

بنام خدا

جمهوری اسلامی ایران

وزارت نیرو

شرکت سهامی تولید و انتقال نیروی برق ایران
(توانیر)

معاونت تحقیقات و فن آوری
دفتر استانداردها

شماره ۶۹-۲۰۱

استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی

استاندارد روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن

تدوین کننده : شرکت احداث کنترل

تاریخ نگارش : آذر ماه ۱۳۷۹

1. $\frac{1}{x^2} = x^{-2}$

2. $\frac{1}{x^3} = x^{-3}$

3. $\frac{1}{x^4} = x^{-4}$

4. $\frac{1}{x^5} = x^{-5}$

5. $\frac{1}{x^6} = x^{-6}$

6. $\frac{1}{x^7} = x^{-7}$

7. $\frac{1}{x^8} = x^{-8}$

8. $\frac{1}{x^9} = x^{-9}$

9. $\frac{1}{x^{10}} = x^{-10}$

10. $\frac{1}{x^{11}} = x^{-11}$

پیشگفتار

استاندارد بر حسب مورد عبارتست از تعیین تمام یا برخی از خصوصیات و مشخصات هر جوهره (محصول، فرآیند، سازمان یا فرد) و اطمینان از کیفیت آن از قبیل :

کالا (Material) شامل : اجزاء تشکیل دهنده، ترکیب، مواد اولیه، جنس، منشاء، کمیت، شکل، رنگ، وضع ظاهر، وزن، ابعاد، عیار، فهرست مقادیر، نحوه استفاده، شرایط کاری، شرایط محیطی و آب و هوایی، مشخصات فنی، تواناییها، قابلیت ها، فهرست اطلاعات داده شده توسط خریدار، فهرست اطلاعات خواسته شده از سازنده، اطلاعات شرایط محیطی و آب و هوایی، بسته بندی، حمل و نقل و نگهداری

مهندسی (Engineering) شامل : معیارها، مبانی، نیازها و خواسته ها، اطلاعات مورد نیاز جهت طراحی و انتخاب، نرم افزارها، شاخصها و پارامترهای مشخص کننده طراحی، روش قدم به قدم طراحی، یک نمونه طراحی، جداول طراحی، مشخصات فنی و قابلیتها، خواص، ایمنی، بهداشت، اقتصاد، نقشه ها، طرح تفصیلی، محاسبات، دستورالعملها، راهنمای کاربردی، معیارهای طراحی، شرایط محیطی، ضرایب اطمینان

اجرائی (Construction) شامل : ساخت، نشانه و علامتگذاری، بسته بندی، حمل و نقل، نصب، فونداسیون، سازه، ساختمان، تأسیسات، راه اندازی، راهبری و بهره برداری، ابزار و وسائل خاص، فصل مشترکها، نگهداری و تعمیرات، دستور العمل نصب، ابزار مخصوص، تنظیمات

بازرسی (Inspection) شامل : کیفیت، بازرسی، آزمایش در طول ساخت، آزمایش راه اندازی، آزمایش دوره ای، ارزیابی، فرمهای کنترل کیفی، روش کنترل کیفی و تأییدها

عمومی (General) شامل : فرمها، نحوه یکنواخت کردن اوراق اداری، اسناد بازرگانی و مالی، (اولویتها، روشها، توصیه ها، تفسیرها، ملزومات، مقررات و قوانین، سیاستها، استانداردهای مورد استفاده)

ساختار (Structure) شامل : طرح و ساختار گزارش و خلاصه آن، تهیه و تدوین کنندگان منابع، مراجع و استانداردهای مورد استفاده، عناوین، هدف و دامنه کاربرد، تعاریف، متن اصلی، عبارات، جداول، ... ، نظرات و پیشنهادات، آمار و اطلاعات، اشکال، جداول منحنی ها، نقشه ها، فرمولها، نمودارها، نتیجه ، واژگان، پیوستها، سبک نگارش.

این استاندارد جهت استفاده در صنعت برق تهیه و به تصویب مقام محترم وزارت نیرو رسیده است بنابراین رعایت آن برای کلیه شرکتهای تابعه و وابسته وزارت نیرو الزامی می باشد.

