تشخیص نشت شیر خط لوله گاز طبیعی از طریق تجزیه و تحلیل خوشه‌ای آکوستیک امیشن

در حین بهره برداری از ایستگاه های خط لوله گاز طبیعی، نشت شیر داخلی می‌تواند منجر به خسارات اقتصادی هنگفت، آلودگی زیست محیطی و حتی انفجارهای تصادفی شود که ایمنی پرسنل را به خطر می‌اندازد. به عنوان ابزاری برای آزمایش غیرمخرب، آزمایش آکوستیک امیشن (AE) دارای ویژگی‌های بسیار کارآمد، سریع و اقتصادی است. بنابراین، به طور گسترده در صنعت نفت به عنوان راهی برای تشخیص مشکلاتی مانند نشت خط لوله زیرزمینی، نشت شیر و نشت مخزن استفاده می‌شود. علاوه بر این، در مقایسه با سایر فن‌آوری‌های تشخیص، فناوری AE در شرایط بحرانی مانند نویز بالا، فشار کم و نرخ نشتی پایین پایدارتر و قابل اعتمادتر است.

در فرآیند تشخیص نشتی، محققان نه تنها نگران این هستند که آیا نشتی رخ می‌دهد یا خیر، بلکه بیشتر نگران میزان نشتی هستند. پیش‌بینی میزان نشتی اطلاعات لازم برای نگهداری شیر را فراهم می‌کند. در حال حاضر، تجزیه و تحلیل کیفی نشت شیر داخلی در خطوط لوله گاز طبیعی به بلوغ رسیده است. اما تجزیه و تحلیل کمی آن هنوز به تحقیقات بیشتری نیاز دارد. به منظور بررسی عوامل تاثیرگذار نرخ نشت شیر داخلی، چندین مطالعه آزمایش‌های AE را انجام داده‌اند که فرکانس و ویژگی‌های زمانی سیگنال‌های AE، فشار ورودی شیر و آسیب را ارزیابی کرده‌اند. با این حال، مطالعات فوق فقط می‌تواند رابطه بین عوامل متعدد و نرخ نشتی را بدست آورد. اما آنها نمی‌توانند نرخ نشت شیر داخلی را بدست آورند. محققان آزمایشی را انجام دادند و کشف کردند که ریشه میانگین مربع (RMS) در حوزه زمانی سیگنال‌های نشتی می‌تواند برای پیش‌بینی میزان نشت استفاده شود. این مطالعه یک روش جدید برای تشخیص نرخ نشت شیر داخلی بر اساس فناوری AE، کاهش ابعاد و تحلیل خوشه‌ای پیشنهاد می‌کند. نه تنها می‌تواند نرخ نشتی را شناسایی کند، بلکه سرعت تشخیص را نیز بر اساس اطمینان از دقت تشخیص بهبود می‌بخشد.

تجزیه و تحلیل خوشه‌ای

تجزیه و تحلیل خوشه‌ای فرآیند تقسیم مجموعه‌ای از اشیاء فیزیکی یا انتزاعی به چند خوشه بر اساس شباهت است. همچنین یک روش اصلی تجزیه و تحلیل داده است که به طور گسترده در زمینه‌هایی مانند تشخیص هدف، طبقه بندی تصویر و بازیابی اطلاعات استفاده می‌شود. همچنین برای توصیف داده‌ها و سنجش شباهت بین منابع داده استفاده می‌شود. الگوریتم k-means یکی از الگوریتم های کلاسیک خوشه بندی است. دارای ویژگی‌های پیاده سازی آسان، سادگی و کارایی بالا برای مجموعه داده های بزرگ است که از دلایل اصلی استفاده گسترده از آن است. علاوه بر این، الگوریتم k-means امکان موازی سازی مستقیم را فراهم می کند و نسبت به مرتب سازی داده‌ها حساس نیست. هنگامی که خوشه های حاصل متراکم هستند و تفاوت بین خوشه‌ها متمایز است، k-means بهتر از سایر الگوریتم های خوشه بندی عمل می‌کند. با این حال، الگوریتم k-means به نقاط پرت حساس است و به راحتی می تواند در یک بهینه محلی قرار گیرد. الگوریتم k-medoids توسعه ای از الگوریتم k-means است که از میانگین اشیاء در خوشه استفاده نمی‌کند، بلکه مرکز اشیاء در خوشه را به عنوان نقطه مرجع انتخاب می‌کند. در روش خوشه‌بندی فوق، نمونه‌های داده با شباهت بالا به یک خوشه تقسیم می‌شوند. بنابراین، عملکرد الگوریتم خوشه بندی به شدت به کیفیت ویژگی های استخراج شده وابسته است. در این کار، هشت پارامتر ویژگی: آنتروپی، انرژی، میانگین، چولگی، واریانس، انحراف معیار (SD)، کشیدگی و RMS به عنوان متغیرهای ورودی استفاده شد. ویژگی‌های با ابعاد بالا ممکن است حاوی اطلاعات

