

بررسی میدانی تاثیر جریان‌های سرگردان ناشی از سیستم حمل و نقل ریلی برقی بر شبکه گاز رسانی تحت حفاظت کاتدی در شهر تهران

محمد درخشانی^۱، سعیدرضا اله کرم*^۲، میکائیل عیسی خانی زکریا^۳، مسعود صمدیان^۴،
حجت الله شریفی رسایی^۵، اشکان رزمجو^۶

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد خوردگی و حفاظت از مواد، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران

^۲ استاد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران

^۳ کارشناس ارشد خوردگی و حفاظت از مواد، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران

^۴ سرپرست امور پژوهش و فناوری شرکت گاز استان تهران

^۵ مهندس ارشد طراح برق و حفاظت کاتدی شرکت گاز استان تهران

^۶ پژوهشگر شرکت گاز استان تهران

* نویسنده مسئول: akaram@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۲

چکیده

به منظور بررسی نحوه تاثیرگذاری جریان‌های سرگردان خطوط ریلی برقی بر خطوط لوله گازرسانی؛ ابتدا نقشه‌های شهری، خطوط مترو و شبکه گاز استان تهران بر روی هم منطبق شده و نقشه جامعی به منظور انجام بررسی‌های میدانی تهیه و تدوین شد. طبق این بررسی‌ها شبکه گازرسانی یا خطوط مترو در شهر تهران در حدود ۲۱۳ نقطه تلافی داشته و در حدود ۱۰۰۱۵۰ متر با یکدیگر موازی هستند. اندازه‌گیری‌های پتانسیل بصورت یک ساعته در تمام نقاط اندازه‌گیری و ۲۴ ساعته در نقاط انتخابی به منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر جریان‌های سرگردان دینامیکی بر پتانسیل خطوط لوله، انجام شد. نتایج نشان داد که تاثیر جریان‌های سرگردان بر پتانسیل خطوط لوله بصورت نوساناتی در پتانسیل حفاظتی آشکار می‌شود. این نوسانات می‌تواند منجر به خروج خط لوله از منطقه پتانسیل حفاظتی شده و با ایجاد خوردگی باعث بروز تخریب در لوله‌های گاز شود. در بررسی‌های صورت گرفته دامنه نوسان پتانسیل خط لوله به میزان ۱۰۰ میلی‌ولت به عنوان معیاری در نظر گرفته شده است که بیش از این میزان نشانگر حضور جریان‌های سرگردان دینامیک بطور موثر در اطراف خط لوله است. نتایج نشان داد که دامنه نوسانات در نقاط اندازه‌گیری شده در منطقه یک شهر تهران مقادیری بین ۳۰ میلی‌ولت تا ۳ ولت را نشان می‌دهد که نیاز به بررسی دارد. نتایج حاصل از کوپن‌گذاری در یکی از نقاط نشان داد که سرعت خوردگی کوپن متصل به خط لوله (تحت تاثیر جریان سرگردان) در حدود ۴/۴mpy بوده که از سرعت خوردگی آزاد کوپن (۲/۶mpy) در حدود ۱/۵ برابر بیشتر است.

کلمات کلیدی: جریان‌های سرگردان، خطوط ریلی برقی، مترو، خطوط انتقال گاز، حفاظت کاتدی.

Field Investigation of the Effect of Stray Current Generated by DC Traction Systems on Cathodically Protected Gas Distribution Pipelines in the City of Tehran

Mohamad Derakhshani¹, Saeed Reza Allahkaram^{2*}, Michael Isakhani-Zakaria³, Masoud Samadian⁴, Hojatollah Sharifi Rasaey⁵, Ashkan Razmjoo⁶

¹ MSc Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran

² Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran

³ MSc, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran

⁴ Head of Research & Technology Affairs, Tehran Province Gas Company

⁵ Senior Design Engineer of Cathodic Protection System, Tehran Province Gas Company

⁶ Research & Technology Affairs, Tehran Province Gas Company

*Corresponding Author: akaram@ut.ac.ir

Submission: January 19, 2013

Acceptance: July 13, 2013

Abstract

Stray current from DC Traction systems (metro) can affect buried metallic structures from corrosion point of view. In order to investigate these effects on cathodically protected gas distribution pipelines, the metro lines and the gas pipeline maps were superimposed on the urban map of city of Tehran in order to prepare a comprehensive locational map. 213 intersections and almost 100150 meters of parallel sections of pipelines were found with respect to the railway right of way, which were specified for field measurements. The potential measurements were carried out in specific time periods of the day and the data was collected for one hour at each test point. In order to thoroughly investigate the effects of dynamic stray current on the pipelines, 24-hour measurements pipe-to-soil potentials were carried out. The results showed that dynamic stray current from DC traction appears as potential fluctuations on pipeline applied cathodic potentials. The fluctuations faded away during the period of metro shut down systems between 11:30 pm to 4:30 am. These fluctuations can cause the pipeline potential to exit the safe potential zone and can result in corrosion of the zones, where the DC stray current leaves the pipeline and enters the soil. In this study, a maximum potential shift of 100 mv in the pipe-to-soil potential was considered as a commencement criterion for effective dynamic stray current that requires further investigations. Results showed that a potential fluctuation range between 30 mV to 3 V exists in measured points on pipelines, which can exceed the proposed criterion and can cause damage. Corrosion rates influenced by stray currents were also calculated using coupons at a specific region. Results showed that coupons connected to the pipeline had a corrosion rate of 4.4 mpy (with cathodic protection and under influence of stray currents) which was about 1.5 times more than that of free corrosion rate of 2.6 mpy (for unconnected coupons to the pipelines, i.e. without cathodic protection).

Keywords: Stray Current, DC Traction Systems, Buried Pipelines, Cathodic Protection.

۱- مقدمه

جریان‌های سرگردان، جریان‌های الکتریکی هستند که به منظور دستیابی به مسیرهای با مقاومت الکتریکی کمتر، از مسیر اصلی خود خارج شده و وارد محیط‌های الکترولیتی مانند آب یا خاک می‌شوند. این جریان‌ها بسته به منبع خود می‌توانند AC یا DC باشند. یکی از منابع شناخته شده تولید جریان‌های سرگردان سیستم‌های حمل و نقل ریلی برقی (مترو) هستند. عمدتاً به دلایل اقتصادی ریل‌های حرکت در این سیستم‌ها مسیر برگشت جریان الکتریکی به منبع خود نیز هستند. این جریان‌ها از فصل مشترک ریل و زمین به درون خاک نشت کرده و مسیری به موازات مسیر اصلی خود از درون خاک پیدا می‌کنند [۱-۲].

