

Experimental investigation of fluid leakage in pipes by signal processing of acoustic emission signals

Mohammad kalantari¹  | Hossein Heidary¹ 

1. Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, iran. E-mail heidary@tafreshu.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 16 Sep. 2025

Revised 15 July 2026

Accepted 4 October 2026

Keywords:

acoustic emission (AE),
leak,
Experimental setup,
signal,
sensor.

ABSTRACT

The integrity of piping systems is of critical importance across many industries due to the transportation of a wide range of fluids. The occurrence of leaks can disrupt operations, compromise safety, and significantly increase maintenance costs. In this study, the Acoustic Emission (AE) technique was employed as a non-destructive, defect-sensitive, and continuously monitorable approach to investigate leak behavior. A laboratory-scale experimental setup was developed using pressurized water flowing through galvanized steel pipes to evaluate the acoustic characteristics of leakage under controlled conditions. Key parameters such as fluid pressure, leak orifice diameter, and pipe diameter were considered as independent variables. Acoustic Emission waveforms were collected and recorded using sensors installed at predetermined distances along the pipeline. Following noise reduction and the application of an appropriate band-pass filter matched to the sensor bandwidth, time domain, statistical, and frequency-domain features (including amplitude, event counts, signal rise time, and signal energy) were extracted. These features enabled the discrimination of leak-related acoustic signatures from background disturbances such as flow turbulence and mechanical vibrations. Graphical analyses conducted under six experimental conditions demonstrated that fluid pressure, pipe diameter, and leak orifice diameter systematically influence the acoustic response. Specifically, increasing the internal pressure or enlarging the leak aperture led to higher signal amplitudes and event rates. Furthermore, pipe diameter played a significant role in wave propagation characteristics and attenuation behavior. Overall, the findings validate Acoustic Emission as a rapid and reliable non-destructive technique for structural health monitoring of pipelines and early leak detection. The integrated workflow combining feature-based detection with sensitivity analysis of key physical parameters provides a practical foundation for real-time (online) monitoring. The results further indicate that proper calibration with respect to pipe geometry and fluid properties, along with integration of AE systems into inspection and condition-monitoring programs, is essential for reducing testing time and operational risk.

Cite this article: Kalantari, M, Heidary H. (2026). Experimental investigation of fluid leakage in pipes by signal processing of acoustic emission signals. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 5 (1), 1-14. <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.545530.1169>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.545530.1169>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

بررسی آزمایشگاهی نشتی سیال در لوله‌ها به روش پردازش سیگنال‌های دریافتی نشر آوایی صوتی محمدکلانتری^۱ | حسین حیدری^۱ | ✉

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، رایانامه: heidary@tafreshu.ac.ir

چکیده:

یکپارچگی سامانه‌های لوله‌کشی در بسیاری از صنایع، به سبب جابه‌جایی طیف گسترده‌ای از سیالات، اهمیت حیاتی دارد و وقوع نشتی می‌تواند عملیات را مختل کرده، ایمنی را کاهش دهد و هزینه‌های نگهداری را افزایش دهد. در این پژوهش، با تکیه بر روش نشر آوایی «آکوستیک امیشن» به عنوان رویکردی غیرمخرب، حساس به عیوب کوچک و سازگار با پایش پیوسته، یک سامانه آزمایشگاهی شامل لوله‌های فولادی گالوانیزه حامل آب تحت فشار ساخته شد تا رفتار آکوستیکی نشتی در شرایط کنترل شده بررسی شود و پارامترهایی نظیر فشار آب، قطر نشتی قطر لوله به عنوان متغیر مورد پژوهش قرار گیرد. شکل موج‌های آکوستیک امیشن توسط سنسورهای نصب شده در فواصل تعیین شده گردآوری و ثبت شد. پس از کاهش نویز و اعمال فیلتر گذر باند متناسب با پهنای باند سنسور، ویژگی‌های زمانی و آماری و طیفی (دامنه، رویدادها، نرخ رشد سیگنال‌ها، انرژی سیگنال و غیره) استخراج شد و با اتکا به این ویژگی‌ها، مؤلفه‌های مرتبط با نشتی از اغتشاش‌های زمینه‌ای و آشفتگی جریان و ارتعاشات مکانیکی تفکیک گردید. تحلیل‌های نموداری در شش حالت نشان داد که فشار سیال، قطر لوله و قطر دهانه نشتی به طور سیستماتیک بر پاسخ آکوستیکی اثرگذارند؛ به گونه‌ای که با افزایش فشار یا بزرگ‌تر شدن دهانه نشتی، دامنه‌ها و نرخ رخدادها افزایش یافته و نقش قطر لوله در تعدیل انتشار و میرایی آشکار می‌شود. در مجموع، یافته‌ها آکوستیک امیشن را به عنوان روشی غیرمخرب و سریع برای پایش سلامت خطوط لوله و تشخیص زودهنگام نشتی تأیید می‌کند. جریان کار ترکیبی «تشخیص مبتنی بر ویژگی» و «تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای فیزیکی کلیدی» زیربنایی عملی برای پایش برخط فراهم می‌آورد. نتایج نشان می‌دهند که کالیبراسیون متناسب با هندسه لوله و ویژگی‌های سیال و ادغام سامانه آکوستیک امیشن در برنامه‌های بررسی و پایش تجهیزات، برای کاهش زمان تست و ریسک ضروری است.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۶/۲۵

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۴/۲۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۷/۱۲

کلیدواژگان:

آکوستیک امیشن،

نشتی،

سامانه آزمایشگاهی،

سنسور،

سیگنال.

استناد: کلانتری، محمد؛ حیدری، حسین. (۱۴۰۴). بررسی آزمایشگاهی نشتی سیال در لوله‌ها به روش پردازش سیگنال‌های دریافتی نشر آوایی صوتی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۵ (۱)، ۱-۱۴.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.545530.1169>



۱- مقدمه

انتقال مواد حیاتی همچون آب، گاز و نفت از طریق خطوط لوله، به واسطه ظرفیت بالای انتقال، سرعت تحویل بالا و هزینه‌های اقتصادی پایین، به روش غالب در صنایع مختلف تبدیل شده است. با این حال، یکی از چالش‌های اساسی در این سیستم‌ها، رخداد نشتی‌های ناگهانی است که می‌تواند عواقب جبران‌ناپذیری به همراه داشته باشد.

نشتی سیال «Fluid Leakage» به خروج ناخواسته و کنترل‌نشده سیالات از سیستم‌های لوله‌کشی، اتصالات و تجهیزات صنعتی گفته می‌شود که ناشی از گسیختگی یا نقض در یکپارچگی فیزیکی این سیستم‌هاست. این رخداد ممکن است تحت تأثیر عواملی مانند نقص ساختاری، خوردگی، فرسایش، فشار بیش از حد، نصب غیراصولی یا خرابی‌های مکانیکی روی دهد و باعث خروج سیال از نواحی و محدوده‌هایی گردد که طبق شرایط عملیاتی طبیعی، انتظار نمی‌رود اتفاق بیفتد [۱].

روش‌های گوناگونی برای شناسایی و کشف نشتی موجود است که اگرچه به‌طور مستقیم از بروز نشتی جلوگیری نمی‌کنند، اما در کنترل و کاهش اثرات زیان‌بار و پیامدها و آثار منفی آن بسیار مؤثر و کاربردی هستند [۲].

اهمیت و ضرورت تشخیص سریع و دقیق نشتی در خطوط لوله، بر هیچ کس پوشیده نیست. چرا که شناسایی به موقع نشتی، امکان اتخاذ تدابیر لازم برای جلوگیری از گسترش آن و کاهش خسارات احتمالی را فراهم می‌آورد. در همین راستا، توسعه سیستم‌های هوشمند و خودکار تشخیص نشتی، به عنوان یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر مطرح شده است. این سیستم‌ها با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، قادرند به صورت مداوم خطوط لوله را پایش کرده و درصد بالایی از نشتی‌ها را به سرعت شناسایی کنند. در نتیجه، می‌توان گفت که سرمایه‌گذاری در توسعه و پیاده‌سازی سیستم‌های تشخیص نشتی هوشمند، گامی مؤثر در جهت افزایش ایمنی، کاهش هزینه‌ها و صیانت از محیط زیست محسوب می‌شود [۳].