اضافی زیادی باشد که می‌تواند سرعت محاسبات و دقت تشخیص را کاهش دهد. بنابراین، به منظور بهبود عملکرد الگوریتم‌های خوشه‌بندی، از تحلیل عاملی برای تحلیل همبستگی متغیرها استفاده شد تا ابعاد ویژگی‌های اصلی کاهش یابد و اطلاعات اضافی حذف شود.

تئوری

- **آکوستیک امیشن**

پدیده AE به عنوان فرآیند تولید امواج تنش گذرا از طریق آزادسازی سریع انرژی از تغییر شکل‌ها یا شکستگی‌های موضعی تعریف می‌شود. هنگامی که نشتی دریچه رخ می دهد، اختلاف فشار در نقطه نشتی باعث می شود گاز با سرعت بالا خارج شود و با گاز جریان ثابت یا نسبتا کند مخلوط شود و در نتیجه صدای بلندی ایجاد کند (منبع AE). سیستم‌های تشخیص AE ابداع شده‌اند که چنین صداهایی را شناسایی کرده و ویژگی‌های آن‌ها را برای تخمین میزان نشتی دریچه تجزیه و تحلیل می‌کنند.

- **K-means**

برای مجموعه داده (xx x 1 2,, , ⋯ n)، هر نمونه یک بردار واقعی d بعدی است. k-means یک الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر مرکز است. یک مرکز معمولاً نشان دهنده میانگین نمونه‌های موجود در یک خوشه است. هدف الگوریتم تقسیم n نمونه به k خوشه { , , } k ... CC C 1 2 به گونه‌ای است که تابع هدف را به حداقل برساند. تابع هدف را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$E = \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{n} \|x_i - o_j\|^2$$

که با محاسبه میانگین نمونه های موجود در خوشه Cj به دست می آید. و $\|x_i - o_j\|^2$ فاصله اقلیدسی مجذور بین xi و oj است که عمدتاً برای محاسبه عدم تشابه بین داده‌های نمونه و مراکز استفاده می‌شود. به همین دلیل، تجزیه و تحلیل خوشه بندی به اندازه‌گیری فاصله انتخاب شده حساس است.

- **K-medoids**

الگوریتم خوشه‌بندی k-medoids یک روش تکراری و حریصانه است که n نمونه را در فضای نمونه به k خوشه تقسیم می‌کند. به صورت زیر عمل می کند:

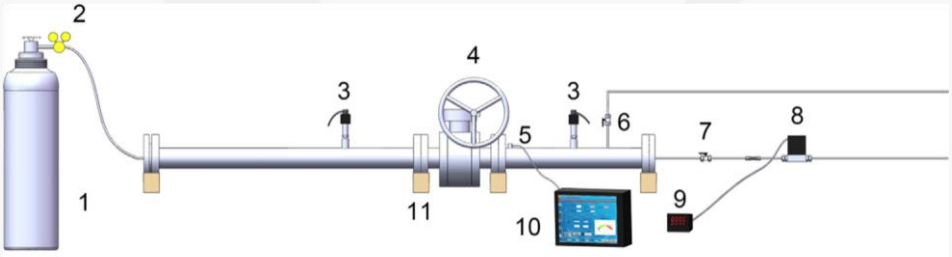
۱. k نمونه به طور تصادفی به عنوان نقاط مرکزی اولیه انتخاب می‌شوند.
۲. نمونه‌های باقیمانده به نزدیک‌ترین نقطه مرکزی مرتبط می‌شوند.
۳. نقطه نمونه غیر مرکزی و نقطه مرکزی را عوض کنید. سپس هزینه کل تابع هدف را محاسبه کنید.

مراحل ۲ و ۳ متناوب را تکرار کنید تا تابع هدف بهینه شود.

