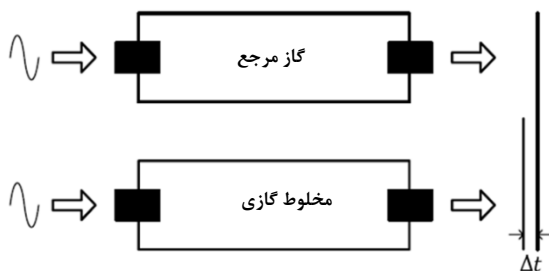
یک محلول صابونی می‌تواند محل نشتی گاز را به صورت حباب‌های کف در خطوط لوله، ریزرها، کنتورها، شیرها و اتصالات لوله نشان دهد. بازرسان پس از تمیز و جدا کردن پوشش عایق قسمت‌های با احتمال نشتی زیاد، با محلول صابونی وجود یا عدم نشتی را تأیید می‌کنند. این روش کم هزینه و نسبتاً سریع است، بنابراین می‌تواند برای بازرسی‌های مرسوم روزانه مفید واقع شود.

1. Riser

کنند. تعداد زیادی حسگر صوتی برای نظارت بر کل خطوط لوله مورد نیاز است که هزینه گزافی برمی‌دارد [۹]. جریان نوفه سایر تجهیزات مانند ابزارهای کنترل جریان، شیرها و پمپ‌ها ممکن است سیگنال نشتی واقعی را مختل کند. این فناوری برای شناسایی نشتی‌های کوچک، که نشر صوتی در سطوح پایین‌تر از نوفه‌های محیط ایجاد می‌کنند، مناسب نیست. با این حال، تحقیقات برای کاهش اثر نوفه‌های محیط و هشدار اشتباه ادامه دارد [۱۱ و ۱۲].

روش‌های صوتی بر اساس پارامتر مورد بررسی، به سه دسته کلی، سرعت صوت، میرایی و امپدانس صوتی^۳ تقسیم می‌شوند. شناسایی نشتی بر مبنای تعیین سرعت صوت از تحلیل زمان عزیمت (TOF)^۴ امواج صوتی بهره می‌گیرد و از زمان عزیمت یک موج صوتی در فاصله‌ای معین برای محاسبه‌ی گسترش امواج صوت استفاده می‌شود [۷].

در شکل (۲) دو کانال کاملاً شبیه به هم را مشاهده می‌کنید، که به ترتیب، پارامترهای گسترش شدت صوت (مانند اختلاف زمان ΔT یا فاز سرعت موج) در گاز مرجع و گاز مخلوط مورد نظر را اندازه می‌گیرند.



شکل ۲. طرح نموداری روش آشکارسازی صوتی بر مبنای زمان عزیمت [۷].

با این احوال که آثار محیطی بر دو کانال یکسان نیست، روش شناسایی شدت صوت، همچنان دقت زیادی برخوردار است. محققان یک TOF را برای مخلوط‌های دو جزئی طراحی کرده‌اند که از یک کانال برای مخلوط گازی بهره می‌گیرند و از روابط بین سرعت صوت در هوا و دمای هوا برای تعریف سرعت استاندارد مرجع (C_R) و سپس از اختلاف زمان انتقال (ΔT) در هوا و گازهای هدف سود می‌جوید. سرعت گاز اندازه‌گیری شده برای تعیین بسیاری از

از روش‌های دیگری که می‌توان در خلال بازرسی‌های چشمی خطوط و تأسیسات از آن سود جست، دقت به تجمع حشرات و رشد قارچ‌ها در نواحی نشتی به دلیل تجزیه میکروبی برخی اجزای گاز است. تجمع حشرات، بخصوص نزدیک رایزرها و کنتورها یا رگولاتورها (تنظیم‌کننده‌های فشار) می‌تواند نشانه وجود نشتی باشد. رشد قارچ‌ها^۱ نیز در جعبه کنترلی شیرها و سایر نقاط تاریک‌تر ممکن است نشانه نشتی باشد. این قارچ‌ها در نواحی با غلظت زیاد گاز و اکسیژن کم رشد می‌کنند. رنگ آنها عموماً سفید یا سفید متمایل به خاکستری است. این روش نیز برای تشخیص اولیه به کار می‌رود و تشخیص صحت آن و میزان نشتی نیازمند استفاده از ابزار مناسب خواهد بود [۹].

۲-۲ روش‌های فنی

مطابق شکل (۱)، روش‌های فنی به دلیل تنوع روش‌های نوری به دو دسته نوری و غیرنوری تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های غیر نوری طیف وسیعی از روش‌ها با سازوکار متفاوت را در بر می‌گیرند. در ادامه به بررسی این روش‌ها پرداخته می‌شود:

۱-۲-۲ روش‌های غیرنوری

۱-۱-۲-۲ روش‌های صوتی^۲

به جای روش‌های شیمیایی به دلیل طول عمر کوتاه، آلودگی ثانویه و عدم قابلیت شناسایی از راه دور، روش‌های به‌روزتری چون روش‌های صوتی قرار گرفته‌اند. در روش صوتی، امواج ناشی از نشتی را تحلیل می‌کنند. وقتی دیواره یک خط لوله گاز دچار نشتی می‌شود، گاز به صورت جت با سرعت زیاد از آن خارج می‌شود، که امواج فشاری را تشکیل می‌دهد، که به هر دو طرف لوله حرکت می‌کنند و می‌توانند تحلیل و شناسایی شوند [۶]. حسگرهای گسیل صوتی برای ثبت این سیگنال‌ها به کار می‌روند. این حسگرها می‌توانند به صورت دستی در ابزارهای شناسایی توسط بازرسان خط یا به صورت رسوبگیرهای هوشمند در خط لوله به کار گرفته شوند. نظارت مداوم بر خط لوله با نصب حسگرهای صوتی بیرون خط و در فواصل معین با یکدیگر، امکان‌پذیر است. روش‌های صوتی می‌توانند بدون تداخل در عملکرد خط، محل و اندازه نشتی را نیز برآورد

3. Acoustic Impedance
4. Time of Flight

1. Fungus-Like Growth
2. Acoustic Methods

الف. حسگرهای گرماسنجی

پلیستورها^۵ دسته‌ای از حسگرهای جامد گازند، که برای شناسایی گازهای قابل احتراق یا گازهای با رسانندگی متفاوت با هوا به کار می‌روند. حسگر این وسیله از دانه‌های کوچک کاتالیستی واقع در درون سرامیک، تشکیل شده است، که مقاومت آنها در حضور گاز تغییر می‌کند. حد شناسایی (LOD)^۶ برای این حسگرها، معمولاً در حدود قسمت در هزار (ppth) است، که برای سناریوهای صنعتی کافی است، اما برای کاربردهای آزمایشگاهی مناسب نیست [۷].

به طور مشخص، پلیستورها، به دو دسته کاتالیستی^۷ و رسانایی گرمایی^۸ تقسیم می‌شوند. در هر مورد، تغییر دمایی بر اثر گرمای واکنش گاز نمونه ایجاد می‌شود، که سپس با یک شناساگر تغییر مقاومت دمایی پلاتینی یا یک ترمیستور اندازه‌گیری می‌شود [۷]. حسگرهای کاتالیستی، گرمای آزاد شده از اکسایش کاتالیستی آنالیت گازی را اندازه می‌گیرند و متداول‌ترین نوع پلیستورها به‌شمار می‌آیند. این حسگرها با سوزاندن گاز مورد نظر، یک آنتالپی احتراق معین تولید می‌کنند و با این کار امکان تعیین غلظت‌های پایین در زمان کوتاه فراهم می‌آید [۱۹].

حسگرهای کاتالیستی در حکم جانشینی برای لامپ ایمن شعله، دقت آنالیز را بالا می‌برند و اختلال کمتری نیز دارند. با این وجود، این لامپ‌ها از مشکلات مسمومیت کاتالیست در حضور برخی ناخالصی‌های گاز که موجب برگشت‌ناپذیر شدن و کاهش فعالیت کاتالیست می‌شود، در امان‌اند. در شکل (۳) طرح نموداری یک حسگر کاتالیستی را مشاهده می‌کنید. لایه کاتالیست روی یک دانه سرامیکی کشیده می‌شود، که شامل یک سیم‌پیچ پلاتینی به عنوان گرماسنج است. سیم‌پیچ پلاتینی تا زمانی که دمای لایه کاتالیستی از ۵۰۰°C گذارند و گازهای قابل احتراق روی سطح لایه کاتالیستی سوزانده شوند، به عنوان منبع گرما، عمل می‌کند. گرمای تولیدی باعث تغییر در مقاومت سیم‌پیچ شده و این تغییر از طریق یک مدار ساده مانند پل وتستون^۹ قابل اندازه‌گیری است [۲۰ و ۷].

