

## بررسی علل ریشه‌ای حادثه‌ی انفجار خط لوله‌ی ۲۰ اینچ گاز شرکت ملی نفت ایران

حمیدرضا عسگری بیدهندی\*، مسعود رفیعی میاندشتی، مانی عبدالله‌زاده راد، مدیریت HSE شرکت ملی نفت ایران ■ محمدرضا زیبچی قدره، علی جهدی سردرود، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

خطوط لوله‌ی انتقال نقش مهمی در صنعت نفت و گاز ایفا می‌کنند. این خطوط لوله در معرض خطراتی از قبیل طراحی غلط، خوردگی و بهره‌برداری ناصحیح هستند که هزینه‌ی بسیاری بر این صنعت تحمیل می‌کنند. در یک حادثه، قسمتی از خط لوله‌ی ۲۰ اینچ زیرزمینی گاز شرکت ملی نفت ایران شکسته و ابر گاز ناشی از نشت به منبع حرارتی رسیده است. با توجه به باز بودن محیط، حریق ناگهانی (Flash Fire) ایجاد شده و بازگشت شعله منجر به انفجار ابر گاز تجمع کرده در چاله‌ی اطراف خط لوله به‌صورت انفجار ابر گازی (VCE) شده است. انرژی حاصل از شکست حدود ۵ متر از بدنه‌ی خط لوله را جدا کرده و به فاصله‌ی ۲۰ متری پرتاب کرده است.

در این مقاله علل فنی و ریشه‌ای ایجاد ترک و نشت در این حادثه بررسی شده است. در ابتدا همخوانی ریزساختار و ترکیب شیمیایی فلز پایه با استاندارد API 5L بررسی شده و پس از آن سلامت فرآیند ساخت مورد توجه قرار گرفت. در گام بعدی، بررسی‌های میکروسکوپی الکترونی انجام شد و پس از مشاهده‌ی تردشدگی و ترک مرزانه‌ای، آزمون‌های کشش و ضربه نیز برای تأیید تردشدگی خط لوله انجام گردید. نتایج حاصل از انرژی جذب شده در آزمون ضربه برابر ۱۱ ژول و بسیار کمتر از مقدار استاندارد (۲۷ ژول) بوده است. در همین راستا، آنالیز شیمیایی EDS در طول ترک انجام شد که مقادیر بسیار زیاد و خارج از استاندارد عنصر گوگرد در این ناحیه مشاهده گردید. ترک از سمت خارج خط لوله گسترش یافته است. پوشش خط لوله به‌مرور زمان و به‌دلیل عمر زیاد (بیش از ۴۰ سال) تخریب شده، باعث در معرض خاک قرار گرفتن لوله گردیده و در نهایت خوردگی تنش‌ی و پارگی در آن ایجاد کرده است. علل ریشه‌ای پارگی خط لوله‌ی مذکور، نقص در فرآیندهای بازرسی فنی دوره‌ای و منظم به‌منظور حصول اطمینان از کارکرد صحیح پوشش و همچنین نقص در نگهداری و تعمیرات مناسب پوشش خط لوله تشخیص داده شد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۳/۱۸

تاریخ ارسال به داو: ۹۸/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش داو: ۹۸/۰۵/۰۵

### واژگان کلیدی:

انفجار خط لوله، خوردگی تنش‌ی، علل ریشه‌ای، حریق ناگهانی، انفجار ابر بخار

### مقدمه

می‌شوند. فولاد در تماس با آب و سایر مواد و یون‌های خورنده، مستعد به خوردگی بوده و بنابراین لازم است از تمهیداتی مانند حفاظت کاتدی، ممانعت‌کننده‌های خوردگی، رنگ و پوشش‌های مختلف استفاده شود. استفاده از رنگ و پوشش به‌منظور جلوگیری از خوردگی، نفوذ عناصر موجود در محیط، ایجاد مقاومت در برابر ضربه و جلوگیری از اکسیداسیون در دمای زیاد کاربرد دارند [۱]. عمر مفید اغلب رنگ‌ها و پوشش‌ها کمتر از ۱۰ سال بوده و پس از آن باید به‌صورت مرتب بازرسی شده و در صورت نیاز تعمیر شوند [۲]. خطوط لوله در صورت عدم انجام تعمیر و نگهداری به‌موقع، به‌دلیل قرار گرفتن فولاد در معرض محیط، مستعد انواع خوردگی و تردشدگی ناشی از جذب عناصر نامطلوب در ریزساختار است [۳].