امروزه، آزمون آکوستیک امیشن به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر و پیشرفته ارزیابی غیرمخرب، در مجموعه‌ای گوناگون از مصارف صنعتی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد و

نقش مهمی در سنجش مداوم سلامت سازه‌ها، تشخیص زودهنگام عیوب و بهینه‌سازی فرآیندهای نگهداری ایفا می‌کند؛ یکی از مهم‌ترین کاربردهای آکوستیک امیشن شناسایی و آشکارسازی نشتی در خطوط لوله‌های انتقال سیالات است [۴]. این روش بر پایه‌ی ثبت و تحلیل امواج الاستیکی ایجادشده در اثر آزاد شدن ناگهانی انرژی درون ماده عمل می‌کند. این امواج می‌توانند ناشی از فرآیندهایی همچون رشد ترک، تغییر شکل پلاستیک، نشتی سیال، یا شکست‌های موضعی در ساختار باشند. در این روش، حسگرهای پیزوالکتریک روی سطح نمونه یا سازه نصب می‌شوند تا امواج گذرنده را دریافت کنند. سیگنال دریافتی معمولاً بسیار ضعیف است، بنابراین نخستین مرحله پس از آشکارسازی، تقویت سیگنال‌ها توسط پیش‌تقویت‌کننده‌هاست. سپس سیگنال وارد واحد فیلترینگ می‌شود تا نویزهای محیطی حذف و تنها بازه‌ی فرکانسی مرتبط نگه داشته شود. پس از این مراحل، داده‌ها به سیستم اخذ داده (DAQ) منتقل شده و در قالب پارامترهای زمانی و فرکانسی مانند دامنه، انرژی، تعداد ضربه‌ها (Hits)، نرخ رخداد و طیف فرکانسی ذخیره می‌گردند. پردازش این سیگنال‌ها می‌تواند به‌صورت حوزه‌ی زمان (TimeDomain)، حوزه‌ی فرکانس (FFT)، یا حوزه‌ی زمان-فرکانس (مانند اسپکتروگرام یا اسکالوگرام) انجام شود. هدف نهایی پردازش، شناسایی الگوهای خاص در سیگنال است که بتواند نوع مکانیزم ایجادکننده (مثلاً ترک یا نشتی) را مشخص کند و همچنین امکان تعیین مکان منبع انتشار از طریق محاسبه‌ی اختلاف زمان رسیدن سیگنال‌ها به حسگرهای مختلف فراهم شود. سنسورهای آکوستیک امیشن معمولاً از نوع پیزوالکتریک هستند که قابلیت تبدیل ارتعاشات مکانیکی ناشی از انتشار امواج الاستیک به سیگنال‌های الکتریکی را دارند. این سنسورها بر اساس بازه‌ی فرکانسی موردنیاز به انواع پهن‌بند برای ثبت کل طیف امواج و باریک‌بند برای تمرکز روی یک فرکانس مشخص تقسیم می‌شوند. امواج دریافتی توسط این حسگرها معمولاً به دو دسته‌ی اصلی امواج سطحی و امواج حجمی شامل امواج طولی و امواج برشی طبقه‌بندی می‌شوند. امواج طولی سریع‌تر حرکت کرده و زودتر به سنسور می‌رسند، در حالی که امواج برشی و سطحی اطلاعات ارزشمندی از

مکانیزم شکست یا نشی در ماده فراهم می آورند. انتخاب نوع سنسور، محل نصب و بازه ی فرکانسی آن نقش مهمی در کیفیت سیگنال دریافتی و قابلیت تفکیک رخدادهای مختلف در آزمون آکوستیک امیشن دارد [۵].

محققان از دیرباز به دنبال رویکردی دقیق با قابلیت اطمینان برای تشخیص نشی در لوله ها بوده اند. در این مسیر پژوهشگران متدهای مختلفی را برای نشی یابی ارائه کردند. در این راستا، استفاده از سیگنال های آکوستیک امیشن و توسعه الگوریتم های پردازش سیگنال پیشرفته، یکی از مسیرهای پرطرفدار و محبوب تحقیقات بوده است:

مجیداحدی و مهرداد شریفبختیار [۶] نشان دادند که با تبدیل موجک بهینه شده و «تنظیم» موجک مادر با شکل سیگنال AE می توان نشی در لوله های PVC پر از آب را حتی در حضور نویز پاشش و رزونانس های طبیعی جداسازی کرد و باندهای متمایزی برای نشی به دست آورد. هم زمان، مسئله مکان یابی از طریق اختلاف زمان رسیدن امواج و مدل سازی هندسی مطرح شد؛ اوزوین و هاردینگ^۱ [۷] با ترکیب AE و اتصال هندسی، نشی در شبکه های تحت فشار را با به کارگیری همبستگی متقابل بین کانال ها مکان یابی کردند و در عین حال به حساسیت نتایج نسبت به سرعت انتشار موج و پدیده پراکندگی اشاره نمودند. از سوی دیگر، مصطفی پور و داوودی [۸] نشان دادند که نرخ جریان و افزایش فشار داخلی به طور معنی داری انرژی و الگوی طیفی آکوستیک امیشن را تغییر می دهد و بنابراین می توان از شاخص های آکوستیک امیشن برای پایش وضعیت خطوط فشار بالا بهره گرفت.

با پیشروی تحقیقات، تمرکز از «قابلیت مشاهده رخداد» به سنجش کمی و پیوند با شدت نشی تغییر کرد. باترفیلد و همکاران^۲ [۹] روی لوله های MDPE نشان دادند که شاخص های میانگین مربعات ریشه و چگالی طیفی توان همبستگی بالایی با نرخ جریان نشی دارند و می توانند مبنای برآورد شدت باشند. در ادامه، برای مقابله با نویزهای سازه ای محیطی، پن و همکاران^۳ [۱۰] ترکیبی از تجزیه موجک و تجزیه حالت ذاتی را برای پالایش سیگنال به کار

گرفتند و با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان توانستند حالت های «عادی، نشی کم، نشی زیاد» را با دقت بالا طبقه بندی کنند؛ این نتایج نشان می دهد انتخاب مقیاس های موجک و مدهای ذاتی مناسب، نسبت سیگنال به نویز و تفکیک پذیری را به طور محسوس ارتقا می دهد.

در دهه اخیر، دسترسی به داده های چندکاناله پایدار و پیشرفت محاسباتی، گذار به یادگیری ماشین را تسریع کرد. سانگ بویی و جانگ بویی^۴ [۱۱] با تحلیل پیوسته رخدادهای آکوستیک امیشن در نداشت زمان فرکانس و ترسیم هیستوگرام مکانی منابع آکوستیک امیشن نشان دادند که چگالی رخدادهای نقاط بحرانی (ترک، نشی) را آشکار می کند و نرخ فعالیت آکوستیک امیشن با فشار داخلی همبستگی دارد؛ این یافته ها برای پایش پیشگیرانه سودمند است. در یک مطالعه ی میدانی واقعی، فارس و همکاران^۵ [۱۲] در شبکه توزیع آب هنگ کنگ با حسگرهای آکوستیکی بی سیم و ادغام ویژگی های زمانی و فرکانسی، مدل های شبکه های عصبی مصنوعی و یادگیری عمیق را بررسی کرده و کارایی سامانه را در شرایط عملیاتی واقعی اعتبارسنجی کردند. با تکیه بر داده های آزمایشگاهی کنترل شده، نیامات و همکاران^۶ [۱۳] سه سنسور را روی خط لوله فولادی مستقر کردند و داده ها را تحت دو سیال آب و گاز و فشارهای ۱۳ و ۱۸ بار گردآوری نمودند؛ به کمک پنجره لغزان با آستانه تطبیقی بردارهای ویژگی زمانی طیفی استخراج و با «Random Forest, KNN» و شبکه های عصبی آموزش داده شد و دقت های بسیار بالا در تفکیک حالت عادی نشی و حتی برآورد اندازه نشی به دست آمد. این خط پژوهشی نشان داد که ترکیب زمان بندی رخدادهای الگوهای طیفی، پایداری تصمیم گیری را در سناریوهای متنوع افزایش می دهد.