خواص گاز، مانند غلظت گاز هدف، بر اساس این مدل ریاضی، که با اختلاف زمان گسترش صوت متناسب است، استفاده می‌شود. بر اساس معادلات ترمودینامیکی، جزء مولی گازهای مختلف در مخلوط نیز قابل دستیابی خواهد بود [۱۳].

به افت انرژی یا پراکندگی انرژی امواج صوتی در طول مسیر حرکتشان در یک محیط میرایی^۱ می‌گویند. گازهای مختلف، خاصیت میرایی متفاوتی ایجاد می‌کنند. روش میرایی با متلاطم شدن جریان، وجود قطرات و ذرات در گاز یا حتی خرابی مبدل الکتریکی در طول زمان تحت تأثیر قرار می‌گیرد، که باعث می‌شود این روش نسبت به روش شدت صوت کاربرد کمتری داشته باشد و تجاری شدن آن نیز دشوارتر باشد [۱۴ و ۱۵].

حاصل‌ضرب سرعت صوت و چگالی گاز را امپدانس صوتی^۲ می‌گویند. بر این اساس با اندازه‌گیری امپدانس صوتی و سرعت گاز، غلظت گاز به دست خواهد آمد. اما، اندازه‌گیری امپدانس صوتی گاز در عمل، به ویژه در محیط فرایندی بسیار دشوار است. بنابراین، مانند روش میرایی، روش امپدانس صوتی نیز در صنعت کاربرد چندانی ندارد [۱۶ و ۱۷].

۲-۲-۲- نمونه‌برداری گازی^۳

نشتی را با نمونه‌برداری از هوای مجاور خط لوله نیز می‌توان تشخیص داد. این فناوری می‌تواند از طریق سیستم نظارت گازی، که شامل یک حسگر لوله‌ای خاک شده در مجاور و در طول خط است، یا به کمک شناساگرهای قابل جابه‌جایی که پرسنل یا سوار بر وسایل نقلیه کنترل از راه دور (ROVs)^۴ آنها را حمل می‌کنند، به کار می‌روند. به دلیل حساسیت زیاد این حسگرها، نشتی‌های کوچک نیز قابل شناسایی خواهند بود. همچنین این فناوری مصون از هشدار اشتباه است. با این حال، این روش علاوه بر هزینه گزاف، در خطوط لوله خیلی عمیق یا خیلی مرتفع قابل اجرا نیست. هرچند این روش به خصوص برای نشتی‌های کوچک بهتر از روش‌های غیرفنی عمل می‌کند، ولی موفقیت آن به بازه‌ی زمانی بازدید بستگی دارد. این نمونه‌گیری از طریق دستگاه‌های قابل حمل مجهز به حسگرهای جامد انجام می‌گیرد. متداول‌ترین حسگرها را در ادامه معرفی خواهیم کرد [۱۸ و ۷].

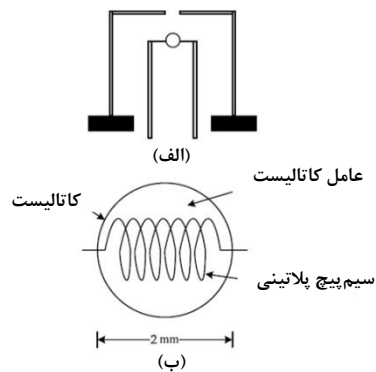
5. Pellistor
6. Limit Of Detection
7. Catalytic
8. Thermal Conductivity (TC)
9. Wheatstone Bridge Circuit

1. Attenuation
2. Acoustic Impedance
3. Gas Sampling
4. Remotely Operated Vehicles

حسگرهای گرماسنجی عموماً با مشکل عدم انتخاب‌پذیری مواجه‌اند، که ناشی از سازوکار فیزیکی ذاتی آنهاست. بسیاری از گازهای خالص (یا مخلوط‌ها) آنتالپی احتراق یا رسانایی گرمایی مشابهی دارند. برای بهبود عملکرد حسگرهای گرماسنجی موجود باید به نکاتی مانند، کاهش توان مصرفی، افزایش مقاومت حسگر در برابر مسموم شدن و شوک‌های مکانیکی، طراحی حسگرهای ضدشعله^۲، به گونه‌ای که دانه درون حصار قرار می‌گیرد تا از تماس آن با بالک گازی و انفجار ناشی از آن جلوگیری شود، توجه کرد [۷].

ب. حسگرهای اکسید فلزات نیم‌رسانا^۳

اکسید فلزات نیم‌رسانا متداول‌ترین مواد سازنده حسگرها، که علاوه بر کم‌هزینه بودن، به محض تماس با گاز حساسیت پدیده‌ای ایجاد می‌کنند. به طور کلی، اکسید فلزات را می‌توان در دو دسته تغییرپذیر^۴ و تغییرناپذیر^۵ قرار داد [۲۴]. ساختارهایی را که به دلیل نیاز به انرژی زیاد برای تغییر حالت‌های اکسایش، فقط یک حالت اکسایش دارند (مانند Al_2O_3)، تغییرناپذیر و ساختارهایی را با چند حالت اکسایش (مانند Fe_2O_3)، تغییرپذیر گویند. بنابراین، اکسید فلزات تغییرپذیر می‌تواند حالات مختلفی اکسید را روی سطح شکل دهد. اکسید فلزات تغییرپذیر با آرایش الکترونی d^0 (مانند TiO_2 ، V_2O_5 و WO_3) و d^{10} (مانند ZnO و SnO_2) می‌توانند به عنوان حسگر گاز به کار روند. شناسایی با این حسگرها طی فرایندی دو مرحله‌ای انجام می‌گیرد. در مرحله اول، واکنش‌های اکسایش، کاهش صورت می‌گیرد، O^- روی سطح مواد توزیع می‌شود و با مولکول‌های گاز مورد نظر واکنش می‌دهد و باعث تغییر الکترونی سطح اکسید می‌شود. سپس در مرحله بعد، این تغییرات موجب تغییر مقاومت الکتریکی حسگر می‌شود. چندین عامل، مانند مشخصات و ساختار لایه حسگر روی واکنش‌های اکسایش-کاهش، و در نتیجه حساسیت حسگر تأثیر می‌گذارند. در بین تمام اکسید فلزات نیم‌رسانا، حسگرهای بر پایه SnO_2 حساسیت بیشتری دارند. این حسگر در دمای ۲۵ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس عملکرد متفاوتی دارد. بر اساس همین تغییرات عملکردی با دما، قابلیت ساخت حسگر برای شناسایی مواد مختلف وجود دارد. مثلاً برای شناسایی متان، دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس دمای بهینه است،



شکل ۳. (الف) طرح نموداری حسگر کاتالیستی؛ (ب) طرح نموداری درون دانه حسگر [۷].

حسگرهای کاتالیستی در دماهای پایین در حضور میدان الکتریکی کارایی بهتری دارند، زیرا کاهش سطح حسگرهای کاتالیستی در دمای پایین کندتر است و پایداری خروجی بهبود می‌یابد. همچنین، مطالعات نشان می‌دهد، که سرعت تضعیف حساسیت حسگرهای کاتالیستی در خلال مسموم شدن، در حضور میدان الکتریکی کندتر است [۲۲ و ۲۱].

حسگرهای TC بر اساس میزان گرمای تلف شده در آنالیت گازی، یا به بیان دیگر، بر اساس رسانایی گرمایی گازهای مختلف عمل می‌کنند. گاز مورد نظر به درون یک محفظه که منبع گرما/گرماسنج (مانند سیم پلاتینی یا تنگستنی و ترمیستور) در مرکز آن قرار دارد، منتقل می‌شود. این سیم تا دمای مشخصی گرم می‌شود و سپس تغییر مقاومت الکتریکی بر اثر افزایش دما، اطلاعاتی درباره رسانایی گرمایی گاز و در نتیجه مشخصات گاز می‌دهد. حسگرهای TC حدود شناسایی گسترده‌ای دارند و تا بالاترین غلظت‌های ممکن نزدیک به ۱۰۰٪ را شناسایی می‌کنند. پایداری مناسب، قابلیت اعتماد و ساده بودن تجهیزات از مزایای این نوع حسگرها به شمار می‌آیند. با این احوال، دقت و حساسیت آن‌ها همچنان نیاز به ارتقا دارد [۲۳].

در کنار دو روش بالا، روش‌های دیگری بر پایه تغییر آنتالپی در دسترس است که به صورت واکنش‌های شیمیایی یا فرایندهای جذب فیزیکی گرما به محیط داده یا جذب می‌کنند. اختلاف دما علاوه بر تغییر مقاومت الکتریکی و ترمیستور با ترموکوپل بر اساس خاصیت سیبک^۱ قابل اندازه‌گیری است.

2. Flameproof
3. Metal Oxide Semiconductor
4. Transition.
5. Non-Transition

1. Seebeck



شکل ۴. چرخه ترمواستاتی حساس به متان و کربن مونواکسید [۷].

