

تأثیر ویژگی‌های خاک بر خوردگی لوله‌های انتقال گاز از جنس فولاد AP-5L-X60

سعید رضا اله کرم*^۱، رضا صدیق‌فر^۲

^۱دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

^۲دانشگاه آزاد واحد ساوه

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۷/۴/۱۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۸/۷/۱۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۸/۸/۲۶

چکیده تخریب لوله‌های فولادی مدفون در زمین در اثر خوردگی، زیان‌های قابل توجهی را بر صنعت و محیط زیست تحمیل می‌کند. شناخت طبیعت خاک به عنوان الکترولیت ناهمگون در این پروسه خوردگی برای طراحی و حفاظت خطوط لوله امری ضروری است. از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک که بر خوردگی تأثیرگذار است می‌توان از مقاومت ویژه، نمک‌های محلول، رطوبت، بافت خاک، مواد معدنی، میکروارگانیسم‌ها و ... نام برد. در این مطالعه، از خاک مجاور به خط لوله‌ای به طول پنج کیلومتر در فواصل مختلف نمونه‌هایی جهت بررسی‌های مطالعات میدانی و آزمایشگاهی تهیه گردید. در مطالعات میدانی متوسط مقاومت ویژه خاک اطراف خط لوله در پنج نقطه به روش چهار میل ونر اندازه‌گیری شد. در بررسی‌های آزمایشگاهی pH نمونه‌ها اندازه‌گیری و سپس جریان و پتانسیل خوردگی با استفاده از آزمایش پلاریزاسیون به دست آمد. سپس آزمایش اندازه‌گیری I/S برای نمونه‌هایی که تحت حفاظت کاتدی قرار داشتند به مدت زمان ۴۰۰ ساعت انجام شد. آزمایش آنالیز خاک دانه‌بندی و به ترتیب توسط روش XRF و LOI صورت پذیرفت و نتایج آزمایش‌ها با جریان خوردگی هر یک از نقاط مقایسه و پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار خوردگی این مناطق شناخته شد.

کلمات کلیدی حفاظت کاتدی، مقاومت ویژه خاک، روش چهار میل ونر، میکروارگانیسم‌ها.

Effects of Soil Compositions on Corrosion of Gas Transferring Pipelines

S. R. Allahkaram*¹, R. Sedighifar²

¹School of Metallurgy and Materials Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

²Islamic Azad University of Saveh, Saveh Branch, Saveh, Iran

Abstract Degradation of underground buried pipelines due to corrosion imposes enormous financial damages on industry and environment. Hence, recognition of soil nature as a non-homogeneous electrolyte in corrosion of pipelines is an important issue, which should be taken into consideration during design and execution of cathodic protection (CP). The most important factors regarding soil composition, which affect the corrosion or protection of a buried pipeline, are: soil resistivity, various dissolvable salts in earth, relative humidity, soil composition and grain size, mineral materials, micro organisms, etc. In this study, a length of 5 kilometers from a long cathodically protected coated pipeline near Tehran was selected for laboratory and on-site investigations, which had noticeable lack of protection. Five soil samples were collected from five positions adjacent to the pipeline with one kilometer distance between each collect sample. Prior to sample collection, the selected positions were subjected to resistivity measurement, using Wenner measuring device. The soil samples were transferred immediately to the laboratory for further investigation, whereby the pH, grain size and chemical composition of each sample was calculated using standard measuring methods including XRF and Loss on ignition (LOI) for grain size specification and chemical composition, respectively. Furthermore, the corrosion rate of steel specimens with similar composition to the pipeline exposed to each soil sample was obtained via potentiostatic polarization measurement. Also the relative amount of current required with respect to the area of the steel specimen (i.e. I/S) exposed to each soil sample was obtained for a period of 400 hours in each case. Finally, the results for all selected samples were compared and contrasted against each other and the effective parameters on corrosion of steel samples were specified.

Keyword Cathodic Protection, Soil resistivity, The Wenner 4-point Method, micro organisms.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: تهران، امیرآباد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد.

تلفن: ۰۲۱-۶۱۱۱۴۱۰۸، دورنگار: ۰۲۱-۶۱۱۱۴۱۰۸، پیام‌نگار: akaram@ut.ac.ir

۱- مقدمه

خوردگی سازه‌های مدفون در زمین از مشکلات متداول در صنعت می‌باشد. لوله‌های انتقال نفت، گاز و آب که عموماً در زمین مدفون هستند از این قبیل سازه‌ها محسوب می‌شوند. در ایران برای انتقال گاز از پالایشگاه تا محل مصرف از لوله‌های فولادی API-5L-X60 استفاده می‌شود.

