

تعیین تجربی موقعیت نشتی گاز خط لوله فشار بالا با استفاده از روش نشر آوایی

حمیدرضا حاجی باقری*

کارشناس ارشد مکانیک

بازرسی فنی منطقه دو عملیات انتقال گاز ایران

hamidreza2128@yahoo.com

سید علی ابراهیمیان

کارشناس ارشد مکانیک

مدیر عامل شرکت دانش بنیان تحقیق و توسعه ایرانیان (تتا)

s.ali.ebrahimiyan@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۰۵

چکیده

در این تحقیق تعیین قابلیت آزمون نشر آوایی (آکوستیک امیشن^۱) در تعیین محل نشتی گاز در خط لوله انتقال گاز سراسری ایران با قطر خارجی ۵۶ اینچ و فشار ۱۰۵۰ psi، ارزیابی شد. با توجه به اعلام گزارش وجود نشتی ۱۵۰۰ ppm در لوله به طول ۳۷/۸ متر محصور داخل غلاف بتنی (CCW^۲)، با عنایت به گازدار بودن خط لوله، عدم امکان قطع جریان و همچنین هزینه بالای تخریب غلاف بتنی، با استفاده از آزمون نشر آوایی، احتمال وجود نشتی در غلاف بتنی و تخمین موقعیت آن ارزیابی شد. در این آزمون در دو سر لوله خارج از غلاف بتنی با نصب حسگرهای پیزوالکتریک عملیات داده برداری جهت شناسایی منابع صوتی ناشی از نشتی موجود انجام شد. پس از مکان یابی داده های دریافتی با توجه به مشخصات اصلی سیگنال نشتی یعنی RMS و زمان ماندگاری، محل نشتی ردیابی و شناسایی شد. نتایج آزمون حاکی از عدم وجود نشتی گاز در غلاف بتنی بوده و موقعیت نشتی در محلی خارج از آن شناسایی گردید. با حفاری محل تخمین زده شده توسط نشر آوایی، نشتی موجود در سر جوش محیطی^۳، به علت ترک طولی بر روی جوش در ساعت ۶ لوله مشاهده شد. که پس از تخلیه گاز خط لوله، جوش تعمیر و هیچ آسیبی به غلاف بتنی وارد نشد.

واژگان کلیدی: لوله انتقال گاز، نشر آوایی، نشتی، غلاف بتنی، ترک طولی

۱. مقدمه

از گروه فولادهای کم آلیاژ پراستحکام (HSLA^۴) هستند. و توسط مؤسسه نفت آمریکا (API^۵) استاندارد شده اند [۲]. نشت گاز در خطوط گاز به دلایل مختلفی از جمله: خوردگی داخلی و خارجی، ترک، عوامل خارجی مانند ضربه، نقص در

خطوط نفت و گاز یکی از مهم ترین و حیاتی ترین بخش ها و ارکان های هر کشوری به شمار می رود. بنابراین حفظ و نگهداری این خطوط یک امر بدیهی است [۱]. ورق های فولادهای مورد استفاده در ساخت لوله های انتقال گاز پرفشار

جوش لوله‌ها و... اتفاق می‌افتد [۳]. تشخیص نشت به عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات در خطوط لوله نفت و گاز می‌باشد، که در صورت عدم تشخیص می‌تواند منجر به زیان‌های مالی و همچنین اثرات زیست محیطی شود [۴، ۵]. رویکردهای مختلفی برای تشخیص نشت توسط محققین پیشنهاد شده است [۶-۸]. استانداردهای ASTM, ASME, روش‌هایی را برای تشخیص نشتی مایعات و گازها سیستم‌های تحت فشار بیان می‌کنند [۹، ۱۰]. آزمون غیرمخرب به روش نشرآوایی یکی از روش‌های نوین و پیشرفته در مجموعه آزمون‌های غیرمخرب محسوب می‌شود. که جهت موقعیت نشتی استفاده می‌شود [۱۱]. نشرآوایی پدیده‌ای است که در اثر ایجاد و انتشار یک موج الاستیک در محدوده فراصوتی (۱MHz-۲۰Hz) رخ می‌دهد [۱۲].

