

بررسی میدانی خوردگی سطح بیرونی لوله گاز مدفون در اثر جریان‌های القایی سرگردان DC و AC

مهدی شیرى^{۱*}، شهرام نیازبالی^۲، پیام پورنیا^۳، مریم رکاب اسلامی^۴، افشین حجازی موغاری^۵

^۱ کارشناس خوردگی بازرسی فنی، ^۲ رئیس بازرسی فنی، ^۳ کارشناس ارشد بازرسی فنی، ^۴ کارشناس ارشد بازرسی فنی، ^۵ کارشناس بازرسی فنی، شرکت گاز استان تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: mahdi_shiri@yahoo.com

تاریخ ارسال : ۱۴۰۰/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

چکیده

جریان‌های سرگردان ناشی از خطوط ریلی مترو (دارای جریان‌های بالای DC) و خطوط انتقال برق فشارقوی هوایی (دارای جریان‌های AC) یکی از معضلات مهم برای لوله‌های زیرزمینی گاز درون‌شهری می‌باشد که بهره‌برداری و نگهداری این لوله‌ها را دچار مشکل نموده و هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم خوردگی را به همراه دارد. در مطالعه پیش رو، علت خوردگی خط لوله گاز زیرزمینی تحت تأثیر جریان‌های سرگردان مذکور، در یکی از مناطق تهران مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا بازرسی‌های میدانی در محل صورت پذیرفت و سپس بررسی‌های تکمیلی آزمایشگاهی با مطالعات ریزساختاری و مورفولوژی خوردگی به انجام رسید. بر اساس نتایج حاصله، پوشش لوله و سطح بیرونی فلز در دو نقطه از خط لوله به فاصله تقریباً ۱۰ متر از یکدیگر به صورت موضعی آسیب دیده بودند. مطابق معیارهای استاندارد و نتایج پتانسیل AC، احتمال خوردگی شدید لوله در نقاط مذکور در اثر جریان‌های سرگردان AC غیرمحتمل است. پتانسیل لحظه‌ای خاموش خط لوله در هر دو نقطه دارای نوسانات بسیار شدید بود و در برخی زمان‌ها مقادیر مثبت نیز مشاهده گردید؛ که بر این اساس و همچنین مطابق استاندارد مربوطه، لوله مذکور تحت تأثیر جریان‌های سرگردان دینامیک DC، دچار خوردگی موضعی شدید شده است. محصولات خوردگی به صورت غیریکنواخت سطح فلز را پوشانده و دارای ترکیبات اغلب اکسیدی و هیدروکسیدی آهن بودند. همچنین در نقطه دوم، ترکیبات آهن کلراید نیز مشاهده گردید. لذا پیشنهاد گردید مطالعات تکمیلی مطابق توصیه‌های استاندارد BS EN 50162 انجام شده و سپس مطابق توصیه‌های استاندارد BS EN 50122-2، در جهت رفع این معضل اقدام نمود.

واژه‌های کلیدی: لوله‌های زیرزمینی گاز، خطوط ریلی مترو، خطوط انتقال برق فشارقوی، خوردگی جریان‌های سرگردان AC و DC.

Case Study

Evaluation of Underground Gas Pipeline External Corrosion Due to AC and DC Interference Currents

M. Shiri ^{1*}, S. Niazbali ², P. Poornia ³, M. Rekab Eslami ⁴, A. Hejazi Moghari ⁵

¹ Technical Inspection Corrosion Expert, ² Technical Inspection Chief, ³ Technical Inspection Senior Expert, ⁴ Technical Inspection Senior Expert, ⁵ Technical Inspection Expert, Tehran Gas Company, Tehran, Iran.

* **Corresponding Author:** mahdi_shiri@yahoo.com

Submission: 2022, 03, 11 **Acceptance:** 2022, 06, 10

Abstract

Adjunct to underground railway (which produce DC interference currents) and overhead power transmission lines (which produce AC interference currents), underground gas pipelines have been affected severely which have brought about corrosion costs namely direct and indirect costs. The effects of both types of stray currents on the UG gas pipelines located in a street in Tehran are studied. On-site inspections were performed and then additional laboratory studies were done to analyze and characterize the corrosion products. It is founded that the coating of the pipe has been disbonded in two points which are in 10-meter distances from each other and the external pipe wall were locally corroded which has led to gas leakage. According to the standard criteria and the results of AC potential, AC interference current may not cause the corrosion in the points. However, the amounts of off-potentials were out of range according to the relevant standards and therefore DC stray current produced by Tehran underground railway has mainly led to the corrosion. Corrosion products were not uniformly covered the metal surface and mainly contains Fe_3O_4 and FeOOH as well as FeCl_2 . Thus, it is recommended that additional evaluations need to be done according to BS EN 50162 and afterwards, protective measures must be taken to eliminate the side effects of the DC stray current.

Keywords: Underground Gas Pipelines, Underground Railways, Overhead Power Transmission Power lines, AC & DC Corrosion.

