



## تشخیص موقعیت نشتی ایجاد شده در یک لوله گاز تحت فشار

سید امیر حسینی سبزواری

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

## چکیده

در این مقاله موقعیت نشتی ایجاد شده در یک لوله گاز تحت فشار تشخیص داده شده است. برای این منظور در بخش آزمایشگاهی این تحقیق، نشتی ایجاد شده در یک لوله فولادی به‌وسیله نازل‌های مختلف شبیه سازی شده است. به دلایل زیست محیطی و کاهش خطرات احتمالی در حین انجام آزمایش، از هوا به‌عنوان جایگزین گاز طبیعی استفاده شده است. پیش از این اکثر پژوهش‌های منتشر شده متکی به استفاده از حسگرهایی با فرکانس بالا در دو سمت نشتی ایجاد شده، بوده‌اند. در پژوهش حاضر روش نوینی برای تعیین موقعیت محل نشتی در یک لوله ارائه شده است. در این روش با بهره‌گیری از آنالیز میرایی امواج منتشر شده در لوله، از دو حسگر نصب شده در یک سمت لوله استفاده شده است. در روش پیشنهادی به‌منظور کاهش اثرگذاری عوامل محیطی در پاسخ نهایی، داده‌های ذخیره شده در تنها در یک بازه فرکانسی مشخص مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، نشان می‌دهد با افزایش فشار داخل لوله خطای تشخیص موقعیت کاهش می‌یابد. در نهایت با پردازش سیگنال‌های ذخیره شده، میانگین مقدار خطا در تشخیص موقعیت نشتی ۱۳/۷۷ سانتی‌متر حاصل شده است.

کلمات کلیدی: تشخیص موقعیت صدا؛ لوله گاز؛ تشخیص نشتی؛ آنالیز میرایی.

## Leakage localization in a pressurized gas pipe

Seyed Amir Hoseini Sabzevari\*

Assist. Prof., Mech. Eng., University of Gonabad., Gonabad, Iran

## Abstract

In this paper, the position of the leakage in a pressurized gas pipe is localized. As an experimental example, the leakage in a steel pipe is simulated by different orifices. To decrease the risk of explosion and environmental contamination during experiments, pressurized air was used instead of natural gas. Most of the published papers are based on using high sampling rate sensors placed on both sides of the leakage. In this study, a new method is extended due to leakage localization in a gas pipe. To achieve this goal, attenuation analysis is implementing by installing two sensors on one side of the pipe. In the proposed technique, the dominant frequency of recorded signals is used, to decrease the effect of background noises on final results. Experimental results reveal by increasing the pressure the leakage localization error is decreased. Finally, by implementing signal processing into the data the average value of leakage localization error is reported 13.77 cm.

**Keywords:** Sound localization; Gas pipeline; Leakage detection; Attenuation analysis.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۱۵۷۲۲۹۸۰۲؛ فکس: ۰۵۱۵۷۲۵۵۹۶۹

آدرس پست الکترونیک: [hoseini.sabzevari@gonabad.ac.ir](mailto:hoseini.sabzevari@gonabad.ac.ir)

## ۱- مقدمه

تشخیص و یافتن موقعیت نشت در خطوط لوله تحت فشار در دهه‌ی گذشته مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. این نشتی می‌تواند به علت‌های مختلفی ایجاد شود که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به خوردگی تدریجی لوله‌ها و اثرات خارجی مانند ضربه‌های ایجاد شده هنگام نصب لوله‌ها، اشاره نمود.

یکی از مهم‌ترین روش‌های انتقال گاز طبیعی، استفاده از خطوط لوله‌های تحت فشار است. ایجاد نشت در این خطوط نه تنها موجب اختلال در سیستم انتقال گاز خواهد شد، بلکه اثرات مخرب زیست محیطی نیز به همراه خواهد داشت. از این روی تشخیص موقعیت نشتی در خطوط لوله‌های گاز طبیعی توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است.

موروی<sup>۱</sup> و همکاران [۱] روش‌های موجود دریافتن نشتی را بر اساس دستگاه‌ها و حسگرهای استفاده شده به دو دسته اصلی تقسیم نمودند: روش‌های مبتنی بر سخت افزار و روش‌های مبتنی بر نرم افزار. در روش‌های نرم افزاری با پایش مدام پارامترهای خط لوله مانند دما، سرعت سیال، فشار و غیره موقعیت نشتی را تشخیص می‌دهند [۲]. از مهم‌ترین و رایج‌ترین روش‌های مبتنی بر سخت افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: روش رادار نفوذی به زمین [۳]، استفاده از حسگرهای توری براگ فیبری [۴]، استفاده از دبی سنج‌های آلتراسونیک [۵] و آکوستیک و نشر آوایی [۶].