این استاندارد توسط گروهی مرکب از متخصصین و کارشناسان مجرب در زمینه استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی (روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن) که دارای تجارب طولانی در صنعت برق و صنایع دیگر می باشند بر مبنای استانداردهای معتبر جهانی، مراجع منتشره عملی، مدارک فنی و تجارب کارشناسان متخصصین و صنعتگران تهیه شده و سپس بمنظور بررسی و اظهار نظر برای اشخاص ذیعلاقه و ذینفع شامل مهندسين مشاور، شرکتهای تابعه و وابسته، صاحبان صنایع و حرف و اساتید دانشگاهها، مراکز علمی و تحقیقاتی ارسال و نظرات و پیشنهادات اصلاحی آنها جمع آوری گردیده است.

و در مرحله بعدی جلساتی با حضور متخصصین و صاحب نظران فوق الذکر تشکیل و در نهایت نظرات و پیشنهادات اصلاحی مورد تأیید اعضاء جلسه در آن اعمال و بدین ترتیب این استاندارد حاصل شده است. علیرغم تلاشهای فوق الذکر هیچ وجه ادعا نمی گردد استاندارد حاضر بدون عیب و کاستی باشد لذا هرگونه نظرات اصلاحی در جهت ارتقاء کیفیت آن در تجدید نظر بعدی مورد استقبال قرار خواهد گرفت.

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۱
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاندی

شماره استاندارد	اجرا
۶۹-۴۰۱	دستور العملهای نصب و راه اندازی و بهره برداری و تعمیرات و نگهداری

شماره استاندارد	مهندسی
۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت خاک و تعیین درجه خوردگی آن
۶۹-۲۰۲	مبانی و معیارهای طراحی و انتخاب روش بهینه در نیروگاهها، پستها و خطوط انتقال نیرو
۶۹-۲۰۳	روش محاسبات طراحی و مهندسی
۶۹-۲۰۴	نقشه های اتصالات عایقی و نقشه های مربوط به piping مخازن و محل استقرار آند ها و کابل ها

شماره استاندارد	کالا + بازرسی و کنترل کیفی + مهندسی
۶۹-۱۰۱	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به ذرات ریز
۶۹-۱۰۲	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به آند مگنتایت
۶۹-۱۰۳	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به کابل ها
۶۹-۱۰۴	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به آند گرافیت
۶۹-۱۰۵	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به آند سیلیکان
۶۹-۱۰۶	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به آند روی
۶۹-۱۰۷	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به آند منیزیم
۶۹-۱۰۸	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به آند آلومینیوم
۶۹-۱۰۹	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به ترانسفورمر رکتیفایر
۶۹-۱۱۰	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به (اسپلیسینگ کیت) splicing kit
۶۹-۱۱۱	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به لاین تب (line tab)
۶۹-۱۱۲	مشخصات فنی و آزمونهای مربوط به اتصالات عایق و فلنج های عایق

فهرست مطالب		
شماره بندها	عنوان	صفحه
۱	شناخت خاک و اهمیت آن در فرآیند خوردگی	۶
۲	مقدمه	۶
۲-۱	خواص فیزیکی خاک	۶
۱-۲-۱	بافت و ساختار	۶
۲-۲-۱	مقاومت مخصوص	۸
۳-۲-۱	هوادهی و نفوذ اکسیژن	۸
۳-۱	خواص شیمیایی خاک	۹
۱-۳-۱	نمکهای محلول	۹
۲-۳-۱	آب و تغییرات حجم آن	۹
۳-۳-۱	پی اچ (pH)	۱۰
۴-۳-۱	فعالتهای میکروبیولوژیکی در خاک	۱۱
۴-۱	ارزیابی عوامل مهم فیزیکی و شیمیایی خاک	۱۱
۱-۴-۱	اندازه گیری مقاومت مخصوص	۱۱
۲-۴-۱	اندازه گیری pH	۱۶
۳-۴-۱	ارزیابی فعالتهای میکروبیولوژیکی در خاک	۱۷
۵-۱	معیار بررسی درجه خوردگی خاکها	۱۸