خوردگی انواع مختلفی دارد و معمول‌ترین انواع خوردگی در صنایع نفت و گاز، خوردگی یکنواخت، خوردگی حفره‌ای و خوردگی تنش‌ی است. خوردگی تنش‌ی (Stress Corrosion

خطوط لوله‌ی انتقال و توزیع سیالات نقش مهمی در صنعت نفت و گاز دنیا ایفا می‌کنند. معضل خوردگی از جمله مشکلات اساسی در این صنایع بوده و هزینه‌های بسیاری برای آنها ایجاد می‌کند. به‌منظور کاهش هزینه‌های مترتب بر خطوط لوله، سالیانه مبالغ زیادی صرف نگهداری و محافظت از آنها در برابر خوردگی می‌شود که این هزینه‌ها اغلب برای رنگ و پوشش، حفاظت کاتدی و بازرسی فنی هستند. هزینه‌های بازرسی فنی و نگهداری تعمیرات پیشگیرانه، از طریق کاهش ریسک، سبب افزایش قابلیت اطمینان خطوط لوله و افزایش سطح ایمنی آنها می‌شود و بنابراین عامل بسیار مهمی از دیدگاه HSE هستند. در واقع اگر هزینه‌های بازرسی فنی و نگهداری انجام نشود هزینه‌های بسیاری باید برای جبران خسارات حوادث صرف گردد.

با توجه به خواص مکانیکی مورد نیاز و اصول اقتصاد مهندسی، اغلب خطوط لوله‌ی فلزی از فولاد ساده‌ی کربنی تولید

\* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (hr.asgari@gmail.com)

از جوش طولی (Longitudinal weld) نشست کرده بود با این انفجار از دو سر جوش شعاعی (Circumferential weld) و بدنه دچار شکست شده است. قسمتی از لوله به طول حدود ۵ متر در طول درز جوش طولی، برش خورده و در فاصله‌ی ۲۰ متری فرود آمده است. در ادامه، آتش به صورت فورانی (Jet Fire) [۹] ادامه یافته است.

در این مقاله علل ایجاد ترک و نشست از منظر متالورژیکی بررسی می‌شود. همچنین علل ریشه‌ای این رخداد مشخص شده و راهکارهایی برای جلوگیری از بروز چنین حادثه‌ای در آینده ارائه می‌گردد.

### ۱- مواد و روش‌ها

جنس خط لوله API 5L Grade X52 با ضخامت ۷/۷ mm و کلاس اتصالات ۳۰۰ lb و نوع پوشش خارجی PVC بوده است. خط لوله‌ی مورد نظر در نزدیکی جاده‌ی اصلی و به صورت زیرزمینی در حال سرویس‌دهی بوده است. برای بررسی علل پارگی، از قسمت‌های (۱) سطح شکست طولی (۲) جوش عرضی منطقه‌ی آسیب‌دیده (۳) جوش عرضی منطقه خارج از محدوده‌ی انفجار نمونه‌برداری انجام شد. ترکیبات شیمیایی فلز پایه و جوش با استفاده از اسپکتروسکوپی نشری (کوآتومتری) بررسی گردید. به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری استفاده شد و آماده‌سازی نمونه‌ی متالوگرافی طبق استاندارد ASTM E3-17 انجام گردید. آشکارسازی میکرواچ، با محلول نایتال ۲ درصد مطابق استاندارد ASTM E 407 و آشکارسازی میکرواچ با استفاده از محلول نایتال ۱۰ درصد مطابق استاندارد ASTM E340 صورت گرفت. سختی‌سنجی ویکرز مطابق استاندارد ASTM E92 و با نیروی 10Kgf انجام شد.

شکست‌نگاری سطح ترک با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) برای بررسی نرم یا ترد بودن سطح مقطع شکست انجام گردید. آزمایش ضربه از نوع شارپی مطابق استاندارد ASTM A370 از نمونه با شکاف V شکل به عمق ۲mm انجام شد. همچنین آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM A370 (2018) از نمونه‌ی ۳- انجام شده و استحکام تسلیم و نهایی ماده به دست آمد.