از میان این روش‌ها، روش نشر آوایی به‌عنوان یکی از روش‌های غیر مخرب مورد توجه ویژه محققان و پژوهشگران قرار گرفته است. این روش مبتنی بر تحلیل داده‌های ذخیره شده از یک حسگر ساده بوده به نحوی که بر عملکرد خط لوله مورد بررسی اختلالی ایجاد نمی‌کند. از مهم‌ترین مزیت‌های این روش، می‌توان به سهولت به‌کارگیری، حساسیت بالا نسبت به رخداد‌های احتمالی و امکان پایش مستمر اشاره نمود [۷]. تشخیص نشتی در لوله‌ها با استفاده از روش‌های نشر آوایی را می‌توان بر اساس محیط انتشار امواج به سه دسته اصلی تقسیم بندی نمود: ۱- لوله ۲- هوا و محیط پیرامون و ۳- سیال داخل

لوله [۸]. از این رو حسگرهای مختلفی در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این پژوهش از میکروفون‌های خازنی استفاده شده است؛ لذا در ادامه تنها به بررسی پژوهش‌هایی با حسگرهای مشابه پرداخته شده است. در اغلب پژوهش‌های پیشین محققان با استخراج ویژگی‌های مناسب از داده‌های ذخیره شده توسط حسگرها، وقوع و موقعیت نشتی را تشخیص داده‌اند. این ویژگی‌ها در حوزه‌های زمان، فرکانس و زمان-فرکانس تقسیم بندی می‌شوند [۲].

منگ<sup>۲</sup> و همکاران [۹] با استفاده از گشتاورهای آماری مرتبه اول، دوم و چهارم سیگنال نشتی ایجاد شده در یک خط لوله را شناسایی کردند. روش پیشنهادی آن‌ها، موجب کاهش تشخیص اشتباه به‌ویژه در خطوط لوله طولانی شده است. در پژوهش صورت گرفته توسط یو و همکاران [۱۰] از تبدیل موجک برای یافتن نشتی استفاده شده است.

ژو<sup>۳</sup> و همکاران [۱۱] یک روش با سرعت بالا جهت یافتن موقعیت نشتی پیشنهاد دادند. در روش پیشنهادی آن‌ها امواج تنش منتشر شده به علت نشتی در یک لوله به طول ۵۵ متر ذخیره شد. با آنالیز داده‌های ذخیره شده موقعیت نشتی با حداکثر خطای ۲ درصد محاسبه و گزارش شد.

لیانگ<sup>۴</sup> و همکاران [۱۲] روش پیشنهادی خود را بر روی یک خط لوله گاز طبیعی به طول ۱۵۶ کیلومتر اجرا کردند. در روش پیشنهادی آن‌ها از تحلیل‌های صوتی و ارتعاشاتی به‌صورت هم‌زمان استفاده شده است؛ به‌نحوی که میانگین خطای گزارش شده ۲۰۰ متر است.

ژیاو<sup>۵</sup> و همکاران [۱۳] از ویژگی‌های فرکانسی سیگنال ذخیره شده استفاده کردند و روش پیشنهادی آن‌ها با دقت ۹۹/۵ درصد، موقعیت نشتی را تشخیص می‌دهد.

کیم<sup>۶</sup> و همکاران [۱۴] از تحلیل هم‌زمان داده‌های آزمایش تجربی و روابط مربوط به انتشار امواج در حوزه زمان-فرکانس استفاده کردند.

بانجارا<sup>۷</sup> و همکاران [۱۵] نشتی‌های مختلف در یک خط لوله را شبیه سازی کردند و با استفاده از انرژی سیگنال‌های ذخیره شده موقعیت نشتی‌های ایجاد شده را شناسایی کردند.

<sup>5</sup> Xiao

<sup>6</sup> Kim

<sup>7</sup> Banjara

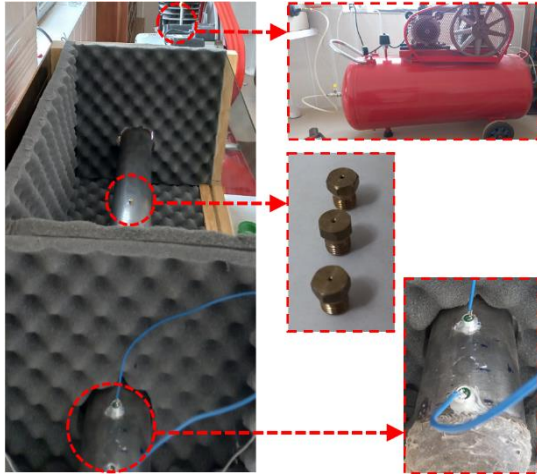
<sup>1</sup> Murvay

<sup>2</sup> Meng

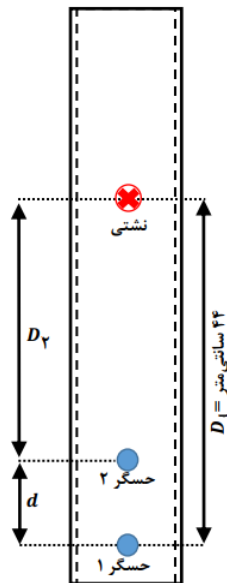
<sup>3</sup> Zhu

<sup>4</sup> Liang

به صورت همزمان با نشستی از نازل، صورت می‌گیرد. جهت حصول اطمینان از شرایط پایدار، داده برداری ۲۰ ثانیه بعد از شارژ لوله انجام می‌شود. مجموعه‌ی تجهیزات و لوازم مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ معرفی شده‌اند.



