

## The effect of soil resistivity on corrosion behavior of natural gas pipelines

### Abstract

The effective parameters that influence the exterior corrosion of pipelines are: moisture, soil resistivity, soluble salts, pH, Redox potential. In this investigation the effect of soil resistivity on corrosion behavior of API-5LX46 pipelines were studied. The chemical composition of soil also, was discussed as important parameters in corrosion of mentioned steel. The rate of corrosion was measured by weight loss and polarization methods. The obtained results showed that the increase of chloride and sulphate concentration in soil, increase the electrical conductivity of it and decrease soil resistivity. Therefore the rate of corrosion rises consequently. Experimental data showed that weight loss of steel decreases with increasing resistivity considerably. The polarization data confined that the corrosion current density decreases as soil resistivity increases. Finally, it can be concluded that corrosion current density, polarization resistance and soil resistivity can serve as the parameters for evaluation of soil corrosivity.

**Keywords: low carbon steel, pipeline corrosion, soil resistivity, weight loss, polarization**

## اثر مقاومت ویژه خاک بر خوردگی لوله‌های انتقال گاز

### چکیده

عوامل مهم خاک که در خوردگی خارجی لوله‌های گاز مؤثرند شامل رطوبت، مقاومت ویژه، نوع و غلظت نمک‌های محلول، pH، پتانسیل اکسید احیا می‌باشند. در این مقاله اثر مقدار مقاومت ویژه چهار خاک مختلف بر خوردگی لوله فولادی API-5LX46 بررسی شده و همچنین تأثیر ترکیب شیمیایی خاک (غلظت آنیونهای کلرید و سولفات) مورد بحث قرار گرفته است. اندازه‌گیری سرعت خوردگی با استفاده از روش کاهش وزن و نیز روش پلاریزاسیون خطی انجام گرفته است. نتایج بدست آمده از آنالیز شیمیایی خاک نشان می‌دهند که با افزایش غلظت آنیونهای کلرید و سولفات هدایت الکتریکی محلول خاک افزایش و مقاومت ویژه خاک کاهش یافته است و در نتیجه شدت جریان خوردگی افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش کاهش وزن بیانگر این مطلب است که اتلاف وزنی و سرعت خوردگی نمونه فولادی با افزایش مقاومت ویژه کاهش می‌یابد. همچنین بررسی داده‌های روش پلاریزاسیون نشان می‌دهند که با افزایش مقاومت ویژه خاک، دانسیته جریان خوردگی و سرعت خوردگی کاهش و مقاومت پلاریزاسیون افزایش می‌یابند. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده از هر دو روش می‌توان پارامترهایی مانند چگالی جریان خوردگی، مقاومت پلاریزاسیون و مقاومت ویژه خاک را به عنوان پارامترهای کلیدی در تخمین خوردگی خاک به کار گرفت.

واژه‌های کلیدی: فولاد کربنی کم، خوردگی خطوط لوله، مقاومت ویژه خاک، کاهش وزن، پلاریزاسیون

## مقدمه

خوردگی در خطوط انتقال گاز به دو صورت خوردگی داخلی و خارجی مشاهده می‌شود. خوردگی داخلی در اثر ترکیبات گوگردی مانند سولفید هیدروژن و مرکاپتانها و نیز حضور مایعات هیدروکربنی و آب بوجود می‌آید. از جمله شرایط طبیعی محیط (خاک) که باعث ایجاد خوردگی خارجی خطوط می‌شوند، عبارتند از مقدار رطوبت و اکسیژن، مقدار مقاومت ویژه و PH و ... که در این بین مقاومت ویژه دارای کاربردهای فراوانی، مانند پیش‌بینی مقدار رطوبت خاک، درجه تراکم و اشباعیت خاک، تخمین اثرات خوردگی خاک بر روی لوله‌های مدفون، طراحی بسترهای آندی در سیستم‌های حفاظت کاتدی، طراحی مقاومت سیستم‌های ارت زمین، طراحی نیروگاهها، مطالعه پدیده الکترواندوسمزی در خاکها، بررسی اثر انجماد خاک و تخمین درجه شوری خاک در فعالیت‌های کشاورزی و همچنین تحقیقات باستان‌شناسی، بررسی و پایش انتقال فلزات آلاینده مانند Cu، Pb، Zn، Ni و تعیین مقاومت حرارتی خاک، مورد استفاده گسترده‌ای دارد [۸-۱]. در این مقاله تأثیر مقاومت ویژه خاک بر سرعت خوردگی لوله فولاد کربنی API-5LX46 بررسی می‌شود.