بر همین اساس، تست به روش نشرآوایی شامل دریافت سیگنال‌های منتشر شده در جسم توسط حسگرهای مخصوص و برقراری ارتباط بین سیگنال‌های دریافتی و تغییرات ایجاد شده بر روی منبع می‌باشد. نشت سیال با دبی نسبتاً بالا از منفذ نشت باعث القای ارتعاش به سیستم جامد سیال می‌شود و در حقیقت این ارتعاش است که توسط حسگرهای آکوستیک در روش آزمون غیرمخرب نشرآوایی دریافت شده و به عنوان نشان‌دهنده نشت به کار می‌رود [۱۳]. امواج آکوستیکی در اثر آزاد شدن سریع انرژی کرنشی در سازه‌ها ممکن است ایجاد شوند. این روش در محدوده گسترده‌ای نظیر بازرسی مخازن تحت فشار فلزی نشت‌یابی سیستم‌های لوله‌کشی نفت، گاز، راکتورها و غیره قابل استفاده است [۱۴]. درک اولیه از مکانیزم نشت و تست انتشار آکوستیک توسط پولاک و هسو [۱۵] ارائه شد. صنعت معدن از جمله اولین صنایعی بوده که از روش نشرآوایی برای پایش اغتشاشات ناشی از توسعه ناپایدار صخره‌ها استفاده کرد. کوسویچ و همکاران [۱۶] تأسیسات و بویلرهای تحت فشار نیروگاهی را برای پایش نشتی از نشرآوایی مورد استفاده قرار

دادند. جاکس و واو [۱۷] از نشرآوایی برای پایش سازهایی شامل تست‌های مخازن تحت فشار راکتور استفاده کرد. تحقیقات بسیار زیادی با استفاده از نشرآوایی در پایش وضعیت تجهیزات دوار از جمله پایش یاتاقان‌ها، عیب‌یابی گیربکس و وضعیت شفت انجام گرفته است [۱۸، ۱۹]. سزار و همکاران [۲۰] سایش بسیار جزئی را در یاتاقان ردیابی نمودند.

تحقیقات دیگری نیز با استفاده از تست نشرآوایی در جهت شناسایی عیوب جوش در لوله‌های فولادی، روند شکست الیاف کامپوزیت و میزان نشتی شیر در خط لوله گاز توسط محققین مختلف ارائه شده است [۲۱-۲۳]. در این تحقیق کاربرد نشرآوایی در شناسایی محل نشت گاز در خط لوله انتقال گاز سراسری ایران با سایش ۵۶ اینچ و فشار ۱۰۵۰ psi، مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به اعلام گزارش وجود نشتی ۱۵۰ ppm دستگاه نشت‌یاب در لوله به طول ۳۷/۸ متر محصور داخل غلاف بتنی (CCW)، با توجه به گازدار بودن خط لوله و عدم امکان قطع جریان و همچنین هزینه بالای تخریب غلاف بتنی، با استفاده از آزمون نشرآوایی احتمال وجود نشتی در غلاف بتنی و تخمین موقعیت آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

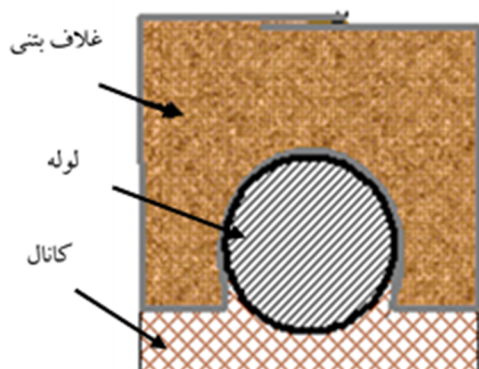
۲. روش پژوهش

لوله مورد تحقیق از خط لوله انتقال گاز سراسری ایران با قطر خارجی ۵۶ اینچ، ضخامت ۰/۶۲۸ اینچ، فشار ۱۰۵۰ psi، گرید API X70 و با قدمت ۱۷ سال بهره‌برداری می‌باشد. جدول ۱ خواص مکانیکی لوله می‌باشد. به علت اینکه لوله مورد تحقیق در منطقه با خاک سست و آب خیز می‌باشد، نیروی کمانش و شناوری لوله می‌تواند بر نیروی وزن خاک غلبه کند به همین دلیل لوله در غلاف بتنی (CCW) قرار داده شده است. شکل ۱-الف، لوله مورد تحقیق که در غلاف بتنی می‌باشد و شکل ۱-ب، شماتیک غلاف بتنی مشاهده می‌شود.