این نوع فولاد نسبت به خوردگی حساس است ولی با این وجود به صورت گسترده‌ای برای انتقال گاز استفاده می‌شود. از دلایل اصلی کاربرد این فولاد می‌توان به قیمت پایین، استحکام بالا و جوشکاری آسان آن نام برد. تخریب لوله‌های نفت و گاز در اثر خوردگی عواقب زیان‌باری از نقطه نظر زیست محیطی و اقتصادی به همراه دارد و موجب می‌شود سالیانه خسارت‌های هنگفتی را به اقتصاد این صنایع وارد نماید.

دلیل اصلی خوردگی لوله‌های مدفون در زمین طبیعت خاک می‌باشد. خاک ماده‌ای شبه جامد و دارای طبیعت متخلخل است که متشکل از مخلوطی از مواد آلی و معدنی، آب و هوا و دیگر گازها می‌باشد. خاک به‌عنوان الکترولیتی ناهمگن سبب پیشرفت تدریجی واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌شود و با کنترل دسترسی اکسیژن محیط خارج شرایط وقوع خوردگی را بر سطح سازه مدفون مهیا می‌کند.

اولین مطالعاتی که ارتباط میان خاک‌های مختلف و خوردگی آنها را بررسی کرد، به سال ۱۹۶۳ بر می‌گردد [۱]. نشئی لوله‌های آب که به سبب خوردگی لوله‌های انتقال آب در خاک به وجود آمده بود سبب شد تا مطالعات جدی‌تری در این زمینه انجام شود.

ویژگی‌های مختلفی از خاک که بر خوردگی تأثیرگذارند، طی سالیان متمادی مورد بررسی قرار گرفته است. درصد رطوبت خاک، pH، مقاومت الکتریکی، تأثیر انواع

نمک‌های موجود در خاک تشکیل لایه‌های پسیو بر سازه‌های مدفون [۲]، بافت خاک، دمای خاک، حضور مواد معدنی در خاک [۳] و حضور آب‌های زیر زمینی، چگونگی گذر آب از لایه‌های دانه‌های خاک از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه می‌باشد.

با این وجود بررسی‌ها بر عوامل خورنده موجود در خاک همچنان ادامه دارد، تا آنجا که نظریه‌های جدیدتری بر مقاومت خاک (R.C. Benson 2002) و تأثیر بافت‌های مختلف خاک، آلودگی‌های زیست‌محیطی [۴] و انواع نمک‌های موجود در خاک [۵] مطرح شده و نگرش قوی‌تری بر ویژگی‌های خاک و ارتباط آن با خوردگی سازه‌های مدفون در خاک را ایجاد نموده است.

بررسی هرچه بیشتر ویژگی‌های خاک جهت طراحی سازه‌های مدفون در خاک و حفاظت آن از اهمیت بسیاری برخوردار است لیکن به جهت پیچیدگی، زمان‌بر بودن و افزایش هزینه‌های مربوطه صرفاً در طراحی‌ها به مقاومت ویژه خاک و پتانسیل لوله نسبت به خاک بسنده می‌شود. هرچند که هزینه این‌گونه بررسی‌ها نسبت به راه‌اندازی خط لوله و یا تعویض آن بسیار کمتر است، در عین حال برای افزایش بازدهی خط لوله بسیارحائز اهمیت می‌باشد.

خاک‌ها را بر حسب ترکیب آنها که شامل لای و رس می‌باشد و مابقی آن سنگ است، تقسیم می‌نمایند. روبرج نمودار واتینی که در شکل ۱ رسم شده را برای خاک‌های مختلف نشان داده است [۶].

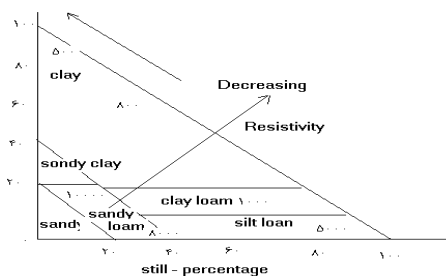
در بیشتر منابع مطالعاتی مربوط به خوردگی از مقاومت ویژه خاک به عنوان اصلی‌ترین عامل خوردگی خاک یاد می‌شود و دیگر عوامل مؤثر در این امر را تا حد زیادی در ارتباط با مقاومت ویژه خاک می‌دانند. نظریه خوردگی و مقاومت ویژه به این صورت است که در ازای افزایش مقاومت ویژه خاک خوردگی کاهش می‌یابد.

با توجه به فاکتورهای خورنده طبقه‌بندی نموده است و استفاده از چنین طبقه‌بندی‌هایی برای تخمین میزان خوردگی خاک بسیار مؤثر می‌باشد [۸].