بسامد تشدید، ثابت دی الکتریک یا آنتالپی جذب/دفع آنالیت لایه‌نشانی می‌شوند [۲۸ و ۲۷ و ۷].

۲-۱-۳-۲ پایش خاک^۵

در این روش مقادیری ردیاب شیمیایی به طور پیوسته همراه با گاز به خط لوله تزریق می‌شود. ردیاب‌های^۶ شیمیایی، گازهایی بی‌خطر و فرارند، که از محل نشتی‌ها به بیرون لوله تراوش می‌کنند. به محض نشتی، از طریق حسگرهای سطحی واقع در طول خط یا از طریق کاوشگرهای^۷ نصب شده در خاک مجاور لوله شناسایی می‌شود. این روش به دلیل نیاز به تزریق مداوم مواد ردیاب بسیار پرهزینه است [۲۹ و ۱].

۲-۱-۴-۲ جریان سنج‌های شدت صوت^۸

جریان‌سنج شدت صوت، سرعت گاز را درون یک لوله با استفاده از مبدل^۹ شدت صوت اندازه می‌گیرد. این مبدل‌ها معمولاً برای تبدیل امواج صوتی به داده‌های مرتبط با شدت جریان گاز به کار می‌روند. با این حال، قابلیت تحلیل نوفه‌های جریان به منظور شناسایی نشتی برخوردارند [۳۰]. این سیستم که شرکت زیمنس^{۱۰} (۲۰۱۱) آن را ارائه کرده، با در نظر گرفتن تقسیم لوله به چندین بخش، کار می‌کند. هر بخش از دو نقطه، به نام ایستگاه^{۱۱}، و از یک جریان‌سنج گیره‌دار، یک حسگر دما و واحد پردازش تشکیل است. هر ایستگاه سرعت جریان حجمی، دمای هوای محیط و گاز، سرعت انتشار صوت و شرایط ایستگاه را اندازه می‌گیرد. از مزایای این روش تعیین مکان نشتی با دقتی در حدود ۱۵۰ متر است. در این روش

در حالی که در مورد کربن مونواکسید در دمای ۹۰ درجه سلسیوس بهتر جواب خواهد داد. بر همین اساس، با تغییر دمای حسگر، طی چرخه‌ای مطابق شکل، امکان شناسایی دو نوع ماده مختلف وجود خواهد داشت [۲۴ و ۷].

این فناوری برای محدوده دمایی مشخصی کاربردی است و برای دماهای زیاد به فناوری‌های جدیدتر، موسوم به میکرو حسگر نیاز است. همچنین، بعد از هر بار آشکارسازی نشتی با این حسگرها، مدت زمان احیای حسگر نسبتاً طولانی است [۲۵ و ۲۴]. اطلاعات کاملی از انواع این نوع حسگرها و طراحی آنها در مرجع [۲۶] موجود است.

پ. حسگرهای بسپاری

مطالعات بسیاری روی حسگرهای بسپاری برای تشخیص گازهایی غیر آلی مانند CO₂ و H₂O و نیز گستره وسیعی از بخارات غیر آلی یا بخارات حلال در فاز گاز مانند، الکل‌ها، آروماتیک‌ها یا هالوژن‌ها انجام شده است. مانند اکسید فلزات نیم‌رسانا، وقتی لایه‌های بسپاری در معرض بخارات آنالیت مربوطه قرار گیرند، خواص فیزیکی لایه بسپار مانند جرم و خواص دی الکتریک آن تغییر خواهند کرد. بر اساس تغییر خواص، بسپارها به دو دسته، بسپارهای رسانا^۱ و بسپارهای نارسانا^۲ تقسیم می‌شوند. رسانایی الکتریکی بسپارهای رسانا مانند پلی‌پیرول (ppy)، پلی‌انیلین (PAni)، پلی تیوفن (PTh) و مشتقات آنها در حضور گازهایی آلی و غیر آلی مختلف تغییر می‌کند. بسپارهای رسانا به طور مستقیم در حکم مبدل^۳ برای تغییرات خواص الکتریکی به کار می‌روند [۲۷]. بسپارهای نارسانا مانند پلی‌مید^۴ روی حسگرهای مختلف به منظور تغییر در

5. Soil Monitoring
6. Tracer
7. Probes
8. Ultrasonic Flow Meters
9. Transducers
10. Siemens
11. Site Stations

1. Conducting Polymers
2. Non-Conducting Polymers
3. Transducers
4. Polyimide

۱۰ درصد ضخامت لوله قابل شناسایی‌اند. از مزایای این سیستم این است که در مدت زمان کوتاه، می‌تواند ناحیه وسیعی را بکاود و نیاز به حفاری هم وجود ندارد. رسوبگیر قرار گرفته در لوله نیازمند ایستگاه‌های رها سازی رسوبگیر و بازگیری رسوبگیر است. قطر خطوط لوله و شعاع زانویی‌ها باید به اندازه کافی برای جای‌گیری رسوبگیر مناسب باشند [۱۹].

۲-۱-۲-۷ روش‌های مبتنی بر پایه نرم‌افزار^۹

در این روش‌ها از جریان، فشار، دما و سایر اطلاعات به دست آمده از یک سیستم کنترل و اندازه‌گیری در بزرگ مقیاس (SCADA)^{۱۰} بهره می‌گیرند. این سیستم‌ها را می‌توان از این قرار دسته‌بندی کرد:

الف. موازنه جرمی / حجمی

ب. مدل‌سازی ناپایا

پ. تحلیل امواج فشار منفی

ت. تحلیل نقطه‌ای فشار

ج. روش‌های آماری

د. پردازش سیگنال‌های دیجیتال.

الف. موازنه جرمی / حجمی

بنابر قانون پیوستگی جرم، اختلاف بین جرم یا حجم گاز ورودی و خروجی، از وجود نشتی خبر می‌دهد. جرم و حجم با استفاده از برخی متغیرهای قابل خواندن مانند، سرعت جریان، فشار و دما محاسبه می‌شوند. جزئیات بیشتری از بحث نظری این روش را لیو^{۱۱} و همکاران (۲۰۰۸) منتشر کرده‌اند. این روش توانایی شناسایی نشتی‌های کوچک را در زمان طولانی، با فرض پایایی جریان دارد، اما در خصوص مکان نشتی اطلاعاتی ارائه نمی‌دهد. در شرایط جریان ناپایا، هشدارهای اشتباه این سیستم نیز زیاد است و نیاز به توان محاسباتی بالایی هم دارد [۱۹].

ب. مدل‌سازی ناپایا^{۱۲} (RTM)

در این روش یک مدل غیرخطی دینامیک شماره‌ها، با استفاده از معادلات پیوستگی، تکانه و انرژی برای تعیین سرعت لحظه‌ای، دما و چگالی سیال در نظر گرفته می‌شود. اختلاف میزان محاسبه شده از

می‌توان از تجهیزات اندازه‌گیری غیر تداخلی نیز بهره گرفت. با این حال، مقاوم سازی آن برای استفاده در خطوط خاک شده، دشوار است [۳۱ و ۹].

۲-۱-۲-۵ حسگرهای کابلی^۱

گسترش فناوری‌های تارهای نوری پخشی و سنجش دما بر پایه اثر پراکندگی بریلیم^۲ و رامان^۳، نویدبخش تولید کم هزینه تجهیزات واری از راه دور شده است. بنابراین، نظارت و بازرسی خطوط، با دقت زیاد و صرفه اقتصادی، با نصب تعداد محدودی حسگر با فواصل طولانی ممکن خواهد بود. علاوه بر کابل‌های تار نوری، کابل‌های برق نیز برای تعیین نشتی گاز کاربردی‌اند. مواد سازنده کابل وقتی با مواد خاص تماس یابند، واکنش می‌دهند. پس از واکنش، خواص کابل، مانند مقاومت یا ظرفیت الکتریکی، تغییر می‌کند. این تغییرات می‌توانند نمایانگر وجود نشتی باشند. ساندربرگ^۴ و همکاران به شناسایی و تعیین مکان نشتی با کابل‌های حساس به هیدروکربن با دقت ۲۰ متر موفق شدند. این سیستم حساس شناسایی نشتی، پاسخ سریع و منطقی‌تر از سایر روش‌های محاسباتی خواهد داد. با این وجود، هزینه این فناوری‌ها در حال حاضر بسیار گزاف است. مشکل مقاوم‌سازی و عدم تخمین اندازه نشتی نیز از دیگر مسائل این روش به‌شمار می‌آیند [۳۲ و ۹ و ۱۰].