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۳
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

۱- هدف و دامنه کاربرد

در این استاندارد سعی شده است تا عوامل مؤثر در خوردگی خاک شناسایی و معرفی گردند و درجه تأثیر هر عامل در میزان خوردگی بیان گردد. در ضمن با توجه به اینکه یکی از مهمترین ابزار در مرحله طراحی سیستم های حفاظت کاتدی برای سازه های مدفون، داشتن اطلاعات دقیقی از میزان خوردگی خاک است. بنابر این آزمایشات و روشهای ارزیابی و اندازه گیری عوامل مهم فیزیکی و شیمیایی خاک نیز ارائه گردیده است.

۲- منابع و مراجع :

در تهیه این استاندارد از منابع و مراجع زیر استفاده شده است:

- ۱- M. Romanoff, "underground corrosion", Nat. Bur. standard, circular No. 579, (1957)
- ۲- ASTM, STP 1013, "Effects of soil characteristics on corrosion", (1984)
- ۳- BS 1377, "Methods of test for soils for civil Engineering purposes, part3, part 9, British standard institution, (1987)
- ۴- German Gas and water works Engineers, Association standard, DVGW (1971)
- ۵- W.J.Schwerdtfeger, "Soil Resistivity as Related to underground corrosion and cathodic Protection, J.Res. Nat. Bur. Stand, 69C, No.1, (1965)
- ۶- G.H Booth, A.W. Cooper, "Criteria of Soil Aggressiveness Towards Buried Metals, Brit. Corros. J. (1967).

۳- تعاریف

- باکتری احیاء کننده سولفات (Sulphate Reducing Bacteria) یا SRB :

گروهی از باکتری ها که در خاک یا آب زندگی می کنند اما تنها در شرایط غیرهوازی و pH خنثی می توانند ادامه حیات دهند. این باکتریها با احیاء یون سولفات موجود در خاک یا آب تولید یون سولفور می نمایند. یون سولفور سطح کاتدپیل حفاظتی یا سطح تحت حفاظت کاتدی را دپلاریزه نموده و سبب افزایش دانسیته جریان لازم برای حفاظت می گردد.

- پیل غلظتی اکسیژن (Oxygen Concentration Cell) :

یک نوع خوردگی که توسط اختلاف غلظت اکسیژن بر سطوح فلز حادث می گردد. معمولاً نقاطی که در تماس با خاک یا آب حاوی اکسیژن کمتر می باشند، نسبت به نقاطی که در تماس با خاک یا آب حاوی اکسیژن بیشتر هستند آندی بوده و خورده می شوند.

- غیر هوازی (Anaerobic) :

شرایط مربوط به عدم وجود اکسیژن آزاد در الکترولیت اطراف یک سازه فلزی می باشد.

- اختلاف دمش هوا (Differential Aeration) :

رسیدن هوا به طور غیر یکنواخت به قسمت های مختلف یک سازه فلزی می باشد. در اثر این پدیده در نقاطی که دسترسی هوا به سطح سازه محدودتر است خوردگی پدید می آید.

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۴
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آیین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

- الکترولیت (Electrolyte)

یک مایع ، یا جزء مایعی یک ماده کامپوزیتی همچون خاک ، که عبور جریان الکتریکی (توسط حرکت یون ها) از داخل آن امکان پذیر می باشد.

- الکترو اسمزی (Electro - Osmosis):

خاصیت عبور مایع از داخل یک ماده یا سطح متخلخل تحت تأثیر یک اختلاف پتانسیل می باشد.

- پیل زمینی (Grounding Cell)

دو الکتروود از جنس روی یا مواد قربانی شونده دیگر که توسط مواد عایق از یکدیگر جدا شده و در داخل یک ماده پشت بند با مقاومت مخصوص پائین بسته بندی شده اند.

- اسید (Acid):

موادی که غلظت یون های هیدروژن (H^+) در آن بیش از یون های هیدروکسیل (OH^-) است.