شکل ۱- محیط آزمایش



شکل ۲- شماتیک لوله‌ی مورد آزمایش، نحوه‌ی نصب حسگرها

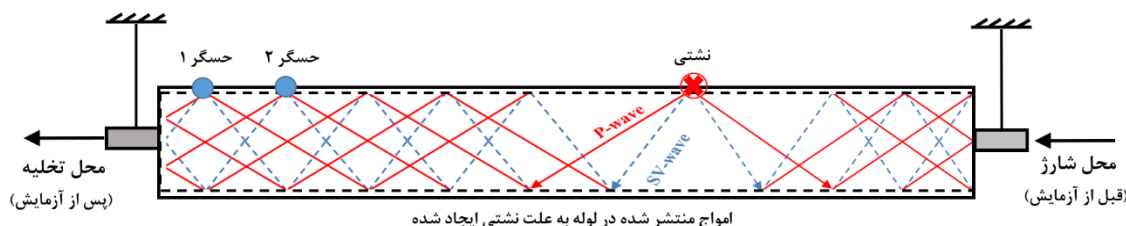
کروز<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] به‌صورت هم‌زمان از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و چهار عدد میکروفون، استفاده کردند. نتایج تجربی گزارش شده دقت ۹۹/۶ درصدی برای تشخیص وقوع نشستی با بیشینه خطای مکانی ۴/۳۱ درصدی را نشان می‌دهد. در این مقاله موقعیت نشستی مصنوعی ایجاد شده در یک لوله تحت فشار، تشخیص داده شده است. بدین منظور سیگنال منتشر شده توسط نشستی ایجاد شده در لوله به‌وسیله دو حسگر صوتی ذخیره می‌شود. در روش پیشنهادی با استفاده از آنالیز میرایی امواج ذخیره شده توسط حسگرها، موقعیت نشستی تشخیص داده می‌شود. برخلاف اکثر پژوهش‌های پیشین حسگرهای مورد استفاده در یک سمت نشستی نصب شده‌اند. از بهترین مزیت‌های عملکردی روش پیشنهادی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: ۱- افزایش چشمگیر همگام‌سازی داده‌های حسگرها، ۲- سهولت استفاده از روش پیشنهادی به‌ویژه در محیط واقعی (با توجه به طول خط لوله‌های انتقال).

## ۲- روش پیشنهادی

### ۲-۱- محیط آزمایش

مطابق شکل ۱، یک لوله فولادی به طول ۸۰ سانتیمتر و ضخامت ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. لوله مورد نظر در داخل یک محفظه پوشانده شده با فوم آکوستیک، معلق شده است، به نحوی که با دیواره‌های آکوستیکی برخوردی ندارد (برخوردهای احتمالی کوچک در طول انجام آزمایش صرف نظر شده است). دو حسگر صوتی مطابق شکل‌های ۲ و ۳ بر روی سطح لوله نصب می‌شوند، به‌طوری که دهنه‌ی ورودی دیافراگم حسگرها چسبیده به سطح لوله است. داده‌های دریافتی توسط این حسگرها با نرخ داده برداری ۴۴۱۰۰ داده در ثانیه ذخیره می‌شود. فشار مورد نیاز در لوله توسط یک کمپرسور با بیشینه فشار ۰/۸ مگا پاسکال شبیه‌سازی می‌شود؛ همچنین نشستی (چشمه انتشار موج) مورد نظر در لوله با استفاده از سه نازل با قطر ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۶ میلی‌متر ایجاد می‌شود. نازل به صورت مستقیم بر روی لوله نصب و شارژ لوله

<sup>۱</sup> Cruz



شکل ۳- شماتیک لوله‌ی مورد آزمایش، نحوه انتشار امواج

۲-۲- ماهیت امواج منتشر شده  
 لوله‌ی شبیه سازی شده توسط یک ورق نازک و مختصات مرتبط به آن، در شکل ۴ نشان داده شده است. معادله امواج منتشر شده در یک پوسته‌ی استوانه‌ای شکل همگن، الاستیک و همسانگرد با استفاده از تئوری غیرخطی دانیل<sup>۱</sup> استخراج می‌شود:

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{C_p} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}, \quad C_p = \sqrt{\frac{2\mu + \lambda}{\rho}} \quad (3)$$

$$\nabla^2 H = \frac{1}{C_s} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}, \quad C_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4)$$

که با حل عددی این معادلات سرعت انتشار امواج بر حسب فرکانس آن‌ها قابل محاسبه است. از حل رابطه (۲) سه نوع موج ایجاد می‌شود: امواج طولی، خمشی و پیچشی [۱۷]. مطابق نتایج پژوهش‌های پیشین در این حوزه، امواج پیچشی بیشتر از امواج طولی و خمشی در معرض میرایی قرار می‌گیرند؛ همچنین تأثیر عیوب ایجاد شده در لوله‌ها در مدهای طولی و خمشی بیشتر از مود پیچشی است [۱۸]؛ لذا در مطالعات مربوط به یافتن موقعیت نشتی در لوله‌ها، تنها امواج طولی و خمشی مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. نشتی ایجاد شده در لوله‌ها موجب ایجاد این امواج می‌گردد. انتشار آزادانه و برهمکنش این دو موج و بازتاب‌های آن‌ها از سطوح بالایی و پایینی ورق باعث ایجاد امواجی می‌شود که امواج لمب<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند [۱۹]. این امواج از دو مود متقارن و نامتقارن با خواص مشخص تشکیل می‌شود. امواج منتشر شده فوق به‌وسیله دو حسگر به‌صورت سیگنال‌های زمانی ذخیره می‌شود.