۱- مقدمه

۱-۱- مروری بر جریان‌های سرگردان

اثرات جریان‌های سرگردان از مهم‌ترین معضلات موجود در سازه‌های فلزی زیرزمینی می‌باشند. جریان‌های این‌چنینی موجب آسیب‌های بعضاً شدیدی به سازه مبدأ و سازه متأثر از آن می‌شود. همچنین موجب هزینه‌های مستقیم (همانند هزینه متریال و ساخت و تولید اولیه و آماده‌سازی، هدر رفت منابع انرژی، هزینه نشت‌یابی، هزینه تعمیرات و ...) و همچنین هزینه‌های غیرمستقیم (از قبیل هزینه‌های ناشی از کارافتادگی سیستم، آسیب‌های جانبی به سایر تجهیزات و تأسیسات و ...) می‌شود. این جریان‌ها مشتمل بر جریان‌های سرگردان AC یا برق متناوب و DC یا مستقیم هستند [۱]. مهم‌ترین منابع جریان‌های سرگردان برق AC عبارت‌اند از خطوط انتقال برق فشارقوی روزمینی و زیرزمینی و سیستم‌های حمل و نقل دارای ولتاژ برق متناوب [۲]. مهم‌ترین منابع جریان‌های سرگردان برق DC عبارت‌اند از سیستم‌های حفاظت کاتدیک بیگانه، سیستم‌های حمل و نقل دارای ولتاژ برق مستقیم همانند مترو، اتوبوس برقی، خطوط انتقال برق مستقیم، تجهیزات و تأسیسات دارای ولتاژ برق مستقیم فشارقوی و رکتیفایرهای جوشکاری [۳]. همچنین سازه‌هایی که می‌توانند متأثر از جریان‌های سرگردان باشند شامل خطوط لوله مدفون، کابل‌های برق زره‌دار ۴ مخازن روزمینی (که سطح زیرین آن در تماس با زمین هست) و مخازن دفنی، سیستم‌های ارتینگ و شبکه آرماتور داخل بتن می‌باشند. علیرغم وجود برخی مقاومت‌ها (همانند عایق‌های اطراف ریل، استفاده از اسلب یا مقاطع بتنی و ...) جهت ممانعت از ورود جریان الکتریکی در درون خاک، مقادیری از جریان به دلیل اختلاف ولتاژی بالا از سازه مبدأ (به‌طور مثال از ریل مترو) در درون خاک القا می‌شود. گرادیان ولتاژی ایجادشده در اطراف سازه متأثر (به‌طور مثال لوله گاز مدفون) در خاک، موجب ایجاد فضایی مناسب برای تداخل جریان می‌گردد. به‌واسطه وجود سازه‌ها یا لوله‌های فلزی در درون الکترولیت خاک که مقاومت الکتریکی بسیار پایینی در مقایسه با خاک و زمین دارند، این

جریان‌ها وارد آن سازه شده و به دلیل اینکه این سازه با سازه مبدأ ارتباط الکتریکی ندارد، جریان‌ها در نقاطی دیگر از آن به درون خاک بازگشته و از طریق مدار الکتریکی به منبع اولیه خود بازمی‌گردند. نقطه ورود جریان به سازه یا لوله مدفون اصطلاحاً نقطه ورود و نقطه خروج جریان سرگردان به‌عنوان نقطه تخلیه نامیده می‌شود. معمولاً این جریان‌ها مقاطع با مقاومت الکتریکی پایین را جهت ورود به سازه انتخاب می‌کنند [۴ و ۳]. تغییر پتانسیل و جریان در سازه یا لوله متأثر یا اطراف آن نشان‌دهنده وجود جریان سرگردان می‌باشد. این تغییرات شامل (۱) تغییر پتانسیل لوله نسبت به خاک در نقاط ورود و تخلیه، (۲) تغییر جریان لوله بین نقاط ورود و تخلیه و (۳) تغییر جریان در الکترولیت خاک اطراف لوله در نقاط ورود و تخلیه هستند. به دلیل شیف منفی پتانسیل در نقطه ورود، این نقطه پلاریزه شده و به قولی حفاظت می‌شود. باین حال، در صورتی که لوله دارای پوشش باشد، گرادیان ولتاژی جریان سرگردان موجب ایجاد میدان الکتریکی در اطراف لوله شده و این موضوع موجب سرعت بخشیدن به نفوذ رطوبت در زیر پوشش شده و در نهایت موجب تاول‌زدگی و جدایش پوشش می‌گردد. در نتیجه با گذشت زمان و از بین رفتن پوشش لوله در نقاط مختلف لوله، مقدار جریان موردنیاز حفاظت کاتدیک برای پلاریزه شدن لوله و رسیدن به پتانسیل حفاظتی، افزایش یافته و در نتیجه موجب ایجاد هزینه‌های ناخواسته و بار مالی مضاعف می‌شود. از طرفی جریان‌های سرگردان AC موجب آسیب رسیدن به ترانسفورمر رکتیفایرهای سیستم حفاظت کاتدیک می‌گردند. این جریان‌ها با تأثیر گذاشتن در سیستم ارتینگ ترانس رکتیفایر موجب تداخل در سیم‌پیچ‌های داخلی ترانس رکتیفایر و آسیب رسیدن به تجهیزات داخلی آن می‌شود [۱، ۳ و ۴].

نقاط تخلیه به دلیل تخلیه جریان سرگردان در الکترولیت خاک، نقاط بسیار حساسی هستند، زیرا خوردگی شدیدی در این نقاط حادث می‌شود. در صورتی که اختلاف پتانسیل فولاد خارج از محدوده حفاظتی باشد آنگاه فولاد دچار خوردگی می‌شود. به‌علاوه اینکه،

1 - Alternative Current (AC)

2 - Direct Current (DC)

3 - HVDC

4 - Armored Cables

5 - Pick-up

6 - Discharge

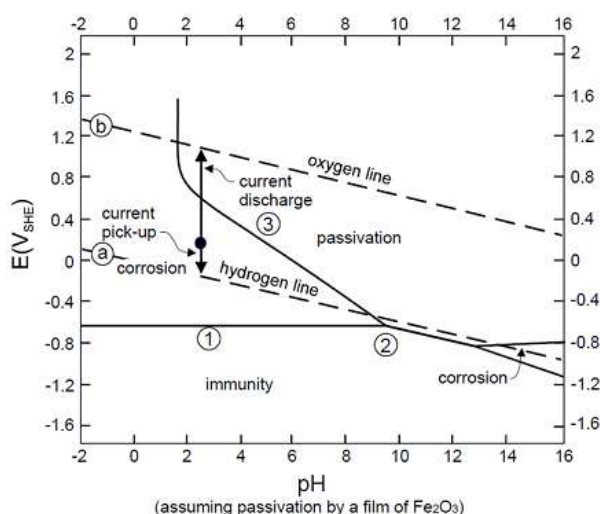
7 - Disbonding

اگر جریان سرگردان باعث الکترولیز رطوبت آب در سطح لوله گردد $(2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^-)$ و در نتیجه آزاد شدن یون H^+ موجب اسیدی شدن محیط در سطح لوله فولادی و تشدید واکنش‌های خوردگی خواهد شد. مطابق دیاگرام پوربه، در صورتی که مقدار پتانسیل یا ولتاژ به خط اکسیژن (خط b) برسد، آنگاه واکنش آزادسازی یون H^+ اتفاق می‌افتد (شکل ۱) [۳-۵].