گام بعدی، حرکت به سوی تجزیه های پیشرفته سیگنال و معماری های مقاوم در برابر نویز بود. زگرتدینوف و همکاران^۷ [۳] با استفاده از تحلیل فراکتال روی سیگنال های آکوستیک امیشن ناشی از شکاف های میلی متری نشان دادند شاخص های پیچیدگی می توانند تمایز رخدادهای را بهبود

⁴ Thang Bui Quy, Jong Myon Kim

⁵ Ali Fares et al.

⁶ Niamat et al.

⁷ Ayrat Zagretidinov et al.

¹ Didem Ozevin, James Harding

² J.D. Butterfield et al.

³ Shengshan Pan et al.

روی سیگنال‌های آکوستیک امیشن را دریافت و سپس مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

۲- روش پژوهش و انجام آزمایش

اطمینان از پایایی و درستی یافته‌ها، مستلزم بهره‌گیری ادوات و تجهیزات تخصصی، فراهم‌آوری بسترهای استاندارد و پایبندی و تبعیت کامل به الزامات و دستورالعمل‌های استاندارد بین‌المللی است تا فرآیند آزمون با دقت و راندمان بالا انجام شود. این استانداردها شامل دستورالعمل‌هایی فراگیر و راهبردی برای نحوه نمونه‌پردازی و آماده‌سازی آن‌ها، نصب سنسور، پردازش داده‌ها و تبیین خروجی‌ها هستند که رعایت آن‌ها تضمین‌کننده صحت و دقت فرآیند ارزیابی است.

۲-۱ روش پژوهش

مطابق شکل ۱ برای انجام پژوهش یک سامانه آزمایشگاهی آماده شد؛ دراین سامانه از لوله‌های فولادی گالوانیزه جهت شبیه‌سازی بخشی از مسیر انتقال سیال استفاده شد. این لوله‌های گالوانیزه با استفاده از بست و پایه روی یک میز فریم فلزی سوار شد. جهت جلوگیری از ارتعاشات بخش‌های دیگر به لوله از فوم و دمپینگ در محل اتصالات استفاده شد. از یک مخزن آب برای جمع‌آوری سیالات در حال چرخش در سیستم و از یک پمپ برای فشرده‌سازی سیال و انتقال سیال در مسیر لوله و برای کنترل میزان فشار سیال درگرددش از شیر فشارشکن استفاده شد.



شکل (۱) سامانه آزمایشگاهی

تست‌های مربوطه براساس استاندارد ASTM E1211/E1211M-17 با عنوان «روش استاندارد برای شناسایی و مکان‌یابی نشتی با استفاده از سنسورهای انتشار آکوستیک سطحی»، انجام پذیرفت. این استاندارد با

دهند، به‌ویژه زمانی که فرکانس‌های تشدید و نویز محیطی همپوشانی دارند. در محیط‌های پرنویز دریایی، جیالین سویی و همکاران^۱ [۱۴] با ادغام تجزیه حالت ذاتی بهبودیافته با نویز تطبیقی و شبکه عصبی احتمالی، نشتی را با پایداری بالا شناسایی کردند و گزارش دادند که انرژی آکوستیک امیشن نشتی عمدتاً در بازه‌های سی تا پنجاه کیلوهرتز و صدوسی و پنج تا صدوشت و پنج کیلوهرتز متمرکز می‌شود؛ یافته‌ای که برای طراحی باند سنسور فیلتر و انتخاب سنسورهای رزونانسی راهبردی است. همسو با این جهت‌گیری، امجدعلی و همکاران^۲ [۱۵] راهکاری چندتجزیه‌ای تلفیقی از تجزیه حالت متغیر، آنالیز موجک تجربی و تبدیل موجک پیوسته را برای بهبود نسبت سیگنال به نویز و آشکارسازی دقیق زمان‌مبنای نشتی پیشنهاد کردند و نشان دادند که این ترکیب می‌تواند سیگنال نشتی پنهان در نویز شدید را استخراج و مکان‌یابی را با کیفیت بالا ممکن سازد. برای تکمیل زنجیره پردازش تا مکان‌یابی نهایی، جیالین کوی و جینو دو^۳ [۱۶] یک رویکرد تلفیقی مبتنی بر تجزیه تجربی مد مجتمع با نویز تطبیقی برای تفکیک و جداسازی و کاهش نویز و استخراج اجزای موثر سیگنال، الگوریتم وزنی مبتنی بر هیلبرت جهت تخمین اختلاف زمان و مکان‌یابی و شبکه عصبی پس‌انتشار برای تصحیح و بهینه‌سازی نتایج مکان‌یابی ارائه دادند. این ترکیب باعث شد خطای میانگین مکان‌یابی کاهش یافته و دقت میانگین به ۹۶.۹۳ درصد برسد که نسبت به بسیاری از روش‌های پیشین، بهبود قابل ملاحظه‌ای است.

مطالعه و بررسی پژوهش‌های پیشین از کارامدی و مفید بودن روش آکوستیک امیشن برای شناسایی و ردیابی نشتی خبر می‌دهد. همچنین نکات مهمی پیرامون ایجاد سامانه آزمایشگاهی برای انجام بهتر و موثرتر تست‌ها ارائه می‌کند تا بتوان با دقت بیشتری آزمایش‌ها را انجام داد و داده‌های قابل اعتمادتری دریافت کرد.

در این پژوهش با بهره‌گیری از روش آکوستیک امیشن و ایجاد یک سامانه آزمایشگاهی، یک سیستم تحت کنترل از انتقال سیال ایجاد شد تا بتوان تاثیر پارامترهای مختلف بر

¹Jialin Cui et al.

²Amjad Ali et al.

³Jialin Cui, Jinbo Du

سنسورها و فشار آزمون، زمان ثبت رویدادهای آکوستیک امیشن و موقعیت مکانی نشی است.

۲-۲ تست و آزمایش

ابتدا تست های آکوستیک امیشن روی لوله های سالم بدون نشی مصنوعی انجام شد. این تست های آکوستیک امیشن برای دریافت سیگنال های نویز محیطی و پس زمینه و همچنین برای تعیین خط سطح آستانه صورت پذیرفت.

تست ها روی هر کدام از لوله ها بصورت زیر انجام شد:

۱. تست لوله بدون عبور سیال از درون لوله
۲. تست لوله در هنگام عبور سیال از درون لوله
۳. تست لوله در هنگام عبور سیال از درون لوله با نصف فشار اولیه

پس از ثبت داده های تست های ذکر شده با ایجاد یک نشی مصنوعی در لوله ها با سوراخکاری با قطر مشخص، تست های قبل تکرار می شود تا تاثیرات نشی و پس از آن تاثیرات قطر سوراخ نشی، تاثیر فشار سیال و تاثیر فاصله سنسور از کانون نشی بر روی سیگنال های آکوستیک امیشن بررسی شود.

برای شبیه سازی مسیر انتقال سیال از لوله های فولادی گالوانیزه به طول ۲ متر و با قطر تقریبی ۲۰ میلی متر و ۳۰ میلی متر که به لوله های سایز ۲ و ۳ معروف است، استفاده شد.

فشار کاری این لوله ها تا ۲۵ بار است و اتصالات آن معمولاً از طریق روزه و یا مهره ماسوره انجام می شود. از مزایای این نوع لوله ها می توان به مقاومت به خوردگی نسبت به فولاد سیاه و طول عمر بیشتر در برابر رطوبت و محیط های مرطوب اشاره کرد.