جدول ۱- تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش

توضیحات	تجهیزات مورد استفاده
لوله به طول ۸۰ سانتی‌متر، قطر ۱۴ سانتی-متر و ضخامت ۳ میلی‌متر، جنس کربن استیل با چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	لوله
دو حسگر صوتی خازنی با بیشینه فرکانسی ۲۰ کیلوهرتز، جرم ۰/۸ گرم.	حسگر
محفظه عایق شده با فوم آکوستیک با ابعاد ۶۵ در ۳۴ در ۳۰ سانتی‌متر	محفظه آزمایش
سه عدد نازل با قطرهای ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۴ میلی‌متر	نازل
کمپرسور با فشار ۶ و ۸ بار	کمپرسور

که در رابطه فوق،  $u$  معرف بردار جابجایی است.  $\mu$  و  $\lambda$  ضرایب ثابت لامه و  $\rho$  چگالی است.  $\Delta$  و  $\nabla^2$  به ترتیب عملگرهای لاپلاس سه بعدی و همیلتون هستند. به‌منظور یافتن پاسخ معادله فوق بر اساس اصل هلمهولتز<sup>۲</sup> بردار جابجایی را می‌توان به‌صورت مجموع دو تابع پتانسیل اسکالر  $\phi$  و برداری  $H$  بیان نمود [۱۷]:

$$u = \nabla \phi + \nabla \times H \quad (2)$$

<sup>3</sup> Lamb waves

<sup>1</sup> Donnell's non-linear theory

<sup>2</sup> Helmholtz principle

که در رابطه فوق، "g" ضریب میرایی نامیده شده و مقدار آن طی آزمایش‌های تجربی حاصل می‌شود.

ج- محیط مجاور: کاهش دامنه سیگنال منتشر شده به علت انتشار بخشی از آن به محیط مجاور که اثر "نشستی" نیز نامیده می‌شود. چنانچه محیط مجاور، هوا باشد معمولاً از اثر "نشستی" صرف نظر می‌شود [۲۴]. درینک واتر<sup>۲</sup> و همکاران [۲۵] به صورت تجربی نشان داده‌اند که اثر "نشستی" در یک صفحه شیشه‌ای به ضخامت ۴ میلی‌متر که در مجاورت هوا قرار دارد، بسیار کم و قابل چشم پوشی است.

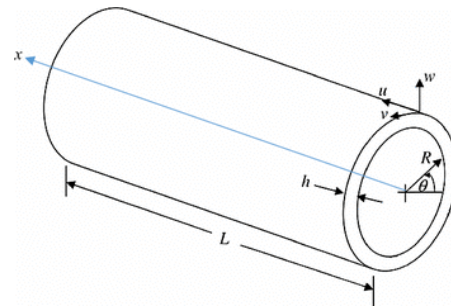
د- پراکندگی امواج: کاهش دامنه امواج به علت افزایش زمان انتشار آن‌ها روی می‌دهد [۲۶].

با توجه به شرایط حاکم در این پژوهش از جمله مجاورت هوا با لوله مورد آزمایش، فواصل کوتاه انتشار موج و به طبع آن زمان کوتاه پراکنش امواج، اثر "افزایش فاصله موج" به عنوان عامل اصلی میرایی امواج انتخاب شده است. چگونگی استفاده از رابطه (۵) در ادامه توضیح داده شده است.

### ۳- آزمایش

در روش پیشنهادی نشستی مصنوعی به وسیله سه نازل در دو فشار ۸ و ۶ بار ایجاد می‌شود. امواج ایجاد شده به علت نشستی مصنوعی به وسیله دو حسگر صوتی ذخیره می‌گردد. فاصله‌ی نصب میان دو حسگر روی سطح لوله به مقدار ۲، ۴ و ۶ سانتیمتر متغیر بوده و آزمایش‌ها به ازای این مقادیر مختلف تکرار می‌شود. با استفاده از رابطه (۵) و مشخص بودن محل نصب دو حسگر و با تحلیل سیگنال‌های ذخیره شده، موقعیت نشستی حاصل می‌شود.

در رابطه (۵)، مقادیر  $F(D_1)$  و  $F(D_2)$ ، با استفاده از محاسبه‌ی انرژی سیگنال‌های ذخیره شده توسط حسگرهای اول و دوم حاصل می‌شود. در این رابطه  $D_1 = D_2 + d$  جاگذاری شده و با مشخص بودن فاصله حسگرهای از یکدیگر (d) در هر آزمایش تنها مجهول فاصله نشستی از حسگر دوم ( $D_2$ ) قابل محاسبه خواهد بود. نتایج آزمایش روش پیشنهادی در جداول ۲، ۳ و ۴ گزارش شده است.



شکل ۴- شماتیک لوله شبیه سازی شده با یک ورق نازک و مختصات

### مرتبط با آن

#### ۲-۳- میرایی امواج منتشر شده

انرژی امواج منتشر شده در صفحات در حین انتشار کاهش می‌یابد. این پدیده که منجر به کاهش تدریجی دامنه امواج منتشر شده می‌شود، میرایی نامیده می‌شود [۲۰]. این میرایی توسط عوامل مختلفی روی می‌دهد که توسط پولاک<sup>۱</sup> به چهار دسته اصلی طبقه بندی شده است [۲۱]:

الف- افزایش فاصله موج: کاهش دامنه موج منتشر شده که متناسب با افزایش مسافت طی شده روی می‌دهد. این اثر غالباً در فواصل نزدیک به منبع ایجاد موج مورد توجه قرار می‌گیرد. رابطه میان کاهش دامنه سیگنال و مسافت طی شده مطابق رابطه (۵) بیان می‌شود [۲۲]:

$$\frac{F(D_1)}{F(D_2)} = \frac{\sqrt{D_2}}{\sqrt{D_1}} \quad (5)$$

که در رابط فوق،  $D_i$  و  $F(D_i)$  به ترتیب نشان دهنده‌ی فاصله حسگر از محل انتشار موج و انرژی سیگنال ذخیره شده توسط حسگر است.