۲-۱-۲-۶ روش نشت شار مغناطیسی^۵

با این روش، اطلاعات مربوط به نشتی ناشی از ناهنجاری‌های خط لوله، مانند، حفره‌های خوردگی، آسیب‌های مکانیکی، جای ضربه، نقص ماشین‌کاری، چین‌های زانویی^۶، نقاط سخت^۷ و تاول‌های هیدروژنی^۸ را شناسایی می‌کنند. فرستنده شار مغناطیسی از طریق رسوبگیر درون لوله منتقل می‌شود و ناهنجاری‌ها به برقراری نشت شار مغناطیسی به زمین می‌انجامند. اطلاعات برای بازبینی و پردازش‌های بعدی ثبت می‌شوند. این سیستم فقط برای لوله‌های فولادی یا آهنی کاربرد دارد. نقاط نشتی با دقت ۰/۱ درصد مسافت اندازه‌گیری، قابل تعیین مکان‌اند و حداقل سوراخ‌های با اندازه ۵ تا

1. Cable Sensor
2. Brillouin
3. Raman
4. Sandberg
5. Magnetic Flux Leakage (Pigging) Method
6. Wrinkle Bends
7. Hard Spots
8. Hydrogen Blisters

9. Software-Based Methods
10. Supervisory Control And Data Acquisition
11. Liu
12. Real Time Transient Modeling

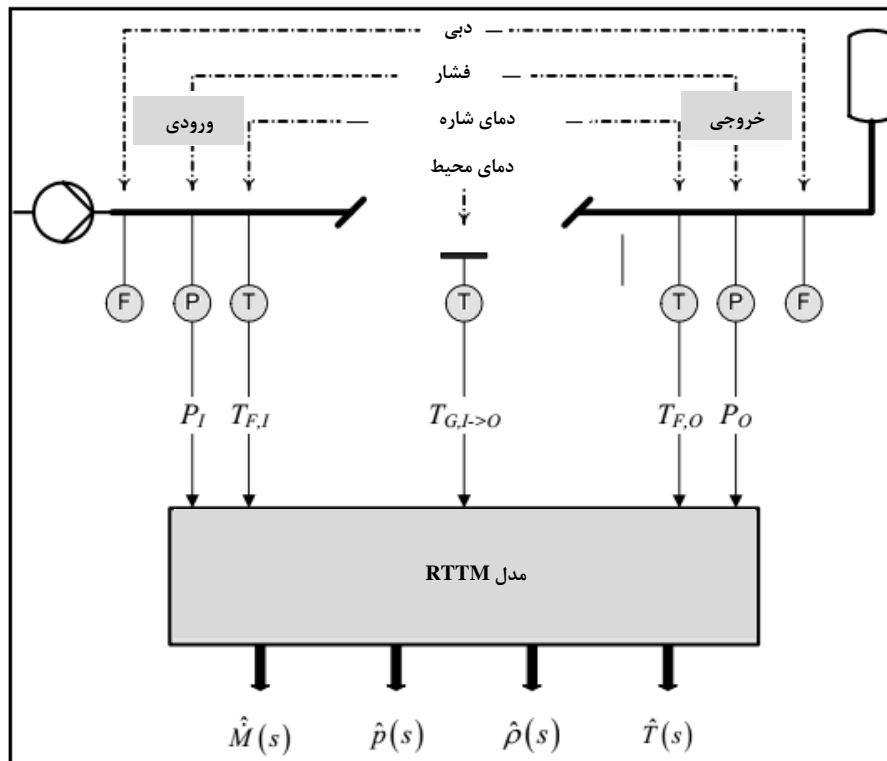
نشستی ناگهانی، به برقراری یک افت فشار ناگهانی، در محل نشستی می‌انجامد و باعث ایجاد امواج فشار منفی و انتقال آنها با سرعت صوت به بالا دست و پایین دست جریان خواهد شد. چنین امواجی می‌توانند، به کمک مبدل‌های فشار^۲ نصب شده در دو قسمت لوله، یک هشدار نشستی بدهند. روش NPW با محاسبه زمان رسیدن امواج فشاری از دو یا چند نقطه از لوله، مکان نشستی را نیز محاسبه می‌کند. موج ATMOS بر پایه امواج فشار منفی و به کمک سیگنال‌های ضعیف تولید شده از نشستی، آن را شناسایی و تعیین مکان می‌کند. روش دیگر استفاده از امواج فشار منفی برای نشستی‌یابی، تولید عمدی امواج فشاری با باز و بسته کردن تناوبی شیرهاست. در این حالت اگر نشستی در خط وجود داشته باشد، انعکاس جزئی این امواج فشاری برای تعیین محل نشستی به کار می‌روند. بهره‌گیری از امواج فشار برای شناسایی نشستی در خطوط لوله طویل عملی نیست [۹ و ۱۰]. در [۳۶] روشی برای بهبود امواج فشار منفی بر اساس آنالیز موج و حسگرهای FBG^۳ معرفی شده است.

روی مدل با مقدار اندازه‌گیری شده، بیانگر وجود نشستی خواهد بود. برای کمینه کردن هشدارهای اشتباه، سطح اختلالات و اتفاقات گذرا، پیوسته پایش می‌شوند. به دلیل آنالیز پیوسته شرایط خط لوله، این روش به سرعت نشستی را تشخیص می‌دهد، ولی با توجه به تعداد زیاد پارامترها، روشی پیچیده است. علاوه بر این، به دلیل نیاز به ابزارهای کنترل و نگهداری، هزینه‌های اجرایی روش نیز گزاف است. خطا در کالیبراسیون تجهیزات، موجب افزایش هشدارهای اشتباه می‌شود [۳۳ و ۳۴ و ۹].

ساده‌ترین و کم هزینه‌ترین مدل RTTM را در شکل (۵) مشاهده می‌کنید. در این مدل، دما، فشار و شدت جریان گاز به همراه دمای محیط در ابتدای خط به مدل داده می‌شوند و بر اساس معادلات مدل، فشار، دما و شدت جریان در نقاط مختلف محاسبه می‌شود.

پ. امواج فشار منفی^۱

امواج فشار منفی (NPW) یکی از روش‌های معروف برای شناسایی اتفاقات و تعیین مکان نشستی در خطوط لوله نفت و گاز است. یک



شکل ۵. طرح نموداری مدل‌سازی RTTM بر اساس فشار [۳۵].

1. Negative Pressure Wave

2. Pressure Transducers

3. Fiber Bragg Grating

اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری همراه با پردازش سیگنال‌های دیجیتال برای تشخیص تغییرات در پاسخ سیستم به کار می‌روند. این روش این امکان فراهم می‌آید که پاسخ نشتی از داده‌های نوفه‌ای متمایز و ثبت شود. تشخیص نشتی بر پایه DSP در ابتدا توسط گالبی^۶ و ووارد^۷ در ۱۹۹۹ برای خطوط لوله مایع معرفی شد. با این احوال، برای خطوط گازی نیز به کار می‌رود. این روش نشتی‌های کوچک و متوسط و جریان با اختلاف فشاری کم در طول لوله‌ها و شیرها و نقاط اندازه‌گیری را شناسایی می‌کند. این روش نیز به مدل ریاضی نیاز ندارد و هدف اصلی تشخیص داده‌های واقعی از نوفه است. مانند روش آماری، اگر یک نشتی در طول تنظیم پارامترها یک نشتی در سیستم وجود داشته باشد، تا زمانی که به طور قابل ملاحظه نشتی زیاد نشود، قابل شناسایی نخواهد بود. از سوی دیگر، اجرای این روش دشوار و آزمایش آن پرهزینه است [۱۰۹].

۲-۲-۲ روش‌های نوری^۸

روش‌های نوری برای شناسایی نشتی به دو دسته غیرفعال^۹ و فعال تقسیم می‌شوند. روش فعال نیازمند روبش نوری ناحیه با بهره‌گیری از یک منبع تابشی است، در حالی که، روش غیرفعال نیازمند منبعی نیست و به تابش زمینه یا تابش از گاز بستگی دارد [۳۸]. از مزایای بهره بردن از روش‌های نوری می‌توان به قابل حمل بودن دستگاه، تشخیص و تعیین مکان نشتی از راه دور (جز در موارد مربوط به دستگاه‌های با کابل تار نوری) اشاره کرد. یکی از روش‌های متداول بازدید از خطوط لوله گازی، استفاده از هواپیماها مجهز به ابزارهای نشتی یابی نوری است [۱۰۹].

۲-۲-۱ روش‌های فعال

در این دسته روش‌ها، جذب یا پراکنش نور توسط مولکول‌های گاز بررسی می‌شود و مشاهده جذب یا پراکنش قابل ملاحظه روی خطوط دلیلی بر وجود نشتی خواهد بود. روش‌های فعال مختلف برای تشخیص گاز طبیعی مانند سیستم‌های شناسایی و حدود نوری (LIDAR)^{۱۰}، جذب دیود لیزر^{۱۱}، رادار موج میلی‌متری^{۱۲}، تصویر

ت. تحلیل نقطه‌ای فشار (PPA)^۱

روش PPA با بررسی فشار خط در نقاط منفرد در طول خط و مقایسه با اندازه‌گیری‌های قبلی، نشتی را شناسایی می‌کند. فاصله حسگرها از هم در این روش می‌تواند کیلومترها باشد، در شرایط خاص، مانند تپه‌های شیب دار، یک حسگر بالای تپه قرار می‌گیرد. این روش در جریان ناپایدار قابل اعتماد نیست. نوفه‌های جریان مانند جابه‌جایی شیر، می‌تواند به اشتباه پیغام نشتی بدهند. اندازه نشتی قابل تشخیص با این روش، به حجم خط لوله بستگی دارد [۳۷ و ۹۱].