برای بررسی ترکیب شیمیایی سطوح از آنالیز EDS دستگاه میکروسکوپ الکترونی SEM استفاده شد. آزمون غیرمخرب ذرات مغناطیسی به منظور بررسی وجود معایب و ترک روی

(Cracking: SCC) ناشی از تأثیر همزمان تنش کششی و خوردگی است. مکانیزم‌های ایجاد SCC متفاوتند اما در مجموع به سه دسته تقسیم می‌شوند: (الف) خوردگی تنش در فلز ترد شده توسط هیدروژن که با وجود تنش، ترک‌هایی در آن ایجاد شده و با رشد و گسترش این ترک‌ها، شکست فاجعه‌بار (Catastrophic Failure) اتفاق می‌افتد. (ب) ترک خوردن برنج در محیط‌های حاوی آمونیاک که با نام ترک خوردن فصلی (Season Cracking) شناخته می‌شود (ج) تردی ناشی از وجود سدیم (Caustic Embrittlement) که در آن فولاد در محیط‌های بازی قوی دچار خوردگی تنش می‌شود.

ترکیبات شیمیایی و وجود باکتری‌های SRB در خاک، pH خاک، رطوبت موجود در خاک و سیال داخل لوله تأثیر به‌سزایی در بروز خوردگی دارند. از سوی دیگر وجود هیدروژن اتمی که ممکن است در اثر حفاظت کاتدی نامناسب [۴] یا وجود گاز  $H_2S$  در سیال ایجاد شود [۵]، عامل مخربی برای خواص مکانیکی فولاد بوده و با نفوذ در ریزساختار اتمی باعث تردی می‌گردد. مکانیزم ایجاد SCC به روشنی مشخص نشده و همچنان در دست بررسی توسط محققان مختلف است. به هر ترتیب وجود سه عامل (۱) ماده‌ی مستعد به خوردگی (۲) محیط خورنده (۳) تنش کششی بیش از حد مجاز، برای ایجاد این پدیده لازم است. تنش‌های مکانیکی شامل تنش پسماند ناشی از جوشکاری، تنش موجود در خط لوله ناشی از فشار سیال و تنش‌های ناشی از خاک، امکان ایجاد و گسترش ترک را افزایش می‌دهند [۶].

در ۱۳۵۷ خط لوله‌ی ۲۰ اینچ انتقال گاز غنی به طول ۲۲ کیلومتر به بهره‌برداری رسیده و با گذشت ۴۰ سال از سرویس‌دهی، دچار نشست سیال و پارگی منجر به انفجار شده است. در ابتدای نشست گاز، پاشش خاک اطراف لوله که از جاده‌ی عبوری به فاصله‌ی ۱۰۰ متر نیز دیده می‌شده اتفاق افتاده است. توده‌ی ابر گاز ایجاد شده با توجه به جهت وزش باد به سمت جاده منتشر شده است. ابر گاز به منبع حرارتی (یکی از خودروهای عبوری یا برق فشار قوی) رسیده و با توجه به باز بودن محیط منجر به شعله‌ی ناگهانی (Flash Fire) [۷] گردیده است. با بازگشت شعله به چاله‌ی ایجاد شده در اطراف خط لوله (چاله) در اثر نشست ابتدایی گاز ایجاد شده و منطقه‌ای بسته ایجاد کرده که محیطی مساعد برای انفجار ایجاد کرده است، انفجار گاز (VCE) [۸] در اطراف خط لوله اتفاق افتاده و لوله که

سطح داخلی و خارجی خط لوله با استاندارد ASTM E709-15 و توسط کنسانتره پودر مغناطیسی WB12 با روش یوک انجام شد. دستگاه مورد استفاده یوک مغناطیسی مگنا فلاکس (Magna flux/KDE) بوده است.