مقدار ماکزیمم جریان سرگردانی که شبکه مترو برقی را ترک می‌کند و مسیرش را در داخل زمین می‌بندد، تابعی از دو پارامتر مهم ولتاژ ریل‌ها (ولتاژ تماسی) و مقاومت الکتریکی بین ریل‌ها و تأسیسات و تجهیزات موجود در مسیر می‌باشد. به دلیل مقاومت بین ریل و زمین، و نیز مقاومت خود ریل‌ها، یک افزایش ولتاژی بین ریل‌ها و زمین محلی در اثر عبور جریان از آن‌ها بوجود می‌آید که به ولتاژ تماسی یا ولتاژ ریل معروف است. ولتاژ ریل با توجه به ملاحظات و نکات ایمنی، باید در حد مجاز محدود شود تا خطرات جانی نداشته باشد. حداقل مقدار مقاومت الکتریکی نیز به وسیله مشخصات طراحی بدست می‌آید. افزایش مقاومت بین ریل و زمین باعث افزایش ولتاژهای تماسی و کاهش جریان‌های سرگردان می‌گردد [۳-۴].

امکان نفوذ این جریان‌ها به لوله‌های گاز مدفون که به صورت موازی و یا متقاطع با خطوط ریلی مترو قرار دارند، وجود دارد. این جریان‌ها از مسیرهای با کمترین مقاومت و در جایی

که پوشش سطح لوله‌ها معیوب باشد به داخل لوله انتشار می‌یابند و نقطه ورود جریان، نقطه کاتدی نامیده می‌شود. نقطه خروج جریان از لوله یا هر سازه‌ی مدفون دیگر را نقطه آندی می‌نامند و خوردگی در نقاط آندی متمرکز می‌شود (شکل ۱) [۵].

در حالت کلی، کنترل مدرن جریان سرگردان حاصل از خطوط ریلی را می‌توان به دو قسمت طبقه بندی کرد: الف) اصلاح سیستم حمل و نقل و ب) اصلاح ساختارهای زیرزمینی همسایه. این دو دسته اصلاحات با انجام دادن یک یا چند مورد از موارد زیر انجام می‌شود.

۱. کاهش مقاومت مدار ریل بازگشتی

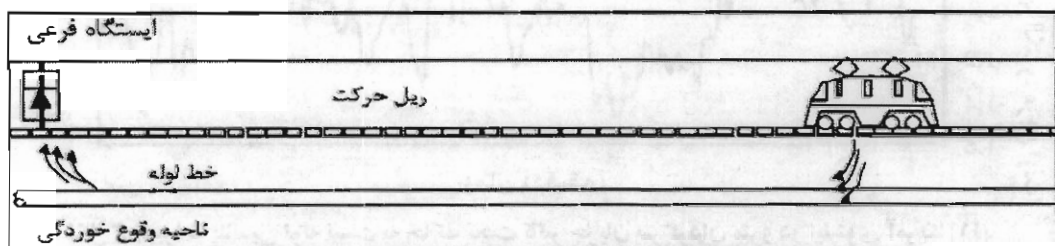
۲. افزایش مقاومت نشت جریان به داخل زمین

۳. افزایش مقاومت بین زمین و سازه‌های فلزی زیرزمینی

۴. افزایش مقاومت سازه‌های زیرزمینی فلزی

موارد ۱ و ۲ به اصلاح سیستم حمل و نقل مربوط می‌شوند در حالی که موارد ۳ و ۴ به اصلاح ساختارهای زیرزمینی مربوط می‌شوند [۶-۷].

بررسی‌ها بر روی تاثیر جریان‌های سرگردان بر خطوط لوله مدفون، مطابق با استاندارد، با اندازه‌گیری‌های مداوم پتانسیل خطوط لوله‌ی مورد اشاره آغاز می‌شود. پژوهش‌های مشابه در کشورهای دیگر نیز با پتانسیل‌سنجی‌ها نسبت به الکترودهای مرجع آغاز شده است. در تمام پژوهش‌های مشابه، تاثیر جریان‌های سرگردان به شکل تغییرات نوسانی در نمودار پتانسیل لوله نسبت به خاک، نشان داده شده است. بطور مثال شکل ۲ تغییرات پتانسیل لوله‌های تحت جریان‌های سرگردان متروی شهر شانگهای را نسبت به الکترود مرجع $Cu/CuSO_4$ نشان می‌دهد.



شکل ۱: مسیر حرکت جریان‌های سرگردان ناشی از خطوط مترو [۲].



شکل ۲: تغییرات پتانسیل لوله مدفون نسبت به الکتروود مرجع Cu/CuSO_4 در متروی شاکتهای (۸).

زمین (به‌خصوص با بالا رفتن عمر خطوط مترو و افزایش امکان آسیب دیدگی عایق‌های ریل‌ها)، امکان نفوذ این جریان‌ها به لوله‌های گاز مدفون در شهر تهران وجود دارد. از آنجایی که خطوط لوله گاز درون شهری نقش شاهرگ حیاتی را در تامین و انتقال ماده سوختی به واحدهای صنعتی و منازل ایفا می‌کند، بحث پیشگیری از خوردگی این لوله‌ها دارای اهمیت بسیار بالایی است. به همین منظور برای بررسی میزان جریان‌های سرگردان موجود بر روی خطوط لوله گاز شهر تهران، پتانسیل‌سنجی‌های دقیق بر روی نقاط اندازه‌گیری انتخاب شده صورت پذیرفت. در مرحله بعدی بررسی‌های بیشتر در کنار اندازه‌گیری‌های کمی با استفاده از کوپن‌های خوردگی در یک نقطه‌ی انتخابی تحت عنوان پایلوت انجام شد و نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

همانگونه که دیده می‌شود، پتانسیل لوله تغییراتی در حدود $0/4$ ولت را نشان می‌دهد. پتانسیل متوسط نیز در حدود $-0/42$ ولت بوده که خیلی کمتر از معیار حفاظت استاندارد است [۸-۱۰].

همچنین در پژوهش میدانی که توسط K.E. Davis در ایالت ایلینوی آمریکا صورت گرفت، نمودار تغییرات پتانسیل خط لوله گاز در تقاطع با سیستم حمل و نقل ریلی بصورت شکل ۳ بدست آمد. همانطور که ملاحظه می‌شود در این مورد نیز تاثیر جریان‌های سرگردان خطوط ریلی بر روی پتانسیل خطوط لوله بصورت نوسانات با دامنه‌ای در حدود ۱ ولت قابل مشاهده است [۱۱].

سیستم حمل و نقل ریلی برقی (مترو) در تهران، یکی از عوامل عمده‌ی تولید جریان‌های سرگردان است. به دلیل امکان نشت جریان‌های الکتریکی از طریق خطوط ریلی به



شکل ۳: تغییرات پتانسیل لوله نسبت به خاک تحت تاثیر جریان سرگردان مترو در ایلینوی آمریکا [۱۱].