ج. آماری^۲

تحلیل آماری یکی از روش‌های ساده شناسایی نشتی بدون نیاز به مدل ریاضی است. این تحلیل بر اساس پارامترهای اندازه‌گیری مانند فشار و جریان در مکان‌های مختلف در طول خط لوله انجام می‌شود. هشدار نشت فقط وقتی تولید می‌شود، که یک الگوی منحصر به فرد از تغییرات در جریان و فشار وجود داشته باشد. آستانه نشتی با انجام آزمایش‌هایی در شرایط عملیاتی مختلف در یک لوله سالم تنظیم می‌شود. فرایند تنظیم نیازمند یک دوره زمانی طولانی است، تا میزان هشدارهای اشتباه در حین اجرای روش کاهش یابد. اگر یک نشتی در طول تنظیم پارامترها در سیستم وجود داشته باشد، روی داده‌های اولیه بدست آمده از سیستم در نظر گرفته شده تأثیرگذار خواهد بود. سیستم، نشتی را تا زمانی که به اندازه کافی از مقدار سرحدی فاصله نگیرد، شناسایی نمی‌کند. ژانگ^۳ و دی ماورو^۴ در سال ۱۹۹۸ تا ۰/۵ درصد نشتی را شناسایی کردند، ولی یافتن نشتی‌های کوچکتر نیز در صورت بهره‌گیری از تجهیزات با تفکیک پذیری بالاتر امکان پذیر است. این روش علاوه بر تعیین مکان نشتی، با شکل‌های مختلف خط تجهیزات و خطوط لوله سازگاری دارد، با این وجود قابلیت تخمین حجم نشتی را ندارد [۱۰۹].

د. پردازش سیگنال‌های دیجیتال (DSP)^۵

پردازش سیگنال‌های دیجیتال (DSP) روشی برای شناسایی نشتی، با اندازه‌گیری، جریان، فشار یا سایر پارامترهای شاره در لوله است. در مرحله تنظیم، پاسخ سیستم به تغییر معلوم در جریان،

6. Golby
7. odwardWo
8. Optical Methods
9. Passive
10. Light Detection And Ranging (Lidar)
11. Diode Laser Absorption
12. Millimeter Wave Radar

1. Pressure Point Analysis
2. Statistical
3. Zhang
4. Di Mauro
5. Digital Signal Processing

خطوط لوله گاز عمل می‌کنند. چون متان خیلی سبکتر از هواست، اختلاف چگالی می‌تواند یک اثر راداری ویژه تولید کند، که به منظور تشخیص پتانسیل نشتی بررسی می‌شود. این روش با وجود مؤثر بودن، پرهزینه است [۴۳].

روش تصویربرداری پراکنش برگشتی، از یک لیزر کربن‌دی‌اکسید برای روشن کردن محیط استفاده می‌کند. چون گاز طبیعی نور لیزر را پراکنده می‌کند، اثر پراکندگی با استفاده از یک دوربین فرسرخ ثبت می‌شود. الگوی نشان داده شده توسط دوربین می‌تواند وجود نشتی را آشکارسازی کند [۴۴ و ۴۵].

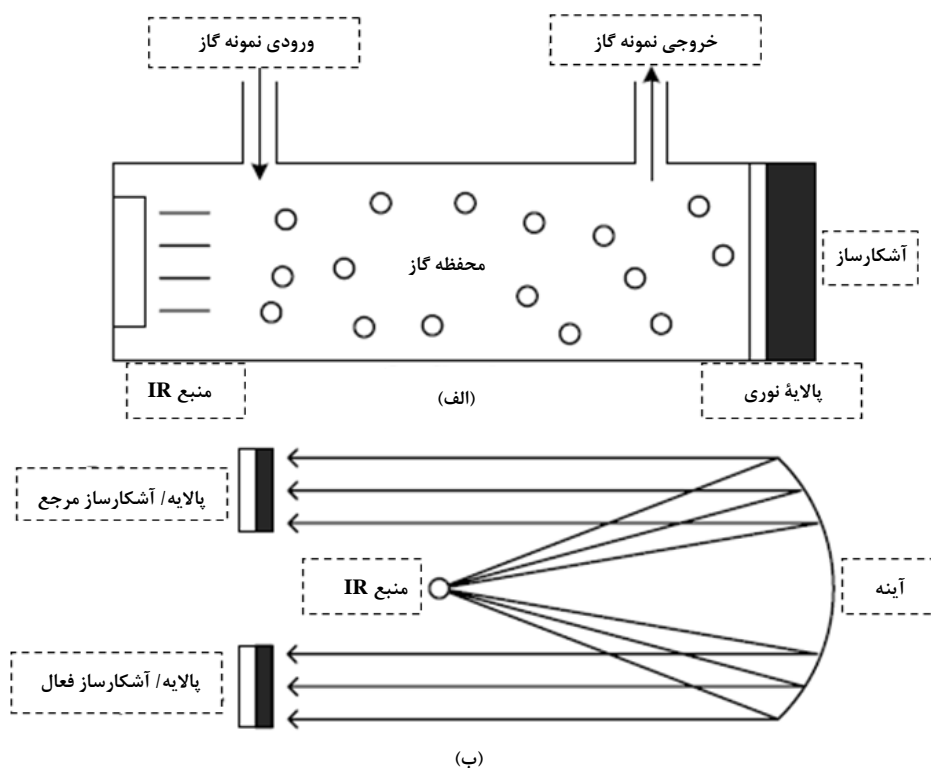
سیستم‌های جذب پهن باند با استفاده از لامپ‌های کم هزینه به عنوان منبع، به میزان چشمگیری هزینه سیستم‌های فعال را کاهش می‌دهند. طول موج‌های متعدد به کار رفته برای پایش نیز، احتمال هشدارهای اشتباه را کاهش می‌دهد. این سیستم می‌تواند محدوده وسیعی را شناسایی کند، با این وجود در معرض هشدارهای کاذب قرار دارد [۴۶].

برداری پراکنش برگشتی^۱، جذب پهن باند^۲ و سنجش ناپایدار^۳ وجود دارند [۳۸ و ۳۹].

سیستم‌های LIDAR معمولاً از یک پالس لیزری برای تابش به مکان و یک آشکارساز برای تحلیل میزان جذب انرژی لیزر در طول مسیر بهره می‌گیرند. این فناوری حساس برای بازرسی‌های از راه دور قابل کاربرد است. با این احوال، قیمت بالای لیزرهای پالسی و طول عمر کوتاه سیستم از معایب آن است [۴۰ و ۴۱].

فناوری جذب دیود لیزر، شبیه به LIDAR است، با این تفاوت اساسی که از لیزرهای دیودی به جای لیزرهای گران قیمت پالسی بهره گرفته شده است. این روش برای آشکارسازهای نزدیک برد دستی و هوایی مناسب است. یکی از معایب LIDAR و سیستم جذب لیزر دیودی، امکان تولید هشدارهای اشتباه است [۴۱]. به منظور کاهش هشدارهای اشتباه از حسگرهایی چون اکسید فلزات در کنار این فناوری بهره گرفته می‌شود [۴۲].

سیستم‌های رادار موج میلی‌متری بر اساس اثر رادار، نواحی بالای



شکل ۶. طرح نموداری شناسایی گاز با روش نوری [۷].^۱

تصویربرداری حرارتی، نشتی گاز طبیعی از خطوط را بر اساس اختلاف در دمای بین گاز نشت یافته و محیط اطراف شناسایی می‌کند. این وسیله می‌تواند روی وسایل نقلیه زمینی و هوایی و همچنین ربات‌های هوشمند نصب شود. از آنجا که این وسیله باید قادر به اندازه‌گیری اختلاف دماهای کوچک باشد، نیازمند تصویربردارهای پر هزینه است. اگر گاز نشت یافته، با محیط همدمما باشد، تشخیص نشتی با این روش امکان پذیر نیست [۵۲].