در این مقاله نمونه‌هایی از خاک در امتداد بخشی از خط لوله انتقال گاز به طول ۴ کیلومتر در پنج نقطه تهیه و مورد بررسی واقع گردید. هدف از اجرای این طرح آن است که برخلاف مشی متداول در بررسی حفاظت کاتدی خطوط لوله که معمولاً فقط مقاومت ویژه خاک مورد بررسی واقع می‌گردد، عواملی چون مقاومت ویژه خاک، pH، آنالیز عنصری خاک، بافت خاک و تأثیر مواد معدنی موجود در خاک بررسی‌هایی انجام و تأثیر خوردگی هر کدام از این فاکتورها بر روی لوله مشخص شده است.

۲- نحوه انجام آزمایش

به‌منظور بررسی خواص خاک، نیاز به منطقه‌ای با خاک متنوع بود. پس از بررسی سوابق خط لوله در شرکت ملی گاز ایران، خط اول سراسری انتقال گاز کیلومتر ۶۵۰ لوله ۴۰ اینچ انتخاب شد. بررسی‌ها در حوالی شهرستان ساوه و در منطقه‌ای بیابانی و خشک صورت پذیرفته است. نمونه‌برداری و بررسی‌های میدانی مربوط به تیرماه ۱۳۸۷ می‌باشد، در آن زمان تقریباً زمین اطراف خط لوله خشک بوده است. خط لوله در عمق یک متری زمین واقع و تحت سیستم حفاظت کاتدی بود. از کیلومتر ۶۵۰ تا کیلومتر ۶۵۴ پنج منطقه به فاصله یک کیلومتر از هم برای بررسی انتخاب و به ترتیب از نقاط یک تا پنج نام‌گذاری شد. به عمق یک متر از هر نقطه حفاری صورت پذیرفت و از خاک اطراف لوله ۱ تا ۳ کیلوگرم خاک، جهت بررسی‌های آماری نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها داخل کیسه‌هایی دو جداره و در بسته قرار داده شد در تماس با هوا و یا فلز دیگری نباشد و در محلی به دور از نور در تماس با هوا و یا



شکل ۱. نمودار وایتنی برای خاک‌های دارای مقاومت مخصوص خاص [۶].

برای حفاظت لوله‌های انتقال گاز در مقابل خوردگی از پوشش‌های پلی اتیلنی، اپوکسی و کولتار استفاده می‌شود. پوشش‌هایی که از آنها یاد شد حدود ۹۵ الی ۹۸ درصد از حفاظت خط لوله‌ها را به عهده دارند و مابقی حفاظت توسط سیستم حفاظت کاتدی با پتانسیل حداقل -850 mV در صورت عدم حضور میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی در خاک نسبت به الکتروود مرجع مس/سولفات مس تأمین می‌شود [۷].

در اثر انتقال و نصب لوله‌ها در خاک در هنگام راه اندازی خط لوله امکان صدمه دیدن پوشش زیاد است. بنابراین روی لوله نقاطی به وجود می‌آید که پوشش آنها از بین رفته است و این نقاط در خاک به شدت در معرض خوردگی موضعی قرار می‌گیرند. ولی متأسفانه تا قبل از زمان بهره‌برداری حفاظت کاتدی از لوله صورت نمی‌پذیرد که این موضوع می‌تواند چندین ماه به طول انجامد. حفاظت کاتدی برای حفاظت این مواضع تخریب شده طراحی می‌شود و چنانچه جریان حفاظتی کافی توسط خاک به لوله نرسد این نقاط شدیداً خورده می‌شوند و خسارات سنگینی را بر خط لوله تحمیل می‌کند.

بنابراین شناخت طبیعت خاک برای طراحی صحیح حفاظت کاتدی و تخمین عمر لوله الزامی می‌باشد و فقط با تکیه بر مقاومت ویژه خاک نمی‌توان میزان خوردگی خاک را تخمین زد. در برخی استانداردها مثل DIN 50929-3، خاک را

آزمایش کوانتومتری ترکیبی از پنج نمونه خاک با استفاده از استاندارد ASTM C 982-97 انجام شد تا تأثیر ترکیب‌های تأثیرگذار خاک بر خوردگی خط لوله مشخص شود.

۳- نتایج و بحث

مقاومت خاک اندازه‌گیری شده در پنج نقطه مورد نظر در امتداد خط لوله در رابطه (۱) قرار داده شد که نتیجه آن مقاومت ویژه خاک می‌باشد.

$$\rho(\Omega.cm) = \rho_a \times \pi \times 2 \times A \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه ρ مقاومت ویژه، ρ_a مقاومت اندازه‌گیری شده بر حسب Ω و A فاصله بین میله‌ها بر حسب سانتیمتر می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک به روش چهار میل و نر در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱. مقاومت الکتریکی خاک نقاط آزمایش.