## ۲- نتایج و بحث

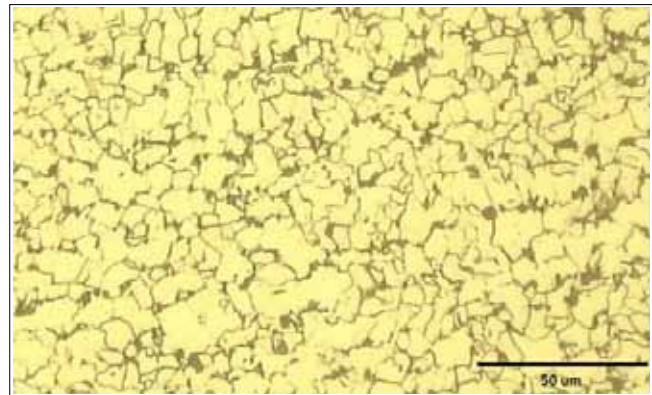
### ۲-۱- بررسی ترکیب شیمیایی و ریزساختار

با توجه به نوع شکست اتفاق افتاده، ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز جوش بررسی شد (جدول ۱) که ترکیب شیمیایی آنها با مقادیر استاندارد همخوانی داشت. با توجه به یکسان بودن تقریبی ترکیب‌های شیمیایی، می‌توان گفت که در جوشکاری از فیلر متال استفاده نشده و فرآیند جوشکاری احتمالی، جوشکاری مقاومتی الکتریکی [۱۴] بوده است.

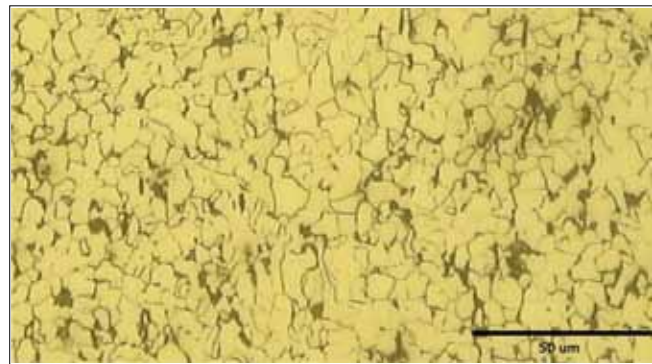
در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ نتایج بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپی نوری نمایش داده شده است. فلز پایه ساختار فریت و پرلیتی دارد. به صورت مشابه، ساختار فلز جوش نیز مخلوطی از فریت و مقادیر اندک پرلیت است. تفاوت چشمگیری نیز در اندازه‌ی دانه‌ها دیده نمی‌شود.

با توجه به تفاوت اندک سختی بین فلز پایه و فلز جوش و حتی کمتر بودن سختی فلز جوش و منطقه‌ی متأثر از حرارت (HAZ) نسبت به فلز پایه، می‌توان گفت که جوشکاری درز سختی در نمونه‌ی ۱- ممکن است بر اثر گرما و تنش‌های ناشی از انفجار بوده یا بر اثر تردی ایجاد شده باشد.

با توجه به عدم وجود عیوب ساختاری و آخال و همچنین سختی‌سنجی انجام شده روی نمونه‌های ۱، ۲ و ۳، باید عنوان کرد که مطابق استاندارد ASTM E92 ترکیب شیمیایی فلز و همچنین فرآیند ساخت و جوشکاری لوله بدون نقص انجام شده است.



شکل ۱ | ریزساختار فلز پایه



شکل ۲ | ریزساختار فلز جوش



شکل ۳ | خط جوش در مرکز تصویر، ریزساختار فلز جوش مقادیر کمتر پرلیت دارد

جدول ۱ | ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز جوش مقایسه‌ی آنها با استاندارد

عنصر شیمیایی	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Cu	Ti+Nb+V
ترکیب شیمیایی استاندارد SPL2 برای لوله با درز جوش	۰/۲۶	-	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۱۵	-	-	۰/۱۵<
ترکیب شیمیایی فلز پایه	۰/۱۶±۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۷۴±۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴±۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳+۰/۰۰۴+۰/۰۰۱
ترکیب شیمیایی فلز جوش	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۷	۰/۰۱۹	۰/۰۱۶	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰۲+۰/۰۰۲+۰/۰۰۰

### ۲-۲- بررسی‌های شکست‌نگاری

در شکل‌های ۴ و ۵- بررسی‌های میکروسکوپی الکترونی SEM از سطح شکست نمونه‌ی ۱- نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴- مشاهده می‌شود سطح شکست جوش طولی خط لوله، براق و نسبتاً مسطح است. Cup & Cone در این سطح دیده نمی‌شود که ترد بودن شکست را نشان می‌دهد. شکل ۵- ترک‌های مرز دانه‌ای موجود در سطح شکست را نشان می‌دهد که عمدتاً به دلیل نفوذ عناصر مخرب مانند گوگرد و هیدروژن ایجاد می‌گردند [۳].