تصویربرداری چند طیفی یا ابر طیفی^۶ را می‌توان در حالات جذب و نشر به کار گرفت. اگر دمای گاز نشر یافته، خیلی بالاتر از محیط باشد، این روش در حالت انتشار می‌تواند نشتی را تشخیص دهد. در تصویر برداری جذبی چند طیفی، تابش زمینه از طریق چندین طول موج جذب می‌شود و برای ترسیم نمودار غلظت گاز به کار می‌رود. نوع جذبی این روش در حالتی اختلاف دمای محدود نیز قابل استفاده است. در این روش احتمال هشدارهای اشتباه بسیار ناچیز است و به صورت موفق می‌توان در صنایع بدون بازرسی‌های ثابت آن را نصب کرد. با این حال، این روش معمولاً نیازمند تصویربردارهای بسیار حساس و پر هزینه است [۵۳].

تابش‌سنجی رابط صافی گازی (GFCR) یک فناوری حساسی از راه دور، برای اندازه‌گیری مقدار گاز مورد نظر در قسمتی از جو در میدان دید تجهیزات است و از سال ۱۹۶۰ در دستگاه‌های هوایی به کار می‌رود. گاز نمونه در یک ظرف پر می‌شود، که معمولاً یاخته همبستگی^۷ نامیده می‌شود و در مسیر دریافت تابش‌های الکترومغناطیسی قرار دارد و به عنوان صافی طیفی عمل می‌کند [۵۴]. تابش‌های دریافتی ابتدا از یک صافی میان‌گذران باریک برای انتخاب تابش نوار طیفی گاز مورد نظر عبور می‌کند. پرتو سپس توسط یک پرتو شکن به دو مسیر - مسیر اول شامل یک یاخته گاز پر شده با گاز مورد نظر (به نام یاخته همبستگی) و مسیر دیگر سلول بدون گاز (به نام یاخته مرجع) - تقسیم می‌شود. صافی‌های طیفی شامل یاخته همبستگی برای حذف انرژی از پرتو ورودی در طول موج‌های مرتبط به خطوط جذب گاز استفاده می‌شوند. تجهیزات GFCR می‌توانند روی هلیکوپتر و هواپیما نصب و نشتی را از فواصل ۳۰۰ متری تعیین مکان کنند [۹ و ۵۵].

برای سنجش ناپایداری، یک تار نوری در طول خط لوله برای بازرسی خواص شیمیایی و فیزیکی کشیده می‌شود. تغییرات موضعی فشار یا غلظت در نتیجه نشت گاز از لوله، به تغییرات در مشخصات انتقالی تار نوری منجر می‌شود. این تغییرات در مشخصات انتقالی با استفاده از لیزر و آشکارسازهای نوری بررسی می‌شوند. مکان و غلظت نشتی با سنجش تار نوری قابل دستیابی‌اند. یکی از مزایای چشمگیر استفاده از تار نوری، مصونیت از تداخل امواج الکترومغناطیسی است. از معایب این روش می‌توان به گران بودن و پایداری لایه شیمیایی تار^۱ در طی زمان اشاره کرد. همچنین به کارگیری این روش در خطوط لوله نصب شده قدیمی، به خصوص خطوط لوله دفن شده به علت نیاز به حفاری دشوار است [۴۷ و ۴۸].

برای شناسایی نوری نشتی گازها به دو دلیل به امواج IR نسبت به سایر طیف‌های نوری توجه خاصی می‌شود. اولاً، حدود اندازه‌گیری سایر طیف‌ها در حضور بخار، مه یا دود به دلیل پراکنش، جذب اضافی و پراش کاهش می‌یابد. اما در تابش‌های IR به دلیل طول موج بلندتر، این اثر کمتر است. ثانیاً، فناوری MEMS^۲ موجب کوچک شدن منابع و آشکارسازهای فروسرخ می‌شود، که به شدت در محبوبیت حسگرهای IR نقش دارد. اطلاعات جامع‌تری از حسگرهای نوری و روش‌های آشکارسازی نوری در مراجع [۷ و ۳۸ و ۴۹] موجود است. تحقیقات به منظور افزایش برد و نیز دقت و حساسیت روش‌های نوری مبتنی بر دوربین‌های IR ادامه دارد [۵۰]. مطالعات در زمینه حسگرهای طیف‌سنجی فروسرخ حساس به چندین نوع گاز به منظور پیش هم زمان متان، اتان و پروپان نیز در جریان است [۵۱].

۲-۲-۲ روش‌های غیرفعال

روش‌های نوری غیرفعال نیاز به منبع تولید نور ندارند. با این احوال، کاهش هزینه منبع نوری این روش‌ها نیازمند آشکارسازهای پرهزینه‌تری‌اند، که قادر به پردازش تابش‌های ضعیف در غیاب منبع نوری باشند. از چندین نوع روش غیرفعال برای شناسایی نشتی بهره می‌گیرند: تصویربرداری گرمایی^۳، تصویربرداری چند طیفی^۴ و تابش‌سنجی رابط صافی گاز^۵ [۳۸ و ۳۹].

1. Fiber Chemical Coating
2. Micro-Electromechanical Systems
3. Thermal Imaging
4. Multi-Spectral Imaging
5. Gas Filter Correlation Radiometry

6. Hyperspectral Imaging
7. Correlation Cell

۲. مقایسه روش‌ها و نتیجه‌گیری

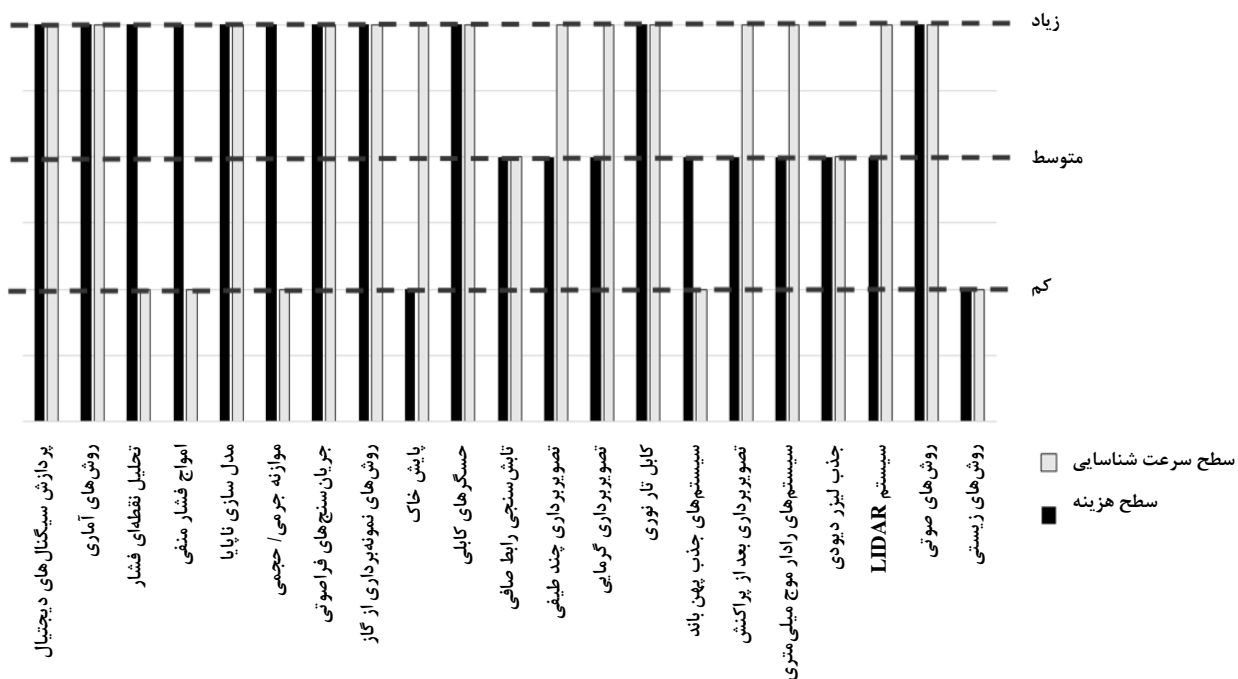
عملکرد سیستم‌های شناسایی نشتی با معیارهای مختلفی قابل بررسی است. روش‌های یادشده در این تحقیق بر طبق معیارهای مرسوم برای ارزیابی سیستم‌های نشتی‌یابی، مانند قابلیت تعیین مکان نشتی، سرعت تشخیص، برآورد اندازه نشتی و سهولت و هزینه اجرا مقایسه شده‌اند.

در نمودار شکل (۷)، روش‌های مختلف شناسایی نشتی از لحاظ هزینه لازم برای اجرا و سرعت شناسایی در سه سطح رده‌بندی شده‌اند.

هزینه روش‌های شناسایی با توجه به فناوری به کار رفته تعیین می‌شود. روش‌های صوتی و نوری به دلیل نیاز به فناوری‌های پیشرفته‌تر و به روزتر معمولاً سرمایه‌گذاری کلان‌تری نیاز خواهند داشت و در مقابل روش‌های موازنه‌ای و غیر فنی که نیاز به تجهیزات خاصی ندارند، کم‌هزینه‌ترند. اطلاعات دقیق‌تر در مورد هزینه روش‌های مختلف شناسایی نشتی در مرجع [۵۶] آمده است.