۱-۲- جریان‌های سرگردان ناشی از مترو

خطوط ریلی مترو به واسطه دارا بودن ولتاژ و جریان بالا، یکی از منابع قابل توجه جریان‌های سرگردان در مناطق شهری می‌باشند. خوردگی ناشی از جریان سرگردان خطوط ریلی دارای جریان برق مستقیم، برای اولین بار در سال ۱۸۹۴ میلادی در انگلستان گزارش شده است. جریان‌های سرگردان ناشی از خطوط ریلی در دسته‌بندی جریان‌های دینامیک قرار می‌گیرند (یعنی مقدار آن به صورت سینوسی در بازه زمانی تغییر می‌کند) [۳ و ۶]. مترو سیستمی است که برای جابجایی حجم انبوهی از مسافر مورد استفاده قرار می‌گیرد و طبق استانداردهای بین‌المللی،

ظرفیت این نوع سیستم، ۱۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ نفر مسافر در ساعت می‌باشد. این سیستم خود کشش برقی از طریق ریل سوم یا شبکه بالاسری تغذیه می‌گردد. معمولاً توان فرعی بسته به اندازه قطار و تعداد واگن‌ها ۶۵۰ تا ۱۰۰۰ ولت ولتاژ برق مستقیم و ۱۰۰۰ تا ۸۰۰۰ آمپر جریان تأمین می‌کند. از آنجایی که فیدر برگشتی یا منفی مورد نیاز است، دو ریل برگشتی برای بازگرداندن جریان به منبع استفاده می‌شوند. ریل‌ها در طول راه آهن بدون پوشش در تماس با زمین (که معمولاً دارای سنگریزه یا بتن است) قرار دارند که این تماس باعث فراهم نمودن مسیر شار جریان در زمین می‌گردد. هنگامی که قطار در حمل و نقل سنگین کار می‌کند، جریان مورد نیاز برای حرکت چندین هزار آمپر خواهد بود و مقاومت ریل متحرک تقریباً چندین میلی اهم تا ۱۰ میلی اهم بر کیلومتر خواهد بود و بنابراین افت ولتاژ قابل توجهی (۶۰-۱۰۰ ولت) روی ریل متحرک ایجاد خواهد شد. این افت ولتاژ باعث می‌شود که مقداری از جریان از ریل به زمین نشت کند. [۷]. نشت جریان سرگردان خطوط ریلی (که به صورت سینوسی مقدار آن تغییر می‌کند)، موجب تغییرات پتانسیل ثبت شده نسبت به زمان در سازه متأثر می‌گردد [۱، ۸ و ۹].



شکل ۱- دیاگرام پوربه برای فلز آهن در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد (تغییر پتانسیل با اسیدیته) [۵]

۳-۱- جریان‌های سرگردان ناشی از کابل برق هوایی

فشارقوی

به واسطه مجاورت خطوط انتقال برق فشارقوی متناوب با خطوط لوله زیرزمینی، احتمال ایجاد جریان سرگردان در این لوله‌ها مهیا می‌گردد. این تداخل‌ها به سه روش معمول در خطوط لوله حادث می‌شوند [۲ و ۴]:

- الکترواستاتیک^۱: این روش زمانی رخ می‌دهد که خط لوله و خطوط انتقال برق به عنوان ۲ سطح یک خازن عمل کرده و باعث بوجود آمدن ولتاژی روی سطح لوله خواهد شد.

- القای الکترومغناطیس^۲: در این روش، خطوط انتقال برق به عنوان سیم‌پیچ اولیه و خط لوله به عنوان سیم‌پیچ ثانویه عمل می‌کنند و در این حالت خطوط انتقال برق موجب القای ولتاژ به خطوط لوله می‌شود.

- مقاومتی^۳: این روش زمانی رخ می‌دهد که جریان‌های خطا در خطوط انتقال برق بوجود آمده و توسط سیستم زمین (ارتینگ) دکل‌ها در زمین تخلیه می‌شوند.

- در مجموع جریان‌های سرگردان AC از دو منظر مورد توجه می‌باشند:

مطابق استاندارد ISO 18086 و NACE SP 0177، وجود جریان‌های سرگردان AC در سازه‌های مدفون از لحاظ ایمنی مشکل‌ساز بوده و موجب شوک الکتریکی و برق‌گرفتگی اپراتور و سرویس‌کار خطوط لوله می‌گردد (به‌خصوص در حین قرائت پتانسیل حفاظت کاتدیک که دست اپراتور ممکن است به‌صورت ناخواسته با کابل متصل به لوله تماس پیدا کند) [۱۰ و ۱۱].

مطابق استاندارد BS EN 15280، جریان‌های سرگردان AC موجب ایجاد خوردگی در سازه‌های مدفون می‌گردند [۱۲].

کابل‌های برق فشارقوی AC نیز در سطح شهر پراکنده شده‌اند و همان‌گونه که اشاره شد، این کابل‌ها تأثیر منفی در خطوط لوله‌های فلزی مدفون دارند. از طرفی خطوط ریلی مترو در شهر تهران با استفاده از جریان برق مستقیم فعالیت دارند. از همین رو خطوط لوله زیرزمینی در شهر تهران به واسطه وجود خطوط ریلی پراکنده و وسیع در سطح شهر، همواره در معرض این جریان‌های سرگردان قرار دارند. در برخی نقاط شهری به واسطه

عدم رعایت اصول ممانعت از نشت جریان‌های سرگردان (که در استاندارد BS EN 50122-2 اشاره شده است)، در آن محل‌ها شاهد خوردگی شدید سازه‌های فلزی زیرزمینی هستیم [۱۳]. از همین رو در مقاله پیش رو علت نشتی و سوراخ شدگی لوله گاز اصلی در یکی از مناطق تهران که با خطوط ریلی مترو احاطه شده و همچنین در نزدیکی ترانس برق هوایی فشارقوی قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بررسی‌های اولیه در ادامه عنوان شده و مورد بحث قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

خط لوله ۶ اینچ حاوی سیال گاز شیرین شهری که ضخامت اسمی جداره آن برابر ۰/۱۸۸ اینچ است. خط لوله دارای پوشش قیر پایه نفتی به ضخامت حدوداً ۳ میلی‌متر است. لوله مذکور در فاصله ۸ متری به موازات ایستگاه مترو قرار دارد. همچنین ترانس برق هوایی ۴۰۰ ولت در فاصله ۳ متری در موازات خط لوله مذکور در جوار نقطه دوم حفاری شده واقع شده است. ترانس برق هوایی مذکور دارای سیستم ارتینگ (شامل دو عدد راد مسی) با عملکرد مناسب می‌باشد. کابل برق هوایی فشار ضعیف ۲۰ کیلوولت به موازات خط لوله اجرا شده است.