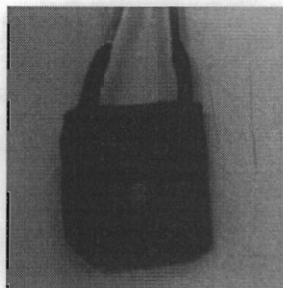
۲- روش تحقیق

در راستای تعیین نقاط مناسب برای انجام مطالعات میدانی، نقشه‌های مسیر رو گذر و زیر گذر مترو تهران و نقشه‌های مربوط به خطوط گاز رسانی ۶۰psi و ۲۵۰psi تهیه شدند. در نهایت نقشه خطوط مترو تهران و خطوط انتقال گاز، انطباق داده شدند.

جهت اندازه‌گیری پتانسیل خطوط لوله بر اساس استانداردهای اندازه‌گیری [۱۰، ۱۲]، از الکتروود مرجع $Cu/CuSO_4$ استفاده شد. همچنین به منظور قرائت پتانسیل و ثبت پیوسته نتایج، مولتی متر مدل Ziegler RM-16 و دیتالاگر مدل Ziegler RM-232 ساخت آلمان مورد استفاده قرار گرفت. در نقاط اندازه‌گیری مشخص شده، مطابق این استانداردها، پتانسیل خطوط لوله به مدت یک ساعت و با فواصل زمانی یک ثانیه ثبت شد و همچنین در برخی نقاط اندازه‌گیری، پایش ۲۴ ساعته پتانسیل صورت گرفت که طی آن پتانسیل خطوط در فواصل زمانی پنج ثانیه ثبت شد. پس از انتقال داده‌ها به کامپیوتر، نتایج به صورت نمودارهای پتانسیل- زمان ترسیم شدند و مورد بررسی قرار گرفتند. لازم به ذکر است که زمان پتانسیل سنجی برای تمامی اندازه‌گیری‌های یک ساعته در فاصله زمانی ۹ صبح تا ۴ بعد از ظهر و مربوط به روزهای شنبه تا چهارشنبه می‌باشد. دلیل این انتخاب آن بود که در این بازه زمانی از روزهای کاری و غیر تعطیل توالی حرکت قطارهای مترو یکسواخت بوده و داده‌های حاصل قابل مقایسه می‌باشند.

برای تهیه کوپن‌های خوردگی از ورق فولاد API X65 (جنس خطوط لوله انتقال گاز) با ضخامت ۳ میلی‌متر استفاده شد که در ابعاد ۵×۵ cm برش داده شدند. پس از کدگذاری نمونه‌ها، اتصال الکتریکی نمونه‌ها نیز از طریق سیم مسی با پوشش عایق برقرار شد، بطوریکه محل اتصال سیم به کوپن نیز کاملاً عایق شده بود. به منظور شبیه سازی نقص پوشش خط لوله، نمونه‌های آماده شده با پوشش کول‌تار (مشابه پوشش خطوط لوله گازرسانی شهر تهران) پوشش داده شده و نقص‌هایی با ابعاد یک سانتی‌متر مربع بر روی آن‌ها ایجاد شد (شکل ۴). کوپن‌ها در عمق ۱/۵ متر از سطح زمین و به

فاصله حدود ۶ متر از لوله گاز ۱۰ اینچ که در حفاصل کمتر از ۵ متری از خطوط ریلی مترو که در عمق ۲۰ متری بود، قرار داده شدند.



شکل ۴: کوپن خوردگی با پوشش کول‌تار و نقص عمودی یک سانتی متر مربعی.

پس از خارج نمودن کوپن‌های مدفون، تمیزکاری محصولات خوردگی، اندازه‌گیری مقدار کاهش وزن، محاسبه مقدار کاهش وزن با استفاده از دانسیته جریان کوپن (رابطه‌ی فارادی) انجام گردید و سرعت خوردگی کوپن‌ها بر اساس استانداردها و مراجع صورت گرفت [۱۶-۱۳].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- انطباق و بررسی نقشه‌ها

شکل ۵ نمای نزدیکی از نقشه انطباق داده شده خطوط مترو و شبکه گازرسانی است که خطوط مختلف مترو و مسیر لوله‌های گاز در آن به خوبی دیده می‌شود. با توجه به اینکه جریان‌های سرگردان در مسیرهای موازی و متقاطع با خطوط مترو و خطوط لوله مدفون امکان ورود و خروج به لوله گاز از محل نقص پوشش را دارند، در ادامه بر اساس نقشه‌های موجود، نقاط تلاقی و مسیرهای موازی خطوط لوله ۶۰psi و ۲۵۰psi با خطوط مختلف مترو تعیین شدند که نتایج حاصل بصورت تعداد تلاقی و طول توازی خطوط انتقال گاز با خطوط مترو در فاصله کمتر از ۲۰۰ متر از خطوط مترو در جدول ۱ آمده است.

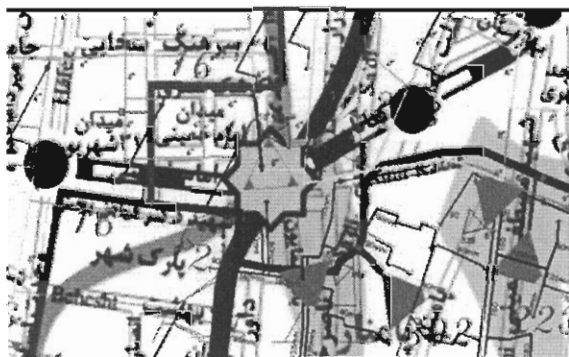
با بررسی نقشه‌ها و تعیین مناطقی که در معرض جریان‌های نشر یافته از خطوط مترو هستند، نقاط مختلف جهت انجام بررسی‌های میدانی تعیین شدند. مناطق گازرسانی در محدوده

معیار جریان سرگردان معرفی شده است. میزان اختلاف قابل قبول در استانداردهای کشورهای مختلف متفاوت است. بطور مثال بر اساس استاندارد ملی کشور چین برای بازرسی خوردگی خطوط لوله فولادی مدفون در خاک، هنگامی که شیفیت مثبت پتانسیل لوله نسبت به خاک بیشتر از ۲۰ میلی‌ولت یا گرادیان پتانسیل خاک بیشتر از ۰/۵ میلی‌ولت بر متر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که جریان سرگردان بطور موثر در محیط حضور دارد. وقتی که شیفیت مثبت پتانسیل لوله نسبت به خاک بیشتر از ۱۰۰ میلی‌ولت باشد یا گرادیان پتانسیل خاک بیشتر از ۲/۵ میلی‌ولت بر متر باشد، بایستی اقدامات لازم برای حفاظت سازه از این جریان‌ها صورت گیرد. البته پذیرش این استاندارد برای جریان سرگردان در کشورهای مختلف، متفاوت است. در انگلستان، ماکزیمم شیفیت مثبت پتانسیل قابل پذیرش برای سازه‌های فلزی مدفون در خاک برابر ۲۰ میلی‌ولت و در ژاپن این مقدار برابر ۵۰ میلی‌ولت می‌باشد. در این پژوهش حداکثر دامنه تغییرات مجاز پتانسیل برابر با ۱۰۰ میلی‌ولت در نظر گرفته شده است [۲، ۹ و ۱۷].