سرعت شناسایی روش با کاهش وابستگی به متصدی و گرداننده انسانی و تغییرات زیستی افزایش می‌یابد. روش‌های غیر فنی، به دلیل وابستگی به متصدی یا تحولات محیطی، در مقابل روش‌های نوری، صوتی و مدل‌سازی‌های ناپایا، از سرعت شناسایی پایین‌تری برخوردارند. احتمال موفقیت در روش‌های مبتنی بر بازرسی نیز مانند روش‌های غیر فنی و بعضی روش‌های فنی، وابسته به بازه‌های بازرسی خواهد بود. روش‌های تصویر برداری و رادار موج میلی‌متری با توجه به این‌که محدوده وسیعی از تأسیسات روکار را در زمان محدود پوشش می‌دهند از روش‌هایی سریع و در حین حال تا حدودی به صرفه‌اند. همچنین، روش‌هایی مانند پایش خاک به منظور شناسایی نشتی از تجهیزات و خطوط دفن شده از لحاظ سرعت و هزینه و کارایی مناسب‌تر خواهد بود.

در جدول (۱)، روش‌های مختلف نشتی‌یابی از لحاظ سهولت استفاده، قابلیت تعیین مکان نشتی و شدت نشتی مقایسه شده‌اند.



شکل ۷. مقایسه کیفی سطح هزینه و سرعت شناسایی روش‌ها.

جدول ۱. مقایسه سطح سهولت و قابلیت‌های روش‌های نشتی‌یابی در تعیین مکان و شدت نشتی.

سهولت استفاده	قابلیت تعیین مکان نشتی	قابلیت تخمین شدت نشتی	روش‌ها
✓	x	x	روش‌های زیستی
✓	✓	✓	روش‌های صوتی
✓	✓	✓	سیستم LIDAR
✓	✓	✓	جذب لیزر دیودی
✓	✓	✓	سیستم‌های رادار موج میلی‌متری
✓	✓	✓	تصویربرداری بعد از پراکنش
x	✓	✓	سیستم‌های جذب پهن باند
✓	✓	✓	کابل تار نوری
✓	✓	✓	تصویربرداری گرمایی
✓	✓	✓	تصویر برداری چند طیفی
✓	✓	✓	تابش‌سنجی رابط صافی
✓	✓	x	حسگرهای کابلی
✓	✓	x	پایش خاک
✓	✓	✓	روش‌های نمونه‌برداری از گاز
✓	✓	x	جریان‌سنج‌های فراصوتی
✓	x	✓	موازنه جرمی / حجمی
x	✓	✓	مدل‌سازی ناپایا
✓	✓	✓	امواج فشار منفی
✓	x	x	تحلیل نقطه‌ای فشار
✓	✓	✓	روش‌های آماری
✓	✓	x	پردازش سیگنال‌های دیجیتال

مانند برخی روش‌ها نوری ضروری خواهد بود. معمولاً روش‌های پایش از بیرون خط لوله دقیق‌تر است و توانایی تشخیص نشتی‌های کوچکتر با آنها وجود دارد، در حالی که در پایش درون خط با روش‌های صوتی چنین امکانی به دلیل وجود نوفه و کم بودن شدت صوت منافذ کوچک، کمتر است.

پارامتر مهم دیگر که اغلب در مورد حسگرها اهمیت دارد، حساسیت است که می‌توان آن را به صورت کمترین میزان گاز هدف قابل اندازه‌گیری تعریف کرد. حساسیت در مورد روش‌های نرم‌افزاری، از ۰/۱ درصد برای روش تحلیل نقطه‌ای فشار تا ۱ درصد برای موازنه حجمی یا پردازش سیگنال‌های دیجیتالی تغییر می‌کند که چون

از لحاظ سهولت در کاربرد، بیشتر روش‌ها جز روش‌های طیفی مانند جذب پهن باند و روش مدل‌سازی ناپایا به آسانی قابل کاربردند و به تخصص خاصی نیاز ندارند. روش جذب پهن باند چون نیاز به تحلیل داده‌های طیفی دارد و روش مدل‌سازی ناپایا با توجه به تعداد زیاد پارامترها، روش‌های پیچیده‌ای‌اند.

اکثر روش‌هایی که روی کل خط نظارت دارند، از قابلیت تشخیص مکان نشتی برخوردارند، با این وجود برای تشخیص میزان نشتی یا اندازه حفره ایجاد شده بیشتر روش‌ها ناکارآمدند. برای این کار یا به پایش درون خط نیاز است، مانند روش‌های صوتی که بر اساس امواج تولیدی از منفذ عمل می‌کنند، یا روش‌های پایش از بیرون خط

- [6] Adnan, N. F., Ghazali, M. F., Amin, M. M., Hamat, A. M. A., "Leak detection in gas pipeline by acoustic and signal processing-A review.", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, (2015).
- [7] Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D., Ning, H., "A survey on gas sensing technology.", Sensors, 12(7): p. 9635-9665, (2012).
- [8] Sivathanu, Y., "Natural gas leak detection in pipelines.", Technology Status Report, En'Urga Inc., West Lafayette, IN, (2003).
- [9] Mandal, P. C., "Gas Leak Detection in Pipelines & Repairing System.", Journal of Applied Engineering (JOAE), (2015).
- [10] Liu, L., Zhao, Q., Zhao, L., He, Y., Li, Y. "An LPG sensing system for leak detection of oil storage tanks.", in International Conference of Optical Instrument and Technology, International Society for Optics and Photonics, (2008).
- [11] Meng, L., Yuxing, L., Wuchang, W., Juntao, F., "Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method.", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(1): p. 90-102, (2012).
- [12] Kaewwaewnoi, W., Prateepasen, A., Kaewtrakulpong, P., "Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage.", Measurement, 2(2)43.10: p. 274-282, (2010).
- [13] Minglei, S., Xiang, L., Changping, Z., Jiahua, Z., "Gas concentration detection using ultrasonic based on wireless sensor networks.", Information Science and Engineering (ICISE), 2nd International Conference on. IEEE, (2010).
- [14] Fuchs, H., Riehle, R., "Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis.", Applied Acoustics, 33(1): p. 1-19, (1991).
- [15] Petculescu, A., "A prototype acoustic gas sensor based on attenuation.", The Journal of the Acoustical Society of America, 120(4): p.1779-1782, (2006).
- [16] Watanabe, K., Himmelblau, D., "Detection and location of a leak in a gas-transport pipeline by a new acoustic method.", AIChE Journal, 32(10): p. 1690-01, (1986).
- [17] Mylvaganam, S., Halstensen, M., Engan, H. E., Esbensen, K., "Gas density metering in ultrasonic gas flowmeters using impedance measurements and chemometrics.", Ultrasonics Symposium, Proceedings, IEEE, (1999).
- [18] Azad, A. M., Akbar, S. A., Mhaisalkar, S. G., Birkefeld, L. D., Goto, K. S., "Solid-state gas sensors: A review.", Journal of the Electrochemical Society, 139(12): p. 3690-3704, (1992).
- [19] Krebs, P., Grisel, A., "A low power integrated catalytic gas sensor.", Sensors and Actuators B: Chemical, 13(1): p. 155-158, (1993).

تمام روش‌ها را نمی‌توان به صورت کمی حساسیت سنجی کرد، مقایسه‌ها به صورت کیفی صورت می‌گیرند. با تحمیل هزینه و تغییر نوع حسگرها می‌توان حساسیت روش‌های نوری، نمونه برداری و صوتی را بالاتر برد [۵۷].

هر کدام از روش‌های معرفی شده بر حسب نیاز در شرایط خاص می‌توانند روش مناسب‌تری باشند. روش‌های مدل‌سازی برای شدت جریان‌های پردامنه مناسب‌اند، در حالی که برای شدت جریان‌های کمتر با موازنه جرمی جریان با هزینه کمتر نشستی جریان شناسایی می‌شود. یکی از روش‌های عملی تشخیص نشستی استفاده ترکیبی از فناوری‌هاست. با این کار از مزایای روش‌های مختلف با هم می‌توان برای اندازه‌گیری و شناسایی‌های خاص استفاده کرد و دقت را بالاتر برد. مثلاً با فناوری‌هایی که صرفاً قابلیت تشخیص مکان نشستی را دارند، می‌توان نشستی را شناسایی کرد و با دستگاه‌های نمونه برداری و اندازه‌گیری گاز مانند HFS¹ که با اتصالات مناسب گاز نشت یافته را به یک اوریفیس (وزنه) هدایت می‌کند، میزان نشستی را تعیین کرد [۵۸]. با انتخاب فناوری‌های مناسب ترکیبی علاوه بر کاهش هزینه، سرعت و دقت شناسایی و اندازه‌گیری بالا خواهد رفت.