طی عملیات نشت‌یابی دوره‌ای در یکی از مناطق تهران، دو نشت به فاصله ۱۰ متری از یکدیگر شناسایی گردید. به منظور بررسی دقیق‌تر، محل‌های مذکور حفاری شده و بررسی‌های میدانی شامل بازرسی چشمی و عملیات بررسی چسبندگی پوشش در محل انجام شد.

پس از برداشتن پوشش خط لوله، مقادیر پتانسیل AC خط لوله و پتانسیل DC حالت روشن (On) و خاموش (Off) حفاظت کاتدیک با استفاده از دستگاه مولتی‌متر HIOKI 3255 و الکترو مرجع پرتابل Cu/CuSO₄ (CSE) مطابق استاندارد NACE TM 0497 اندازه‌گیری و ثبت گردید [۱۴]. به منظور بررسی تأثیر جریان‌های سرگردان ناشی از مترو، اندازه‌گیری در دو زمان روز (که مترو در حال حرکت است) و شب (که مترو خاموش می‌باشد) انجام گردید. به منظور اندازه‌گیری پتانسیل لحظه‌ای خاموش خط لوله، ترانس رکتیفایرهای حفاظت کاتدیک در اطراف ناحیه مذکور (۳ عدد ترانس رکتیفایر)، به‌صورت هم‌زمان روشن و خاموش گردیدند. همچنین مقاومت الکتریکی ویژه خاک در ناحیه مذکور کمتر از ۵۰۰۰ اهم

1 - Electrostatic Coupling

2 - Electromagnetic Induction

3 - Resistive Coupling

سانتیمتر است. مطالعه ترکیبات فازی محصولات خوردگی به وسیله آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) نرمال در محدوده زاویه ۵ الی ۹۰ درجه و با استفاده از دستگاه X-ray diffraction دارای فیلتر مس (Cu-K α) با گام 0.01° انجام شده و نتایج آن با نرم افزار PANalytical X'Pert PRO diffractometer مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز عنصری (EDS) به صورت نقطه‌ای و تصاویر مورفولوژی (SEM-SE) محصولات خوردگی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN مجهز به آنالیزور StdLess تهیه گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بازرسی چشمی

پس از حفاری زمین در محل نشی، مشاهده گردید که پوشش قیر پایه نفتی در سطح نقاط آسیب دیده به صورت پودری درآمده و پس از انجام عملیات بررسی چسبندگی مشخص گردید که پوشش مذکور به قطر ۱۰ سانتی متر به طور کامل از سطح لوله جدایش یافته است. پس از برداشتن پوشش از سطح نقاط آسیب دیده، خوردگی موضعی سطح بیرونی فلز در این نقاط

نمایان شد. تصاویر مربوط به نقاط خوردگی در لوله مذکور در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند. قطر سوراخ شدگی در نقطه ۱ به صورت سوزنی بوده و در نقطه ۲ برابر با ۷ میلی متر است. آسیب دیدگی پوشش و خوردگی در هر دو نقطه به صورت موضعی بوده است. میزان خوردگی در نقطه ۲ بسیار شدیدتر بوده و مواضع زیادی در اطراف سوراخ شدگی نیز دچار خوردگی موضعی شده‌اند. این موضوع نشان از دانسیته جریان بسیار بالای خوردگی در این نقطه دارد. نرخ خوردگی فولاد به ازای جریان ۱ آمپر در سال برابر با ۹,۱۷ کیلوگرم می‌باشد که مقدار قابل توجهی است [۱]. با توجه به تصاویر مربوط به نقاط نشی، خوردگی به صورت حفره دار شدن بوده که نشان از تخلیه جریان در نقطه تخلیه به صورت موضعی است. چن [۱۵] و همکارانش نیز در مطالعه خود عنوان کرده‌اند که خوردگی ناشی از جریان سرگردان دینامیک DC به صورت موضعی می‌باشد. در مطالعه کویی و همکارانش [۱۶] نیز مشخص شده که آسیب‌های موضعی پوشش خط لوله نیز بر شدت حفره دار شدن فلز تحت تأثیر جریان‌های سرگردان دینامیک DC می‌افزاید.



شکل ۲ - تصویر نقطه آسیب دیده لوله در (الف) نقطه اول و (ب) نقطه دوم

۳-۲- اندازه‌گیری‌های میدانی

مقادیر پتانسیل AC و DC اندازه‌گیری شده از خط لوله در طول روز و شب در جدول ۱ لیست شده است. مقدار جریان سرگردان متناوب در زمان شب مقدار ثابتی است، درحالی‌که این مقادیر در بازه زمانی روز متغیر می‌باشد. این موضوع ناشی از تغییرات میزان بار مصرفی برق شهری در زمان روز دارد. همان‌گونه که عنوان شد، جریان‌های سرگردان AC از دو منظر ایمنی و تأثیر بر خوردگی لوله موردتوجه می‌باشند. مطابق معیار استانداردهای NACE SP 0177 و ISO 18086، زمانی که مقدار پتانسیل AC خط لوله برابر یا بیشتر از 15 VCSE باشد [۱۰ و ۱۱]، آنگاه احتمال ایجاد شوک الکتریکی و برق‌گرفتگی اپراتور و سرویس‌کار خطوط لوله وجود دارد. لذا مطابق مقادیر اندازه‌گیری شده پتانسیل AC در جدول ۱، مشکلات ایمنی شک الکتریکی وجود ندارد. همچنین بر اساس استاندارد BS EN 15280، اگر مقاومت الکتریکی خاک کمتر از ۲۵ اهم سانتیمتر باشد، آنگاه پتانسیل‌های AC بالاتر از 4000 mVCSE موجب خوردگی در سازه‌ها و خطوط لوله مدفون می‌شوند. و در صورتی که مقاومت الکتریکی خاک بیشتر از ۲۵ اهم سانتیمتر باشد، آنگاه پتانسیل‌های AC بالاتر از 10000 mVCSE موجب خوردگی در سازه‌ها و خطوط لوله مدفون می‌شوند [۱۲]. بیشترین مقادیر پتانسیل AC اندازه‌گیری شده مربوط به نقطه دوم در طی روز بوده و مقدار آن برابر 1900 mVCSE+ است که از منظر امکان ایجاد خوردگی در بازه ایمن قرار دارد و بنابراین احتمال ایجاد خوردگی شدید ناشی از جریان‌های سرگردان AC غیرمحتمل می‌باشد.