### ۲-۳- بررسی خواص مکانیکی

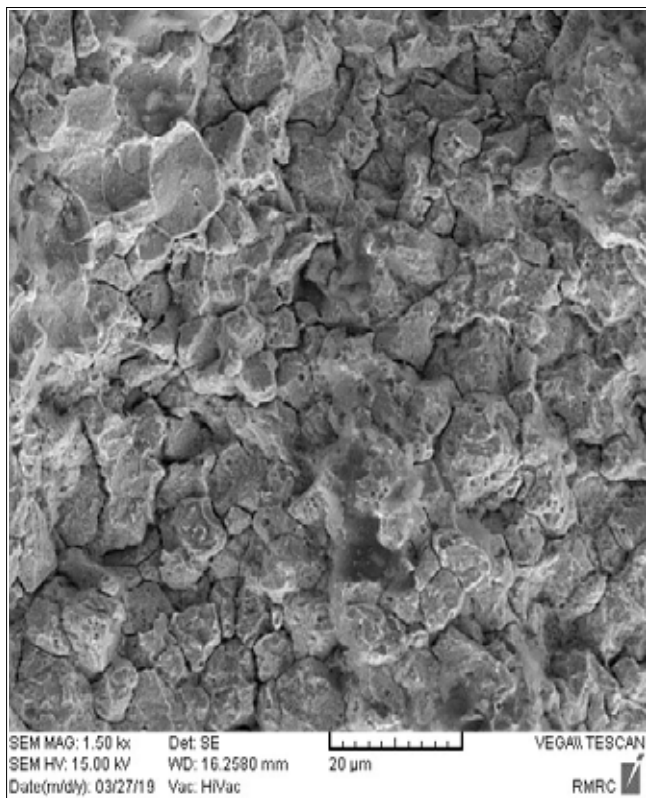
به‌منظور بررسی خواص مکانیکی و وجود پدیده‌ی تردی در خط لوله، نمونه‌ی ۳- مورد آزمایش کشش و ضربه قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۳- آورده شده است. حداقل انرژی جذب شده در آزمایش ضربه مطابق استاندارد API 5L، J 27 است که با مقدار اندازه‌گیری شده (J10) تفاوت فاحشی دارد. این تفاوت بیانگر مقاومت ضعیف درز جوش طولی نسبت به تغییرات ناگهانی تنش است. بدیهی است که تردی فلزات با استحکام

کششی آنها رابطه‌ی عکس دارد [۱۰].

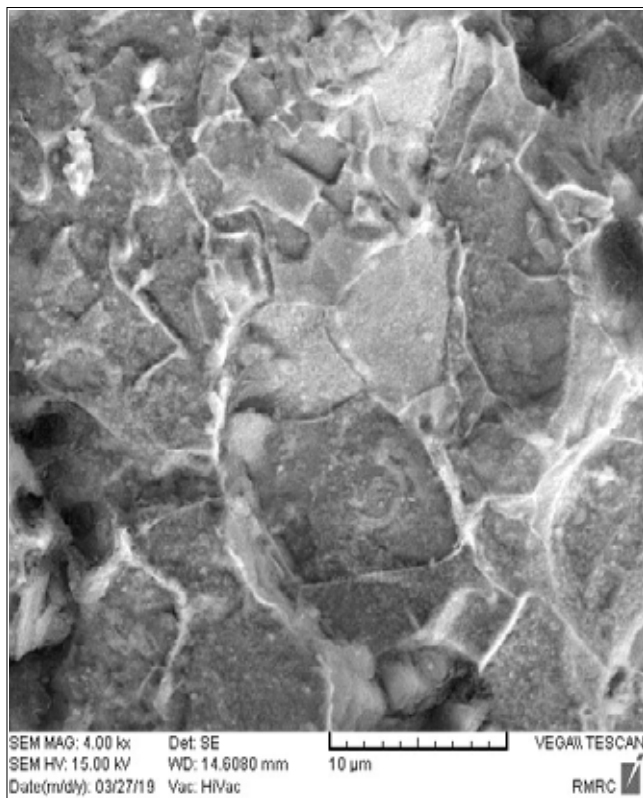
تغییرات مقدار گوگرد در ساختار فلز با استفاده از طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS) اندازه‌گیری شده است (شکل ۴-). وجود گوگرد عامل مهمی در تردی خط لوله است [۱۱]. همچنین گرادیان کاهشی مقدار گوگرد از سطح خارجی فلز به سمت داخل آن نشان می‌دهد که شروع ترک از سمت خارج فلز بوده و احتمالاً با از بین رفتن پوشش خط لوله، فلز خط لوله به تدریج در تماس با خاک قرار گرفته است. همان‌گونه که در تحقیقات دیگری نشان داده شده نفوذ عنصر گوگرد از خاک در ساختار فلز باعث تردی فلز و در نهایت کاهش استحکام کششی می‌شود [۱۲].