نکته‌ای که همیشه در بررسی جریان‌های سرگردان بایستی مدنظر قرار داد این است که جریان‌های سرگردان در حالت کلی دارای منابع متفاوتی هستند و تنها بر اساس نمودارهای یک ساعته‌ای که دارای نوسانات پتانسیل می‌باشند، نمی‌توان ادعا نمود که قطعا نوسانات مشاهده شده مربوط به ناشی جریان از خطوط مترو است و بررسی‌های بیشتری مورد نیاز است. بر همین اساس پتانسیل‌سنجی‌هایی بصورت ۲۴ ساعته برنامه‌ریزی شده است.

تغییرات پتانسیل یکی از نقاط اندازه‌گیری (در منطقه یک گازرسانی) در طول ۲۴ ساعت، در شکل ۶ نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود نوسانات پتانسیل خطوط لوله ناشی از جریان‌های سرگردان خطوط ریلی برقی در ساعات کاری منجر به خروج خط لوله از منطقه حفاظتی ایده‌آل از نقطه نظر پتانسیل شده است. این امر بدین معنی است که در زمان‌هایی، پتانسیل خط لوله به مقادیری مثبت تر از ۸۵۰- میلی‌ولت (نسبت به الکتروود مرجع مس/ سولفات

خطوط متروی درون شهری، تهران را به ۹ منطقه مجزا تقسیم کرده‌اند که در هر یک از این مناطق، تعدادی T/P (Test point) با توجه به میزان نزدیکی به مترو انتخاب شدند. بایستی توجه داشت که در انتخاب نقاط اندازه‌گیری تمام تلاش بر این اساس بوده است که نواحی تقاطع و طول‌های توازی که در بررسی‌های نقشه‌ای بدست آمده‌اند، بطور دقیق مدنظر قرار گرفته باشند.



شکل ۵: نمای نزدیک بخشی از نقشه‌های منطبق شده خطوط لوله گاز و خط مترو تهران.

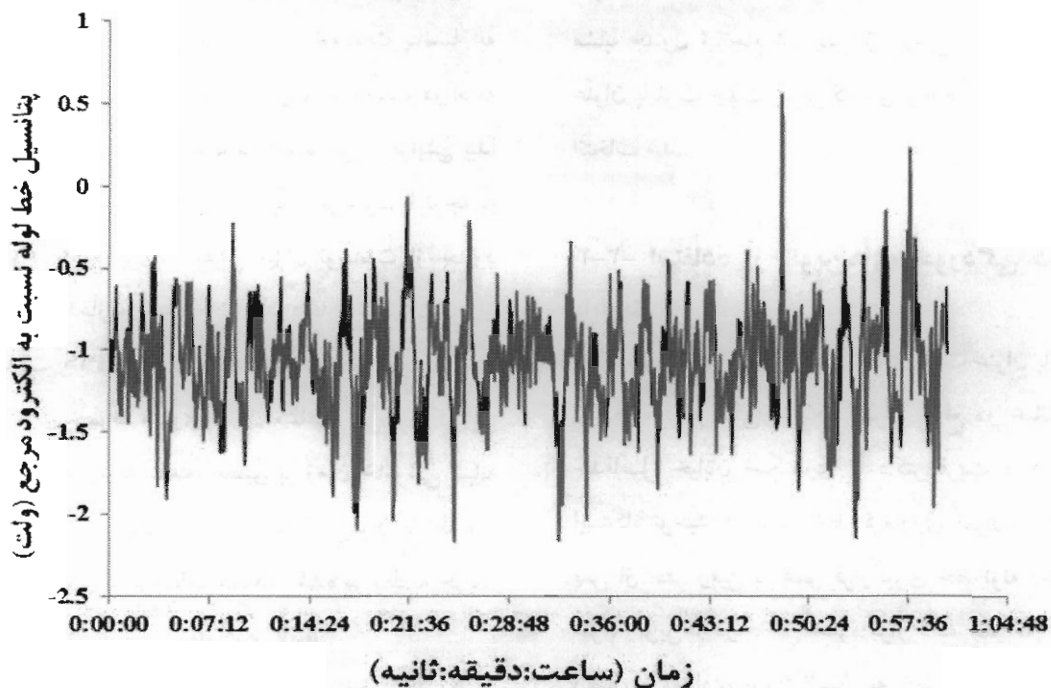
جدول ۱: تعداد نقاط تلاقی و طول توازی خطوط گاز با خطوط مختلف مترو در فاصله‌ی کمتر از ۲۰۰ متر

شماره خط مترو	تعداد تلاقی	طول توازی (m)
خط ۱	۶۱	۳۲۸۰۰
خط ۲	۷۰	۳۲۸۵۰
خط ۴	۸۲	۳۴۵۰۰
کل خطوط	۲۱۳	۱۰۰۱۵۰

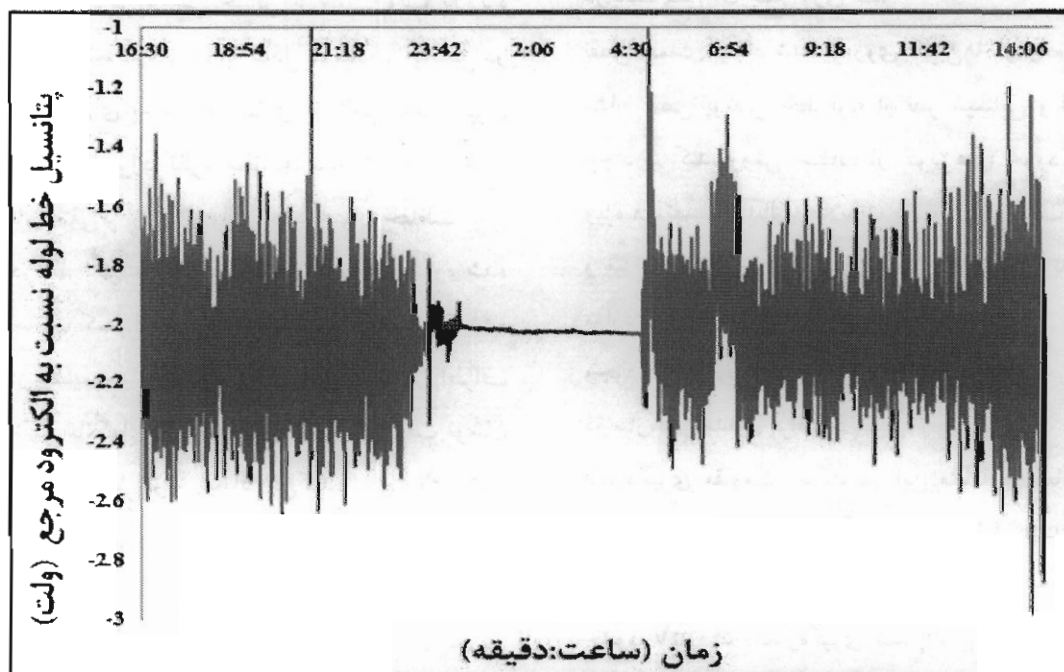
۲-۳- بررسی‌های میدانی، اندازه‌گیری و پایش