مقادیر پتانسیل DC لحظه‌ای خاموش نشان از وجود جریان‌های

سرگردان دینامیک در خط لوله دارد و خط لوله لحظاتی به‌صورت آند بوده و لحظاتی دیگر به‌صورت کاتد می‌باشد. حد پذیرش مقادیر پتانسیل لحظه‌ای خاموش خطوط لوله تحت حفاظت که موجب آسیب‌های ناشی از جریان‌های سرگردان DC می‌شوند در استاندارد BS EN 50162 ذکر شده است [۱۷]. بر این اساس، اگر لوله تحت حفاظت کاتدیک بوده و پتانسیل حفاظتی آن در بازه مقداری مطلوب باشد، آنگاه جریان سرگردان اثر سوئی بر خط لوله نخواهد داشت. مطابق استانداردهای ISO 15589-1، EN 12954، NACE SP 0169، IPS-E-TP-270(1) و IPS-E-TP-820(1)، بازه مطلوب پتانسیل حفاظتی لحظه خاموش برای لوله فولادی با پوشش قیر پایه نفتی (در خاک عاری از اکسیژن و SRB و دمای کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد) برابر با 850 mVCSE تا 2000 mVCSE- می‌باشد [۱۸-۲۲]. مقادیر مجاز پتانسیل حفاظتی برای لوله فولادی دارای پوشش‌های مختلف در جدول ۲ آمده است [۲۱ و ۲۰]؛ بنابراین اگر مقدار پتانسیل حالت خاموش خط لوله خارج از بازه حفاظتی باشد، آنگاه خط لوله در معرض آسیب قرار دارد و هرچه مقادیر ثبت‌شده پتانسیل خط لوله دورتر از بازه حفاظتی باشد، آنگاه احتمال آسیب‌دیدگی آن بسیار بیشتر است. زیرا مطابق دیاکرام پلاریزاسیون، مقادیر ولتاژی زیاد موجب افزایش جریان‌های آندی و کاتدی و در نتیجه افزایش نرخ خوردگی خواهد شد [۲۳ و ۲۴]. مطابق نتایج حاصله در جدول ۱، پتانسیل حالت خاموش لحظه‌ای هر دو نقطه از خط لوله در روز و در زمان‌هایی که مترو در حال تردد است، خارج از بازه مجاز استاندارد است و لذا جریان‌های القایی مترو را می‌توان دلیل اصلی خوردگی لوله نامید.

جدول ۱ - مقادیر پتانسیل AC و DC خط لوله در نزدیکی نقاط خورده شده

نقطه/زمان اندازه‌گیری	پتانسیل AC (mVCSE)	پتانسیل لحظه‌ای خاموش DC (mVCSE)
نقطه اول/روز	+300 to +1700	+1500 to -2200
نقطه اول/شب	+1170	-980
نقطه دوم/روز	+500 to +1900	+1800 to -2000
نقطه دوم/شب	+890	-1000

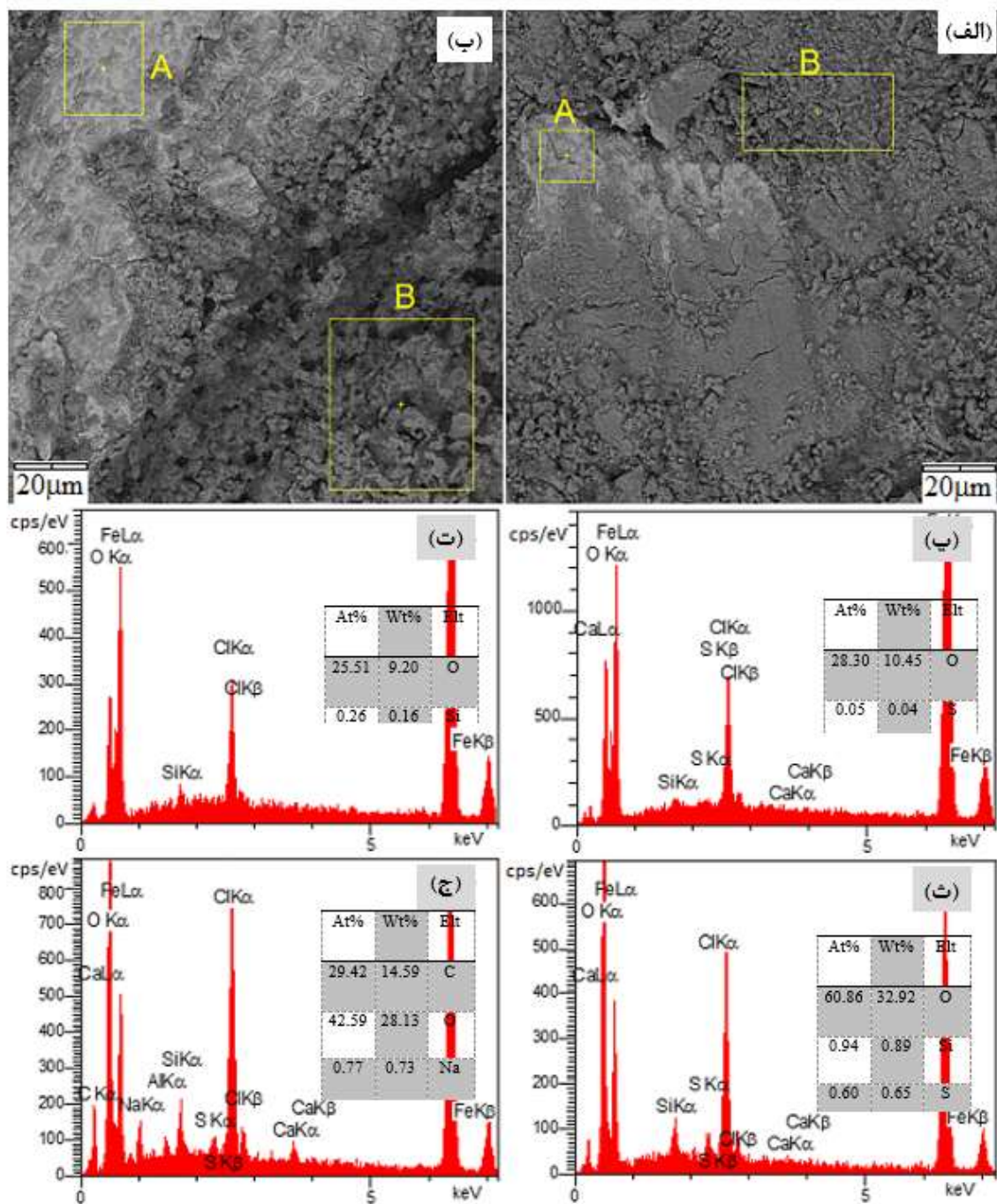
جدول ۲ - محدوده‌های مجاز پتانسیل برای حفاظت کاتدی لوله‌های پوشش شده مدفون [۲۱]