نقطه	مقاومت اندازه‌گیری شده (Ω)	مقاومت ویژه ($\Omega.cm$)
۱	۱۰/۱۳	۴۰۲۵
۲	۵/۷۲	۴۳۱۴
۳	۳/۵۸	۲۲۹۸
۴	۲/۴۴	۲۳۹۲
۵	۱/۹۹	۲۹۳۹

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقاومت ویژه خاک در نقاط ۱ و ۲ بیش از نقاط ۳ تا ۵ می‌باشد. با توجه به رابطه مقاومت ویژه خاک و خوردگی انتظار می‌رود که دو نقطه اول کمتر در معرض خوردگی نسبت به سه نقطه دیگر باشد. ضمن

فلز دیگری نباشد و در محلی به دور از نور تا ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه قرار داده شد.

در اطراف هر پنج نقطه در منطقه مورد بررسی، مقاومت ویژه خاک به روش چهار میل و نر در عمق یک متری اندازه‌گیری شد، برای این اندازه‌گیری از استاندارد ASTM G57-95a استفاده شد.

به فاصله ۲۴ ساعت از نمونه برداری در آزمایشگاه pH خاک طبق استاندارد ASTM G51-95 اندازه‌گیری شد. آزمایش پتانسیل خوردگی بر اساس پلاریزاسیون به روش دینامیکی و با توجه به استاندارد ASTM G61 انجام گرفت. برای انجام آزمایشات (نمونه‌های خاک تهیه شده در شرایط میدانی و نمونه‌های فلزی از جنس لوله API-5L-X60 که برای این آزمایش تهیه شده بود استفاده شد.

آزمایش اندازه‌گیری I/S (جریان به سطح) برای ۵ نمونه طراحی و انجام شد، به این ترتیب که نمونه‌های فلزی از جنس API-5L-X60 در نمونه‌های خاک تهیه شده تحت سیستم حفاظت کاتدی با پتانسیل -۸۵۰ mV قرار گرفت و جریان خروجی از سطح نمونه فلزی اندازه‌گیری شد، چنانچه این جریان مورد نیاز برای حفاظت نمونه‌ها در حالت حفاظت کاتدی می‌باشد. با تقسیم این جریان به سطح نمونه فلزی میزان I/S به دست می‌آید که واحدی از میزان جریان مصرفی بر سطح برای حفاظت فلز در خاک می‌باشد.

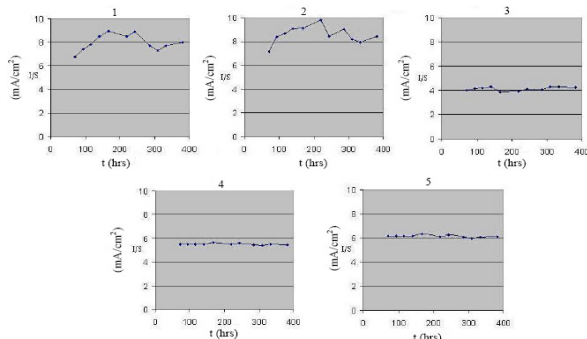
- آزمایش اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک به روش جعبه خاک تحت استاندارد AASHTO T988 انجام شد.

- آزمایش تعیین دانه بندی خاک با استفاده از الک تحت استاندارد AASHTO M-145-91 انجام شد.

- آزمایش L.O.I (loss on ignition) با قرار دادن نمونه‌های خاک در دمای ۵۴۰°C در کوره تحت استاندارد ASTM D2974 انجام شد.

که جریان خوردگی در نقاط ۱ و ۲ از سه نقطه دیگر بیشتر است. با توجه خوردگی در نقاط ۱ و ۲ از سه نقطه دیگر بیشتر است. با توجه به مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده، نتایج جریان خوردگی با آنچه پیش‌بینی شده بود کاملاً متفاوت است. در واقع بیشترین خوردگی در خط لوله در نقطه ۲ و کم‌ترین میزان خوردگی در نقطه ۳ می‌باشد.

با توجه به تناقض نتایج آزمایش‌های پتانسیل خوردگی بر اساس پلاریزاسیون و اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک، به نظر رسید که رفتار خوردگی خط لوله در خاک با نتایج جریان خوردگی متفاوت است و در ارتباط با مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در میدان باشد. پس آزمایش اندازه‌گیری I/S به مدت ۴۰۰ ساعت انجام شد و نتایج در نمودارهای شکل (۲) آمده است.