پتانسیل خطوط لوله انتقال گاز

در شکل ۶ نمودارهای مربوط به پتانسیل سنجی برای یک اندازه‌گیری یک ساعته (در منطقه یک گازرسانی) آورده شده است. همانگونه که قبلا نیز اشاره گردید، میزان نوسان موجود در نمودارها نمایانگر شدت جریان سرگردان موجود در اطراف سازه است. برای بدست آوردن این میزان و به منظور حذف خطاهای اندازه‌گیری، مقدار میانگین ۱۰ درصد پتانسیل‌های پایین از مقدار میانگین ۱۰ درصد پتانسیل‌های بالا کسر شده است و مقدار بدست آمده بعنوان



شکل ۶: نمودار تغییرات پتانسیل برای یک T/P در منطقه یک گازرسانی به مدت یک ساعت.



شکل ۷: نمودار تغییرات پتانسیل برای یک T/P در منطقه یک گازرسانی به مدت ۲۴ ساعت.

پیدا کرده که با توجه به نوع پوشش خطوط، حفاظت بیش از حد اتفاق می‌افتد.

رسیده که به معنی وقوع خوردگی است. همچنین در زمان‌هایی مقدار پتانسیل به منفی‌تر از -2100 میلی‌ولت افت

مترو در آن‌ها توسعه یافته صورت گرفته و تیپ بندی نقاط مشابه جدول ۲ انجام شد. پس از بررسی نتایج، یک منطقه به عنوان پایلوت جهت کوپن‌گذاری و انجام بررسی‌های بیشتر انتخاب شد.

۳-۳- استفاده از کوپن‌های خوردگی در منطقه پایلوت

منطقه مورد نظر جهت کوپن‌گذاری تحت عنوان پایلوت، در دانشکده دامپزشکی دانشگاه تهران (واقع در خیابان آزادی حدفاصل خیابان اسکندری و دکتر قریب و در نزدیکی ایستگاه توحید در مسیر خط ۴ متروی تهران) انتخاب شد. پس از حفر زمین به عمق قرارگیری خط لوله (حدود ۱/۵ متر)، کوپن‌ها در داخل حفره قرار داده شد که تعدادی با اتصال و تعدادی بدون اتصال به خط لوله بودند و اطراف آن‌ها با خاک الک شده پر شد و مابقی حفره تماما با خاک پر شد و سیم‌های متصل به نمونه‌ها جهت انجام اندازه‌گیری‌ها در باندباکس آن جمع‌آوری شد.

نقص عمده ایجاد شده بر روی کوپن‌ها در واقع شرایطی مشابه نقص پوشش خط لوله از نظر شیمیایی و الکتریکی ایجاد می‌کند. روش استفاده از کوپن‌های خوردگی بطور ویژه در تفسیر و آنالیز اطلاعات پتانسیل لوله نسبت به خاک و میزان بازدهی و اثر بخشی سیستم حفاظت کاتدی و در مواردی که افت پتانسیل اهمی ناشی از جریان‌های سرگردان وجود دارد کاربرد دارد و اندازه‌گیری کمی نرخ خوردگی را در سازه‌های مدفون فراهم می‌کند [۱۶-۱۷].

اندازه‌گیری مقاومت خاک در این منطقه بر اساس روش جعبه خاک [۱۲] صورت گرفت که معادل $2450 \Omega \cdot \text{cm}$ بدست آمد. پتانسیل کوپن آزاد (بدون اتصال به خط لوله) در حدود 540 mV اندازه‌گیری شد. پتانسیل کوپن‌های متصل به خط لوله بطور مداوم در حال نوسان بود. جهت بررسی این نوسانات، مقادیر پتانسیل به مدت ۲۴ ساعت ثبت شد که نمودار تغییرات آن در شکل ۸ آمده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، پتانسیل کوپن‌های متصل به خط لوله، نوساناتی کاملاً امشابه با خود خط لوله دارند.

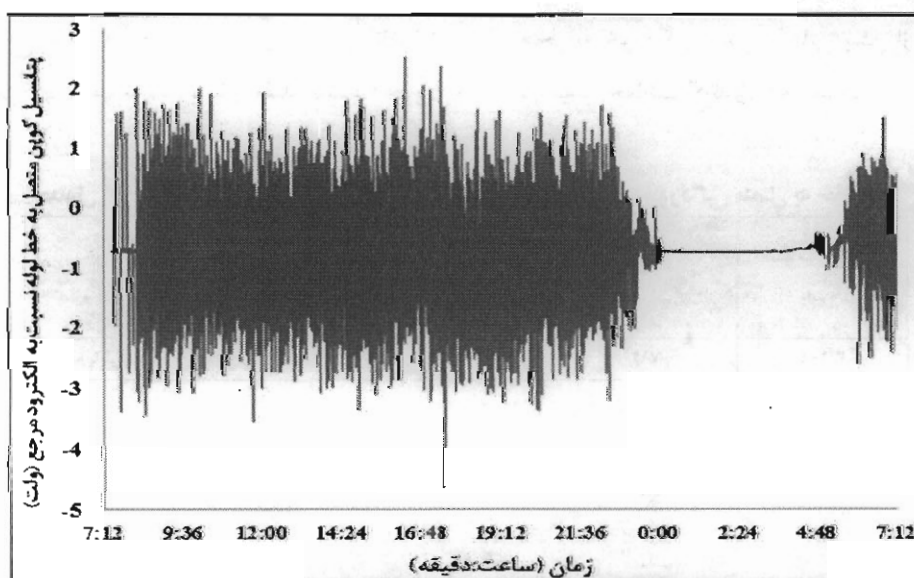
نکته قابل توجه در این نمودار وجود ناحیه تقریباً خطی در وسط نمودار است. در این ناحیه میزان نوسانات پتانسیل به مرور کاهش یافته و به مقدار بسیار ناچیزی می‌رسد و در ادامه پس از گذشت حدود ۵ ساعت دوباره به مرور افزایش پیدا کرده و به مقادیر قبل از این بازه نزدیک می‌شود. با توجه به زمان شروع اندازه‌گیری، کاهش میزان نوسانات از حدود ساعت ۲۳:۳۰ آغاز می‌شود و تشدید دوباره نوسانات نیز از حدود ساعت ۴:۳۰ بامداد روز بعد شروع می‌شود. با توجه به ساعات کاری خطوط متروی تهران مشاهده می‌شود که این بازه زمانی حدود ۵ ساعته، منطبق بر زمان خاموشی شبانه خطوط برقی مترو است و بدین ترتیب می‌توان با اطمینان بیشتری ادعا نمود که نوسانات مشاهده شده مربوط به جریان نیست یافته از خطوط متروی تهران می‌باشد.