## مواد و روشها

### لوله‌های فولادی

امروزه لوله‌های فولاد کربنی مورد استفاده در خطوط انتقال نفت و گاز مطابق مشخصات فنی استاندارد API، کلاس 5L در برگیرنده گرید X46 و سایر گریدها ساخته می‌شوند. API 5L، مجموعه خاصی از پارامترهای مکانیکی شامل استحکام تسلیم، استحکام کششی و فشار پذیری است، که لوله باید بر طبق آن ساخته شود [۹]. کوپن‌های مورد استفاده در این کار، از لوله‌ای با مشخصات API-5LX46، به قطر ۸ اینچ تهیه شده‌اند. ابتدا میله‌ای به ابعاد (۱×۱×۳۰ CM) در جهت شعاعی - محوری تهیه شد و سپس کوپن‌ها، در ابعاد مساوی (۱×۱×۱ CM) برش داده شدند. آنالیز شیمیایی کوپن‌های فلزی مطابق روش استاندارد ASTM-E403 به صورت جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی فولاد API-5LX46

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Al	%Fe
۰/۰۸	۰/۸۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۲۴	۰/۰۴	باقیمانده

## خاک و فرآیند خوردگی

خاک یک ماده پیچیده، متخلخل و ناهمگن متشکل از SiO<sub>2</sub>، Al، Fe و مقادیر نسبتاً کمی از عناصر اصلی می‌باشد. خاک یک سیستم چند جزئی بوده و از فازهای جامد، مایع، گاز و موجودات زنده تشکیل می‌شود [۱۰ و ۱۱]. از آنجا که خطوط انتقال گاز و بسیاری از سازه‌های فولادی دیگر در خاک قرار می‌گیرند و خاک محیط مرطوب و خورنده‌ای بوجود می‌آورد این سازه‌ها خورده می‌شوند. منشاء بروز خوردگی در خاک تشکیل پیل‌های الکتروشیمیایی است، که رطوبت موجود در خاک به عنوان الکترولیت عمل نموده و واکنش‌های الکترودی خوردگی در آن به وقوع می‌پیوندد. در مورد فولاد نیم واکنش آندی و نیز نیم واکنش‌های کاتدی شامل واکنش‌های ۱،۲ و ۳ می‌باشند [۱۱]:





## خواص فیزیکی و شیمیایی خاک

وقوع خوردگی در خاک بوسیله عواملی چون رطوبت، اکسیژن، پتانسیل احیا، pH، مقاومت ویژه خاک، فعالیت میکروبی، سنگ‌ها و در موارد نادری اختلاف غلظت املاح مختلف در خاک و اختلاف دما تشدید می‌شود [۱۲]. در یک جسم استوانه‌ای ساده، مقاومت ویژه خاک  $\rho(\Omega\text{-m})$ ، به صورت رابطه ۴، تعریف می‌شود:

$$\rho = R(S/L) \quad (4)$$

که  $R$  مقاومت الکتریکی ( $\Omega$ )،  $L$  طول استوانه  $m$ ،  $S$  سطح مقطع عرضی استوانه ( $m^2$ ) است [۱۱]. برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک به روش چهار میله‌ای ونر، مطابق شکل ۱ جریان از طریق دو الکترود خارجی  $C_1$  و  $C_2$  به داخل خاک هدایت شده و مقاومت مابین دو الکترود داخلی  $P_1$  و  $P_2$  اندازه‌گیری می‌شود. (میله‌ها در فواصل مساوی و به اندازه  $r$  در راستای خط راست قرار می‌گیرند) پتانسیل و مقاومت ویژه برای همه جهات شعاعی به صورت معادله ۵ محاسبه می‌شود:

$$\rho = 2\pi rR \quad (5)$$

مقاومت ویژه خاک، تابعی از خواص خاک مانند طبیعت تشکیل‌دهنده‌های جامد (توزیع اندازه ذره)، کانی‌شناسی، آرایش حفره‌ها (تخلخل، توزیع اندازه حفره و ارتباط آنها)، درجه اشباعیت آب، مقاومت ویژه الکتریکی محلول خاک (غلظت نمک) و دما می‌باشد [۸] و [۱۳]. مقاومت ویژه چهار نمونه خاک مطابق شکل ۱، به روش چهار میله‌ای ونر و با استفاده از دستگاه مقاومت‌سنج و بیروگراند با مقدار فاصله میله‌ها  $r=20\text{cm}$  اندازه‌گیری شد که به ترتیب افزایش مقاومت ویژه  $A$ ،  $B$ ،  $C$  و  $D$  نامیده می‌شوند. pH خاک بر اساس استاندارد ASTM- D4972 اندازه‌گیری می‌شود. همچنین مقدار آنیونهای کلرید، سولفات، کربنات و بی‌کربنات و کاتیونهای سدیم، پتاسیم، منیزیم و کلسیم با استفاده از روشهای تیتراسیون، گراویمتری، شعله‌سنجی و سایر روشهای شیمیایی در محلول عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری می‌شوند [۱۴]. نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مقاومت ویژه و آنالیز شیمیایی کاتیونها و آنیونهای چهار نمونه خاک