شکل ۲. نمودارهای پنج نمونه پس از اندازه‌گیری I/S به مدت ۴۰۰ ساعت.

جدول ۴. متوسط I/S مورد نیاز نمونه در مدت ۴۰۰ ساعت.

نمونه‌ها	۱	۲	۳	۴	۵
I/S (mA/cm ²)	۷/۹۳	۹/۰۵	۴/۲۲	۵/۷۴	۶/۱۶

این که بیشترین مقاومت مربوط به نقطه ۲ و کم‌ترین مقاومت ویژه مربوط به نقطه ۳ می‌باشد.

نتایج جدول (۲) پس از اندازه‌گیری و میانگین گرفتن نتایج هر نمونه گزارش شده است.

جدول ۲. نتایج pH نمونه‌های خاک.

نمونه	(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)
pH	۶/۹۴	۶/۵۴	۸/۷۵	۸/۲۸	۷/۸۲

در محدوده $4 < \text{pH} < 9$ تقریباً خوردگی تأثیرپذیر از pH وجود ندارد پس میزان pH خاک نمونه‌ها در خوردگی تأثیر زیادی ندارد. ضمن این که نمونه‌های ۳، ۴ و ۵ تمایل به حالت قلیایی و نمونه‌های ۱ و ۲ تمایل به حالت اسیدی دارند. جریان خوردگی برای پنج نمونه خاک با توجه به نمونه‌های فلزی با استفاده از آزمایش پتانسیل خوردگی بر اساس پلاریزاسیون به دست آمد و نتایج آن در جدول (۳) قید شده است.

جدول ۳. نتایج عددی مربوط به آزمایش پتانسیو استات در پنج نمونه.

نمونه	I(A)	S(cm ²)	i(A/cm ²)
۱	۲۱/۵۲	۸/۵	۲/۵۳
۲	۲۵/۱۳	۸/۵	۲/۹۵
۳	۱۱/۷۳	۸/۵	۱/۳۸
۴	۱۴/۵۷	۸/۵	۱/۷۱
۵	۱۲/۶۴	۸/۵	۱/۴۸

I جریان مورد نیاز برای کل سطح و i دانسیته جریان مورد نیاز برای حفاظت واحد سطح می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین جریان خوردگی مربوط به نقطه ۲ و کم‌ترین جریان خوردگی مربوط به نقطه ۳ می‌باشد، ضمن این

به نقطه ۲ و کم‌ترین میزان مقاومت ویژه مربوط به نقطه ۳ می‌باشد.

نتایج مربوط به آزمون دانه بندی خاک در جدول (۶) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دانه بندی نمونه‌های ۱ و ۲ از دیگر نمونه‌ها بزرگتر می‌باشند. دانه‌های درشت‌تر خاک اجازه ورود هوا به سمت سازه را می‌دهد و سبب بالا رفتن سرعت خوردگی سازه می‌شود همچنین آب در خاک‌های دانه درشت‌تر راحت‌تر نفوذ می‌کند و به سمت سازه حرکت می‌کند. دسترسی آسان آب به سازه علاوه بر افزایش نرخ خوردگی سبب شسته شدن و از بین رفتن لایه‌های پسیو تشکیل شده و تشدید خوردگی روی لوله می‌شود. بنابراین همیشه لایه پسیو در حال تشکیل و انهدام بر سطح لوله است.

جدول ۶. میزان درصد‌های وزنی ترکیبات هر نمونه.

نمونه	خاک رس	گل و لای (silt)	ماسه
۱	۹/۴۰٪	۳۲/۲۴٪	۵۸/۳۶٪
۲	۵/۴۲٪	۲۸/۵٪	۶۶/۲۶٪
۳	۱۸/۵۰٪	۴۶/۳۵٪	۳۵/۱۵٪
۴	۱۵/۲۳٪	۴۲/۸۹٪	۴۱/۸۸٪
۵	۱۲/۲۶٪	۳۹/۶۷٪	۴۸/۰۷٪

در اندازه‌گیری I/S جهت اتصال بهتر الکتروود مرجع با خاک روزانه مقداری آب روی نمونه‌ها ریخته می‌شد و تأثیر عبور آب در خوردگی نمونه‌ها در این آزمایش مشاهده می‌شد. درشت بودن خاک نمونه‌های ۱ و ۲ دلیل اصلی مضر بودن نمودارهای آزمایش I/S می‌باشد، چرا که لایه پسیو بر روی سطح نمونه‌ها تشکیل می‌شود و این لایه سبب کاهش جریان حفاظتی مورد نیاز می‌باشد. ولی درشت بودن دانه‌های خاک سبب از بین رفتن لایه‌های پسیو می‌شود و در نتیجه جریان