(الف)



(ب)



شکل ۱. الف) لوله مورد تحقیق. ب) شماتیک لوله در داخل غلاف بتنی

جدول ۱. خواص مکانیکی لوله مورد تحقیق

Specimen	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	YS/UTS	elongation(%)
BASE	۵۹۹	۶۳۸	۰/۹۳	۲۴/۶
Target, API 5L(MPa)	۶۳۵-۴۸۵	۷۶۰-۵۷۰	۰/۹۳	۲۱/۱

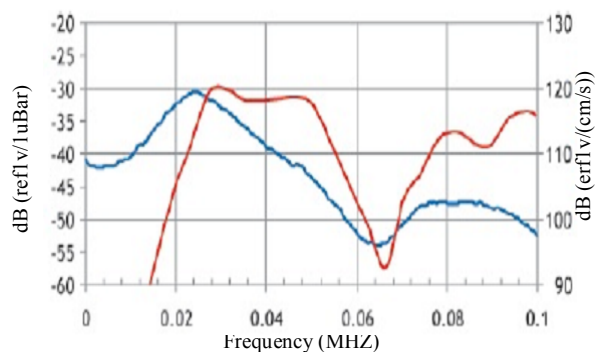
با توجه به اعلام گزارش وجود نشتی ۱۵۰۰ ppm با دستگاه نشت‌یاب در لوله به طول ۳۷/۸ متر، محصور در داخل غلاف بتنی، با استفاده از آزمون نشرآوایی احتمال موقعیت نشتی در غلاف بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت. تصمیم بر آن شد که تخریب بتن فقط در نقطه نشتی صورت بگیرد. تجهیزات مورد نیاز معمول برای پردازش آزمون نشرآوایی عبارتند از: سیستم داده‌برداری، حسگر و تقویت کننده، کابل اتصال [۲۴]. جهت انجام آزمون ردیابی محل نشتی از دستگاه داده‌برداری نشرآوایی مدل Micro SamosII محصول شرکت Physical Acoustic آمریکا استفاده شد. شرکت‌های سازنده تجهیزات نشرآوایی با توجه به تجربیات و نتایج آزمون‌های مختلف، حسگرهایی را با قابلیت دریافت

محدوده فرکانس‌های مشخص برای کاربردهای خاص طراحی و تولید نموده‌اند [۲۵]. برای شناسایی و ردیابی سیگنال نشتی از حسگرهای پیزوالکتریک با فرکانس تشدید ۳۰ کیلوهرتز و حساسیت ۱۲۰ دسی‌بل، مدل R3I-AST محصول شرکت Physical Acoustic آمریکا استفاده شد که در شکل ۲-الف نشان داده شده است. نمودار پاسخ فرکانسی این حسگر در شکل ۲-ب نشان داده شده است. این مدل حسگر دارای پیش تقویت‌کننده داخلی است که درون محفظه حسگر تعبیه شده و سیگنال‌های دریافتی را تا ۴۰ دسی‌بل تقویت می‌نماید.

(الف)



(ب)



شکل ۲. الف) حسگر پیزوالکتریک R3I-AST ب) نمودار پاسخ فرکانسی حسگر

همچنین یک حسگر مدل R15a با فرکانس ۱۵۰ کیلو هرتز جهت ردگیری ترک در کنار حسگر R3I-AST استفاده شد. پیزوالکتریک‌های سرامیکی عملکرد بسیار بهتری در تولید الکتریسیته هنگام تغییر فرم نسبت به سایر مواد از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل پیزوالکتریک سرامیکی برای حسگرهای نشرآوایی برای دستیابی به حساسیت بالا در اندازه‌گیری تغییرات میکروسکوپی مناسب‌تر است [۲۶].