مرجع

- [1] Murvay, P. S., Silea, I., "A survey on gas leak detection and localization techniques". Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(6): p. 966-973, (2012).
- [2] Hanle, L., "Methane Emission Factor Development Project for Select Sources in the Natural Gas Industry Draft Task 1 Report.", (2008).
- [3] Allen, D. T., Torres, V. M., Thomas, J., Sullivan, D. W., Harrison, M., Hendler, A., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Fraser, M. P., Hill, A. D., Lamb, B. K., Miskimins, J., Sawyer, R. F., Seinfeld, J. H., "Measurements of methane emissions at natural gas production sites in the United States.", Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(44): p. 17768-17773, (2013).
- [4] Mitchell, A. L., Tkacik, D. S., Roscioli, J. R., Herndon, S. C., Yacovitch, T. I., Martinez, D. M., Omara, M. "Measurements of methane emissions from natural gas gathering facilities and processing plants: Measurement results.", Environmental science & technology, 49(5): p. 3219-3227, (2015).
- [5] Eshraghi, H., Ahadi, M. S., "An initiative towards an energy and environment scheme for Iran: Introducing RAISE (Richest Alternatives for Implementation to Supply Energy) model.", Energy Policy, 89: p. 36-51, (2016).

1. High Flow® Sampler

- [20] Firth, J. G., Gentry, S. J., Jones, A., "Catalytic gas detectors.", Google Patents, (1978).
- [21] Karpov, E. E., Suchkov, A., Mironov, S., Baranov, A., Sleptsov, V., Calliari, L., "Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement.", *Sensors and Actuators A: Physical*, 194: p. 176-180, (2013).
- [22] Tong, Z., Tong, M. M., Meng, W., Li, M., "Inflammable Gas Mixture Detection with a Single Catalytic Sensor Based on the Electric Field Effect.", *Sensors*, 14(4): p. 6409-6418, (2014).
- [23] Tardy, P., Coulon, J. R., Lucat, C., Menil, F., "Dynamic thermal conductivity sensor for gas detection", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 98(1): p. 63-68, (2004).
- [24] Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., Gao, R., "Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors.", *Sensors*, 10(3): p. 2088-2106, (2010).
- [25] Shaalan, N., Yamazaki, T., Kikuta, T., "Synthesis of metal and metal oxide nanostructures and their application for gas sensing.", *Materials Chemistry and Physics*, 127(1): p. 143-150, (2011).
- [26] Korotcenkov, G., "Semiconductors in Gas Sensors.", *Handbook of Gas Sensor Materials*, Springer. p.167-195, (2013).
- [27] Debarnot, N., Epailard, D. F., " Polyaniline as a new sensitive layer for gas sensors.", *Analytica Chimica Acta*, 475(1): p. 1-15, (2003).
- [28] Wu, Z., Chen, X., Zhu, S., Zhou, Z., Yao, Y., Quan, W., Liu, B., "Room temperature methane sensor based on graphene nanosheets/polyaniline nanocomposite thin film.", *Sensors Journal, IEEE*, 13(2): p. 777-782, (2013).
- [29] Batzias, F., Siontorou, C., Spanidis, P. M., "Designing a reliable leak bio-detection system for natural gas pipelines.", *Journal of hazardous materials*, 186(1): p. 35-58, (2011).
- [30] Brennan, W. J., Wilson, M. A., Northrup, W. E., "Ultrasonic Flow Meter Leak Detection System and Method", Google Patents, (2017).
- [31] Loth, J., Morris, G. J., Palmer, G. M., "Technology assessment of on-line acoustic monitoring for leaks/infringements in underground natural gas transmission lines." USA: West Virginia University, (2003).
- [32] Park, E. J., Reid, K. R., Tang, W., Kennedy, R. T., Kopelman, R., "Ratiometric fiber optic sensors for the detection of inter-and intra-cellular dissolved oxygen.", *Journal of materials chemistry*, 15(27-28): p. 2913-2919, (2005).
- [33] Aamo, O. M., "Leak Detection, Size Estimation and Localization in Pipe Flows.", *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 61(1): p. 246-251, (2016).
- [34] Fukushima, K., Maeshima, R., Kinoshita, A., Shiraishi, H., Koshijima, I. "Gas pipeline leak detection system using the online simulation method.", *Computers & chemical engineering*, 24(2): p. 453-456, (2000).
- [35] Geiger, I. G., "Principles of leak detection.", KROHNE Oil and Gas Brochure, (2008).
- [36] Hou, Q., Ren, L., Jiao, W., Zou, P., Song, G., "An improved negative pressure wave method for natural gas pipeline leak location using FBG based strain sensor and wavelet transform.", *Mathematical Problems in Engineering*, (2013).
- [37] Zhang, J., "Designing a cost-effective and reliable pipeline leak-detection system." *Pipes and Pipelines International*, 42(1): p. 20-26, (1997).
- [38] Hodgkinson, J., Tatam, R. P., "Optical gas sensing: a review.", *Measurement Science and Technology*, 24(1): p. 012004, (2012).
- [39] McDonagh, C., Burke, C. S., MacCraith, B. D., "Optical chemical sensors." , *Chemical reviews*, 108(2): p. 400-422, (2008).
- [40] Reutebuch, S. E., Andersen, H. E., McGaughey, R. J., "Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory.", *Journal of Forestry*, 103(6): p. 286-292, (2005).
- [41] Crutchley, S., "Light detection and ranging (lidar) in the Witham Valley, Lincolnshire: an assessment of new remote sensing techniques.", *Archaeological Prospection*, 13(4): p. 251-257, (2006).
- [42] Zhang, E., Teng, C. C., Van Kessel, T. G., Klein, L., Muralidhar, R., Xiong, C., Barwicz, T., "Localization and quantification of trace-gas fugitive emissions using a portable optical spectrometer.", *Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIX, International Society for Optics and Photonics*, (2018).
- [43] Gopalsami, N., Raptis, A. C., "Millimeter-wave radar sensing of airborne chemicals.", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 49(4): p. 646-653, (2001).
- [44] McRae, T. G., "Backscatter absorption gas imaging system.", Google Patents, (1985).
- [45] McRae, T. G., Kulp, T. J., "Backscatter absorption gas imaging: a new technique for gas visualization.", *Applied optics*, 32(21): p. 4037-4050, (1993).
- [46] Langridge, J. M., Ball, S. M., Shillings, A. J., Jones, R. L., "A broadband absorption spectrometer using light emitting diodes for ultrasensitive, in situ trace gas detection.", *Review of Scientific Instruments*, 79(12): p. 123.110, (2008).
- [47] Tai, H., Yoshino, T., Tanaka, H., "Fiber-optic evanescent-wave methane-gas sensor using optical absorption for the 3.392- μm line of a He-Ne laser.", *Optics letters*, 12(6): p. 437-439, (1987).
- [48] Hoo, Y. L., Jin, W., Ho, H. L., Wang, D., Windeler, R. S., "Evanescent-wave gas sensing using microstructure fiber.", *Optical Engineering*, 41(1): p. 8-9, (2002).
- [49] Lee, B., "Review of the present status of optical fiber sensors.", *Optical fiber technology*, 9(2): p. 57-79, (2003).

- [50] Ravikumar, A. P., Wang, J., McGuire, M., Bell, C. S., Zimmerle, D., Brandt, A. R., "Good versus Good Enough?: Empirical Tests of Methane Leak Detection Sensitivity of a Commercial Infrared Camera.", *Environmental Science & Technology*, 52(4): p. 2368-2374, (2018).
- [51] Roscioli, J. R., Herndon, S., Nelson, D. D., Yacovitch, T. "Methane, Ethane, and Propane Sensor for Real-time Leak Detection and Diagnostics.", Aerodyne Research, Inc., Billerica, MA (United States), (2017).
- [52] Avila, L. F., "Leak detection with thermal imaging.", Google Patents, (2005).
- [53] Shaw, G. A., Burke, H. K., "Spectral imaging for remote sensing.", *Lincoln Laboratory Journal*, 14(1): p. 3-28, (2003).
- [54] Edwards, H., Dakin, J., "Gas sensors using correlation spectroscopy compatible with fibre-optic operation.", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 11(1-3): p.9-19, (1993).
- [55] Smith, M. W., Khattatov, B. V., "Apparatus for gas filter correlation radiometry and methods for 2-dimensional and 3-dimensional atmospheric sounding", Google Patents, (2004).
- [56] Patel, P., "Monitoring methane.", ACS Publications, 3(7): p. 679-682, (2017).
- [57] Cui, Y., Wei, Q., Park, H., Lieber, C. M., "Nanowire nanosensors for highly sensitive and selective detection of biological and chemical species.", *Science*, 293(5533): p. 1289-1292, (2001).
- [58] Heat Consultants Company, "High flow Sampler For Natural Gas Leak Rate Measurement Instruction.", rev. 7, (2015).