ب- جنس محیط انتشار: کاهش دامنه موج منتشر شده که به علت کنش و برهم کنش داخلی ذرات محیط انتشار روی می‌دهد. بر خلاف اثر (الف) این اثر در فواصل دور از منبع موج مورد توجه قرار می‌گیرد. رابطه (۶) نحوه‌ی عملکرد این اثر را نشان می‌دهد [۲۳]:

$$\frac{F(D_1)}{F(D_2)} = e^{-g''(D_2-D_1)} \quad (6)$$

<sup>2</sup> Drinkwater

<sup>1</sup> Pollock

جدول ۴- عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص موقعیت نشتی ایجاد شده (فاصله بین دو حسگر ۶ سانتی متر)

میانگین	خطا (سانتی متر)				قطر نازل (میلی متر)	فشار (بار)
	تکرار ۴	تکرار ۳	تکرار ۲	تکرار ۱		
۱۶/۷۳	۱۴/۰۶	۱۷/۱۳	۱۶/۴۲	۱۹/۳۳	۰/۹	
۱۸/۱۲	۱۳/۴۹	۱۷/۸۱	۱۵/۱۹	۲۶/۰۲	۱/۲	۸
۱۶/۸۵	۱۷/۶۶	۱۲/۷۰	۱۹/۸۶	۱۷/۱۸	۱/۶	
۱۷/۸۴	۱۵/۸۳	۱۹/۲۲	۱۷/۷۷	۱۸/۵۴	۰/۹	
۱۹/۴۴	۱۸/۵۷	۲۱/۸۹	۱۷/۳۹	۱۹/۹۱	۱/۲	۶
۱۶/۴۵	۱۶/۱۹	۱۸/۳۲	۱۱/۴۵	۱۹/۸۶	۱/۶	

جدول ۲- عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص موقعیت نشتی ایجاد شده (فاصله بین دو حسگر ۲ سانتی متر)

میانگین	خطا (سانتی متر)				قطر نازل (میلی متر)	فشار (بار)
	تکرار ۴	تکرار ۳	تکرار ۲	تکرار ۱		
۱۷/۲۵	۱۸/۶۱	۱۷/۵۵	۱۷/۴۸	۱۵/۳۶	۰/۹	
۱۵/۶۵	۱۴/۴۱	۱۱/۳۷	۱۷/۵۶	۱۹/۲۷	۱/۲	۸
۱۵/۹۹	۱۷/۴۹	۱۵/۰۵	۱۶/۷۴	۱۴/۷۱	۱/۶	
۱۹/۷۸	۱۶/۸۰	۱۵/۱۸	۲۰/۳۲	۲۶/۸۲	۰/۹	
۱۸/۲۴	۱۶/۸۷	۱۹/۰۷	۱۸/۲۰	۱۸/۸۴	۱/۲	۶
۱۶/۶۶	۱۵/۷۵	۱۷/۲۸	۱۷/۴۹	۱۶/۱۵	۱/۶	

جدول ۳- عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص موقعیت نشتی ایجاد شده (فاصله بین دو حسگر ۴ سانتی متر)

میانگین	خطا (سانتی متر)				قطر نازل (میلی متر)	فشار (بار)
	تکرار ۴	تکرار ۳	تکرار ۲	تکرار ۱		
۱۶/۹۶	۱۸/۸۰	۱۹/۷۲	۱۵/۰۸	۱۴/۲۶	۰/۹	
۱۸/۴۰	۲۱/۴۷	۱۷/۹۱	۱۶/۶۶	۱۷/۵۹	۱/۲	۸
۱۸/۲۶	۱۸/۵۰	۱۷/۸۷	۲۱/۵۸	۱۵/۱۱	۱/۶	
۱۸/۹۵	۲۵/۰۷	۱۹/۵۳	۱۳/۳۹	۱۷/۸۳	۰/۹	
۱۹/۱۵	۱۲/۸۹	۱۸/۶۸	۲۵/۴۱	۱۹/۶۵	۱/۲	۶
۱۷/۵۶	۱۸/۳۹	۱۴/۱۹	۲۰/۲۳	۱۷/۴۵	۱/۶	