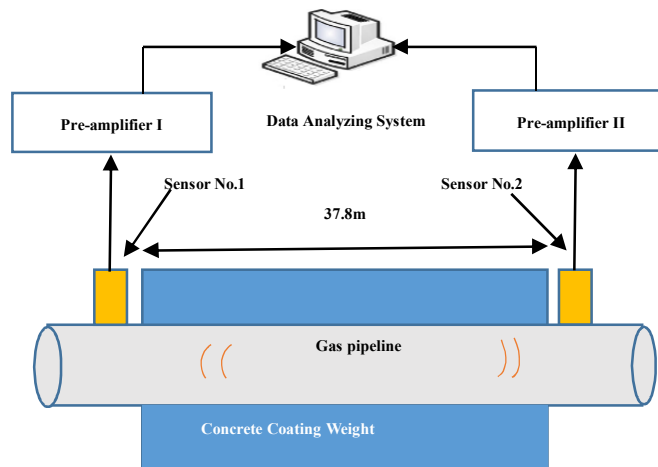
با توجه به اینکه دستگاه نشت‌یاب وجود نشتی در قسمتی از لوله که محصور در بتن است را نشان داده بود، لذا پس از جداسازی پوشش پلی اتیلن لوله مطابق با شکل ۳-الف و ب حسگرهای ۳۰ و ۱۵۰ کیلوهرتز را بر روی لوله نصب می‌کنیم. حسگرها در فاصله ۳۷/۸ متری (ابتدا و انتهای غلاف بتنی) همانند شکل ۴ بر روی بدنه لوله نصب گردید.



شکل ۳. محل قرارگیری حسگرها بر روی لوله الف) حسگر ۳۰ کیلو هرتز شماره ۱ ب) حسگر ۳۰ کیلو هرتز شماره ۲

همچنین جهت حذف فاصله هوایی بین حسگر و لوله از کوپلنت گریس سیلیکون استفاده گردید [۲۷].

با استفاده از گیره آهنربایی حسگرها بر روی لوله متصل شد.

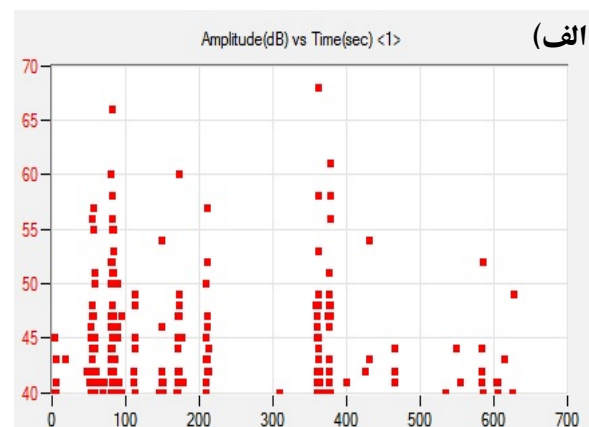
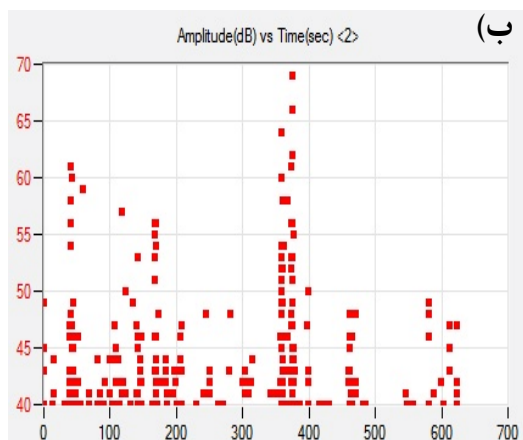


شکل ۴. شماتیک لوله مورد تحقیق به همراه تجهیزات آزمون

۳. نتایج و بحث

پس از اتصال حسگرها و انجام تنظیمات اولیه و کالیبراسیون حسگرها جهت شناسایی و حذف نویزهای احتمالی با انتخاب حد آستانه ۴۰ دسی بل جهت دریافت کمترین میزان نویز، به مدت ۱۰ دقیقه، داده برداری انجام گرفت. پس از بازبینی

نهایی و کالیبراسیون مجدد، ۶۴۰ ثانیه داده برداری نهایی انجام شد. در شکل ۵-الف و ب نمودار دامنه سیگنال‌های دریافتی برای حسگر شماره ۱ و ۲ نسبت به زمان نشان داده شده است. در شکل ۶، سیگنال نشرآوایی اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود.