مشخصات لوله سایز ۲ و لوله سایز ۳ در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول (۱) مشخصات لوله

طول لوله (mm)	وزن هر متر (kg)	قطر داخلی تقریبی (mm)	ضخامت (mm)	قطر خارجی (mm)	سایز اسمی
۲۰۰۰	۱۰۲۷	۱۸۵۳	۱۰۴۷	۲۰	۲
۲۰۰۰	۲۰۵	۲۹۰۶	۳۰۳۸	۳۰	۳

تبیین الزامات فنی و نحوه استفاده بهینه از سنسورهای آکوستیک امیشن، امکان شناسایی و ارزیابی دقیق محل نشی را فراهم می سازد، بی آنکه نیاز به بازکردن و دمونتاژ یا ایجاد آسیب در ساختار سیستم وجود داشته باشد.

برای انجام آزمون آکوستیک امیشن به منظور نشی یابی در لوله ها خصوصاً لوله های تحت فشار، نیاز به رعایت یک روند استاندارد، دقیق و گام به گام وجود دارد تا نتایج قابل اعتماد و تکرارپذیر حاصل شود. در ادامه مراحل انجام این آزمون را بیان و تشریح می شود:

در اولین گام محل جانمایی سنسورها را باید با الکل صنعتی، سمباده نرم یا پارچه خشک تمیز کرد. سپس باید از خشکی، صافی و تمیزی سطح جهت اتصال مناسب سنسور اطمینان حاصل کرد. در گام بعدی سنسورهای موردنظر در جایگاه مشخص خود که از پیش تعیین شده با استفاده از چسب و گیره روی لوله نصب می گردد. برای اتصال بهتر سنسور وسازه از کوپلنت (ژل سیلیکونی) استفاده می شود. در مرحله بعدی این سنسورها به پیش تقویت کننده ها با استفاده از کابل متصل می شوند تا داده ها را به سیستم منتقل کنند.

در کالیبراسیون سیستم جهت بررسی کارایی و عملکرد هر سنسور و ثبت پاسخ AE آزمون «Pencil Lead Break» شکستن نوک مداد ۰.۵ mm روی سطح لوله انجام می شود تا از پاسخ دهی و واکنش پذیری سنسورها اطمینان حاصل گردد. همچنین تست آستانه نویز «Noise Threshold» در محیط آزمایشگاه انجام می شود تا بتوان نویز محیطی آزمایشگاه را ثبت کرد و خط سطح آستانه را تعیین کرد تا در انجام تست های آزمایشگاهی نویز پس زمینه را فیلتر کرد. سپس با استفاده از پمپ در لوله فشار سیال بالا برده می شود تا بتوان سیگنال های نشی را در صورت وجود مورد واریسی قرارداد و ثبت کرد. پس از ایجاد فشار سیال در خط لوله سیگنال ها توسط سنسورها دریافت و به مانیتور دستگاه آکوستیک امیشن منتقل می شود. در این مرحله می توان تمامی داده ها و پارامترهای حاصل را به صورت زنده و برخط کنترل و ثبت وضبط کرد و سپس مورد پایش و تجزیه و تحلیل قرار داد.

پس از طی مراحل ذکر شده گزارشی از روند انجام تست تهیه می شود که این گزارش شامل اطلاعات فنی لوله،

سنسور پیزوالکتریک غیرفعال با پاسخ فرکانسی وسیع و طراحی ضدآب برای کاربردهای آزمایشگاهی و صنعتی در شرایط محیطی مختلف

مشخصات فنی سنسور W800/1 A006

- محدوده فرکانسی: ۵۰ تا ۸۰۰ کیلوهرتز
- فرکانس رزونانس: ۶۰۰ کیلوهرتز
- حساسیت پیک: بیش از ۶۵ دسی‌بل
- دمای کاری: از ۲۰- تا ۱۲۰+ درجه سانتی‌گراد
- ابعاد: قطر ۱۹ میلی‌متر × ارتفاع ۱۵ میلی‌متر
- وزن: ۴۵ گرم
- جنس بدنه: استیل ضدزنگ SUS-304
- جنس سطح حساس: سرامیک
- درجه حفاظت: مناسب برای محیط‌های مرطوب و زیرآبی (IP68)
- نوع کانکتور: BNC با کابل یکپارچه
- موقعیت کانکتور: جانبی

۴- بحث و نتایج

در آزمایش‌های صورت گرفته، داده‌های متفاوتی بر اساس شرایط متغیر گردآوری شده‌اند که مطالعه تحلیلی آن‌ها نیازمند به‌کارگیری تکنیک‌ها و متدهای پیشرفته پردازش سیگنال است. هدف نهایی و تمرکز اصلی بر حصول نتایج صحیح و قابل اعتماد در شناسایی نشتی‌ها و اتخاذ تدابیر پیشگیرانه در برابر آن‌هاست که این امر می‌تواند به بهبود ایمنی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری سیستم‌های انتقال سیال کمک کند.

در تحلیل سیگنال‌های آکوستیک امیشن، تعیین سطح آستانه «Threshold» یکی از بنیادی‌ترین گام‌های پیش‌پردازش داده‌ها محسوب می‌شود. سطح آستانه مقداری از دامنه (ولتاژ) سیگنال است که به‌عنوان حداقل مقدار قابل قبول به‌منظور گردآوری سیگنال‌ها مشخص می‌گردد که در این پژوهش روی ۳۸ دسی‌بل تنظیم شد.

در تحلیل سیگنال‌های آکوستیک امیشن برای شبیه‌سازی و ارزیابی رفتار مواد تحت فشار و بارگذاری و آسیب‌های مختلف از روش‌های گوناگون و متنوعی استفاده می‌کنند.

تبدیل فوریه سریع (FFT) یک الگوریتم و روش

مدت زمان هرکدام از تست‌های انجام شده ۱۰ ثانیه و قطر نشتی‌های مصنوعی ایجاد شده ۲ و ۴ میلی‌متر به صورت دایره در نظر گرفته شده و از سایر شکل‌های دهانه نشتی صرف نظر شده است. سنسورها در این تست‌ها برای بررسی تاثیر پارامترهای قطر لوله، قطر نشتی و فشار در فاصله ۳۰۰ میلی‌متری از محل نشتی مصنوعی نصب شده است. در جدول ۲ پارامترهای ورودی و تعداد سطوح قابل تغییر قابل مشاهده است.

جدول ۲) پارامترهای ورودی

فشار آب ورودی (psi)	فاصله سنسور (mm)	قطر لوله (mm)	قطر سوراخ نشتی (mm)
۱۰	۳۰۰	۲۰	۲
۲۰	۷۰۰	۳۰	۴

۳- ابزار و دستگاه آزمایش

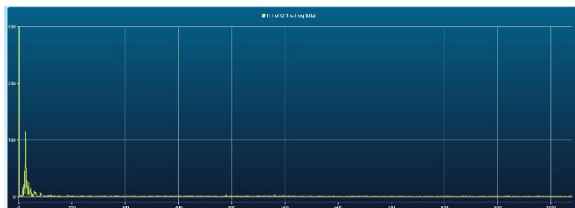
در این سامانه آزمایشگاهی از تجهیزات آکوستیک امیشن شرکت دانش بنیان میپوا با نرخ نمونه برداری ۶۵MHz (که در شکل ۲) تجهیزات آکوستیک امیشن شرکت میپوا قابل ملاحظه است برای انجام تست‌ها استفاده شد. این تجهیزات شامل سنسورهای آکوستیک امیشن، پیش تقویت کننده‌ها، کانال‌های چندگانه برای ورودی سنسورها، نرم‌افزار تحلیل آکوستیک امیشن، رایانه و اتصالات است. این دستگاه دارای قابلیت استخراج پارامترهای کلیدی سیگنال شامل انرژی، تعداد شمارش رویدادها، زمان آغاز، زمان دستیابی به قله، دامنه حداکثری، میانگین فرکانس، بیشترین فرکانس و مقدار مؤثر است.