- قلیائی (Alkaline):

موادی که غلظت یون های هیدروکسیل (OH^-) در آن بیش از غلظت یون های هیدروژن (H^+) است.

- خنثی (Neutral) :

موادی که غلظت یون های هیدروژن (H^+) در آن با غلظت یون های هیدروکسیل (OH^-) مساوی باشد.

- پتانسیل احیائی - اکسیداسیون (Redox Potential) خاک :

به پتانسیلی اطلاق می شود که توسط الکتروود پلاتین نسبت به یک الکتروود مرجع کالومل احراز می گردد.

- گل (Silt):

خاکی است که اندازه قطر ذرات آن مابین $0.005 - 0.075$ میلیمتر بوده و از ته نشین شدن مواد در کف رودخانه ها مانند گل ولای و لجن بوجود می آید.

- خاک رس (Clay):

اندازه قطر ذرات این خاک بسیار کوچک و زیر 0.005 میلیمتر می باشد. این نوع خاک بسیار چسبنده بوده و در ساخت آجر بکار می رود.

- ریگ و سنگریزه (Gravel):

اندازه ذرات آن بزرگتر از 2 میلیمتر می باشد. این نوع خاک دارای نفوذ پذیری اکسیژن بالائی می باشد

- شن (Sand):

به خاک مجاور سواحل دریا و یا کویر اطلاق می شود اندازه ذرات آن مابین $0.075 - 2$ میلیمتر بوده و از شکسته شدن سنگ ها و صخره ها بوجود آمده است.

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خورندگی آن	صفحه ۵
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

- خاک باغچه یا خاک گلدان (Loam):

از خاک رس و ماسه تشکیل شده و حاوی آثار و بقایای مواد گیاهی پوسیده می باشد.

- هوادهی (Aeration):

هر چه ذرات تشکیل دهنده خاک بزرگتر باشد دارای هوادهی بیشتری می باشند.

- پی اچ (pH):

مقدار pH برابر با لگاریتم عکس غلظت یونهای هیدروژن در یک الکترولیت است.

- پلاریزاسیون کاتد (Cathode Polarization):

تشکیل لایه های محافظ و یا تجمع یون های پیچیده^(۱) در روی کاتد می باشد. پلاریزاسیون کاتد سبب سوق پتانسیل کاتد به الکترولیت به سمت مقادیر منفی تر شده و نتیجتاً سبب کاهش میزان خوردگی آن می گردد.

- دپلاریزاسیون کاتد (Cathode Depolarization):

از بین رفتن لایه های محافظ و یا پراکنده شدن یونهای پیچیده بر سطح کاتد می باشد. دپلاریزاسیون کاتد سبب سوق پتانسیل کاتد به الکترولیت به سمت مقادیر مثبت تر شده و نتیجتاً سبب افزایش خوردگی شده و یا موجب نیاز به جریان بیشتر جهت حفاظت کاتدی می گردد.

۱- شناخت خاک و اهمیت آن در فرآیند خوردگی

۱-۱- مقدمه

شناسایی خاک با مورد نظر قراردادن ماهیت پیچیده ای از ترکیب شیمیایی و نحوه اندرکنش آن با عوامل محیطی صورت می پذیرد. نمی توان دو خاک یافت که از نظر ساختار، ترکیب و نحوه عملکرد خوردگی کاملاً مشابه هم باشند. همچنین عوامل آب و هوایی مانند باران، درجه حرارت، جابجایی هوا و نور خورشید، می توانند سبب تغییراتی در خواصی از خاک شوند که آن خواص مستقیماً به شرایط وقوع خوردگی در فلزات مدفون در خاک مربوط می شوند.