همان‌گونه که در نمودارهای شکل (۱) و جدول (۴) مشاهده می‌شود میزان جریان مورد نیاز برای حفاظت نمونه‌های فلزی در نقاط ۱ و ۲ بیش از سه نقطه دیگر است. نکته حایز اهمیت دیگر تلاطم جریان برای نقاط یک و ۲ نسبت به دیگر نقاط می‌باشد. با توجه به آزمایش‌های I/S و I_{corr} می‌توان نتیجه گرفت که خوردگی لوله در نقاط ۱ و ۲ از دیگر نقاط بیشتر است.

خاک دارای طبیعت ناهمگون می‌باشد و ممکن است که نوع خاک از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت باشد. شاید که نمونه‌های خاک گویای طبیعت کل منطقه مورد بررسی نباشد و همچنین مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده به روش و نر گویای مقاومت ویژه نمونه‌های خاک نباشد. بنابراین برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه نمونه‌ها از روش جعبه خاک استفاده شد و نتایج این آزمایش در جدول (۵) آمده است.

جدول ۵. مقاومت ویژه به روش جعبه خاک.

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
مقاومت ویژه (Ω/cm)	۲۸۵۳	۳۰۵۱	۱۹۵۳	۲۰۳۵	۲۲۸۵

مجدداً مقاومت ویژه نقاط ۱ و ۲ بیش از دیگر نقاط است. پس می‌توان مدعی شد که مقاومت‌های اندازه‌گیری شده به روش و نر صحیح می‌باشد. لازم به ذکر است که مقاومت ویژه به روش جعبه خاک حداقل مقاومت ممکن خاک می‌باشد، در صورتی که روش و نر مقاومت ویژه خاک با توجه به میزان رطوبت موجود در میدان می‌باشد. اختلاف میان نتایج روش و نر و جعبه خاک نیز همین امر را نشان داد. لیکن موضوع حایز اهمیت این است که مقاومت ویژه نقاط ۱ و ۲ بیش از سه نقطه دیگر می‌باشد و بیشترین مقاومت ویژه مربوط

خوردگی نسبت به نقاط ۱ و ۲ قرار می‌گیرد. هر چند که لایه‌های پسیو تشکیلی در نقاط ۱ و ۲ به لحاظ بافت خاک به سرعت منهدم می‌شود.

یکی از دلایلی که pH نقاط ۳، ۴ و ۵ قلیایی‌تر از دو نقطه ابتدایی می‌باشد وجود CaO بیشتر در خاک این مناطق است.

بالا بودن غلظت SO_3 به عنوان ترکیبی خورنده در خاک نقاط ۱ و ۲ سبب افزایش خوردگی خاک این نقاط نسبت به سه نقطه انتهایی می‌باشد و ضمن این که SO_3 حالت اسیدی دارد و از دلایل اسیدی بودن pH نقاط ۱ و ۲ وجود بیشتر همین ترکیب در این نقاط می‌باشد.

همچنین نمک‌های Na_2O و K_2OMgO در نقاط ۳ تا ۵ بیشتر از نقاط ۱ و ۲ می‌باشد که از دلایل پایین بودن مقاومت ویژه خاک این نقاط نسبت به نقاط ۱ و ۲ می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نشان داده شد که توأم بررسی ترکیب و عناصر تشکیل دهنده خاک نیز از اهمیت بالایی برخوردار بوده و در تعیین جریان حفاظتی مورد نیاز خط لوله می‌توانند تأثیرگذار باشند. نتایج حاصل از این بررسی می‌تواند به عنوان نگرشی جدید در نحوه طراحی حفاظت کاتدی لوله و مخازن مورد ارزیابی واقع گردد و این بررسی‌ها به عنوان نقطه شروعی برای ارزیابی‌های متفاوت در طراحی حفاظت کاتدی منظور گردد. با توجه به نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته نتیجه‌گیری‌های ذیل حاصل گردید.

- وجود ترکیب خورنده SO_3 در نقاط ۱ و ۲ بیشتر از نقاط دیگر می‌باشد، پس این ترکیب خورنده باعث می‌شود که خط لوله در نقطه ۱ و ۲ بیشتر در معرض خوردگی باشد.