### ۲-۴- آزمون ذرات مغناطیسی

آزمون ذرات مغناطیسی برای بررسی وجود ترک، شکاف و ناپیوستگی سطحی و یافتن عیوب سطحی و منطقه‌ی متأثر از حرارت و جوش (HAZ) و عیوب زیرسطحی شامل ترک‌ها (Crack) و سوراخ‌های کرمی راه یافته به سطح جوش و در نزدیکی سطح (Worm holes) استفاده می‌شود. به دلیل



شکل ۵ | سطح شکست نمونه



شکل ۴ | سطح شکست نمونه براق است

از دیاد طول نمونه‌ی شکست حاصل از آزمایش کشش (۱۴/۶٪) و مقایسه‌ی آن با مقدار استاندارد (۲۴/۲٪)، تردی خط لوله را تأیید می‌کند. با توجه به وجود تنش‌های ناشی از عبور سیال و همچنین تنش‌های خارجی ناشی از خاک که با ساخت جاده و عبور خودروهای سنگین راه‌سازی روی لوله افزایش نیز یافته، احتمال شکست به‌شدت افزایش می‌یابد. این تنش‌ها بیش از مقدار قابل تحمل توسط خط لوله بوده است. افزایش تنش روی خطوط لوله، ایجاد و گسترش ترک‌های مرزانه‌ای موجود در ساختار فلز سبب تردی آن شده و خوردگی از نوع SCC است [۱۲].

علل غیرمستقیم وقوع این حادثه که باید برای جلوگیری از حوادث مشابه رعایت شوند به شرح زیر هستند:

■ بازرسی‌های فنی مؤثر خط لوله (مانند توپکرانی هوشمند و توپکرانی ترک‌یاب) و پوشش (مانند DCVG و CIPS) که بیانگر وضعیت خط است باید به‌صورت مرتب انجام شوند.

■ لازم است پایش، نگهداری و تعمیرات سیستم حفاظت کاتدی مطابق استانداردهای IPS-C-TP-820 و IPS-I-TP-820 مورد توجه قرار گیرد.

■ متأسفانه به‌دلیل کمبود اطلاعات فنی در مورد خط لوله، ارزیابی ریسک صحیح انجام نشده و شرایط ناایمن بروز کرده است.

■ با توجه به گذشت ۴۰ سال از عمر خط لوله و منقضی شدن طول عمر مفید آن باید وضعیت و قابلیت سرویس‌دهی خط لوله مطابق استاندارد ASME FFS-1 2016 Fitness-1-API 579 For-Service روشن گردد که متأسفانه به‌دلیل کمبود اطلاعات و عدم انجام بازرسی‌های فنی مؤثر، این مهم مغفول مانده است. ■ مطابق استاندارد IPS-E-PI-140 جاده‌ی فرعی احداث شده روی خط لوله باید برای عبور خطوط لوله زیرزمینی و عدم انتقال تنش‌های ناشی از عبور ماشین‌آلات دارای کالورت باشد که متأسفانه چنین تمهیدی در نظر گرفته نشده بود.

■ ارزیابی عمر مفید پوشش خط لوله مطابق مشخصات ساخت انجام نشده و آزمون‌های مناسب برای تشخیص کاردهی (Functionality) پوشش در بازه‌های زمانی مناسب مطابق استانداردهای API RP 580 و API RP 581 انجام نشده است.