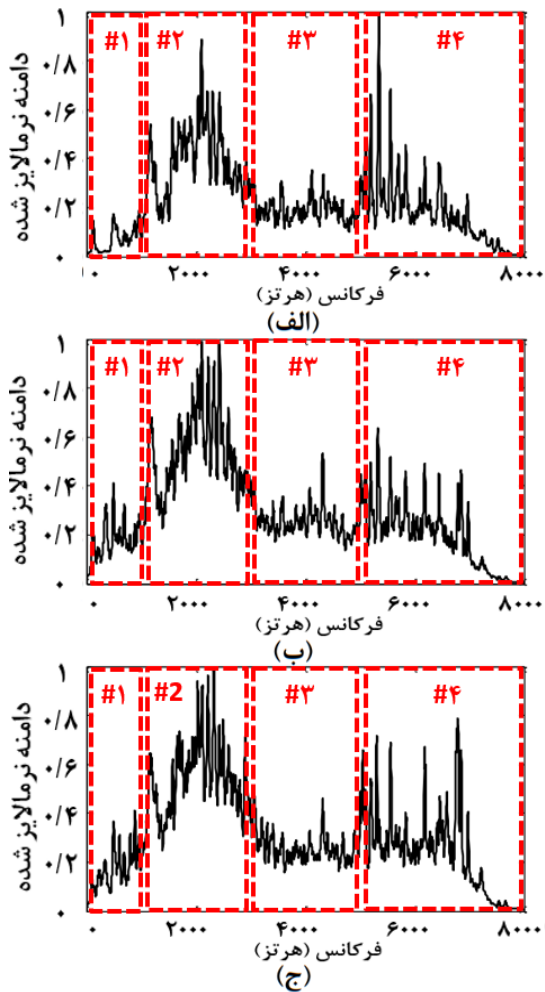
مطابق داده‌های جدول ۲، میانگین خطا در تشخیص موقعیت نشتی ۱۷/۲۶ سانتی متر است. در صورتی که با افزایش فاصله دو حسگر به چهار و شش سانتی متر (جدول ۳ و جدول ۴) این مقدار به ترتیب ۱۸/۲۱ و ۱۷/۵۷ سانتی متر گزارش شده است.

#### ۴- بحث

مطابق داده‌های گزارش شده، با کاهش فشار داخل لوله از ۸ به ۶ بار، میانگین خطا در ۱۶ آزمایش از ۱۸ آزمایش صورت گرفته، افزایش داشته است. روند مشخصی برای این افزایش خطا متصور نبوده و بیشینه این افزایش ۱۶ درصد مربوط به قطر نازل ۱/۲ میلی متر و فاصله ۲ سانتی متری حسگرها می-باشد. همچنین با افزایش قطر نازل، الگوی مشخصی در تغییر خطا مشاهده نمی‌شود.

استفاده از حسگرهایی با نرخ داده برداری پایین علاوه بر اینکه روش پیشنهادی را به شکل مستقیم مستعد خطای بالایی می‌کند، موجب افزایش تأثیرگذاری عوامل و نویزهای محیطی در پاسخ نهایی می‌گردد. تفاوت ایجاد شده میان رابطه تئوری و آزمایش‌های صورت گرفته می‌تواند بنا به علت‌های مختلفی باشد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

۱- اثر نویزهای محیطی.



شکل ۵- میانگین سیگنال‌های ذخیره شده در حوزه فرکانس، فشار ۸ بار و فاصله از منبع نشتی ۳۸ سانتی‌متر. الف) قطر نازل ۹/۰ میلی‌متر، ب) قطر نازل ۱۲/۰ میلی‌متر و ج) قطر نازل ۱۶/۰ میلی‌متر.

لازم به ذکر است با توجه به ماهیت و ویژگی‌های امواج منتشر شده در لوله، با افزایش فاصله انتشار انتظار پراکندگی بیشتر در حوزه زمان به‌خصوص در فرکانس‌های بالا را داریم [۱۹]؛ همچنین مطابق بخش ۲-۳ با افزایش فاصله انتشار به‌ویژه در فرکانس‌های بالا میرایی به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ لذا در روش پیشنهادی باهدف کاهش اثرات پنج‌گانه‌ی بیان شده و به طبع آن کاهش خطای آزمایش تنها فرکانس‌های غالب سیگنال در نظر گرفته می‌شود.

فرکانس غالب در این پژوهش با توجه به داده‌های ذخیره شده بازه ۲۰۰ الی ۷۵۰۰ هرتز تعیین و تمامی آزمایش‌ها تنها در این بازه‌ی فرکانسی تکرار گردید. نتایج حاصل از بهبود ایجاد

۲- بازتاب امواج منتشر شده از انتهای لوله و دریافت آن‌ها توسط حسگرها (علیرغم استفاده از عایق‌های سلیکونی در دو انتهای لوله).

۳- تبدیل مکرر مودهای امواج منتشر شده به یکدیگر که از آن صرف نظر شده است.

۴- برخورد احتمالی و نشت امواج منتشر شده به محفظه در حین انجام آزمایش.

۵- ایجاد ارتعاشات به علت خروج سیال از نازل و دریافت آن توسط حسگرها.

#### ۴-۱- بهبود روش پیشنهادی

شکل ۵ میانگین سیگنال فرکانسی ذخیره شده توسط حسگر در پنج بار تکرار آزمایش هنگامی که فشار ۸ بار بوده و به ازای سه قطر مختلف نازل نشان می‌دهد. بازه‌های فرکانسی در این شکل بر اساس مشابهت به چهار قسمت تقسیم بندی شده است:

قسمت اول: بازه فرکانسی ۰ الی ۱۰۰۰ هرتز.

قسمت دوم: بازه فرکانسی ۱۰۰۰ الی ۳۰۰۰ هرتز.

قسمت سوم: بازه فرکانسی ۳۰۰۰ الی ۵۰۰۰ هرتز.

قسمت چهارم: بازه فرکانسی ۵۰۰۰ الی ۸۰۰۰ هرتز.

مطابق شکل ۵ با افزایش قطر نازل از ۹/۰ به ۱۶/۰ میلی‌متر، نوسانات فرکانسی در قسمت اول و دوم افزایش یافته است، در صورتی که در قسمت سوم تغییر چندانی مشاهده نمی‌گردد؛ همچنین در قسمت چهارم دامنه فرکانس‌های بالا افزایش قابل توجهی یافته است.

شده در روش پیشنهادی در جداول ۵، ۶ و ۷ گزارش شده است.