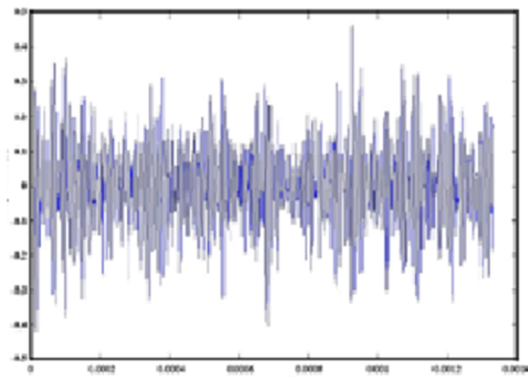


شکل ۵. نمودار دامنه سیگنال‌های دریافتی (الف) حسگر شماره ۱ (ب) حسگر شماره ۲

پس از حذف نویز، مکان‌یابی منابع ایجاد سیگنال نشرآوایی انجام گردید.

در شکل ۷ مختصات نقاط منابع ایجاد سیگنال نشرآوایی نشان داده شده است.

ID				
* Gp# 1[1,2]	x =	16.91, y =	0	dt[681]
* Gp# 1[2,1]	x =	37.8, y =	0	dt[18259]
* Gp# 1[1,2]	x =	0, y =	0	dt[13623]
* Gp# 1[1,2]	x =	5.042, y =	0	dt[4738]
* Gp# 1[2,1]	x =	37.8, y =	0	dt[14623]
* Gp# 1[2,1]	x =	37.8, y =	0	dt[25764]
* Gp# 1[2,1]	x =	37.8, y =	0	dt[8550]
* Gp# 1[2,1]	x =	37.8, y =	0	dt[8441]
* Gp# 1[2,1]	x =	37.8, y =	0	dt[10156]
* Gp# 1[2,1]	x =	34.87, y =	0	dt[5461]
* Gp# 1[2,1]	x =	23.44, y =	0	dt[1553]
* Gp# 1[1,2]	x =	12.67, y =	0	dt[2131]
* Gp# 1[1,2]	x =	5.77, y =	0	dt[4489]
* Gp# 1[1,2]	x =	0, y =	0	dt[7945]
* Gp# 1[2,1]	x =	37.8, y =	0	dt[10178]
* Gp# 1[2,1]	x =	21.54, y =	0	dt[903]
* Gp# 1[1,2]	x =	6.394, y =	0	dt[4276]
* Gp# 1[2,1]	x =	37.8, y =	0	dt[17863]

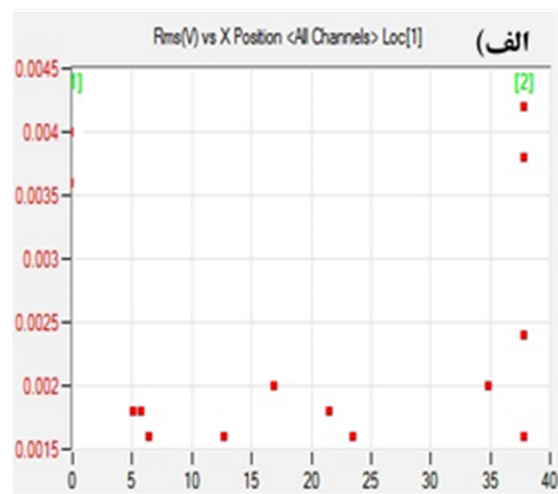
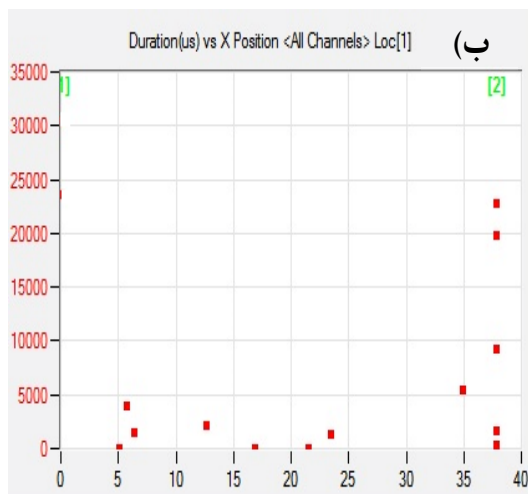


شکل ۶. سیگنال نشرآوایی اندازه گیری شده

شکل ۷. مختصات نقاط منابع ایجاد سیگنال

داده شده است. مقدار این دو عامل در سیگنال های نشتی بالاتر از سایر منابع است.