تجهیزات آزمایشی

پلت فرم آزمایشی برای تشخیص نشت شیر را شکل ۱ نشان می‌دهد. اجزای اصلی آن یک سیلندر گاز نیتروژن، شیر توپی، نشانگر جریان، کنترل کننده جریان حجم و سیستم AE است. سیلندر گاز نیتروژن، با حجم ۴۰ لیتر و حداکثر فشار تامین ۱۶ مگاپاسکال، جریان گاز تحت فشار را در خط لوله فراهم می‌کرد. یک شیر توپی DN80، با حداکثر فشار تحمل ۶,۴ مگاپاسکال، کلید این تحقیق تجربی بود. یک کنترل کننده جریان حجمی برای محاسبه نرخ نشت با دقت ۱±٪، دبی موثر ۱۰ لیتر استاندارد در دقیقه (SLM) و حداکثر فشار باربری ۱۰ مگاپاسکال استفاده شد. به منظور کاهش تأثیر ارتعاش خارجی بر روی سکوی آزمایشی، ضربدری در محل اتصال فلنج نصب شد. سیستم AE مورد استفاده برای جمع‌آوری سیگنال‌های نشتی دریچه داخلی عمدتاً شامل یک سنسور، پیش تقویت‌کننده و کارت جمع‌آوری داده بود. سنسور یک مبدل تشدید با فرکانس مرکزی ۱۵۰ کیلوهرتز و محدوده فرکانسی ۲۲۰-۲۰ کیلوهرتز بود.

از آنجایی که سیگنال‌های جمع‌آوری‌شده توسط سنسور AE ضعیف بودند، سیگنال‌ها از طریق خط انتقال به کارت اکتساب داده‌ها منتقل می‌شدند که نسبت سیگنال به نویز پایینی داشت. بنابراین، از یک پیش تقویت کننده ۴۰ دسی بل برای تقویت سیگنال‌های جمع آوری شده توسط سنسور استفاده شد. سیگنال های AE توسط پیش تقویت کننده، که سیگنال های آنالوگ پیوسته را خروجی می‌کند، تقویت شدند. کارت جمع‌آوری داده دارای نرخ نمونه برداری ۱ مگاهرتز بود و تبدیل آنالوگ / دیجیتال سیگنال‌ها را انجام می‌داد و آنها را از طریق (USB) به کامپیوتر منتقل می‌کرد.



1.Nitrogengas cylinder，2.Regulating valve,3.Pressure gauge,4.Ball valve，5. Sensor, 6. Atmospheric valve,7.Back-pressure valve ,8.Volume flow controller,9.Intelligent flow meter with display,10. Acoustic emission system,11.Crosstie