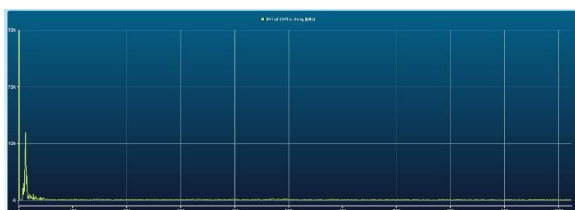
شکل ۲) تجهیزات آکوستیک امیشن شرکت میپوا

۳-۱ مشخصات سنسور

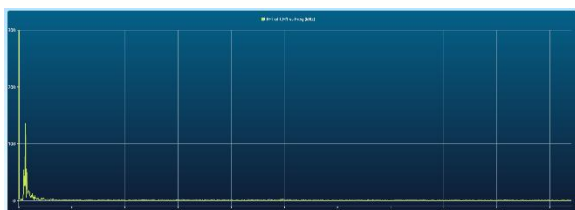
سنسور آکوستیک امیشن مدل W800/1 A006 یک



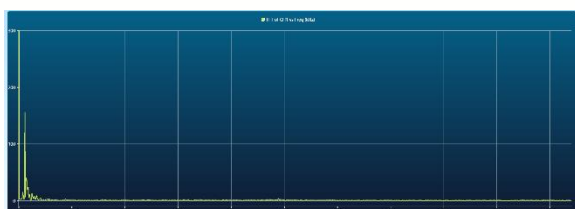
شکل ۶) تحلیل FFT برای لوله سایز ۲ با نشتی به قطر ۲mm در فشار ۱۰psi



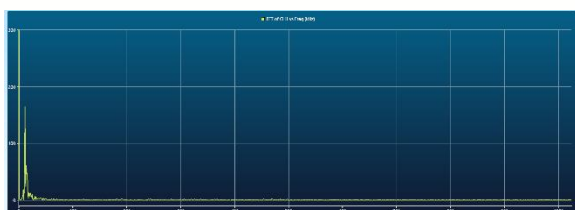
شکل ۷) تحلیل FFT برای لوله سایز ۳ با نشتی به قطر ۴mm در فشار ۱۰psi



شکل ۸) تحلیل FFT برای لوله سایز ۲ با نشتی به قطر ۴mm در فشار ۱۰psi



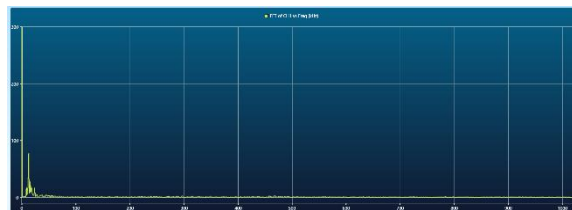
شکل ۹) تحلیل FFT برای لوله سایز ۳ با نشتی به قطر ۴mm در فشار ۲۰psi



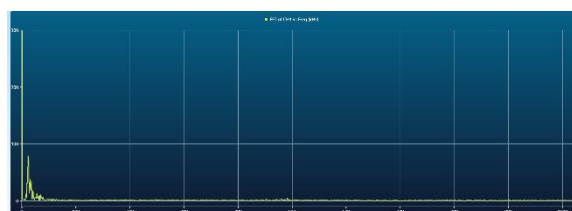
شکل ۱۰) تحلیل FFT برای لوله سایز ۲ با نشتی به قطر ۴mm در فشار ۲۰psi

با بررسی نمودارهای FFT بیشترین دامنه سیگنال مربوط به نشتی لوله با قطر ۲۰ میلی متر و در فشار ۲۰ psi با قطر نشتی ۴ میلی متر و کمترین دامنه سیگنال مربوط به

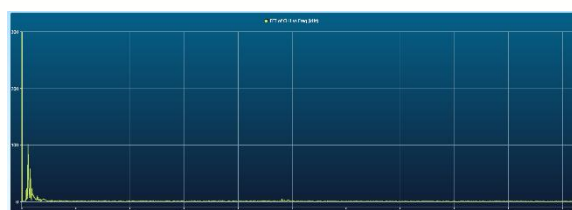
سیستماتیک است که تبدیل فوریه گسسته را برای سیگنال های دیجیتال انجام می دهد و به طور کارساز و با سرعت چشمگیری اطلاعات مربوط به فرکانس های سیگنال را استخراج می کند. این تبدیل سیگنال ها را از دامنه - زمان به دامنه - فرکانس منتقل می کند، به طوری که می توان از طریق آن تغییرات و نوسانات انرژی سیگنال را در فرکانس های مختلف مورد مشاهده و ارزیابی تحلیلی قرار داد. در تصاویر زیر، نمونه هایی از تبدیل فوریه سریع سیگنال های به دست آمده از آزمایش های مختلف مطالعه حاضر نمایش داده می شود تا تاثیر پارامترهای مختلف بررسی شود. در نمودارهای زیر محور Y پاور اسپکتروم (Power Spectrum) یا طیف توان که یکی از ابزارهای مهم در پردازش سیگنال و آنالیز فرکانسی است را نشان می دهد که در این نمودارها به صورت نرمال شده و بدون واحد مشخص نمایش داده می شود، چون بیشتر هدف مقایسه نسبی قدرت فرکانس هاست.



شکل ۳) تحلیل FFT برای لوله سایز ۳ در حالت بدون نشتی در فشار ۲۰psi



شکل ۴) تحلیل FFT برای لوله سایز ۲ در حالت بدون نشتی در فشار ۲۰psi



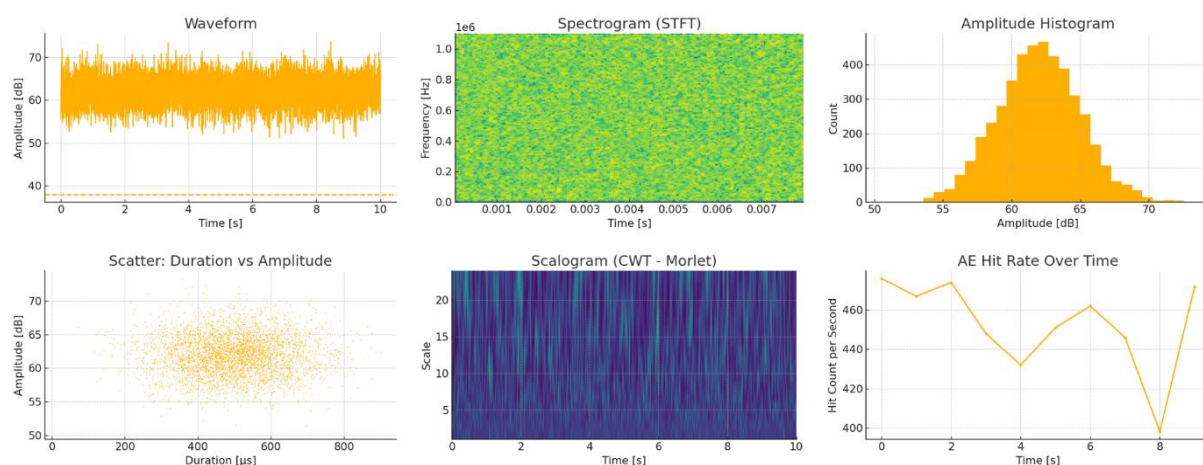
شکل ۵) تحلیل FFT برای لوله سایز ۳ با نشتی به قطر ۲mm در فشار ۱۰psi

بررسی می‌شود. تحلیل شش‌نموداری هر تست (Waveform، Spectrogram، Histogram، Scatter، Scalogram و نرخ رخداد) که از خروجی نرم افزار اوريجين پرو دریافت شده است نشان داد که سه عامل فشار، اندازه‌ی نشستی و قطر لوله به‌صورت منظم بر پاسخ آکوستیکی اثر می‌گذارد که در ادامه این نمودارها مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد

نشستی لوله با قطر ۳۰ میلی‌متر و در فشار ۱۰ psi با قطر نشستی ۲ میلی‌متر است. در مقایسه نمودارهای FFT با یکدیگر فشار تعیین‌کننده‌ترین عامل ارتفاع طیف است؛ قطر نشستی عامل دوم پهنای باند و انرژی سیگنال است.