در شکل ۸ از دو ویژگی RMS و ماندگاری سیگنال جهت شناسایی و تشخیص سیگنال های نشتی از سایر منابع نشان



شکل ۸. الف) RMS ب) ماندگاری

محاسبه اختلاف زمانی بین دو حسگر و با استفاده از رابطه ۱، مکان منبع سیگنال d (فاصله منبع تا نزدیک ترین حسگر) محاسبه می شود.

$$d = 1/2(D - \Delta T \cdot V) \quad (۱)$$

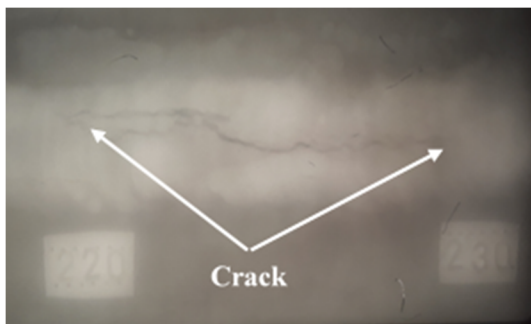
d = فاصله منبع تا نزدیک ترین حسگر

D = فاصله بین دو حسگر

V = سرعت موج (5850 m/s)

جهت تعیین موقعیت نشتی با استفاده از مکان یابی خطی استفاده شد. اساس مکان یابی خطی، محاسبه مکان منبع سیگنال نشرآوایی بر مبنای اختلاف زمانی بین سیگنال دریافتی توسط حسگرها است.

مطابق شکل ۹ اگر فاصله بین حسگرها D باشد و t_1 ثانیه طول بکشد تا حسگر ۱ سیگنال را دریافت نماید و t_2 ثانیه طول بکشد تا حسگر ۲ همان سیگنال را دریافت کند؛ با



شکل ۱۱. فیلم پرتونگاری ترک طولی جوش محیطی

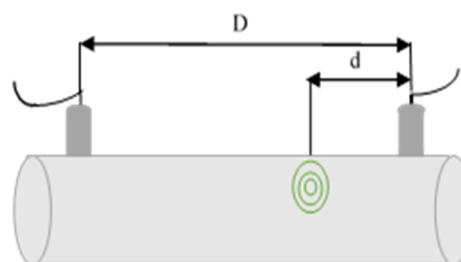
این ترک طولی می‌تواند در زمان اجرای خطوط لوله گاز بر اثر تنش‌های پسماند ناشی از فرایند جوشکاری منجر به بروز پدیده ترک هیدروژنی (HIC^v) شده، و به صورت ریز به وجود آمده باشد و با اعمال تنش و گذشت زمان این ترک ریز رشد کرده است. ترک‌های هیدروژنی ممکن است همواره قابل تشخیص و شناسایی نباشند، به طور معمول چون این ترک‌ها اغلب به سطح قطعه راه ندارند، لذا امکان تشخیص و شناسایی آنها با سایر روش‌های بازرسی ذرات مغناطیسی و مایعات نافذ وجود نخواهد داشت.

همچنین بسته به اینکه جهت ترک در چه امتدادی نسبت به راستای پرتونگاری قرار داشته باشد، امکان شناسایی با آزمون پرتونگاری نیز ممکن است وجود نداشته باشد. عمق و دهانه کوچک ترک‌ها و ضخامت‌های بالای لوله دیده نشدن این میکرو ترک‌ها را تشدید می‌نمایند [۲۸، ۲۹].

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با نصب حسگرهای پیزوالکترونیک با فرکانس ۳۰ و ۱۵۰ کیلوهرتز در دو سر لوله ۵۶ اینچ خط انتقال گاز سراسری ایران (70APIX) با فشار ۱۰۵۰ psi محصور در غلاف بتنی به طول ۳۷/۸ متر نصب گردید و عملیات داده‌برداری جهت محل نشتی انجام شد و پس از مکان‌یابی محل دقیق نشتی گاز کشف گردید. با توجه به اینکه دستگاه نشت‌یاب در دو سر غلاف بتنی، نشتی نشان می‌داد و به نظر می‌رسید نشتی در غلاف بتنی باشد، بدون تخریب غلاف بتنی و قطع جریان گاز با روش نشرآوایی موقعیت نشتی پیدا