خاصیت خاک	A	B	C	D
$\rho = 2\pi rR(\Omega\text{-cm})$	۱۳۸۱	۳۳۹۱	۶۰۲۸	۱۰۰۴۸
pH	۸/۱	۷/۸	۷/۸	۷/۹
Ec ( $\mu\text{mho/cm}$ )	۵۱۹۵	۱۵۵۸	۱۴۹۶	۱۱۳۰
<b>Anions in saturation extract (ppm):</b>				
$SO_4^{2-}$	۱۶۸۰	۲۵۲۰	۱۹۲۰	۱۴۴۰
$Cl^-$	۵۱۰	۲۰۰	۹۰	۹۰
$CO_3^{2-}$	Nil		Nil	۲۰
$HCO_3^-$	۶۵۰	۶۶۰	۷۸۰	۶۰۰
<b>Cations in saturation extract(ppm):</b>				
$Na^+$	۵۰۰	۸۴/۹	۴۰	۳۵/۲
$K^+$	۱۵۶	۲۰	۲۰	۱۷/۵
$Ca^{2+}$	۵۰۰	۲۲۰	۳۰۰	۲۳۰
$Mg^{2+}$	۷۲/۶	۴۸/۷	۷۲/۶	۱۲

## آزمایشهای خوردگی

سرعت خوردگی کوپن‌های فولادی با استفاده از دو روش کاهش وزنی و آزمایشهای پلاریزاسیون خطی حاصل می‌شوند. در روش کاهش وزنی کوپن‌ها، که برگرفته از استاندارد NACE-TM 0169 است، به منظور چربی‌زدایی، به مدت ۲۰ دقیقه در محلول سود ۱۰٪ در دمای ۶۰°C و به منظور اکسیدزدایی، به مدت ۱۵ دقیقه در دمای آزمایشگاه و در محلول اسید کلریدریک ۱۰٪ غوطه‌ور می‌شوند. پس از این مراحل کوپن‌ها توسط جریان هوای گرم خشک شده و پس از توزین آنها در دسیکاتور نگهداری می‌شوند. آزمایش کاهش وزن به صورت میدانی بوده و در عمق نیم‌متری هر کدام از محل‌های تعیین شده سه کوپن خوردگی دفن می‌شود. بعد از ۴۷ روز آنها از زمین درآورده و پس از انجام عملیات تمیز کردن سطحی وزن می‌شوند. سپس دوباره در محل‌های قبلی دفن می‌شود. پس از گذشت ۵۴ روز و در مرحله دوم همراه با دو بار بارندگی فصلی، کوپن‌ها از محل‌های دفن شده خارج می‌شوند.

در روش پلاریزاسیون خطی، چون خاک دارای مقاومت بسیار بالایی است و توسط دستگاه Autolab جریان بسیار کوچکی (در حد صفر) عبور می‌کند، که در این صورت اندازه‌گیری جریان خوردگی عملاً غیرممکن خواهد بود از الکترولیت خاک استفاده می‌شود. الکترولیت، محلول صاف شده‌ای از مخلوط خاک کاملاً خشک (خاک به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۰۵°C در خشک‌کن خشک می‌شود) و آب مقطر، به نسبت ۲:۱ در مدت زمان اختلاط ۱۲ ساعت بدست آمد. چهار نمونه محلول A B C D از این مرحله حاصل شد. وسایل و دستگاه‌های لازم برای رسم منحنی‌های پلاریزاسیون عبارتند از: الکترومد مرجع کالومل اشباع، الکترومد کار، الکترومد کمکی پلاتین و دستگاه Autolab مدل PGSTAT30، به عنوان منبع اعمال پتانسیل که به یک دستگاه رایانه PC پنتیوم S با سرعت ۲۰۰ MHz متصل بوده و مجهز به نرم افزار GPES ۴/۵V می‌باشد. سیستم سه الکترومدی بکار رفته در این آزمایش، در شکل ۲ ارائه شده است.