نتایج پتانسیل‌سنجی‌های نقاط مختلف در منطقه یک گازی شهر تهران در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد. طبق استانداردهای حفاظت کاتدی [۱۲]، خط لوله به منظور حفاظت از خوردگی بایستی حداقل تا -0.85 ولت پلاریزه شود. با توجه به نمودارهای مشابه شکل ۴، میانگین پتانسیل در نقطه‌ی اندازه‌گیری به عنوان معیاری از تامین شدن میزان حفاظت کاتدی مورد نظر، محاسبه شده است. همچنین پتانسیل‌های منفی‌تر از -2.1 ولت نیز به عنوان حفاظت بیش از حد در نظر گرفته شده است. همانگونه که اشاره شده میزان نوسانات کمتر از ۱۰۰ میلی‌ولت، مطلوب ارزیابی شده است. در مقایسه با اندازه‌گیری انجام شده در اطراف متروی شهر شانگهای که در حدود ۴۰۰ میلی‌ولت نوسان در پتانسیل خطوط لوله ایجاد می‌کند، و متروی شهر ایلینوی که روی خطوط لوله در حدود ۱ ولت نوسان نشان می‌دهد، مقادیر اندازه‌گیری شده در منطقه یک گازرسانی تحت تاثیر متروی تهران (جدول ۲) نوساناتی با حدود دامنه‌ی بین ۳۰ میلی‌ولت تا ۳ ولت (ردیف‌های ۴ و ۱۳ جدول) را نشان می‌دهد که این امر از نظر خوردگی بسیار بحرانی است.

پایش پتانسیل خطوط لوله در نقاط انتخابی در اطراف خطوط مترو، در نه منطقه از مناطق گازرسانی شهر تهران که خطوط

جدول ۲: نتایج پتانسیل سنجی نقاط مختلف در منطقه یک گازرسانی تهران

ردیف	کد T/P	٪۱۰ بیشترین پتانسیل (ولت)	٪۱۰ کمترین پتانسیل (ولت)	پتانسیل میانگین (ولت)	فاصله میان ٪۱۰ بالا و ٪۱۰ پایین (ولت)	شرایط از نظر خطر جریان‌های سرگردان
۱	T/P7952	-۰/۵۸۵	-۰/۵۶۲	-۰/۶۲۰	۰/۰۶۷	قابل قبول
۲	T/P7909	-۰/۶۶۹	-۰/۷۷۲	-۰/۷۱۹	۰/۱۰۳	نسبتاً بحرانی
۳	IJ7945	-۰/۴۵۱	-۰/۵۴۴	-۰/۴۹۶	۰/۰۹۳	قابل قبول
۴	44V1	-۰/۷۵۸	-۰/۷۸۹	-۰/۷۷۴	۰/۰۳۱	قابل قبول
۵	160V1	-۰/۶۹۸	-۰/۸۸	-۰/۷۸۷	۰/۱۸۲	نسبتاً بحرانی
۶	80V2	-۰/۵۲۳	-۱/۶۶۳	-۱/۰۸	۱/۱۴۰	فوق بحرانی
۷	T/P2183	-۰/۷۸۴	-۰/۸۲۱	-۰/۸۰۳	۰/۰۳۷	قابل قبول
۸	T/P7922	-۰/۷۹۲	-۰/۹۱۹	-۰/۸۵۹	۰/۱۲۷	نسبتاً بحرانی
۹	T/P7913	-۰/۹۷۵	-۱/۱۵۴	-۱/۰۶۶	۰/۱۷۹	نسبتاً بحرانی
۱۰	17V1	-۰/۶۷۷	-۰/۹۱۴	-۰/۷۹۲	۰/۱۲۷	بحرانی
۱۱	A11	-۱/۰۷۷	-۱/۲۱	-۱/۱۵۴	۰/۱۳۳	نسبتاً بحرانی
۱۲	DR554	-۱/۶۶۱	-۲/۳۷۱	-۲/۰۴۵	۰/۷۰۹	فوق بحرانی
۱۳	منطقه پایلوت	۰/۷۷۴	-۲/۳۱۸	-۰/۷۱۲	۳/۱۰۲	فوق بحرانی



شکل ۸: نمودار تغییرات پتانسیل کوپن متصل به خط لوله در منطقه پایلوت.

حفاظتی، میانگین مقادیر جریانی است که در زمان خاموشی مترو وارد نمونه می‌شود. مقادیر مثبت جریان به عنوان جریان خروجی از کوپن و مقادیر منفی آن به عنوان جریان ورودی به کوپن در نظر گرفته شده‌اند. مدت زمان ورود جریان به کوپن و خروج جریان از آن نیز در جدول آورده شده است. زمان قرارگیری در حالت خروج جریان نیز با در نظر گرفتن متوسط جریان خروجی می‌تواند در محاسبه سرعت خوردگی مورد استفاده قرار گیرد.

بر اساس استانداردهای ذکر شده در روش تحقیق، سرعت خوردگی کوپن با استفاده از متوسط جریان خروجی در مدت زمان مربوطه، در حدود $3/485$ mpy بدست می‌آید. نتایج حاصل از محاسبات کاهش وزن کوپن‌ها نیز نشان داد که سرعت خوردگی کوپن متصل به خط لوله (در معرض حفاظت کاتدی و جریان سرگردان) در حدود $4/4$ mpy است. بیشتر بودن این مقدار نسبت به مقدار محاسبه شده می‌تواند به این دلیل باشد که زمان در معرض قرارگیری جهت اندازه‌گیری کاهش وزن در حدود ۳ ماه بوده است، اما اندازه‌گیری بر اساس جریان کوپن در مدت ۲۴ ساعت صورت گرفته است. این مقدار نسبت به سرعت خوردگی آزاد کوپن (بدون اتصال به خط لوله) که در حدود $2/6$ mpy است تقریباً ۱/۵ برابر است. بنابراین حضور جریان سرگردان حتی در صورت اعمال حفاظت کاتدی می‌تواند منجر به خوردگی با سرعت‌هایی بیش از سرعت خوردگی در غیاب حفاظت کاتدی منجر شود.