مطابق داده‌های جدول ۵، میانگین خطا در تشخیص موقعیت نشتی در روش بهبود یافته ۱۳/۴۰ سانتی‌متر می‌باشد. در صورتی که، با افزایش فاصله دو حسگر به چهار و شش سانتی‌متر (جدول ۶ و جدول ۷) این مقدار به ترتیب ۱۳/۹۶ و ۱۳/۹۷ سانتی‌متر گزارش شده است.

مطابق داده‌های گزارش شده، با در نظر گرفتن بازه فرکانسی غالب در سیگنال‌های ذخیره شده و به طبع آن کاهش اثرات پارامترهای مزاحم در پاسخ نهایی، میانگین خطا در تشخیص موقعیت نشتی به میزان ۲۲ درصد کاهش یافت (از ۱۷/۶۸ سانتی‌متر به ۱۳/۷۷ سانتی‌متر).

### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به تشخیص موقعیت مکانی نشتی ایجاد شده در یک لوله گاز با استفاده از دو حسگر با نرخ داده برداری پایین پرداخته شد. حسگرهای مورد استفاده در یک

#### جدول ۵- عملکرد روش بهبود یافته (فاصله بین دو حسگر ۲

میانگین	خطا (سانتی متر)				قطر نازل (میلی متر)	فشار (بار)
	تکرار ۴	تکرار ۳	تکرار ۲	تکرار ۱		
۰/۹	۱۲/۳۲	۱۲/۸۹	۱۴/۲۸	۱۲/۸۹	۱۲/۶۷	۱۳/۲۹
۱/۲	۱۷/۴۱	۱۲/۸۹	۱۳/۷۶	۱۳/۰۱	۱۴/۲۶	۸
۱/۶	۱۰/۷۰	۱۳/۰۸	۱۲/۳۴	۱۳/۲۱	۱۲/۳۳	۱/۶
۰/۹	۱۱/۳۷	۱۲/۷۴	۱۵/۲۱	۱۲/۲۲	۱۲/۸۸	۰/۹
۱/۲	۱۳/۷۳	۱۴/۰۷	۱۵/۲۴	۱۲/۶۹	۱۳/۹۳	۶
۱/۶	۱۳/۸۱	۱۲/۹۹	۱۳/۱۶	۱۴/۸۳	۱۳/۶۹	۱/۶

#### جدول ۶- عملکرد روش بهبود یافته (فاصله بین دو حسگر ۴

سانتی‌متر)						
------------	--	--	--	--	--	--

میانگین	خطا (سانتی متر)				قطر نازل (میلی متر)	فشار (بار)
	تکرار ۴	تکرار ۳	تکرار ۲	تکرار ۱		
۰/۹	۱۴/۴۳	۱۲/۲۷	۱۳/۶۸	۱۲/۹۱	۱۳/۳۲	
۱/۲	۱۰/۴۶	۱۷/۷۲	۱۲/۵۴	۱۳/۸۵	۱۳/۶۴	۸
۱/۶	۱۴/۴۶	۱۳/۵۱	۱۴/۶۰	۱۲/۶۲	۱۳/۷۹	
۰/۹	۱۳/۷۴	۱۳/۲۱	۱۵/۱۳	۱۴/۹۸	۱۴/۲۶	
۱/۲	۱۱/۴۹	۱۵/۶۲	۱۷/۷۴	۱۳/۵۴	۱۴/۵۹	۶
۱/۶	۱۳/۳۹	۱۳/۵۱	۱۴/۳۹	۱۵/۳۱	۱۴/۱۵	

#### جدول ۷- عملکرد روش بهبود یافته (فاصله بین دو حسگر ۶

میانگین	خطا (سانتی متر)				قطر نازل (میلی متر)	فشار (بار)
	تکرار ۴	تکرار ۳	تکرار ۲	تکرار ۱		
۰/۹	۱۰/۸۲	۱۴/۳۰	۱۵/۶۹	۱۴/۱۹	۱۳/۷۵	
۱/۲	۱۸/۸۶	۱۲/۳۰	۱۳/۲۱	۱۳/۶۷	۱۴/۵۱	۸
۱/۶	۱۱/۶۴	۱۲/۰۶	۱۳/۵۵	۱۴/۱۸	۱۲/۸۵	
۰/۹	۱۲/۲۴	۱۶/۷۵	۱۴/۲۹	۱۵/۱۳	۱۴/۶۰	
۱/۲	۱۰/۲۶	۱۶/۳۷	۱۵/۸۲	۱۲/۶۸	۱۳/۷۸	۶
۱/۶	۱۷/۰۷	۱۲/۴۳	۱۳/۸۲	۱۴/۱۰	۱۴/۳۵	

سمت نشتی نصب شدند. در روش پیشنهادی با استفاده از آنالیز میرایی موقعیت نشتی ایجاد شده تشخیص داده شد. به‌منظور کاهش اثرگذاری عوامل و نویزهای محیطی در پاسخ