نمونه فولادی مانع شده پس از سمباده‌زنی، با آب مقطر آبکشی شده و توسط جریان هوا خشک می‌شود، الکترومد کار همراه با الکترومد مرجع و پلاتین در داخل پیل خوردگی قرار داده می‌شود. بر اساس روش ASTM-G59 بعد از تعیین مقدار پتانسیل مدار باز پیل با استفاده از روش پتانسیودینامیک منحنی‌های پلاریزاسیون رسم می‌شوند. بطوریکه محدوده پتانسیل انتخابی حدود ۲۵۰ mV ± نسبت به پتانسیل مدار باز بوده و سرعت روبش حدود ۲۰ mV/SEC انتخاب شد.

## بحث و بررسی

با توجه به آزمایشات و اندازه‌گیریهای انجام شده بر روی چهار نمونه خاک مطالب زیر بیان می‌شوند. بر اساس تقسیم‌بندی NACE در مورد مقاومت ویژه خاکها، خاک A دارای خاصیت خوردگی متوسط، خاک B و C تقریباً خورنده و خاک D دارای خوردگی ضعیف می‌باشد [۱۵]. همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری pH نشان می‌دهد که خاکها در محدوده pH ۷/۸ تا ۸/۱ قرار دارند و بدون ملاحظه سایر عوامل خوردگی، هر چهار نوع خاک در گروه خاکهای غیر خورنده قرار می‌گیرند ولی با توجه به اندازه‌گیری مقاومت ویژه می‌توان گفت این اظهار نظر صحیح نمی‌باشد و نمی‌توان به صرف اندازه‌گیری pH در این مورد قضاوت کرد. همچنین از pH های بدست آمده گفته می‌شود محیط هر چهار نوع خاک قلیایی ضعیف است. آنیونهای اصلی محلول در خاک شامل کلریدها، سولفات‌ها، فسفات‌ها، کربنات‌ها و بی‌کربنات‌ها هستند اما در بین آنها کلریدها و سولفات‌ها بیشترین تأثیر را در فرآیند خوردگی خاک دارند. ظرفیت خاک‌ها برای جذب سطحی آنیونها با افزایش قدرت اسیدی در آنها افزایش می‌یابد و در تمام مقادیر pH، یون دو ظرفیتی سولفات نسبت به یون تک ظرفیتی کلرید جذب بیشتری دارد و بر اساس نیروهای جاذبه الکتروستاتیکی نیز انتظاری جز این نمی‌رود [۱۰]. بنابراین می‌توان گفت چون در محلول خاک، یون کلرید کوچکتر و فراوان‌تر از یون سولفات است قدرت نفوذ بیشتری نسبت به یون سولفات

داشته و نقش تعیین کننده تری دارد. در خطوط لوله تحت حفاظت کاتدی، یونهای کلرید برای خنثی کردن بار ایجاد شده در آندهای کوچک سطح به آنجا مهاجرت می کنند [۱۵]. بر اساس تحقیقات انجام گرفته، این موضوع ثابت شده است که ارتباط مستقیمی بین غلظت یون کلرید و هدایت الکتریکی خاکها وجود دارد که از نتایج جدول ۲ این مطلب به وضوح مشاهده می شود. یونهای الکترون گاتیوی مانند آنیون کلرید به سطح لایه دی الکتریک نفوذ کرده و با جذب کاتیونهای  $Fe^{2+}$  تشکیل کلریدهای فلزی سنگین خورنده می دهند و این واکنش منجر به مصرف اتمهای آهن شده (تسریع واکنش آندی فلز) و سرعت خوردگی افزایش می یابد. همچنین در شرایط آلی و بی هوازی، آنیون سولفات می تواند در واکنش دپلاریزاسیون (حذف لایه محافظ) که سرعت خوردگی را از طریق فعالیت میکروبی افزایش می دهد شرکت کند [۱۶ و ۱۷]. می توان گفت از نظر غلظت آنیون کلرید، خاک A دارای قدرت خوردگی متوسط و خاکهای B، C و D دارای قدرت خوردگی ضعیف هستند و از نظر آنیون سولفات نیز خاکهای A، B و C دارای قدرت خوردگی قابل ملاحظه و خاک D دارای قدرت خوردگی متوسطی است [۱۵].