نوع پوشش	نام لاتین	مقدار مجاز پتانسیل لحظه‌ای خاموش DC (mV _{CSE})
پیوند همجوشی پودر اپوکسی	Epoxy powder fusion-bonded	-1100
لعب کولتار و آسفالت نفتی	Asphalt and coal tar enamel	-2000
نوار پیچشی (سامانه نوار لایه‌لایه)	Tape wrap (laminated tape system)	-1100
کولتار اپوکسی	Epoxy coal tar	-1500
پلی اتیلن (دولایه)	Polyethylene (2 layers)	-1000
پلی اتیلن (سه لایه)	Polyethylene (3 layers)	-1100
پلی یورتان	Polyurethane pu	-1100
نوار موم نفتی و ژله نفتی سرد اجرا	Cold applied petrolatum and petroleum wax tape	-1100
نوار پلاستیکی سرد اجرای سه لایه	3 ply cold applied plastic tape	-1100

۳-۳- بررسی‌های ریزساختاری

مورفولوژی و آنالیز عنصری محصولات خوردگی در نقطه اول و دوم در شکل ۳ دیده می‌شود. بر اساس تصاویر مورفولوژی، ترکیبات خوردگی آهن به صورت غیریکنواخت بوده و دارای ترک‌های بسیار زیادی است و بعضاً به صورت لایه‌لایه روی سطح را پوشانده است؛ لذا این محصولات قابلیت ایجاد پسیواسیون در سطح فلز را ندارد و همچنین این سطوح اسفنجی

به نوعی موجب در دام افتادن رطوبت خاک و مهیا نمودن شرایط خوردگی می‌گردند. بر اساس آنالیز عنصری محصولات خوردگی، مقادیر بالای اکسیژن و کلر در سطح هر دو نمونه کاملاً مشهود است (شکل ۳-پ تا ۳-ج). در قسمت‌هایی که سطح فلز حفره دار شده است، مقدار یون کلر و اکسیژن نیز بیشتر می‌باشد.

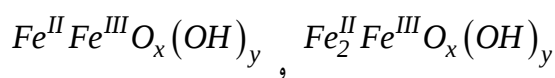


شکل ۳ - مورفولوژی محصولات خوردگی (الف) نقطه اول و (ب) نقطه دوم؛ آنالیز EDS (پ) ناحیه A در تصویر (الف)، (ت) ناحیه A در تصویر (ب)، (ث) ناحیه B در تصویر (الف) و (ث) ناحیه B در تصویر (ب).

وجود دارند. لذا به نظر می‌رسد الکترولیت خاک اطراف لوله دارای ترکیبات کلردار بوده که این موضوع نیز موجب تشدید حفره‌دار شدن فلز شده است.

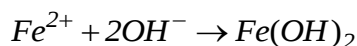
گراف XRD نیز کاملاً همسو با آنالیز عنصری نمونه‌ها است (شکل ۴). اکسید آهن (مگنتیت یا Fe_3O_4) و هیدروکسید آهن ($FeOOH$) ترکیب‌های غالب در هر دو نقطه خورده شده هستند. همچنین در نقطه دوم، ترکیبات آهن کلراید آبدار نیز

تشکیل لایه اکسیدی در سطح آهن و فولاد یک فرایند شیمیایی پیچیده می‌باشد. در یک تقسیم‌بندی کلی، تشکیل این لایه اکسیدی را می‌توان به سه قسمت محتمل دسته‌بندی کرد: تشکیل فیلم نازک اکسیدی/ هیدروکسیدی در حدود ۱ تا ۴ نانومتر؛ این فیلم هیدروکسیدی یک لایه پایدار است و در صورت عدم حضور ناخالصی‌ها و یا وجود رطوبت بالا محافظت‌کننده است. در معرض محیط‌های آبی نزدیک به خنثی این لایه اکسیدی یا هیدروکسیدی به یکی از دو نوع رسوب سبز زیر تبدیل می‌شود:

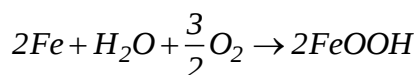


مرحله بعدی شامل تشکیل $Fe(OH)_2$ در بازه زمانی در حدود ۲ الی ۳ ساعت پس از مرحله اول است در مرحله سوم، این پوسته سبزرنگ به تدریج در مرحله سوم به یک لایه قهوه‌ای شکننده از ترکیبات اکسیدی و هیدروکسیدی آهن تبدیل می‌شود. قابل ذکر است که این مراحل تنها با فرض جذب اکسیژن و آب در لایه اکسیدی است. لایه متشکل از محصولات خوردگی اولیه که شامل ترکیبات $Fe(OH)_2$ هستند، طی قرارگیری فولاد در معرض الکترولیت و تحت تأثیر جریان‌های دینامیک، در روی سطح فلز تشکیل می‌شود. این ترکیبات متخلخل بوده و فاقد اثر پسیواسیون هستند. لذا در اثر پلاریزاسیون آندی، این ترکیب تجزیه شده و ترکیبات مختلف $FeOOH$ و همچنین Fe_3O_4 در روی سطح تشکیل خواهند شد [۲۶].