۱-۲- خواص فیزیکی خاک

۱-۲-۱- بافت و ساختار

خاکها را براساس گستره اندازه ذرات آن نامگذاری و دسته بندی می کنند. به عبارت دیگر سه دسته شن^(۲)، گل و لای^(۳) و خاک رس^(۴) از روی گستره اندازه اجزاء عمده غیرآلی خود نام گرفته اند. ذرات دارای قطر متوسط بین ۰/۰۷ تا ۲ میلیمتر به نام شن، ذرات دارای قطر متوسط ۰/۰۵ تا ۰/۰۷ میلیمتر به نام گل و لای، و ذرات دارای قطر متوسط ۰/۰۰۵ میلیمتر و کوچکتر (تا حد مواد کلونیدی) به نام خاک رس نامیده و دسته بندی می شوند. نسبت هر یک از سه دسته فوق می تواند بسیاری از خواص خاک را معین کند. سیستمهای متعددی برای دسته بندی خاک از جهت بافت به کار رفته اند. یکی از آنها که در شکل (۱) نشان داده شده، براساس نسبتهای متفاوت از شن، گل و لای و خاک رس می باشد.

(۱) Complex	(۲) Sand	(۳) Silt	(۴) Clay
شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن		صفحه ۶
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی		تاریخ: آذر ۱۳۷۹

مقاومت مخصوص خاک، میزان توانائی خاک را از نظر هدایت الکتریکی بیان می کند. به عبارت دیگر این عامل نشان می دهد که رفتار خاک به عنوان الکترولیت چگونه است. برای مثال هر چه مقاومت مخصوص خاکی پایین تر باشد، آن خاک الکترولیت قوی تری بوده و احتمال خوردگی در آن بیشتر است. مقاومت مخصوص خاک تابع رطوبت خاک و غلظت یونهای محلول در خاک می باشد. مقدار مقاومت مخصوص محیطهای مختلف متفاوت بوده و واحد اندازه گیری آن اهم - سانتیمتر می باشد. مثلاً آب دریا دارای مقاومت مخصوص ۳۰ اهم - سانتیمتر است، در حالیکه شن های خشک دارای مقاومت مخصوص بالاتر از ۱۰۰۰۰۰ اهم - سانتیمتر هستند. امروزه در بیشتر استانداردها پذیرفته شده است که خاک دارای مقاومت مخصوص کمتر از ۱۰۰۰ اهم - سانتیمتر بشدت خورنده است. همچنین در مواردی گفته شده است که سازه هایی که در خاک دارای مقاومت مخصوص بالاتر از ۱۰۰۰۰۰ اهم - سانتیمتر قرار دارند، نیاز به حفاظت از خوردگی ندارند. البته این مطلب به سالهای دهه ۱۹۴۰ میلادی بر می گردد. در آن سالها مشخص گردید که در خاکهای با مقاومت مخصوص بالاتر از ۱۰۰۰۰۰ اهم - سانتیمتر سرعت خوردگی لوله های فولادی به اندازه کافی کند است، بطوریکه در این نوع خاکها هزینه تعمیرات خطوط لوله آسیب دیده بمراتب کمتر از هزینه حفاظت آنها در برابر خوردگی می باشد.

البته این نکته قابل ذکر است که براساس بیشتر استانداردها، در صورتی که خاک دارای فعالیت شدید خوردگی میکروبیولوژیکی نباشد، مقاومت مخصوص خاک عمده ترین عامل کنترل کننده خوردگی می باشد. میزان رطوبت خاک بطور قابل ملاحظه ای بر روی مقاومت مخصوص خاک اثر می گذارد. با افزایش رطوبت خاک تا حد اشباع، مقاومت مخصوص خاک کاهش می یابد. برای مثال، یک نمونه خاک رس با حدود ۵٪ رطوبت میتواند دارای مقاومت مخصوص حدود ۱۰۰۰۰۰۰ اهم - سانتیمتر باشد. اگر رطوبت این خاک به حدود ۲۰٪ برسد، مقاومت مخصوص آن به ۷۰۰۰ اهم - سانتیمتر کاهش خواهد یافت. این مطلب بیانگر آن است که شدت خوردگی در مواقع بارانی بشدت افزایش می یابد و به همین دلیل اندازه گیری مقاومت مخصوص در مواقعی که خاک بطور غیرعادی خشک است، نتیجه صحیحی نخواهد داد.