در مورد آنیونهای کربنات و بی کربنات می توان گفت آنها به دلیل اینکه لایه چسبنده ای روی سطح فلزات تشکیل می دهند موجب کاهش سرعت خوردگی شده و دخالت مستقیمی در فرآیندهای خوردگی ندارند [۱۶]. کاتیونها در هدایت الکتریکی خاکها مؤثر بوده و در مورد اعداد بدست آمده برای سدیم و پتاسیم می توان گفت با کاهش غلظت این یونها هدایت الکتریکی نیز کاهش یافته است. کاتیونها به دلیل اینکه حامل بار مثبت می باشند در واکنشهای خوردگی دخالت مستقیمی ندارند و تأثیر مستقیم آنها در pH خاک خواهد بود. یعنی خاکهایی که دارای سدیم و منیزیم زیاد باشد خاصیت قلیایی، خاکهایی که دارای کلسیم بیشتر باشند دارای pH خنثی و خاکهایی که دارای آلومینیوم فراوان باشند دارای خاصیت اسیدی خواهند بود. در خاکهایی که مقدار سدیم زیاد باشد نفوذ پذیری خاک کاهش یافته و در واقع حرکت آب در داخل بسیاری از خاکها متوقف می شود [۹]. بنابراین می توان در حالت کلی نتیجه گرفت با افزایش مقدار سدیم خاک، تراکم خاک افزایش و مقاومت ویژه کاهش می یابد. در حفاری خاک این مطلب، به عینه در مورد خاک A که دارای سدیم بیشتری است مشاهده شد، بطوریکه خاک A نسبت به خاکهای دیگر متراکم تر بود. در محیطهای قلیایی کاتیونهای کلسیم و منیزیم، تمایل به تشکیل رسوبهای اکسیدی و کربناته بر روی سطح خورده شده دارند و با تشکیل لایه محافظ سرعت خوردگی را کاهش می دهند [۱۵].

نتایج روش کاهش وزن در جدول ۳ نشان داده می شود، که کاهش وزن کوپن ها در دو مرحله به صورت معادلات ۷ و ۸ می باشد:

$$\Delta W_1 = W_0 - W_1 \quad (7)$$

$$\Delta W_2 = W_0 - W_2 \quad (8)$$

جدول ۳- نتایج آزمایش کاهش وزن

خاک	$W_0(g)$	$W_1(g)$	$\Delta W_1(g)$	$W_2(g)$	$\Delta W_2(g)$
A	۷/۴۱۲	۷/۳۷۷	۰/۰۳۵	۷/۳۳۰	۰/۰۸۲
B	۷/۶۳۲	۷/۵۹۹	۰/۰۳۳	۷/۵۵۵	۰/۰۷۷
C	۷/۵۲۵	۷/۴۹۳	۰/۰۳۲	۷/۴۵۳	۰/۰۷۲
D	۷/۴۸۶	۷/۴۷۷	۰/۰۰۹	۷/۴۶۸	۰/۰۱۸

روش محاسبه سرعت خوردگی در استاندارد ASTM- G7 به صورت معادله ۹ بیان می شود:

$$mpy = 3.46 \times 10^6 (\Delta W/d.A.T) \quad (9)$$

$\Delta W$ ، کاهش وزن فلز در معرض خوردگی بر حسب  $g$ ،  $d$  چگالی فلز بر حسب  $g/cm^3$ ،  $A$  سطح در معرض خوردگی بر حسب  $cm^2$  و  $T$  مدت زمان در معرض خوردگی بر حسب  $hr$  می باشد. نتایج محاسبات سرعت خوردگی با جاگذاری  $7/513 g/cm^3$ ،  $d = 6 cm^2$ ،  $T_1 = 47 day = 1128 hr$  و  $T_2 = 101 day = 2424 hr$  بر حسب  $mpy$ ، در جدول ۴ داده می شود:

جدول ۴- نتایج آزمایش کاهش وزن در دو مرحله زمانی

خاک	$mpy_1$	$mpy_2$
A	۲/۳۸	۲/۵۹
B	۲/۳۴	۲/۴۴
C	۲/۱۸	۲/۲۸
D	۰/۶۱	۰/۶۳

سرعتهای خوردگی در دو دوره زمانی مختلف، مطابق شکل ۳ مقایسه می شوند. از نتایج بدست آمده در یک دوره زمانی مشاهده می شود که خاک A با کمترین مقدار مقاومت ویژه، دارای حداکثر سرعت خوردگی و خاک D با بیشترین مقدار مقاومت ویژه، دارای حداقل سرعت خوردگی است و همچنین با افزایش مقدار مقاومت ویژه از خاک A تا D سرعت خوردگی رو به کاهش است. لازم به توضیح است که انتظار می رود مقدار  $mpy$  در آزمایشهای با طول مدت زمانی متفاوت تقریباً یکسان باشد. نتایج آزمایشات انجام یافته در گزارش حاضر نیز در راستای توضیحات ذکر شده است، به عبارت دیگر آزمایشات اندازه گیری  $mpy$  نشان می دهند که  $mpy$  محاسبه شده بعد از ۴۷ روز با  $mpy$  محاسبه شده بعد از ۱۰۱ روز اختلاف جزئی دارند، ولی  $mpy$  آزمایشات انجام یافته در ۱۰۱ روز همیشه قدری بیشتر از  $mpy$  آزمایشات انجام یافته در ۴۷ روز است. (به دلیل بارشهای فصلی باران) منحنی های پلاریزاسیون برای هر یک از محلولهای چهار خاک مطابق شکل ۴ رسم می شوند.