$\Delta T =$ اختلاف زمانی بین دریافت سیگنال توسط حسگرها

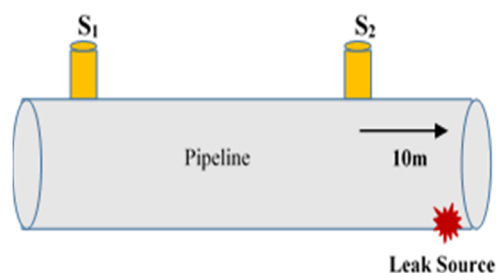


شکل ۹. مکان‌یابی خطی

نتایج آزمون حاکی از آن است که محل نشتی در نزدیکی حسگر شماره ۲ است. با توجه به اینکه نقاط با RMS و ماندگاری بالا دقیقاً در موقعیت ۳۷/۸ متری هستند.

طبق تنظیمات مکان‌یابی مؤید این نکته است که محل نشتی خارج از محدوده دو حسگر و در سمت حسگر شماره ۲ است. با بررسی مقدار دامنه سیگنال‌ها و محاسبه میرایی سیگنال در لوله، مشخص می‌گردد که محل نشتی در فاصله حدودی ۱۰ تا ۱۵ متری بعد از حسگر شماره ۲ و در محلی خارج از لوله محصور در غلاف بتنی است. که در شکل شماتیک ۱۰ نمایش داده شده است.

پس از حفاری از موقعیت نشت کشف شده و پرتونگاری از سرجوش محیطی، ترک طولی به طول ۱۰ سانتی متر در ساعت ۶ لوله مشاهده شد که در شکل ۱۱ قابل رؤیت می‌باشد، پس از تخلیه گاز نقطه مورد نظر تعمیر گردید.



شکل ۱۰. شماتیک موقعیت نشتی کشف شده

شد و توانایی این روش جهت کشف نشتی به صورت تجربی
ملاحظه گردید.

منطقه دو عملیات انتقال گاز ایران جناب آقای مهندس
مهری جهت حمایت از این پروژه و همچنین کارکنان
شرکت دانش بنیان تحقیق و توسعه ایرانیان (تتا) جهت انجام
آزمون ابراز می نمایند.

۵. سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مدیر
محترم، رئیس بازرسی فنی و معاونت عملیات خطوط لوله

۶. مأخذ

- [1] H. Reza Hajibagheri, A. Heidari, and R. Amini, "An experimental investigation of the nature of longitudinal cracks in oil and gas transmission pipelines," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 741, 2018, pp.1121-1129.
- [2] "API 5L, Specification for Line Pipe," in *Edition FORTY-FOURTH EDITION*, ed. API Standard: American Petroleum Institute, 2008.
- [3] Liu, Z. Y., X. G. Li, C. W. Du, and Y. F. Cheng, "Local additional potential model for effect of strain rate on SCC of pipeline steel in an acidic soil solution." *Corrosion science*, Vol.51, No.12, 2009, pp.2863-2871.
- [4] Mostafapour, A., and S. Davoudi., "Analysis of leakage in high pressure pipe using acoustic emission method." *Applied Acoustics* Vol.74, No.3, 2013, pp.335-342.
- [5] Xu, Changhang, Piao Gong, Jing Xie, Huandi Shi, Guoming Chen, and Gangbing Song, "An acoustic emission based multi-level approach to buried gas pipeline leakage localization." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.44, 2016, pp.397-404.
- [6] Murvay, Pal-Stefan, and Ioan Silea., "A survey on gas leak detection and localization techniques." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.25, No.6, 2012, pp.966-973.
- [7] Lay-Ekuakille, Aimé, Giuseppe Vendramin, and Amerigo Trotta., "Spectral analysis of leak detection in a zigzag pipeline: A filter diagonalization method-based algorithm application." *Measurement*, Vol.42, No.3, 2009, pp. 358-367.
- [8] Buerck, J., S. Roth, K. Kraemer, and H. Mathieu., "OTDR fiber-optical chemical sensor system for detection and location of hydrocarbon leakage." *Journal of hazardous materials*, Vol.102, No.1, 2003, pp.13-28.
- [9] "ASTM E1211 / E1211M – 17, Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface-Mounted Acoustic Emission Sensors", *American Society for Testing and Materials*, 2017.
- [10] "ASME Section V, Article 10, Leak testing, Appendix X, Ultrasonic leak detector test," *American Society of Mechanical Engineers*.
- [11] Miller, Ronnie K., Adrian A. Pollock, Peter Finkel, Daniel J. Watts, John M. Carlyle, Anthony N. Tafuri, and J. J. Yezzi, "The development of acoustic emission for leak detection and location in liquid-filled, buried pipelines." *Acoustic Emission: Standards and Technology Update*. ASTM International, 1999.
- [12] J. Spanner, "Advances in acoustic emission," *Dunhart, USA*, p.1, 1981.
- [13] Anastasopoulos, Athanasios, Dimitrios Kourousis, and Konstantinos Bollas., "ACOUSTIC EMISSION LEAK DETECTION OF LIQUID FILLED BURIED PIPELINE." *Journal of Acoustic Emission*, vol.27, 2009.