تغییرات دما تا حد نقطه انجماد تأثیر قابل ملاحظه ای بر مقاومت مخصوص خاک ندارد. در دماهای پایین تر از نقطه انجماد، مقاومت مخصوص خاک بشدت افزایش می یابد. بنابر این در مواقعی که زمین تا عمق زیاد منجمد است، مقاومت مخصوص خاک نباید اندازه گیری شود.

۱-۲-۳- هوادهی و نفوذ اکسیژن

فضای منافذ خاک ممکن است بوسیله آب یا گازها پر شده باشد. بنابراین هوادهی خاک مستقیماً به مقدار منافذ موجود و میزان آب موجود در خاک مربوط می شود. خاکهای دارای بافت ریز به دلیل میزان بالای خاک رس دارای ذرات بسیار متراکم بوده و لذا نسبت به یک خاک دارای ذرات درشت تر، مقدار منافذ کمی برای نفوذ گازی دارند. میزان اکسیژن خاک از نظر خوردگی اهمیت خاصی دارد. بطور کلی فرض می شود که گازهای لایه های بالاتر خاک از نظر ترکیب شیمیایی مشابه با اتمسفر بالای خاک هستند، اما میزان دی اکسید کربن بیشتری دارند. یک مهندس خوردگی علاقمند به دانستن میزان اکسیژن در اعماق خاک است اما در این مورد اطلاعات نسبتاً کمی در دسترس وجود دارد. با این وجود، با دانستن این واقعیت که ریشه گیاهان نیاز به اکسیژن دارد، می توان فرض کرد که در اعماق ۶ متر یا بیشتر، مقدار اکسیژن قابل توجه باشد.

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۸
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

نفوذ گازها در درون خاک در اثر تعدادی از عوامل آب و هوایی افزایش می یابد. تغییر درجه حرارت از روز تا شب سبب انبساط و انقباض گازهای سطح خاک می گردد. تغییر فشار هوا نیز دارای اثر شبه دمشی بر نفوذ گازی است. فعالیتهای بیولوژیکی در خاک، به کاهش میزان اکسیژن و جایگزین شدن آن با گازهای حاصل از فعالیت متابولیکی مانند دی اکسید کربن منجر می شود. بیشتر فعالیتهای بیولوژیکی در ضخامت ۱۵۰ میلیمتری بالایی خاک روی می دهند و به همین دلیل است که در این ناحیه نفوذ بسیار سریع می باشد. عواملی که منجر به بقاء و ادامه حیات میکروبها شوند، مانند افزایش مقادیر زیادی از مواد آلی تجزیه شده، یا عواملی که نرخ نفوذ را کاهش دهند (اشباع شدن بوسیله آب)، شرایط خاک را به سمت غیرهوازی سوق می دهند.