جدول ۵- پارامترهای پلاریزاسیون برای چهار نمونه خاک D.C.B.A

خاک	$E_{corr}(V)$	$R_p(\Omega)$	$\beta_a(V/dec)$	$\beta_c(V/dec)$	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$	Corr.rate (mpy)
A	-۰/۷۶۹	۲۶۱۰	۰/۱۶	۰/۱۱۱	۱۰/۹۱	۴۰/۹۵
B	-۰/۷۰۱	۳۱۲۵	۰/۱۶۴	۰/۱۱۸	۹/۵۵	۳۶/۸
C	-۰/۷۱۹	۳۳۹۰	۰/۱۹۵	۰/۱۱	۹/۰۲	۳۲/۵
D	-۰/۷۰۷	۴۲۹۲	۰/۱۵۵	۰/۱۲۶	۷/۰۴	۲۵/۶

بطوریکه از جدول ۵ مشاهده می شود، پتانسیل خوردگی فولاد کم کربن X46 در محیط A نسبت به سه محیط مورد آزمایش دیگر منفی تر واقع شده است، یعنی مقاومت فولاد کم کربن X46 در محیط A در مقابل خوردگی نسبت به سه محیط دیگر کمتر و خوردگی بیشتر است. نتایج مقاومت پلاریزاسیون نشان می دهد که مقاومت پلاریزاسیون فولاد کم کربن X46 در محیط A کمتر از سه نمونه دیگر است. همچنین مشاهده می شود با افزایش مقاومت ویژه، از خاک A تا خاک D مقاومت پلاریزاسیون افزایش می یابد. لازم به توضیح است که مقاومت پلاریزاسیون بیانگر مقاومت لایه دوگانه الکتریکی است. همچنین جدول ۵، نشان می دهند که شدت جریان خوردگی، در محیط A بیشتر از سه محیط دیگر و شدت جریان خوردگی دو محیط B و C تقریباً یکسان و شدت جریان خوردگی در محیط D کمتر از همه است. از نتایج دو نوع آزمایش کاهش وزن و آزمایش پلاریزاسیون مشاهده می شود که



نتایج هر دو آزمایش بیانگر یک موضوع هستند. به عبارت دیگر نتایج هر دو آزمایش نشان می‌دهند که خاک A با مقاومت ویژه کمتر، بیشترین خاصیت خوردگی را نسبت به خاکهای دیگر دارد.

## نتایج

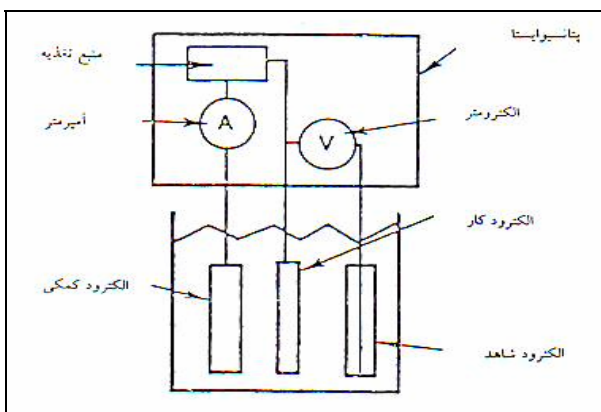
با توجه به داده‌های بدست آمده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که:

- ۱- از نتایج اندازه‌گیری آنیونهای کلرید و سولفات مشاهده می‌شود ارتباط مستقیمی بین غلظت یون کلرید و هدایت الکتریکی خاکها وجود دارد و با افزایش غلظت یون کلرید، هدایت الکتریکی افزایش و مقاومت ویژه کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، آنیونهای کربنات و بی‌کربنات در میزان خوردگی خاک دارای اثر کاهشی جزئی می‌باشند.
- ۲- با افزایش غلظت کاتیونهای سدیم و پتاسیم موجود در الکترولیت خاک، مقدار مقاومت ویژه افزایش یافته است. اما آنها به دلیل داشتن بار مثبت دخالت چندانی در فرآیندهای خوردگی نداشته و تأثیر آنها بیشتر بر روی PH است که آن نیز عامل مؤثری در تعیین قدرت خوردگی خاکها نمی‌باشد.
- ۳- به دلیل اینکه آزمایشهای کاهش وزن در شرایط واقعی و آزمایشهای پلاریزاسیون خطی در محلول حاصل از خاک انجام می‌گیرند، mpyهای حاصل از آنها تفاوت خیلی زیادی دارند اما در هر دو آزمایش با افزایش مقدار مقاومت ویژه خاک، mpy کاهش می‌یابد. همچنین نتایج هر دو آزمایش نشان می‌دهند که نمونه خاک A نسبت به نمونه خاکهای B، C و D از خاصیت خوردگی بیشتری برخوردار است.
- ۴- آزمایش کاهش وزن به دلیل اندازه‌گیری در شرایط واقعی دارای نتایج مطمئن‌تری بوده اما مدت زمان حصول نتایج بیشتر است.
- ۵- جمع بندی کلیه آزمایشات، به ویژه آزمایشات کاهش وزن و پلاریزاسیون نشان می‌دهند که مقاومت ویژه خاک یک معیار بسیار مناسب جهت اطلاع از میزان خوردگی خاک است.

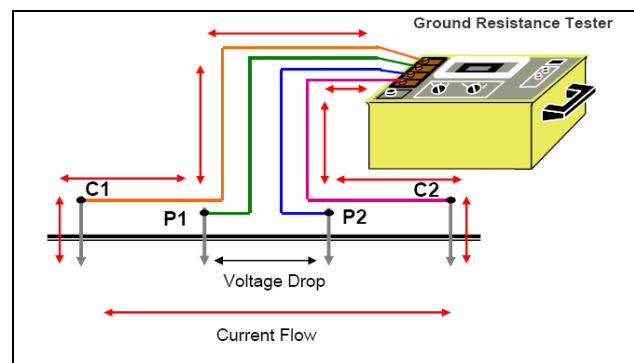
## تشکر و قدردانی

در پایان از حسن همکاری شرکت ملی گاز ایران در حمایت مالی از این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