- [14] Thompson, G., and G. Zolkiewski., "An experimental investigation into the detection of internal leakage of gases through valves by vibration analysis." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol.211 No.3, 1997, pp.195-207.
- [15] Pollock, Adrian A., and Calvin E. Pepper., "Quantitative Analysis of Acoustic Emission from Gas Leaks in a Model Piping System." *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Springer, Boston, MA, 1999, pp. 427-434.
- [16] Kovacevich, James J., Michael O. Robertson, Darryl P. Sanders, and Steven P. Nuspl., "Recent advances in the application of acoustic leak detection to process recovery boilers." *Tappi journal*, 1996.
- [17] Le Floc'h, C., "Acoustic emission monitoring of composite high-pressure fluid storage tanks." *NDT international*, Vol.19, No.4, 1986, pp.259-262.
- [18] Park, Sungho, Seokgoo Kim, and Joo-Ho Choi., "Gear fault diagnosis using transmission error and ensemble empirical mode decomposition." *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.108, 2018, pp.262-275.
- [19] Toutountzakis, Tim, Chee Keong Tan, and David Mba., "Application of acoustic emission to seeded gear fault detection." *NDT & E International*, Vol.38, No.1, 2005, pp.27-36.
- [20] Caesarendra, Wahyu, Buyung Kosasih, Anh Kiet Tieu, Hongtao Zhu, Craig AS Moodie, and Qiang Zhu., "Acoustic emission-based condition monitoring methods: Review and application for low speed slew bearing." *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.72, 2016, pp.134-159.
- [21] Ni, Qing-Qing, and Masaharu Iwamoto., "Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites." *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.69, No.6, 2002, pp.717-728.
- [22] Droubi Mohamad G, Faisal Nadimul H, Orr Fraser, "Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints." *Journal of constructional steel research*, Vol.134, 2017, pp.28-37.
- [23] Cao, Menglong, and Libin Huo., "Natural gas pipeline valve leakage rate estimation via factor and cluster analysis of acoustic emissions." *Measurement*, Vol.125, 2018, pp.48-55.
- [24] Husin, S., A. Addali, and D. Mba., "Sensitivity of acoustic emission (AE) technology in monitoring oxide formation on an aluminium surface." *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol.53, No.12, 2011, pp.677-681.
- [25] Kourousis, Dimitrios, Konstantinos Bolas, Athanasios Anastasopoulos, ENVIROCOUSTICS ABEE, and G. R. E. E. C. E. Athens., "Acoustic Emission Leak Detection of Buried Oil Pipelines, River and Road Crossings." *Envirocoustics ABEE*, 2010.
- [26] Inaba, Hidehiro. "AE Sensor (AE Transducer)," *Practical Acoustic Emission Testing*. Springer, Tokyo, 2016, pp.35-43.
- [27] "ASTM E650-97 Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors," *American Society for Testing and Materials*, 2007.
- [28] Bouchard, P. J., "Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel pipe girth welds." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.84, No.4, 2007, pp.195-222.
- [29] Kim, C. D., "Hydrogen-damage failures." *ASM Handbook*, Vol.11, 1986, pp. 245-251.

1. Acoustic Emission
2. Concrete Coating Weight
3. Girth Weld
4. High Strength Low Alloy Steels
5. American Petroleum Institute
6. Amplitude
7. Hydrogen Induced Cracking