■ با توجه به وقوع شکست ترد در این خط لوله، انجام آزمون‌ها، بازرسی‌های فنی و الزامات ارزیابی تجهیز موجود در خصوص شکست ترد قسمت ۳- استاندارد 1-API 579 قبل از شروع

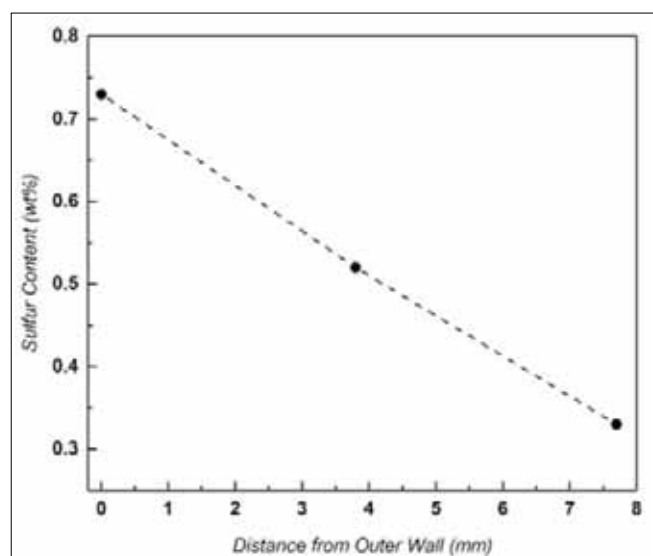
وجود تنش به‌مقداری بیش از مقدار قابل تحمل لوله در نواحی ترد شده، ترک‌هایی در جداره‌ی خارجی خط لوله مشاهده شده است. نتیجه‌ی آزمون ذرات مغناطیسی در شکل ۵- نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود ترک‌های موجود در سطح خارجی لوله عمودی هستند. آزمایش‌های انجام شده و بررسی سطوح شکست نشان می‌دهد فلز ترد شده و داکتیلیته‌ی آن کاهش یافته است. همچنین

جدول ۲ | سختی‌سنجی نمونه‌های ۱ و ۳

ردیف	موقعیت سختی‌سنجی	عدد سختی نمونه‌ی ۱	عدد سختی نمونه‌ی ۳
۱	WM	۱۹۷	۱۸۳
۲	HAZ	۲۰۳	۱۸۱
۳	HAZ	۲۰۳	۱۸۴
۴	BM	۲۰۵	۱۹۲
۵	BM	۲۱۰	۱۹۵
۶	سطح شکست (نزدیک‌ترین نقطه)	۲۱۵	-

جدول ۳ | نتیجه‌ی آزمون ضربه

مقادیر استاندارد برای آلیاژ X52 در استاندارد API 5L	حد اقل elongation	استحکام کششی (MPa)	حد اقل انرژی ضربه (J)
مقادیر استاندارد برای آلیاژ X52 در استاندارد API 5L	۲۴/۲٪	۴۶۰	۲۷
مقادیر اندازه‌گیری شده	۱۴/۶٪	۵۶۳	۱۰



شکل ۶ | تغییرات مقدار گوگرد در مقطع ضخامت خط لوله

مهندسی، عملیات و خوردگی فلزات نیز از عوامل گسست یکپارچگی در مدیریت خط و بروز حادثه است. احداث جاده‌ی دسترسی چاه و عملیات ترمیم جاده باید با هماهنگی و نظارت اداره‌ی خوردگی فلزات و مطابق الزامات استاندارد انجام شود.

■ عدم وجود چرخه‌ی بهبود سیستم مدیریت یکپارچگی شامل گردآوری اطلاعات و انجام بازرسی‌های فنی، ارزیابی ریسک، انجام اقدامات اصلاحی و کنترل‌های مهندسی، ارزیابی یکپارچگی مطابق استاندارد ASME B31.8S

### نتیجه‌گیری

■ به‌دلیل نفوذ عنصر گوگرد ترد شده و همچنین همزمانی تردی و وجود تنش‌های خارجی، خوردگی تنشی (SCC) در فلز خط لوله ایجاد شده است.

■ ضعف در نگهداری، نظر تعمیرات، پوشش و وضعیت حفاظتی خط لوله در وقوع خوردگی و شکست قطعه تأثیرگذار بوده است.