اطلاعات مربوط به این اندازه‌گیری در جدول ۳ بصورت مجزا آمده است. پارامترهایی مشابه آنچه در اندازه‌گیری‌های میدانی قبلی استخراج شده بود، در این اندازه‌گیری نیز محاسبه شد.

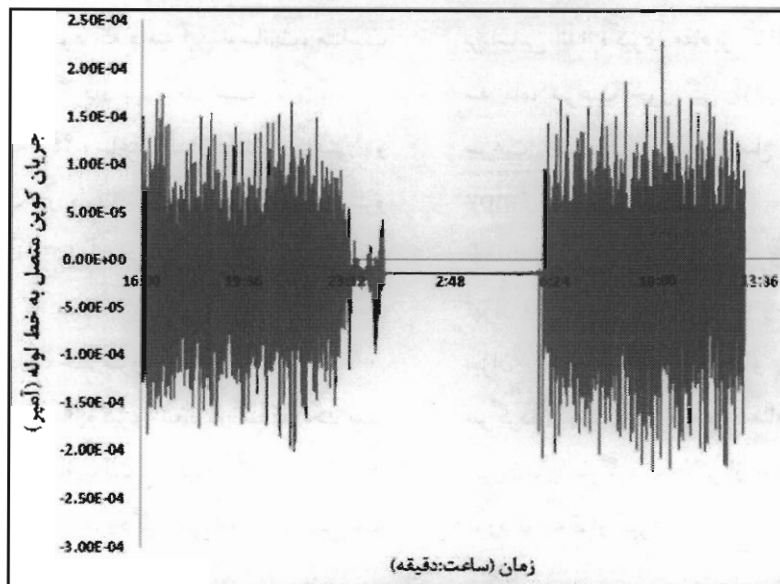
با توجه به جدول ۳، پتانسیل ساکن کوپن (در غیاب جریان سرگردان) و پتانسیل میانگین در طول روز، از محدوده حفاظتی خارج بوده و امکان وقوع خوردگی وجود دارد. دامنه‌ی نوسانات پتانسیل نیز بیشتر از سه ولت است که می‌تواند سازه را از نظر خوردگی در شرایط بسیار بحرانی قرار دهد. به منظور اندازه‌گیری‌های کمی سرعت خوردگی، می‌بایست مقادیر جریان کوپن‌ها را اندازه‌گیری کرد.

جهت بررسی وضعیت ورود و خروج جریان کوپن‌ها، از یک آمپرمتر که در مسیر اتصال خط لوله به کوپن قرار گرفته بود، استفاده شد و نتایج حاصل در طول ۲۴ ساعت با سرعت نمونه‌برداری یک داده در هر پنج ثانیه ثبت شدند. نمودار تغییرات جریان کوپن با نقص پوشش 1cm^2 در شکل ۹ آمده است. با توجه به نمودار، جریان منفی نشانه ورود جریان و جریان مثبت نشانه خروج جریان از نمونه است. در طول مدت شب، همانطور که ملاحظه می‌شود، نوسانی در جریان وجود نداشته و صرفاً جریان حفاظتی به نمونه وارد می‌شود.

اطلاعات حاصل از آنالیز نمودار شکل ۹ در جدول ۴ آمده است. همانطور که ملاحظه می‌شود پارامترهای مختلفی از نمودار استخراج شده‌اند که به منظور بررسی تاثیرات جریان‌های سرگردان می‌توانند بسیار مفید باشند. جریان

جدول ۳: اطلاعات بدست آمده از نمودار تغییرات پتانسیل کوپن خوردگی متصل به خط لوله

محل اندازه‌گیری	پتانسیل ساکن (ولت)	۱۰٪ بیشترین پتانسیل (ولت)	۱۰٪ کمترین پتانسیل (ولت)	پتانسیل میانگین (ولت)	فاصله میان ۱۰٪ بالا و ۱۰٪ پایین (ولت)
منطقه پایلوت	-۰/۷۵	۰/۷۷۴	-۲/۳۱۸	-۰/۷۱۲	۳/۱۰۲



شکل ۹: نمودار تغییرات جریان کوپن متصل به خط لوله در منطقه پایلوت.

جدول ۴: اطلاعات بدست آمده از نمودار تغییرات جریان کوپن خوردگی متصل به خط لوله

محل اندازه گیری	جریان حفاظتی اعمالی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	حداکثر جریان ورودی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	حداکثر جریان خروجی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	متوسط جریان ورودی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	متوسط جریان خروجی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	زمان قرارگیری در ورود جریان (ثانیه)	زمان قرارگیری در خروج جریان (ثانیه)
منطقه پایلوت	۱۳/۸	۱۶۳	۱۱۷	۳۵	۳۴/۶	۵۶۶۵۵	۱۹۱۹۰

این امر می‌تواند به این دلیل باشد که اولاً نمونه متصل به خط لوله در طول مدت خاموشی مترو (با توجه به جدول ۳) در مقادیر پتانسیل کمتر از مقدار حفاظتی -۸۵۰mV قرار دارد. ثانیاً در طول مدت فعالیت مترو در طول یک روز (با توجه به جدول ۴) برای مدت ۵ ساعت در معرض خوردگی قرار می‌گیرد. به این ترتیب نرخ خوردگی در حضور جریان سرگردان از نرخ خوردگی آزاد کوپن (در غیاب حفاظت و جریان سرگردان) بیشتر است. بنابراین نقش جریان‌های نشر یافته از خطوط مترو بر روی پتانسیل اعمالی به خطوط لوله گاز به وضوح قابل مشاهده است. به این ترتیب به نظر می‌رسد که در مناطقی از شبکه گازرسانی شهر تهران در اطراف خطوط مترو که نوسانات پتانسیل به مقادیر بحرانی می‌رسد، نیاز به اقدامات لازم جهت جلوگیری از خوردگی و تخریب خطوط در اثر جریان‌های ناشی خطوط مترو وجود دارد. نگارندگان، بررسی‌های میدانی مربوطه را در تمامی نقاط شهر تهران (در مجاورت

خطوط مترو) به پایان رسانده که منجر به تیپ‌بندی جامع مناطق مختلف بر اساس میزان جریان‌های سرگردان و همچنین میزان تامین حفاظت شده است. پژوهش فوق هم‌اکنون در مرحله شبیه‌سازی قرآبندهای مرتبط و تاثیرگذار و بررسی روش‌های جلوگیری از اثرگذاری جریان‌های سرگردان بر خوردگی خطوط لوله در حال پیگیری است که نتایج آن متعاقباً در نشریات داخلی و خارجی انتشار خواهد یافت.