۱-۳- خواص شیمیایی خاک

۱-۳-۱- نمکهای محلول

آب درون خاک به عنوان حلال نمکهای خاک بحساب آمده و حاصل آن، محلول خاک نامیده می شود. در آب و هوای معتدل و نواحی بارانی معتدل، محلول خاک نسبتاً رقیق است و میزان کل نمکهای محلول آن در گستره ppm ۸۰-۱۵۰۰ می باشد. نواحی پر باران غلظتهای کمتری از نمکهای محلول را نشان می دهند که علت آن نیز شسته شدن نمکها از خاک می باشد. برعکس، خاکهای نواحی خشک معمولاً نمک زیادی دارند، چون همراه با حرکت آب به سمت لایه های سطحی خاک که در اثر تبخیر سطحی صورت می گیرد، این نمکها نیز به لایه های سطحی حمل می شوند. بطور کلی پتاسیم، سدیم، منیزیم و کلسیم، معمول ترین کاتیونهای موجود در خاک هستند. خاکهای قلیایی، پتاسیم و سدیم بالایی دارند و خاکهای آهکی بطور برجسته ای حاوی منیزیم و کلسیم هستند. عناصر قلیایی خاکی یعنی کلسیم و منیزیم، در شرایط غیر اسیدی تمایل به تشکیل اکسیدها و کربناتهای نامحلول دارند. این رسوبهای نامحلول ممکن است یک لایه محافظ بر روی سطح فلز ایجاد کرده و فعالیت خوردگی را کاهش دهند. ذرات آنیونی محلول در خاک نیز همانند کاتیونها نقش مهمی را ایفا می کنند. آنیونها مشابه آنچه برای کاتیونها مطرح شد، در هدایت الکتریکی خاک و رفتار پیل غلظتی مؤثر هستند و علاوه بر این، با کاتیونهای فلز واکنش داده و نمکهای نامحلول تشکیل می دهند. برای مثال اگر فلز مورد نظر سرب و آنیون ممتاز سولفات باشد، لایه نامحلولی از جنس سولفات سرب می تواند روی سطح فلز رسوب کرده و بطور مؤثر در برابر زوال بیشتر فلز ممانعت بعمل آورد. ارتباط مهم دیگر بین نمکهای خاک و خوردگی، به فعالیتهای بیولوژیکی بر می گردد. از آنجا که رشد گیاهان و میکرو ارگانیسمها به مقدار مواد معدنی مناسب بستگی دارد، فعالیت آنها با میزان مواد معدنی خاک تغییر می کند. مثلاً می توان به نقش مواد مختلفی همچون نیتروژن، گوگرد و سولفات در رشد باکتریها و تأثیر آنها در خوردگی اشاره نمود.

مقدار نمکهای خاک ممکن است در نتیجه فعالیتهای انسان بطور محسوسی تغییر کند. استفاده از کود، مواد شیمیایی زیادی به خاک می افزاید. پسماندهای صنعتی، آبهای شور حاصل از فرآیندهای نفتی، استفاده از مواد ضد یخ در معابر و جاده ها، نمکهای کشنده علفهای هرز و نمونه های زیاد دیگری را می توان به عنوان مثالهایی از تغییر دهنده های شرایط محلول خاک ذکر نمود. در نواحی جزر و مدی یا در خاکهای نزدیک رسوبات نمکی زیاد، در اثر جاری شدن آب های شور یا آب دریایی پر نمک به درون خاکها خوردگی سازه های فولادی مدفون در زمین افزایش می یابد.

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۹
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

۱-۳-۲- آب و تغییرات حجم آن

در خاک کاملاً خشک، خوردگی رخ نمی دهد. در خاک، برای یونیزه کردن ترکیبات و نمکهای موجود بر سطح فلز، وجود آب ضروری می باشد. آب همچنین برای یونیزه کردن نمکهای موجود در خاک لازم است. بنابر این آب در خاک به عنوان مهمترین عامل کامل کننده مدار برای عبور جریان خوردگی محسوب می گردد. آب، علاوه بر شرکت داشتن در تمام فرآیندهای پایه ای خوردگی، بر اکثر عوامل مؤثر در خوردگی خاک نیز نقش تعیین کننده دارد. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، حجم آب درون خاک با میزان هوادهی خاک (غلظت اکسیژن) نسبت عکس دارد. هر چه خاک خشکتر باشد، شرایط به سمت حالت هوازی تر و سرعت نفوذ بیشتر برای اکسیژن میل می نماید. تغییر به صورت تر و خشک شدن یا غیر هوازی و هوازی شدن، بطور موقتی یا فاصله دار، منجر به بالا رفتن سرعت خوردگی نسبت به یک محیط ثابت می شود. همین نوسان در مقدار آب و اکسیژن باعث بیشتر شدن تغییرات در فعالیتهای بیولوژیکی درون خاک نیز می شود.