حفاظتی مورد نیاز افزایش پیدا می‌کند. چنانچه در شکل (۱) مشاهده شد؛ این پدیده چندین بار در زمان ۴۰۰ ساعت آزمایش اتفاق افتاده است. نتایج آزمایش LOI در جدول (۷) آورده شده همان‌طور که ملاحظه می‌شود درصد LOI و یا میزان مواد معدنی در خاک نمونه‌های ۱ و ۲ بیشتر از دیگر نمونه‌ها می‌باشد. گازهای متصاعد شده از مواد معدنی سبب بالا رفتن نرخ خوردگی می‌شود.

جدول ۷. نتایج آزمایش LOI از پنج نمونه خاک.

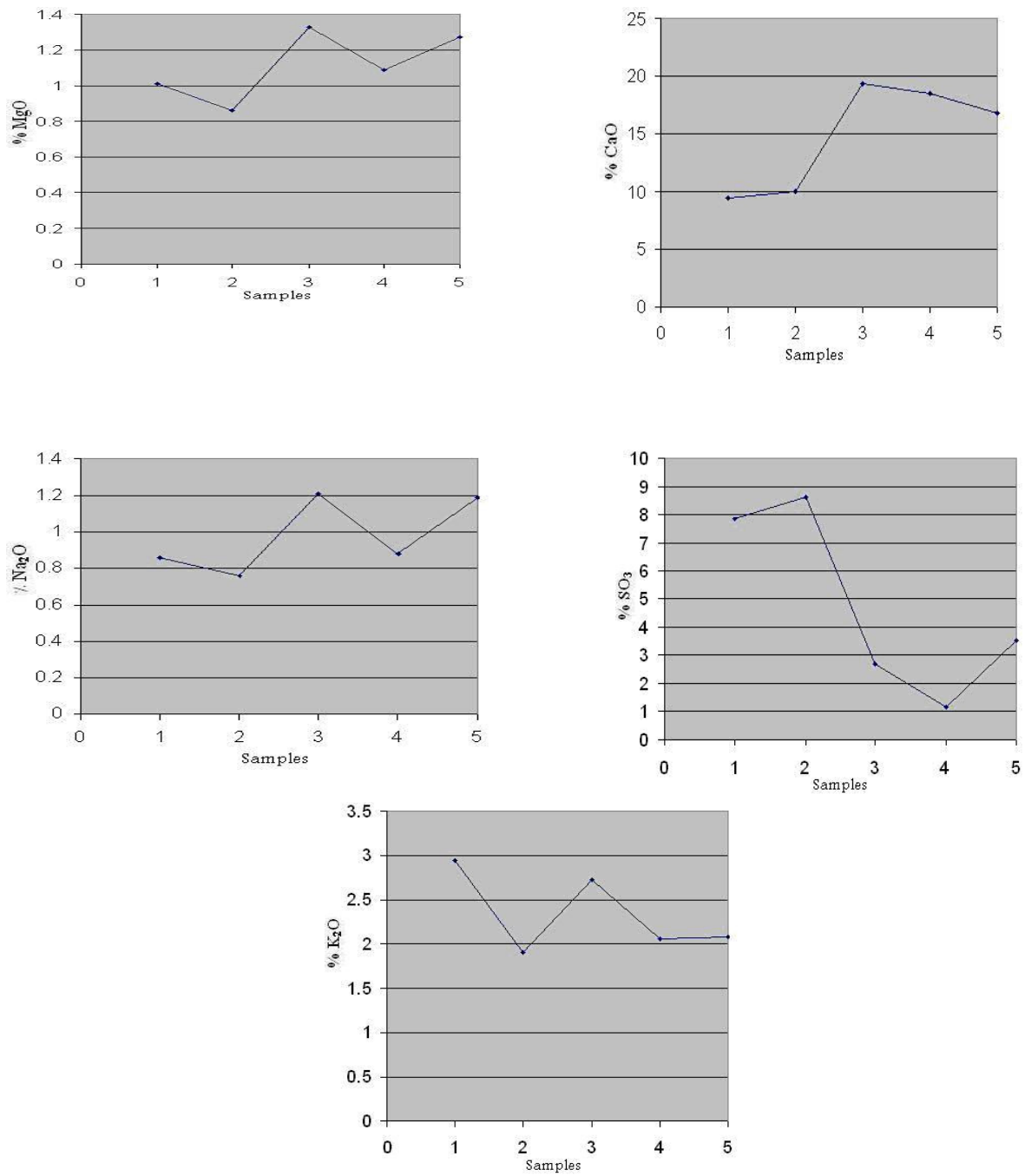
نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
LOI	۱۰/۹۸	۱۲/۰۱	۷/۵۷	۷/۸۲	۶/۴۱

نتایج آزمایش آنالیز ترکیبی به روش XRF برای ترکیباتی که در نمونه‌ها اختلاف قابل توجهی داشته‌اند در شکل (۳) و به صورت عددی در جدول (۸) آورده شده است.