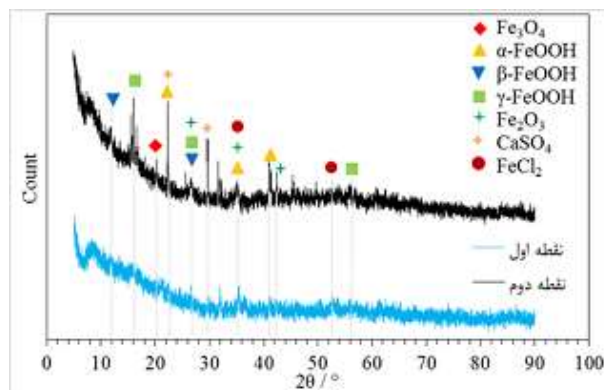
فرمول (۳)



فرمول (۴)



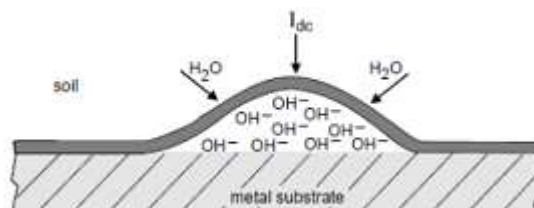
وجود لایه الکترولیتی ضخیم روی سطح می‌تواند سرعت احیای اکسیژن را محدود کند. در واقع در شرایط رطوبت بالا، کاهش $FeOOH$ باعث تشکیل Fe_3O_4 می‌شود. به عبارت دیگر در بیشتر



شکل ۴. گراف XRD محصولات خوردگی

قبل از ایجاد خوردگی در فلز، بایستی پوشش لوله مدفون آسیب‌دیده تا شرایط خوردگی فلز پایه مهیا شود. گرادین ولتاژی جریان سرگردان موجب ایجاد میدان الکتریکی در اطراف لوله شده و این موضوع موجب سرعت بخشیدن به نفوذ رطوبت در زیر پوشش می‌شود. از طرفی ولتاژ منفی بالای لوله، موجب تسریع واکنش‌های کاتدی می‌شود (توضیح اینکه ایجاد خوردگی از منظر الکتروشیمیایی در اثر انجام واکنش‌های آندی و کاتدی رخ می‌دهد).

فرمول (۱) نیم‌واکنش کاتدی: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
فرمول (۲) نیم‌واکنش آندی آهن: $Fe \rightarrow Fe^{3+} + 3e^-$
در نتیجه سرعت یافتن واکنش‌های کاتدی و تجمع یون‌های هیدروکسید (OH^-) در زیر پوشش، pH این محیط افزایش یافته و این موضوع منجر به از بین رفتن اتصال بین فلز و لوله شده و در نتیجه پوشش از فلز لوله جدا می‌گردد (شکل ۶) [۱، ۳، ۲۵].
در نتیجه با گذشت زمان و از بین رفتن پوشش لوله در نقاط مختلف لوله، سطح بیشتری از فلز در معرض الکترولیت خاک قرار خواهد گرفت و لذا مقدار جریان مورد نیاز حفاظت کاتدیک برای پلاریزه شدن لوله و رسیدن به پتانسیل حفاظتی، افزایش می‌یابد.



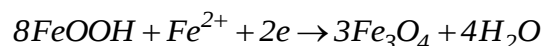
شکل ۵. جدایش پوشش در اثر تجمع یون هیدروکسید در زیر آن [۳]

می‌گردند. در فلزات آهنی، آنیون‌های کلر با یون‌های هیدروکسیل برای ترکیب شدن با محصولات واکنش آندی آهن (کاتیون‌های آهن تشکیل‌شده در واکنش آندی آهن) رقابت می‌کنند. در مورد یون‌های هیدروکسیل، گونه‌های (انواع) پسیوکننده پایدار تمایل به تشکیل دارند. در مقابل ترکیبات آهن کلراید ($FeCl_2$)، به‌صورت ناپایدار و محلول بوده که منجر به تحریک بیشتر خوردگی می‌گردد [۲۸].

از طرفی به‌واسطه پتانسیل‌های مثبت حادث‌شده در خط لوله، مطابق دیاگرام پوربه فلز در ناحیه الکترولیز آب قرار گرفته و آزاد شدن یون H^+ را به دنبال داشته و سطح لوله را اسیدی نموده است.

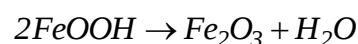
موارد واکنش احیایی زیر به دنبال اکسیداسیون فولاد رخ می‌دهد [۲۶، ۲۷]:

فرمول (۵)



از طرفی با مصرف شدن رطوبت الکترولیت مطابق فرمول ۴، ترکیب Fe_2O_3 نیز تشکیل خواهد شد [۲۷]:

فرمول (۶)



وجود نمک‌های خورنده در الکترولیت خاک نظیر NaCl، علاوه بر تسهیل تشکیل الکترولیت سطحی به‌وسیله این نمک‌های رطوبت‌گیر، در واکنش‌های خوردگی الکتروشیمیایی شرکت مستقیم داشته و موجب تشکیل یون‌های کلریدی

نتیجه‌گیری

- پوشش لوله در هر دو نقطه اول و دوم به‌صورت موضعی آسیب‌دیده و در قطر حدوداً ۱۰ سانتیمتر دچار جدایش شده است.
- بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی، بیشترین مقدار پتانسیل AC در نقطه اول و دوم به ترتیب برابر با 1700 mVCSE و 1900 mVCSE است و بنابراین مطابق الزامات استانداردهای NACE SP 0177 و ISO 18086، مقدار پتانسیل از منظر ایمنی در بازه مطلوب قرار دارد. همچنین مطابق الزامات استاندارد BS EN 15280، مقدار پتانسیل از منظر خوردگی نیز در بازه مجاز قرار داشته و کمتر از 4 VCSE است و احتمال ایجاد خوردگی شدید در اثر جریان‌های سرگردان AC غیرمحتمل است.
- مطابق اندازه‌گیری‌های میدانی پتانسیل خاموش لحظه‌ای و الزامات استاندارد BS EN 50162 و NACE CP Interference، خط مذکور تحت تأثیر جریان‌های سرگردان DC و گرادیان ولتاژی آن قرار دارد. در بازه‌های زمانی شب و روز، مقدار پتانسیل لحظه خاموش خط دارای تغییرات فراوانی در اثر جریان‌های سرگردان ناشی از مترو قرار دارد. مقدار این پتانسیل در نقطه اول بین بازه‌ی 1500 VCSE+ تا 2200 VCSE- و در نقطه دوم بین بازه 1800 VCSE+ تا 2000 VCSE- نوسان دارد.
- به‌واسطه ایجاد مقادیر مثبت در پتانسیل خاموش لحظه‌ای لوله، در زمانهایی که تخلیه صورت می‌گیرد، آب الکترولیز شده و موجب اسیدی شدن نواحی اطراف آن و تشدید خوردگی گردیده است.
- وجود یون کلر در الکترولیت خاک اطراف لوله نیز موجب تشدید حفره‌دار شدن گردیده است.
- پیشنهاد شد مطالعات تکمیلی مطابق توصیه‌های استاندارد BS EN 50162 انجام گردیده و سپس مطابق توصیه‌های استاندارد BS EN 50122-2، در جهت رفع این معضل اقدام نمود.