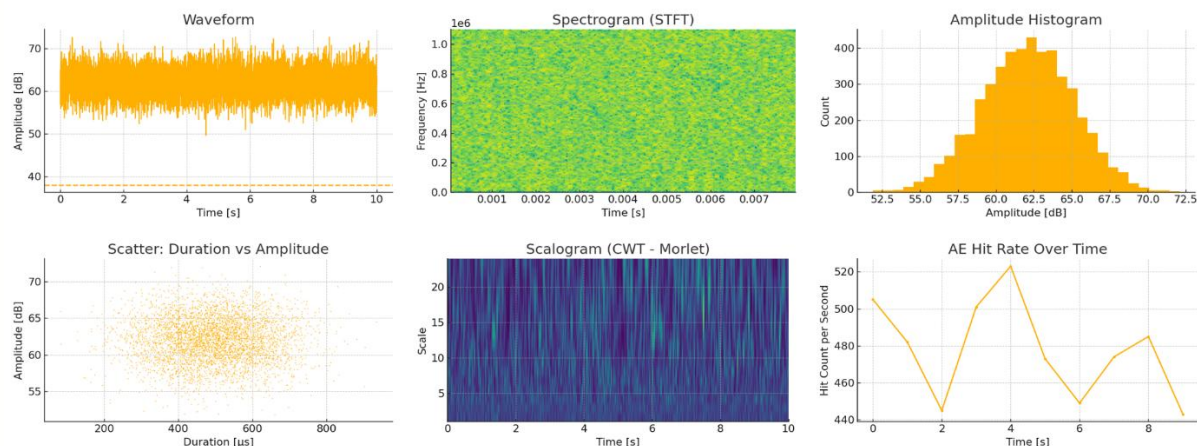
در این پژوهش ورودی‌های مساله شامل فشار سیال داخل لوله، قطر سوراخ نشستی ایجاد شده بر روی لوله، فاصله سوراخ ایجاد شده تا سنسورهای آکوستیک امیشن نصب شده بر روی لوله از یکدیگر است که تاثیر و برآیند آن را بر روی پارامترهای سیگنال‌های دریافتی از سنسور در ادامه

Leak simulation - Pipe 30mm, hole 2mm, 20psi



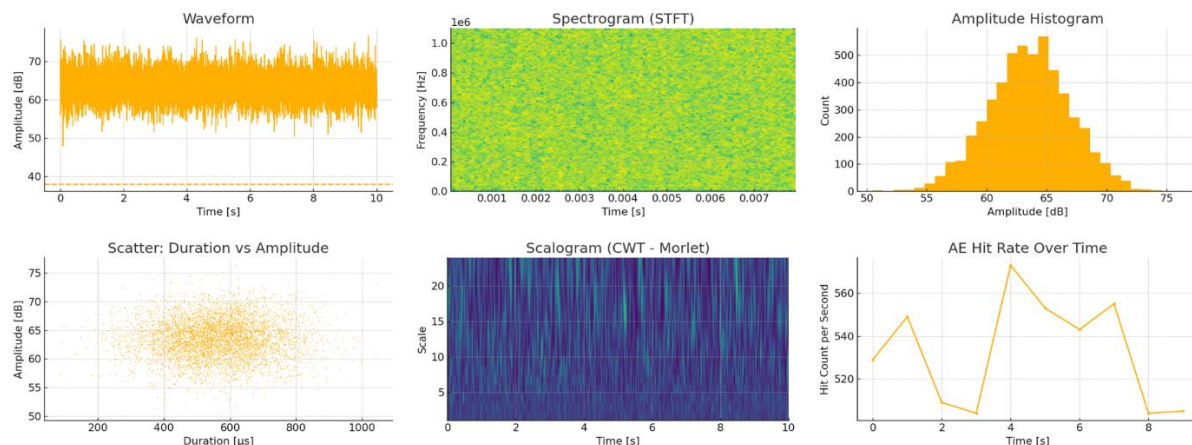
شکل (۱۱) نمودارهای لوله با سایز قطر ۳۰mm با قطر نشستی ۲mm با فشار ۲۰ psi

Leak simulation - Pipe 30mm, hole 2mm, 20psi



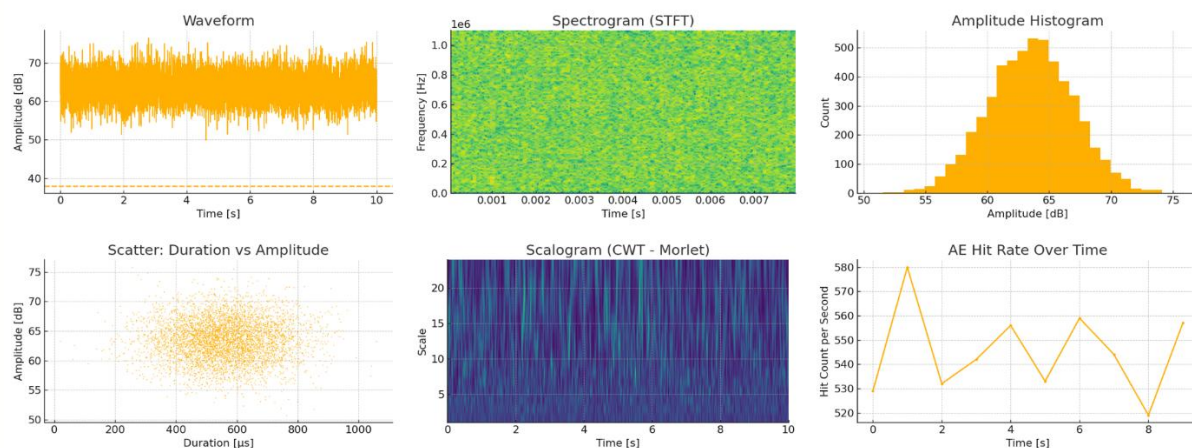
شکل (۱۲) نمودارهای لوله با سایز قطر ۳۰mm با قطر نشستی ۲mm با فشار ۲۰ psi

Leak simulation - Pipe 10mm, hole 4mm, 20psi



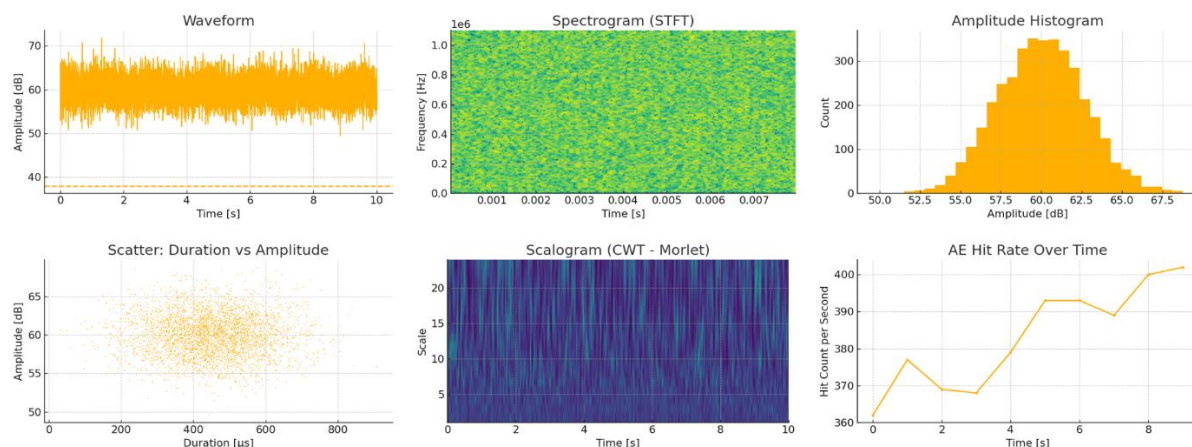
شکل ۱۳) نمودارهای لوله با سایز قطر ۳۰mm با قطر نشستی ۴mm با فشار ۲۰ psi