## شکل‌ها

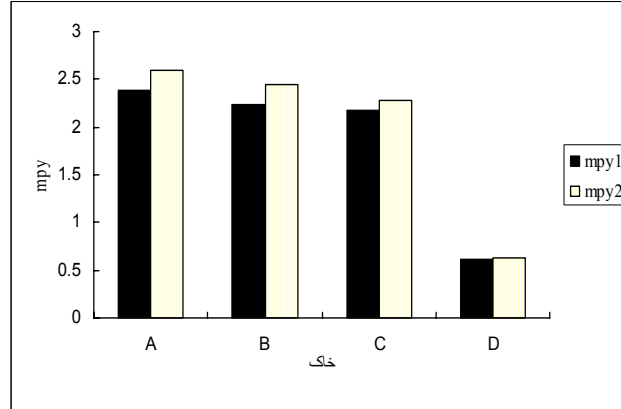


شکل ۲- سیستم سه الکتروودی بکار رفته در روش پلاریزاسیون

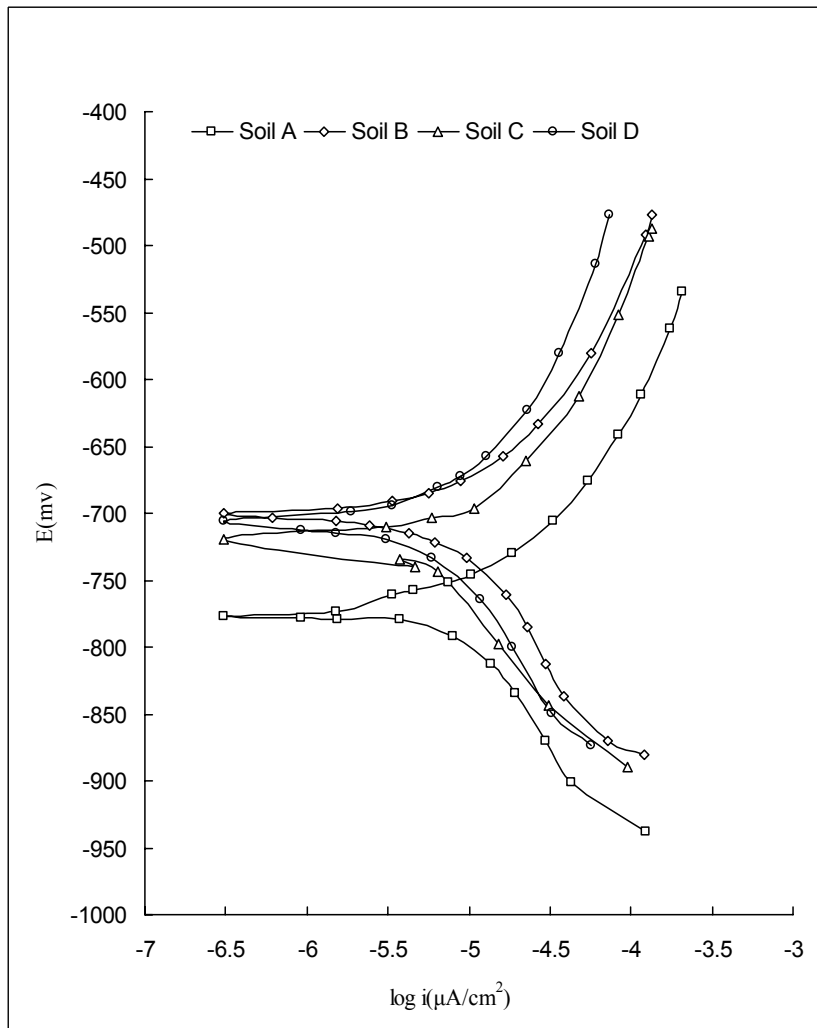


شکل ۱- آرایش چهار میله‌ای و نر





شکل ۳- مقایسه سرعتهای خوردگی در دو دوره زمانی



شکل ۴- منحنی‌های پلاریزاسیون برای چهار نمونه خاک A, B, C, D

## مراجع

- 1- S. K. Agodzo, P. Y. Okyere, K. Husi, " The use of wenner configuration to monitor soil water content " , Lecture at the college on soil physics Trieste, March, 2003.
- 2- A . Rein, R. Hoffmann, P. Dietrich, "Influence of natural time – dependent variations of electrical conductivity on DC resistivity measurements", Journal of Hydrology, Vol 285, P.P 215 – 232, 2004
- 3- R. Winton Revie, "Uhlig's Corrosion Handbook", Second Edition, John Wiley, 2000.
- 4- J . Ma, F. P. Dawalibe, "Correlation between worst case safety conditions and soil resistivity under power systems fault condition", Safe Engineering Service & Technologies Ltd, 1544 viel, Montreal, Quebec, Canada, H3 M IG4.
- 5- M. Kwiatow She, "Resistivity", CEE 8104, Geo Environmental Engineering, 2003.
- 6- M. Fukue, T. Inoue, Y. Fujimori, K. Tanabe, K. Kita, T. Chida, A. Nishihara, "Resistivity change during transport of heavy metal in sand " , Engineering Geology, Vol 85, P.P 46-52, 2006
- 7- S. Sree deep, A. C, Reshma, D. N. Singh, "Generalized relationship for determining soil electrical resistivity from its thermal resistivity", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol 29, PP 217 – 226, 2005.
- 8- A. Samouelian, I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, G. Richard , "Electrical resistiity survey in soil science : a review" , Soil & Tillage Research, Vol 83, PP 173 – 193, 2005.
- 9- A.Benmoussat, M.hadjel, "Corrosion behavior of low carbon line pipe steel in soil environment", JCSE The journal of corrosion science and environment 7, 2005
- ۱۰- بوهن، مک نیل، اوکاتر، "شیمی خاک"، ترجمه مجللی حسام ، مرکز نشر دانشگاهی تهران، ۱۳۶۶
- 11- W.Von Baeckmann, W. Schwen , W.Prinz, "Handbook of cathodic corrosion protection", Third edition, Gulf professional publishing, 1997
- ۱۲- ماتسون اینار، "مبانی تکنولوژی خوردگی"، ترجمه هورفر عسگر ، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۵
- 13- F.H.Slaoui, S.Georges, p.J.Lagace, X.D.do," The inverse problem of schlumberger resistivity sounding measurements by ridge regression" , Electric Power Systems Research 67, 2003, 109-114
- ۱۴- شاه‌آبادی رحیله، مؤثق‌نژاد فرزانه ، " واگرایی در خاک‌ها "، خبرنامه انجمن مکانیک خاک و مهندسی پی، ۱۳۸۵، شماره ۲۵
- 15- A.W.Peabody, Ronald L. Bianchetti," Control of pipeline corrosion", Second edition, Nace press, 2001
- 16- D.L.Growin, S.M.Leseh, "Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity", computers and Electronics in Agriculture 46, 2005, 135-152
- 17- Rim. Rukeh, Akpofure , Awatefe , J. Kehinde,"Investigation of soil corrosivity in the corrosion of low carbon steel pipe in soil environment", Journal of applied sciences Research,2(8),2006,466-469