شکل ۱: پلت فرم آزمایشی تشخیص نشت شیر

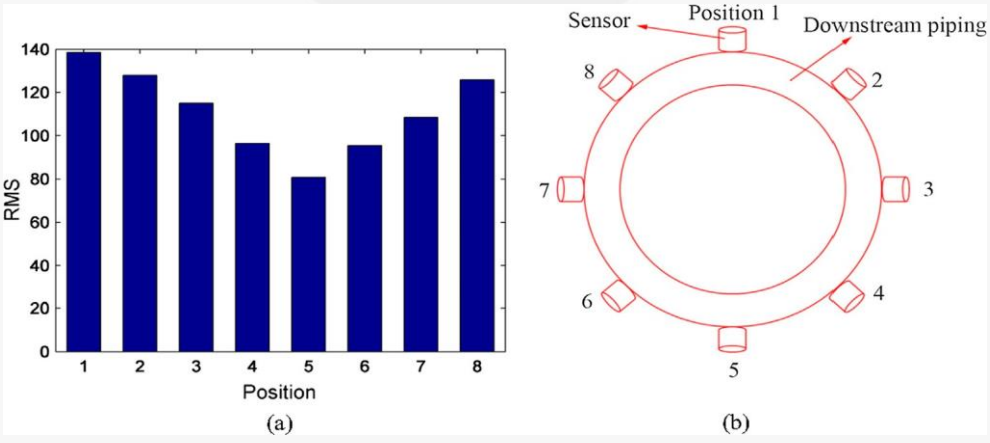
فرآیند جمع آوری داده‌ها

- **کالیبراسیون تجهیزات و بازرسی خط لوله**

هنگامی که فلنج‌ها آب‌بندی نمی‌شوند یا سایر تجهیزات خراب می‌شوند، تأثیر زیادی در آزمایش نشتی داخلی خواهد داشت. بنابراین، قبل از انجام آزمایشات، سیستم آزمایشی باید بررسی شود تا از عملکرد طبیعی هر یک از تجهیزات اطمینان حاصل شود.تنظیمات آزمایشی طبق پروتکل زیر مورد آزمایش قرار گرفت. ابتدا شیر توپی ۴ را کاملا باز کنید، شیر اتمسفر ۶ و شیر فشار برگشتی ۷ را ببندید. دوم، سیلندر گاز نیتروژن ۱ و شیر تنظیم ۲ را باز کنید. سوم، اعداد گیج‌های فشار بالادست و پایین دست را مشاهده کنید. اگر قرائت‌ها ثابت باشند، نشان می‌دهد که عملکرد گیج‌های فشار طبیعی است و فلنج‌ها به درستی متصل شده‌اند. اگر قرائت‌ها به تدریج تغییر کنند، نشان می‌دهد که فلنج‌ها به درستی متصل نشده‌اند و باید آن‌ها را مجدداً نصب کرد تا زمانی که اعداد فشار سنج ثابت به دست آید.

- **اندازه گیری موقعیت نشتی شیر**

قبل از جمع‌آوری سیگنال‌های نشتی، باید سنسور را روی خط لوله در نزدیکی موقعیت نشتی شیر نصب کنیم تا از دست دادن سیگنال نشتی کم شود. موقعیت شیر را در امتداد حلقه آب‌بندی پایین دست در جهات مختلف اندازه‌گیری کنید و موقعیتی را که حداکثر مقدار RMS را دارد به عنوان موقعیت نشتی انتخاب کنید. همانطور که در شکل ۲ (b) می‌بینیم، در مورد ثابت نگه داشتن فشار ورودی، سنسور در هشت مکان نشان داده شده در نمودار نصب می شود و مقادیر RMS سیگنال‌های نشتی ثبت می شود. مقادیر RMS هشت موقعیت نشتی در شکل ۲ (a) نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲(a) مشخص است، موقعیت ۱ حداکثر مقدار RMS را دریافت می‌کند. نشت گاز باعث تولید نویز می‌شود و هر چه سنسور به موقعیت نشتی نزدیکتر باشد، نویز بیشتری جمع آوری می‌شود، یعنی می تواند حداکثر مقدار RMS را بدست آورد. بنابراین موقعیت ۱ به عنوان موقعیت نشتی در نظر گرفته می‌شود.



شکل۲: موقعیت نشتی

- **جمع آوری داده‌ها**

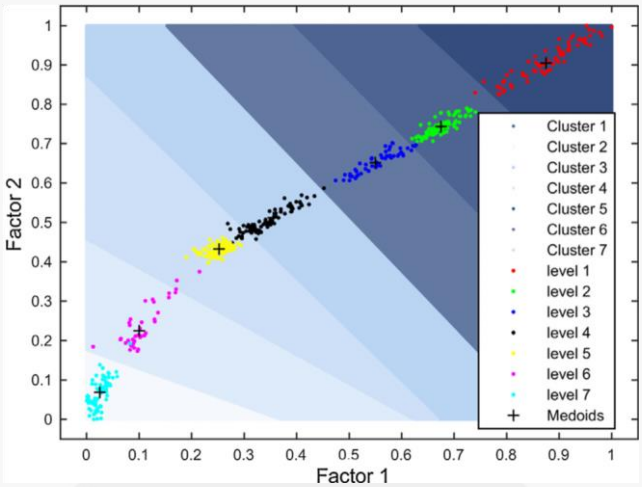
پس از کالیبراسیون تجهیزات و بازرسی آب بندی خط لوله و تعیین موقعیت نشتی، آزمایش تشخیص نشتی شیر اجرا شد. سنسور AE در موقعیت ۱ که نزدیک فلنج است برای جمع آوری سیگنال‌های نشتی نصب شده است. به منظور بهبود حساسیت سیستم AE و کاهش تداخل سیگنال‌های دیگر، ضخامت مناسبی از جفت صوتی بین سنسور و لوله‌کشی اعمال شد. در همین حال، سنسور با یک فیکسچر مغناطیسی ثابت شد. شیر توپی ۴ برای ایجاد نشتی ساخته شده است. نشتی از ۳ تا ۱۱ SLM به دلیل بسته شدن ناقص بود. ۷۰۰ سیگنال نشتی از هفت سطح جمع آوری شد و هر سطح شامل ۱۰۰ سیگنال نشتی است.