۴- نتیجه‌گیری

طبق بررسی‌های اولیه بر روی نقشه‌های موجود، شبکه گازرسانی با خطوط مترو در شهر تهران در حدود ۲۱۳ نقطه طاقی داشته و در حدود ۱۰۱۵۰ متر در فاصله‌ی کمتر از ۲۰۰ متر از خط مترو یا یکدیگر موازی هستند.

تاثیر جریان‌های سرگردان بر پتانسیل خطوط لوله تحت حفاظت کاتدی بصورت نوسانات در نمودار پتانسیل بر

این امر می‌تواند به این دلیل باشد که اولاً نمونه متصل به خط لوله در طول مدت خاموشی مترو (با توجه به جدول ۳) در مقادیر پتانسیل کمتر از مقدار حفاظتی -۸۵۰mV قرار دارد. ثانیاً در طول مدت فعالیت مترو در طول یک روز (با توجه به جدول ۴) برای مدت ۵ ساعت در معرض خوردگی قرار می‌گیرد. به این ترتیب نرخ خوردگی در حضور جریان سرگردان از نرخ خوردگی آزاد کوپن (در غیاب حفاظت و جریان سرگردان) بیشتر است. بنابراین نقش جریان‌های نشر یافته از خطوط مترو بر روی پتانسیل اعمالی به خطوط لوله گاز به وضوح قابل مشاهده است. به این ترتیب به نظر می‌رسد که در مناطقی از شبکه گازرسانی شهر تهران در اطراف خطوط مترو که نوسانات پتانسیل به مقادیر بحرانی می‌رسد، نیاز به اقدامات لازم جهت جلوگیری از خوردگی و تخریب خطوط در اثر جریان‌های ناشی خطوط مترو وجود دارد. نگارندگان، بررسی‌های میدانی مربوطه را در تمامی نقاط شهر تهران (در مجاورت

بر اساس اندازه‌گیری مقادیر کاهش وزن کوپن‌ها در مدت سه ماه، سرعت خوردگی آزاد در حدود $2/6$ mpy و سرعت خوردگی کوپن متصل به خط لوله در حدود $4/4$ mpy محاسبه شد.

طبقه‌بندی تمامی نقاط اندازه‌گیری در منطقه یک گازرسانی تهران (در مجاورت خط مترو) و تیپ‌بندی آن مناطق از نظر میزان حفاظت تامین شده و میزان حضور جریان‌های سرگردان، نشان از وجود مناطقی در تهران با میزان جریان‌های سرگردان بالاتر از حد مجاز دارد که می‌بایستی مورد توجه قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از امور پژوهش شرکت گاز استان تهران در خصوص حمایت‌های معنوی و مالی ایشان نسبت به تحقیق فوق صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

حسب زمان مشاهده می‌شود که دامنه این نوسانات، متناسب با میزان حضور جریان سرگردان دینامیک است.

پتانسیل‌سنجی پیوسته ۲۴ ساعته نشان‌دهنده کاهش و از بین رفتن نوسانات در طول ساعات خاموشی خط مترو (بین ساعات ۲۳:۳۰ تا ۴:۳۰ بامداد روز بعد) بود که این نکته تأییدی بر آن است که منبع جریان‌هایی که موجب نوسان پتانسیل خط لوله شده‌اند، خط متروی تهران است.

دامنه نوسانات در نقاط اندازه‌گیری شده در منطقه یک شهر تهران مقادیری بین ۳۰ میلی‌ولت تا حدود ۳ ولت را نشان می‌دهد که از نقطه نظر خوردگی می‌تواند شرایط نسبتاً شدیدی را ایجاد کند.

با اندازه‌گیری جریان کوپن‌ها در منطقه‌ی پایلوت و استفاده از مقادیر متوسط جریان خروجی و مدت زمان خروج جریان در مدت ۲۴ ساعت، سرعت خوردگی معادل $3/485$ mpy تخمین زده شد.

مراجع

1. K. D. Pham, R. S. Thomas, Analysis of Stray Current, Track-to-Earth Potentials & Substation Negative Grounding in DC Traction Electrification Systems, Proc. Conf. IEEE/ASME Joint Rail Conference, Toronto, Canada, 2001, Pp. 124-136.
2. European Standard EN 50162, Protection against corrosion by stray current from direct current systems, European Committee for Standardization, 2001.
3. Y. S. Tzeng, C. H. Lee, Analysis of Rail Potential and Stray Currents in a Direct-Current Transit System, Proc. Conf. IEEE Transactins on Power Delivery, 2010, Vol. 25, No. 3.
4. K. Zakowski, W. Sokolski, 24-hour characteristic of interaction on pipelines of stray currents leaking from tram tractions, Corrosion Science, Vol. 41, 1999, Pp. 2099-2111.
5. I. Cotton, C. Charalambous, P. Aylott, P. Ernst, Stray Current Control in DC Mass Transit Systems, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, No. 2, 2005, Pp. 85-93.
6. M. Niasati, A. Gholami, Overview of Stray Current Control in DC Railway Systems, Proc. Conf. on Railway Engineering Challenges for Railway Transportation in Information Age (ICRE), 2008, Pp. 14-23.
7. S. Nikolakakos, Stray currents: Generation, Interference Effects and Control, Proc. Conf. Corrosion 98, 1998, Paper No. 559, Pp. 348-356.
8. Z. G. Chen, Application of a stray current monitoring system based upon virtual instrument, Proc. Conf. on Automation and Logistics (ICAL), 2010, Pp. 112-120.
9. British Standard BS EN 13509, Cathodic Protection Measurement Techniques, British Standard Institution, 2003.
10. NACE Standard SP0207, Performing Close-Interval Potential Surveys and DC Surface Potential Gradient Surveys on Buried or Submerged Metallic Pipelines, NACE International, 2007.

11. K. E. Davis, Evaluation of Cathodic Protection Levels on Natural Gas Distribution Systems, Corrosion 98, Paper No. 665, 1998, Pp. 217-226.
12. NACE Standard RP0169-96, Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems, NACE International, 1996.
13. ASTM Standard G1-03, Preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens, ASTM International, 1999.
14. ASTM Standard G102, Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements, ASTM International, 1999.
15. P. D. Simon, Quantifying LRT stray current effects using coupons, Proc. Conf. Corrosion 2005, Paper No. 05246, Pp. 87-96.
16. P. Cohn, AC / DC Interference Corrosion in Pipelines: Summary Report, The Danish Gas Technological Centre, 2006.
17. National Chinese Standard GB/T 19285, Inspection of Corrosion Protection for Buried Steel Pipelines, AQSIQ, 2003.