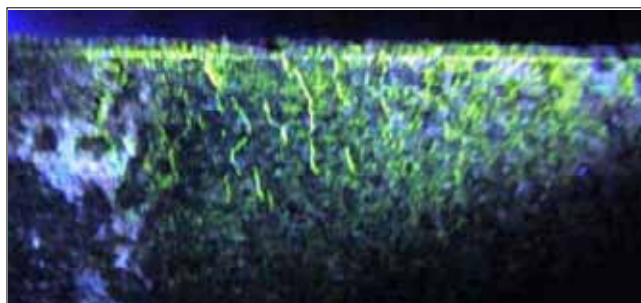
■ از طرفی، تجهیزات ایزولاسیون و کنترلی نظیر LBV روی خط لوله و عدم اجرای ارزیابی ریسک صحیح به‌دلیل کمبود اطلاعات فنی خط لوله منجر به ایجاد شرایط ناایمن شده است.

■ سیستم‌های مدیریت یکپارچگی خطوط لوله شامل ارزیابی ریسک، بازرسی فنی و انجام اقدامات اصلاحی و کنترلی باید مطابق استانداردها در مورد این خط لوله و سایر خطوط لوله استقرار یابد. ■

سرویس‌دهی اکیداً توصیه می‌گردد.

با توجه به موارد بالا، علل ریشه‌ای زیر در حادثه‌ی مذکور دخیل بوده‌اند:

- ضعف در تدوین و اجرای الزامات نگهداشت خط لوله شامل دستورالعمل‌های تعمیراتی و بازرسی فنی
- ضعف در اجرای برنامه‌ریزی دوره‌ای و منظم برای فعالیت‌های بازرسی فنی
- ضعف در پایش و نگهداری و تعمیرات سیستم‌های کنترل خوردگی سطح خارجی خط لوله شامل پوشش و حفاظت کاتدی
- عدم وجود بانک اطلاعات خط لوله شامل اسناد فنی زمان ساخت و نیز عدم مستندسازی بازرسی‌های فنی و تعمیراتی دوران بهره‌برداری
- ضعف در نحوه‌ی ارتباط، تعامل و هماهنگی بین واحدهای



شکل ۷ | آزمون ذرات مغناطیسی که وجود ترک در سطح خارجی لوله را نشان می‌دهد

### منابع

- [1] Alrudayni, Mohammed A., "Evaluation of External Coating Performance on Buried Pipelines in the Oil and Gas Industry". FIU Electronic Theses and Dissertations, November 2015, 1417-
- [2] John Beavers and Thomas A. Bubenik., "Stress corrosion cracking", 12th, December 2017. 295303-
- [3] Alrudayni, Mohammed A., "Evaluation of External Coating Performance on Buried Pipelines in the Oil and Gas Industry" FIU Electronic Theses and Dissertations, November 2015, 910-
- [4] V.S.Raja . T.Shuji. "Stress corrosion cracking in pipelines". Woodhead Publishing Limited, 2011, 749761-
- [5] F. Huang, P. Cheng, X.Y. Zhao, J. Liu, Q. Hu, Y. Frank Cheng. "Effect of sulfide films formed on X65 steel surface on hydrogen permeation in H<sub>2</sub>S environments". International journal of hydrogen energy (2016), 110-
- [6] A.H.S. Bueno, E.D. Moreira, J.A.C.P. Gomes. "Evaluation of stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement in an API grade steel". Engineering Failure Analysis 36 (2014), 423431-
- [۷] عبدالحمیدزاده، بدری، «ارزیابی کمی و کیفی ریسک در صنایع فرایندی»، انتشارات اندیشه‌سرا، ۱۳۹۳
- [۸] بدری، کارشکی و هاشمی، ۱۳۸۸، «کاربردهای ارزیابی پیامد در حیطه‌ی صنایع فرآیندی»، سومین همایش ملی مهندسی ایمنی و مدیریت HSE، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۸
- [9] CCPS, Center of chemical process safety, "Guidelines for evaluating the characteristics of vapour cloud explosions, flash fires and BLEVEs", AIChE, New York, September 2010.
- [10] Enyinnaya Ohaeri, Ubong Eduok, Jerzy Szpunar. "Hydrogen related degradation in pipeline steel". International journal of hydrogen energy (2018), 134-
- [11] Zhou Fan, Xiaogang Hu, Jianyi Liu, Hongchuan Li, Jinwen Fu. "Stress corrosion cracking of L360NS pipeline steel in sulfur environment". Petroleum 3 (2017), 377383-
- [12] E. Sadeghi Meresht, T. Shahrabi Farahani, J. Neshati. "Failure analysis of stress corrosion cracking occurred in a gas transmission steel pipeline". Engineering failure analysis 18 (2011), 963-970