نتایج

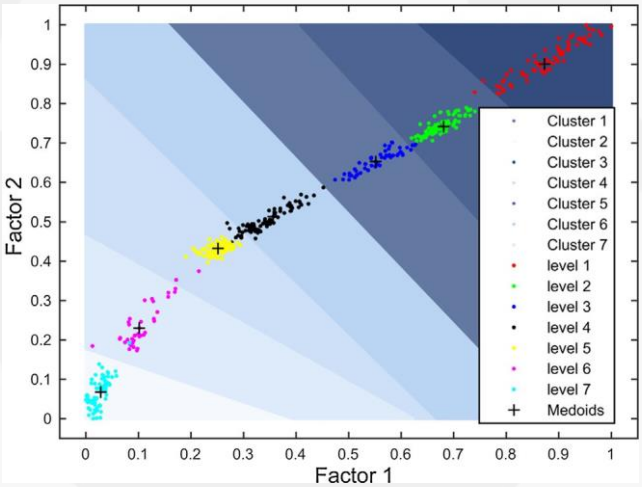
هشت پارامتر ویژگی هر سیگنال نشتی به عنوان متغیرهای ورودی استفاده شد که شامل آنتروپی، انرژی، چولگی، میانگین، واریانس، انحراف استاندارد، کشیدگی و RMS می‌شود. ماتریس ویژگی ۷۰۰ × ۸ به دست آمد (یعنی ۸ پارامتر ویژگی، ۷۰۰ نمونه از ۷ سطح نشت). چنین ویژگی‌های بسیار بعدی اغلب حاوی مقدار زیادی اطلاعات اضافی هستند که نه تنها سرعت محاسبات را کاهش می‌دهد، بلکه بر دقت تشخیص کلی تأثیر می‌گذارد. بنابراین، یک روش جدید برای کاهش ابعاد - تحلیل عاملی - پیشنهاد شد.

آنالیز خوشه‌ای

دو عامل مشترک برای تحلیل خوشه‌ای استخراج می‌شوند. از دو نوع الگوریتم خوشه‌بندی k-means و k-medoids استفاده شد. هر الگوریتم پنج بار اجرا شد و نتایج خوشه‌بندی آنها به‌طور میانگین محاسبه شد. برای انجام تشخیص میزان نشت ۷۰۰ نمونه از هفت سطح نشتی به هفت خوشه تقسیم شدند. نتایج خوشه بندی در شکل‌های ۳-۴ نشان داده شده است. در تئوری، هر خوشه باید شامل ۱۰۰ نمونه برای هر سطح نشتی باشد. با توجه به تفاوت در عملکرد الگوریتم های خوشه بندی، نتایج پارتیشن بندی متفاوتی تولید شد و می‌توانیم ببینیم که تنها تعداد کمی از نمونه‌های متعلق به همان سطح به خوشه‌های مجزا تقسیم می‌شوند.



شکل۳: نتایج خوشه بندی k-means. بلوک‌های رنگ‌های مختلف نشان دهنده هفت خوشه هستند



شکل۴: نتایج خوشه‌بندی k-medoids. بلوک‌های رنگ‌های مختلف نشان دهنده هفت خوشه هستند

نتیجه گیری

در این مقاله، سیگنال‌های صوتی از یک شیر نشتی به‌طور تجربی به‌دست آمد و از هشت پارامتر ویژگی هر سیگنال برای ساخت مجموعه ویژگی‌ها استفاده شد. تجزیه و تحلیل عاملی برای کاهش مقدار اطلاعات اضافی در ویژگی‌های بسیار ابعادی استفاده شد. دو نوع الگوریتم خوشه بندی، k-means و kmedoids برای طبقه بندی نرخ نشت استفاده شد. عملکرد از نظر دقت کلی، زمان محاسباتی، تکرارها ارزیابی شد. در مقایسه با الگوریتم k-means ، الگوریتم خوشه بندی k-medoids بالاترین دقت (۹۶,۲۸٪) را داشت. بنابراین، روش مبتنی بر تحلیل عاملی و الگوریتم خوشه‌بندی kmedoids برای شناخت درونی مؤثر بود.