تشکر و قدردانی

در اینجا لازم است از همکاران محترم واحدهای بازرسی فنی و بهره‌برداری گاز استان تهران که در جمع‌آوری داده‌های میدانی کمک‌های شایانی مبذول داشتند، کمال تقدیر و تشکر داشته باشیم.

مراجع

- [1] NACE, NACE CP 3: Cathodic protection technologist course manual, United States, 2008 .
- [2] Gummow R.A., Eng P., A/C interference guideline final report, Correng Consulting Service Inc, Ontario, Canada, 2014 .
- [3] NACE, NACE CP interference course manual, United States, 2007 .
- [4] Adedeji Kazeem Bolade, Ponnle Akinlolu A., Abe Bolanle T., Jimoh Adisa A., Abu-Mahfouz Adnan M., Hamam Yskandar, A review of the effect of AC/DC interference on corrosion and cathodic protection potentials of pipelines, International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), 13, 6, 2018, pp. 495-508.
- [5] Pourbaix, Marcel, Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions, 1974 .
- [6] Du Yanxia, Chapter 20 - Cathodic protection and stray current measurement and monitoring //Yang L, Woodhead Publishing, 2021.
- [7] Tehran, Research and Technology Affairs of the Provincial Gas Company, providing solutions to prevent stray currents in electric railway lines, Tehran Provincial Gas Company, Tehran, 2016.
- [8] Peng Xun, Huang Zhiqiang, Chen Ben, Liu Deming, Li Haikun, On the interference mechanism of stray current generated by DC tram on pipeline corrosion, Engineering Failure Analysis, 116, 2020, pp. 1-23.
- [9] Nielsen LV, Baumgarten B, Cohn P, Rosenberg H, A field study of line currents and corrosion rate measurements in a pipeline critically interfered with AC and DC stray currents, CEOCOR: Brussels, Belgium, 2006, pp. 1-16 .
- [10] ISO, ISO 18086 :Corrosion of metals and alloys - determination of AC corrosion - protection criteria, London, UK: BSI, 2019 .
- [11] NACE, NACE SP 0177: Mitigation of alternating current and lightning effects on metallic structures and corrosion control systems, Houston, 2007 .
- [12] EN BS, BS EN 15280: Evaluation of a.c. corrosion likelihood of buried pipelines applicable to cathodically protected pipelines, UK, 2013 .
- [13] EN BS, BS EN 50122-2: Railway applications-fixed installations-electrical safety, earthing and the return circuit-Part 2: provisions against the effects of stray currents caused by dc traction systems, Praha: UNMZ, 2011 .
- [14] NACE, NACE TM 0497: Measurement techniques related to criteria for cathodic protection on underground or submerged metallic piping systems, Houston, 2018 .
- [15] Chen ZhiGuang, Qin ChaoKui, Tang JiXu, Zhou Yu, Experiment research of dynamic stray current interference on buried gas pipeline from urban rail transit, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 15, 2013, pp. 76-81.
- [16] Cui Gan, Li Zili, Yang Chao, Wei Xu, Study on the interference corrosion of cathodic protection system, Corrosion Reviews, 33, 5, 2015, pp. 233-247.
- [17] EN BS, BS EN 50162: protection against corrosion by stray current from direct current systems, 2004 .
- [18] EN BS, BS EN 12954: Cathodic protection of buried or immersed metallic structures - general principles and application for pipelines, London, UK, 2019 .
- [19] ISO, ISO 15589-1: Petroleum, petrochemical and natural gas industries - cathodic protection of pipeline systems, Part 1: On-land pipelines, 2015.
- [20] Petroleum Iranian Ministry, IPS-E-TP-270(1): Engineering standard for protective coatings for buried and submerged steel structures, 2009 .
- [21] Petroleum Iranian Ministry, IPS-E-TP-820(1): Engineering standard for cathodic protection, Iran, 2010 .
- [22] NACE, NACE SP 0169: Control of external corrosion on underground or submerged metalliv piping systems., Houston, 2013.

-
- [23] Wang Chengtao, Li Wei, Wang Yuqiao, A probabilistic-based model for dynamic predicting pitting corrosion rate of pipeline under stray current interference, *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 1, 3, 2021, pp. 339-348.
- [24] Wen Chuang, Li Jingbo, Wang Shuli, Yang Yan, Experimental study on stray current corrosion of coated pipeline steel, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27, 2015, pp. 1555-1561.
- [25] Qian Shan, Cheng Y. Frank, Accelerated corrosion of pipeline steel and reduced cathodic protection effectiveness under direct current interference, *Construction and Building Materials*, 148, 2017, pp. 675-685.
- [26] Qian Shan, Frank Cheng Y., Corrosion of pipelines under dynamic direct current interference, *Construction and Building Materials*, 261, 2020, pp. 120-550.
- [27] Qin Runzhi, Du Yanxia, Jiang Zitao, Wang Xiuyun, Fu Anqing, Lu Yi, Corrosion behavior of X80 pipe steel under HVDC interference in sandy soil, *Metals*, 8, 10, 2018, pp. 1-15.
- [28] Deo Ravin N., Birbilis Nick, Cull James P., Measurement of corrosion in soil using the galvanostatic pulse technique, *Corrosion Science*, 80, 2014, pp. 339-349.