- loosening of screw thread connection. *Appl Acoust*, 120, 85-89.
- [11] Zhu J, Ren L, Ho S C, Jia Z, Song G (2017) Gas pipeline leakage detection based on PZT sensors. *Smart Mater Struct*, 26(2), 025022.
- [12] Liang D, Yuan S F, Liu M L (2013) Distributed coordination algorithm for impact location of preciseness and real-time on composite structures. *Measur*, 46(1), 527-536.
- [13] Xiao R, Hu Q, Li J (2021) A model-based health indicator for leak detection in gas pipeline systems. *Measurement*, 171, 108843.
- [14] Kim M S, Lee S K (2009) Detection of leak acoustic signal in buried gas pipe based on the time-frequency analysis. *Method. J Loss Prevent Proc*, 22(6), 990-994.
- [15] Banjara N K, Sasmal S, Voggu S (2020) Machine learning supported acoustic emission technique for leakage detection in pipelines. *Int J Pres Ves Pip*, 188, 104243.
- [16] Cruz R P, Silva F V, Fileti A M (2020) Machine learning and acoustic method applied to leak detection and location in low-pressure gas pipelines. *Clean Technol Envir*, 22(3), 627-638.
- [17] Giurgiutiu V (2007) *Structural health monitoring: with piezoelectric wafer active sensors*. Elsevier.
- [18] Xu C, Du S, Gong P, Li Z, Chen G, Song G (2020) An improved method for pipeline leakage localization with a single sensor based on modal acoustic emission and empirical mode decomposition with Hilbert transform. *Ieee Sens J*, 20(10), 5480-5491.
- [۱۹] حسینی سبزواری س ا و معاونیان م (۱۳۹۷). بررسی تجربی اثر دمپره‌های الاستیک بر امواج بازتابی از مرزهای یک صفحه به هنگام تشخیص موقعیت منبع صدا. مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۸، شماره ۳، صفحه ۲۰۵-۲۱۲.
- [20] Su Z, Ye L (2009) *Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications (Vol. 48)* Springer Science Business Media.
- [21] Pollock A (1986) Classical wave theory in practical AE testing. *Progress in Acoustic Emission III-JAP Society of Non-Destructive Testing*, 708-721.
- [22] Schmidt D, Sadri H, Szewieczek A, Sinapius M, Wierach P, Siegert I, Wendemuth A (2013) Characterization of Lamb wave attenuation mechanisms. *Health Monit of Structl and Biol Syst*. Vol. 8695, pp. 9-16) SPIE.
- [23] Schubert K J, Herrmann A S (2011) On attenuation and measurement of Lamb waves in viscoelastic composites. *Compos Struct*, 94(1), 177-185.
- [24] Fan Z, Jiang W, Cai M, Wright W (2016) The effects of air gap reflections during air-coupled نهایی، داده‌های ذخیره شده تنها در یک بازه فرکانسی مشخص مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد، با افزایش فشار داخل لوله خطای تشخیص موقعیت نشتی کاهش می‌یابد؛ همچنین با محدود سازی فرکانسی سیگنال‌های ذخیره شده خطای نهایی تشخیص موقعیت به میزان ۲۲ درصد کاهش یافته است، هرچند روند کاهشی خطا با افزایش فشار ناپایدار شده است. شده مقایسه توانایی الگوریتم ارائه شده با روش‌های پیشین، به علت قائل بودن نتایج گزارش شده به محیط آزمایش و حسگرهای فراهم شده، صورت نگرفته است.

### مراجع

- [1] Murvay P S, & Silea I (2012) A survey on gas leak detection and localization techniques. *J Loss Prevent Proc*, 25(6), 966-973.
- [2] Zhang J, Lian Z, Zhou Z, Xiong M, Lian M, Zheng J (2021) Acoustic method of high-pressure natural gas pipelines leakage detection: Numerical and applications. *Int J Pres Ves Pip*, 194, 104540.
- [3] Lau P K, Cheung B W, Lai W W, Sham J (2021) Characterizing pipe leakage with a combination of GPR wave velocity algorithms. *Tunn Undergr Sp Tech*, 109, 103740.
- [4] Wang J, Ren L, Jiang T, Jia Z, Wang G X (2020) A novel gas pipeline burst detection and localization method based on the FBG caliber-based sensor array. *Measur*, 151, 107226.
- [5] Goulet J A, Coutu S, Smith I F (2013) Model falsification diagnosis and sensor placement for leak detection in pressurized pipe networks. *Adv Eng Inform*, 27(2), 261-269.
- [6] Quy T B, Kim J M (2020) Leak detection in a gas pipeline using spectral portrait of acoustic emission signals. *Measur*, 152, 107403.
- [7] Diao X, Jiang J, Shen G, Chi Z, Wang Z, Ni L, Hao Y (2020) An improved variational mode decomposition method based on particle swarm optimization for leak detection of liquid pipelines. *Mech Syst Signal Pr*, 143, 106787.
- [8] Hu Z, Tariq S, Zayed T (2021) A comprehensive review of acoustic based leak localization method in pressurized pipelines. *Mech Syst Signal Pr*, 161, 107994.
- [9] Meng L, Yuxing L, Wuchang W, Juntao F (2012) Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method. *J Loss Prevent Proc*, 25(1), 90-102.
- [10] Yu L, Li S Z (2017) Acoustic emission (AE) based small leak detection of galvanized steel pipe due to

- [25] Drinkwater B W, Castaings M, Hosten B (2003) The measurement of a 0 and s 0 lamb wave attenuation to determine the normal and shear stiffnesses of a compressively loaded interface. J Acoust Soc Am, 113(6), 3161-3170.
- [26] Sabzevari S A H, Moavenian M (2017) Sound localization in an anisotropic plate using electret microphones. Ultrasonics, 73, 114-124.
- leaky Lamb wave inspection of thin plates. Ultrasonics, 65, 282-295.