جدول ۸. نتایج آنالیز ترکیبی نمونه‌های خاک.

ترکیب نمونه	CaO	SO_3	Na_2O	K_2O	MgO
۱	۹/۴	۷/۸۳	۰/۸۶	۲/۹۴	۱/۰۱
۲	۱۰/۰	۸/۶۳	۰/۷۶	۱/۹۱	۰/۸۶
۳	۱۹/۴	۲/۷	۱/۲۱	۲/۷۳	۱/۳۳
۴	۱۵/۵	۱/۱۶	۰/۸۸	۲/۰۶	۱/۰۹
۵	۱۶/۸	۳/۵	۱/۱۹	۲/۰۸	۱/۲۷

اکسید کلسیم سبب تشکیل لایه پسیو روی سازه‌های مدفون در خاک می‌شود و همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود، اکسید کلسیم در نمونه‌های ۳، ۴ و ۵ بیشتر از نقاط ۱ و ۲ می‌باشد. پس سازه در این نواحی کمتر در معرض



شکل ۳. نتایج آنالیز XRF برای ترکیباتی که میزان آنها در پنج نمونه اختلاف قابل توجهی دارد.

organic matter. soil science society of America Inc., madison, WI(1996) 21-31.

4. SeonYeob, L., Sungwon, J., Kyeong-wan, P., Seong-Min, L. and Young-Geun, K., "Kinetic study on corrosion of steel in soil environment using electrical resistance sensor technique", *The Journal of Materials Chemistry and Physics*, Vol. 103 (2007) 9-13.

5. Akpofure, R. and Kehnde, A., "Investigation of soil corrosivity in the corrosion of low carbon steel pipe in soil environment" *Journal of Applied Sciences Research*, Vol. 2, No.8, (2006) 466-469.

6. Roberge, P.R., "Handbook of Corrosion Engineering", *Mc Graw-Hill*, (2000).

7. Benmoussat, A. and Hadjel, M., "Corrosion behavior of low carbon line pipe steel in soil environment", *The Journal of Materials and Design*, Vol. 28 (2005) 324-328.

8. Persson, M., "Investigation of the impact of load-induced cracking on the initiation time on steel corrosion in concrete", *Master's Thesis, Lulea Tekniska University*, (2000).9-26.

- ترکیب قلیایی CaO در اطراف خط لوله در نقاط ۳ و ۴ و ۵ بیشتر از نقاط ۱ و ۲ می باشد که این عامل سبب می شود لایه پسیو قوی تری در این نقاط نسبت به نقاط ۱ و ۲ تشکیل شود پس نقاط انتهایی کمتر در معرض خوردگی می باشد.

- بافت درشت تر خاک در نقاط ۱ و ۲ سبب افزایش خوردگی هم از لحاظ رسیدن آب و هوا به خط لوله و هم از لحاظ انهدام لایه پسیو، نسبت به مناطق دیگر به هنگام بارندگی می باشد.

- میزان مواد معدنی که توسط آزمایش LOI مشخص شد، در نقاط ۱ و ۲ بیشتر از نقاط ۳ تا ۵ می باشد. پس گازهای تولیدی خورنده که توسط مواد معدنی منتشر می شود سبب خورنده تر بودن خاک نقاط ۱ و ۲ است.

- در پنج نقطه بررسی شده، خاک نقطه ۲ بالاترین مقاومت را داشت ولی علیرغم این موضوع خاک این منطقه خورنده تر از دیگر مناطق بررسی شده می باشد و خاک نقطه ۳ کمترین مقاومت ویژه را در بین این پنج نقطه داشت و در عین حال خط لوله در این منطقه کمتر در معرض خوردگی نسبت به دیگر مناطق می باشد. با توجه به اینکه این دو نقطه که در نزدیکی یکدیگر قرار گرفته اند می توان این گونه تصور کرد که بین این دو منطقه کوپل گالوانیکی خوردگی تشکیل می شود و عملاً خط لوله در منطقه ۲ بیشتر از نتایج حاصل در آزمایشگاه در معرض خوردگی می باشد.

مراجع

1. Schaschle, E., and Marsh, G.A., "Some new views on soil corrosion", *Materials protection*, Vol. 2 (1963) 8-17.
2. Gerwin, W., Baumhauer, R., "Effect of soil parameters on the corrosion of archaeological metal finds", *University of Trier, Department of Physical Geography*, Trier D-54286 (2000) Germany.
3. Schulte, E.E., Hopkins, B.G., "Estimation of organic matter by weight Loss-in-ignition", *Magdoff, F.R. et al. (Eds), soil*