Leak simulation - Pipe 10mm, hole 4mm, 20psi



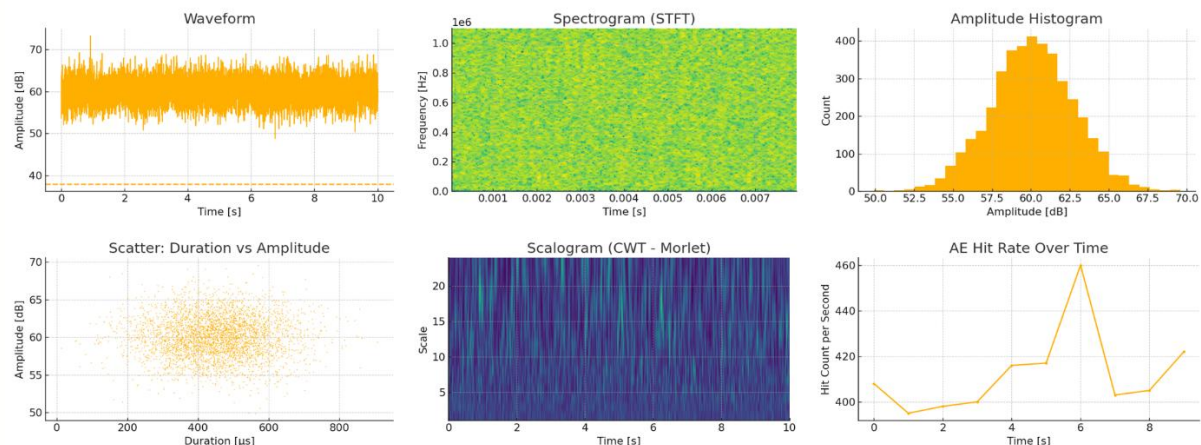
شکل ۱۴) نمودارهای لوله با سایز قطر ۲۰mm با قطر نشستی ۴mm با فشار ۲۰ psi

Leak simulation - Pipe 10mm, hole 2mm, 10psi



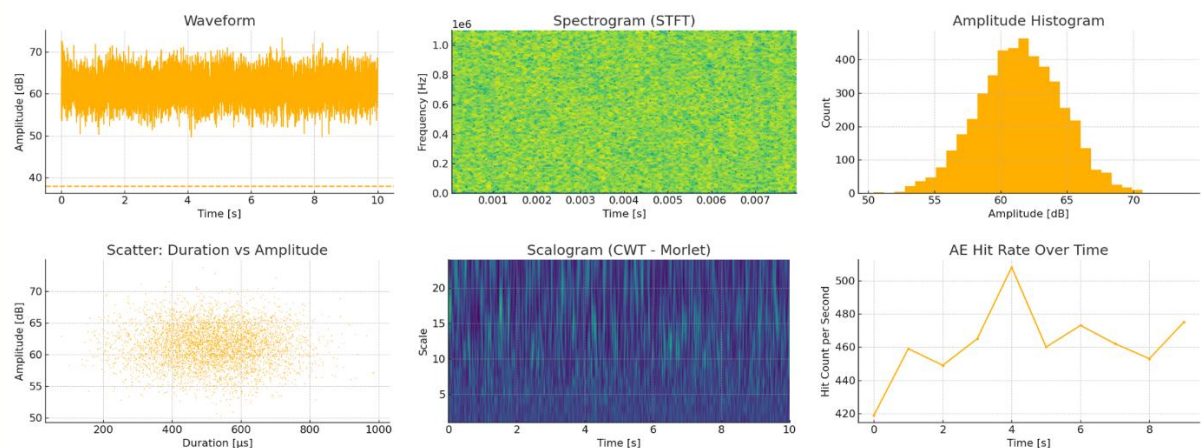
شکل ۱۵) نمودارهای لوله با سایز قطر ۳۰mm با قطر نشستی ۲mm با فشار ۱۰ psi

Leak simulation - Pipe 20mm, hole 2mm, 50psi



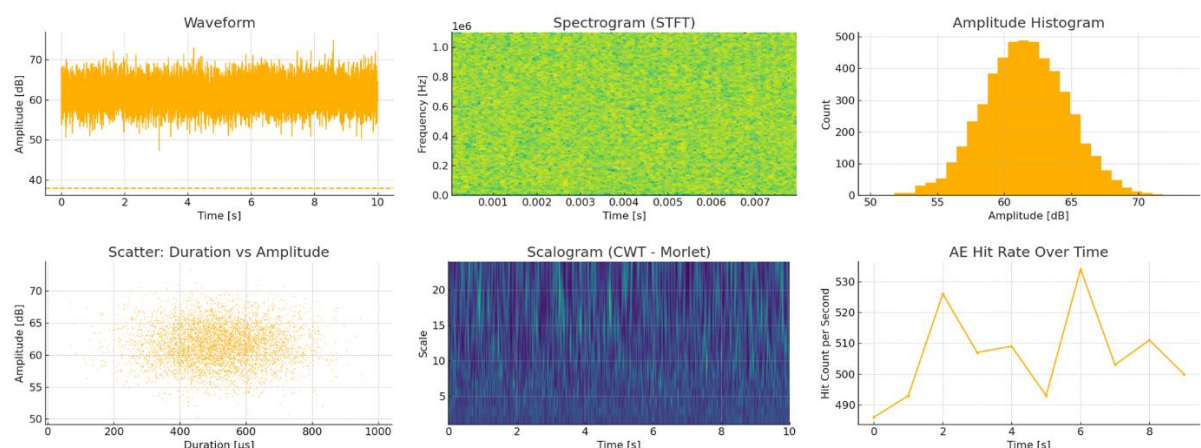
شکل ۱۶) نمودارهای لوله با سایز قطر ۲۰mm با قطر نشتی ۲mm با فشار ۱۰ psi

Leak simulation - Pipe 20mm, hole 4mm, 10psi



شکل ۱۷) نمودارهای لوله با سایز قطر ۲۰mm با قطر نشتی ۴mm با فشار ۱۰psi

Leak simulation - Pipe 20mm, hole 4mm, 10psi



شکل ۱۸) نمودارهای لوله با سایز قطر ۲۰mm با قطر نشتی ۴mm با فشار ۱۰ psi

۴-۴ بررسی اثر فاصله سنسور از محل نشی

در این پژوهش، اثر فاصله سنسور از محل نشی بر پاسخ آکوستیک امیشن یک روند منسجم نشان داد. افزایش فاصله از ۳۰۰ mm به ۷۰۰ mm موجب افت سطح سیگنال، کاهش نرخ رخداد عبوری از آستانه نزدیک به ۳۰ درصد، و تضعیف محسوس مولفه های فرکانسی بالا می شود و انرژی طیفی به باندهای پایین تر متمایل می شود. نتایج نشان می دهد که افزایش فاصله سنسور از محل نشی، به طور همزمان سه پیامد کلیدی دارد. کاهش دامنه، کاهش نرخ کشف و از دست رفتن جزئیات فرکانس های بالا و لذا توصیه می شود یا فاصله ی حسگر کاهش یابد، یا آستانه (به همراه فیلتر و پیش تقویت) بازتنظیم شود تا قابلیت کشف پایدار حفظ گردد.

۴-۵ جمع بندی

تحلیل شش نموداری هر آزمایش (Waveform, Scalogram, Scatter, Histogram, Spectrogram و نرخ رخداد) نشان داد که سه عامل فشار، اندازه ی نشی و قطر لوله به صورت منظم بر پاسخ آکوستیکی اثر می گذارند. افزایش فشار از ۱۰ psi به ۲۰ psi به طور پایا موجب رشد حدودی در میانگین دامنه، افزایش پهنای باند و شدت طیفی در ناحیه ی تقریباً ۸۰ kHz تا ۱۲۰ kHz و افزایش نرخ رخداد در حدود ۶۰ رخداد بر ثانیه شد. بزرگ تر شدن قطر نشی از ۲ به ۴ میلی متر نیز به طور میانگین ۱۵ dB دامنه را بالا برد، و ۵ kHz پهنای باند مؤثر را گسترش داد و حدود ۸۰ رخداد بر ثانیه به نرخ رخداد افزود؛ همزمان، میانگین مدت زمان رخدادها حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد افزایش یافت که با آشفتگی شدیدتر جریان سازگار است. در مقایسه ی قطر لوله، لوله ی ۲۰ میلی متری در شرایط یکسان نسبت به ۳۰ میلی متری به طور سیستماتیک حدود ۸ dB دامنه ی بالاتر و حدود ۳ kHz فرکانس مرکزی بیشتر و ۳۰ رخداد بر ثانیه نرخ رخداد بالاتر نشان داد؛ بنابراین، قطر لوله، فشار و قطر نشی یک عامل مداخله گر ملایم ولی پایدار است و باید در تفسیر نتایج لحاظ شود.

نمودارهای بالا مربوط به حالت های مختلف تست های آزمایشگاهی است که به آن اشاره شد، حال نتایج تفسیری آن و تاثیر هر پارامتر را بررسی می کنیم:

۴-۱ بررسی فاکتور فشار

اثر فشار (۲۰ psi در برابر ۱۰ psi)

دامنه ی سیگنال (AMP) با دو برابر شدن فشار از ۱۰ به ۲۰ psi، میانگین دامنه افزایش دارد. این افزایش در هیستوگرامها به صورت شیف ت به راست دیده می شود. در نمودار پهنای باند و انرژی طیفی (Spectrogram/CWT) روشن تر و عریض تر می شود. نرخ رخداد (Hit-rate) به ازای افزایش از ۱۰ psi به ۲۰ psi افزایش می یابد. مدت زمان رخدادها کمی بالاتر می رود که نشان دهنده آشفتگی بیشتر جریان در فشار بالاتر است.

۴-۲ بررسی فاکتور میزان نشی

اثر اندازه نشی (۴ mm در برابر ۲ mm)

دامنه، انرژی: افزایش قطر نشی در لوله ها میانگین دامنه را بالا می برد؛ همچنین نمودار Histogram به راست می لغزد و سقف دامنه نیز بالاتر می رود. طیف: پهنای باند مؤثر انرژی در باندهای بالاتر کمی بیشتر می شود؛ CWT در چند Scale همزمان قوی تر شده است.

مدت زمان: با افزایش قطر نشی DUR میانگین رشد می کند که باعث ایجاد حباب ها و آشفتگی بیشتر شده و در نتیجه رخدادهای اندکی طولانی تر می شود. برای تخمین شدت نشی، ترکیب (میانگین AMP) و (Hit-rate) شاخص بسیار خوبی می دهد.

۴-۳ بررسی اثر قطر لوله

قطر لوله (۲۰ mm در برابر ۳۰ mm)

دامنه: لوله ۲۰ mm به طور سیستماتیک به دلیل سرعت های خطی بالاتر دامنه ی بالاتری نشان می دهد و نرخ رخداد با شرایط نشی و فشار یکسان اندکی بالاتر می رود. در قطر لوله کمتر، سرعت جریان و شدت آشفتگی در همان تنظیم فشار معمولاً بالاتر می شود و انرژی آکوستیکی بیشتری (و کمی باند بالاتر) به سنسور می رسد؛ همچنین تضعیف موج در مسیر کوتاه تری از دیواره تا سنسور رخ می دهد.

- of Pipeline Leaks Using Fractal Analysis of Acoustic Signals," *Fractal and Fractional*, vol. 8, no. 4, p. 213, 2024.
- [4] T. F. DROUILLARD, "A history of acoustic emission," *Journal of acoustic emission*, vol. 14, no. 1, pp. 1-34, 1996.
- [5] *Practical Acoustic Emission Testing*. Tokyo: Springer Tokyo (in English), 2016.
- [6] M. Ahadi and M. S. Bakhtiar, "Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to acoustic emission signals," *Applied Acoustics*, vol. 71, no. 7, pp. 634-639, 2010.
- [7] D. Ozevin and J. Harding, "Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 92, pp. 63-69, 2012.
- [8] A. Mostafapour and S. Davoudi, "Analysis of leakage in high pressure pipe using acoustic emission method," *Applied Acoustics*, vol. 74, no. 3, pp. 335-342, 2013.
- [9] J. Butterfield, A. Krynkina, R. Collins, and S. Beck, "Experimental investigation into vibro-acoustic emission signal processing techniques to quantify leak flow rate in plastic water distribution pipes," *Applied Acoustics*, vol. 119, pp. 146-155, 2017.
- [10] S. Pan, Z. Xu, D. Li, and D. Lu, "Research on detection and location of fluid-filled pipeline leakage based on acoustic emission technology," *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3628, 2018.
- [11] T. B. Quy and J.-M. Kim, "Crack detection and localization in a fluid pipeline based on acoustic emission signals," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 150, p. 107254, 2021.
- [12] A. Fares, I. Tijani, Z. Rui, and T. Zayed, "Leak detection in real water distribution networks based on acoustic emission and machine learning," *Environmental Technology*, vol. 44, no. 25, pp. 3850-3866, 2023.
- [13] N. Ullah, Z. Ahmed, and J.-M. Kim, "Pipeline leakage detection using acoustic emission and machine learning algorithms," *Sensors*, vol. 23, no. 6, p. 3226, 2023.
- [14] J. Cui, M. Zhang, X. Qu, J. Zhang, and L. Chen, "An Improved Identification Method of Pipeline Leak Using Acoustic Emission Signal," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 4, p. 625, 2024.
- [15] A. Ali, W. Xinhua, and I. Razzaq, "Optimizing acoustic signal processing for localization of precise pipeline leakage using acoustic signal decomposition and wavelet analysis," *Digital Signal Processing*, vol. 157, p. 104890, 2025.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحلیل بیانگر این است که تقویت منبع نشستی اعم از افزایش فشار و یا بزرگ‌تر شدن قطر به‌صورت منسجم موجب افزایش نسبت سیگنال به نویز، پهن‌تر شدن پهنای باند مؤثر و افزایش نرخ رخداد عبوری از آستانه شده است. این امر در تمامی نماهای تحلیلی (نمودار زمانی، هیستوگرام دامنه، نرخ رخداد، سپکتروگرام، اسکالوگرام و تحلیل FFT انعکاس یافته و خود را به‌صورت پیک‌های طیفی بلندتر و پایدارتر و حفظ بهتر انرژی در باندهای میانی و بالاتر نشان می‌دهد. همچنین تفاوت هندسی لوله‌ها معنادار است به طوری که در لوله با قطر کمتر سهم مؤلفه‌های فرکانسی بالاتر بیشتر بوده و مرکز جرم طیف اندکی به فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا می‌شود؛ در مقابل، لوله با قطر بزرگ‌تر تمرکز انرژی در باندهای میانی را نشان می‌دهد. در حالت‌های نشستی کم‌انرژی، طیف‌ها باریک‌تر و پیک‌ها کوتاه‌ترند و تشخیص سیگنال‌های نشستی با نویز پس زمینه کار دشوارتری است.

۶- تشکر و قدردانی

با تشکر و قدردانی از پرسنل و مسئولین دانشگاه تفرش که امکان انجام تست‌ها و آزمایشات را فراهم آوردند. همچنین کمال تشکر و قدردانی از مهندسان و مجموعه شرکت دانش‌بنیان می‌پوا که ما را در این مسیر یاری پشتیبانی کردند.

۷- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸- منابع

- [1] F. Saleem, Z. Ahmad, M. F. Siddique, M. Umar, and J.-M. Kim, "Acoustic Emission-Based pipeline leak detection and size identification using a customized One-Dimensional densenet," *Sensors*, vol. 25, no. 4, p. 1112, 2025.
- [2] R. M. Baptista and C. H. Wildhagen Moura, "Leak Detection Systems for Multiphase Flow: Moving Forward," in *International Pipeline Conference*, 2002, vol. 36207, pp. 1067-1074.
- [3] A. Zagretidinov, S. Ziganshin, E. Izmailova, Y. Vankov, I. Klyukin, and R. Alexandrov, "Detection

- [16] J. Cui and J. Du, "Investigation into acoustic emission-based methodology for precise localization of pipeline leakage sources," *Measurement*, vol. 250, p. 117194, 2025.