۱-۳-۳- pH

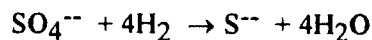
اندازه گیری pH خاک بیشتر برای مشخص کردن شرایط غیرعادی خاک بوده و در اکثر موارد برای تشخیص خاکهای غیر متشابه از یکدیگر بسیار مفید می باشد. تقریباً مقدار pH تمام خاکها و آب های زمینی در بین محدوده ۳/۵-۱۰ تغییر می کند. اکثر این محیط ها دارای pH بین ۶/۵-۷/۵ هستند که به آنها محیط های خنثی گویند. تعدادی از خاک ها قلیائی بوده و دارای pH بین ۷/۵-۱۰ می باشند. در ضمن خاک های اسیدی با pH بین ۳/۵-۶/۵ نیز موجود می باشند. با توجه به میزان حل شوندگی آلودگیها در باران و وجود باران های اسیدی، اکثر خاک ها تمایل به اسیدی شدن دارند اما بطور خیلی استثنائی pH آنها کمتر از ۳/۵ می شود، مگر آنکه خاک در یک محیط شدیداً صنعتی قرار داشته باشد. اگر چه رابطه بینابینی بین pH و دیگر عوامل موجود در خاک که بر روی خوردگی خطوط لوله مدفون مؤثر می باشند هنوز دقیقاً مشخص نشده است، اما عنوان این مطلب منطقی به نظر می رسد که با کاهش pH خاک، میزان خوردگی در خاک افزایش می یابد، زیرا مشاهده گردیده که با ثابت بودن مقاومت مخصوص خاک، کاهش pH خاک باعث افزایش سرعت خوردگی خطوط لوله فولادی شده است. البته این اثر در مورد خاک های اسیدی بیشتر از خاک های قلیائی صادق است. برای مثال سرعت خوردگی خطوط لوله فولادی در خاک های قلیائی بیشتر توسط تغییرات مقاومت مخصوص خاک ها تحت تأثیر می باشد و تغییرات pH در این مورد تأثیر چندانی ندارد. اما سرعت خوردگی در خاک های اسیدی توسط هر دو عامل مقاومت مخصوص و pH تحت تأثیر می باشد.

همانطور که قبلاً گفته شد، با کاهش مقادیر pH خوردگی خاک های اسیدی نسبت به فولاد افزایش می یابد. این مطلب از آن جهت قابل درک بوده که در محیط های اسیدی، دی پولاریزاسیون هیدروژن با سرعتی قابل ملاحظه در کاتد انجام می پذیرد و از آنجا که خوردگی اکثر خطوط لوله فولادی زیر زمینی بصورت کاتدی کنترل می شود (یعنی آنکه پولاریزاسیون در کاتد پیل های خوردگی جریان خوردگی را کنترل می کند)، بنابراین می توان انتظار داشت که دی پولاریزاسیون کاتدی فرآیند خوردگی را بطور قابل ملاحظه و بویژه برای محیط هائی با pH کمتر از ۴ ترغیب کند.

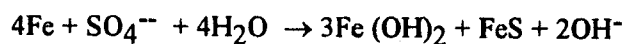
شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۱۰
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

۴-۳-۱- فعالیتهای میکروبیولوژی در خاک

خاک رس اشباع از آب، گل های ته رودخانه، یا محیط های دیگر حاوی اکسیژن کم یا بدون اکسیژن در صورتیکه در آنها باکتری های غیرهوازی فعالیت داشته باشند، نسبت به فولاد بسیار خورنده و مهاجم خواهند بود. باکتریهائی که بطور معمول در این محیط ها فعالیت دارند، باکتری های احیاء کننده سولفات هستند. اصولاً، متابولیسم این باکتری ها بصورتی است که هیدروژن مصرف کرده و در عین حال سولفات را برطبق واکنش زیر به سولفید احیاء می کنند:



یکی از محصولات این واکنش، سولفید هیدروژن می باشد. سولفید هیدروژن با فولاد یا یون های فرو وارد واکنش شده که در نتیجه آن، ترکیب سیاهرنگ سولفید آهن حاصل می گردد. در مجموع می توان بطور تئوری چنین تحلیل نمود که خوردگی در محیط های غیرهوازی براساس واکنش کلی زیر صورت می پذیرد:



صرفنظر از اینکه بطور دقیق چه واکنشی رخ می دهد، می توان چنین استنباط کرد که در اثر این فرآیند خوردگی، هیدروژن مصرف شده و سولفید آهن حاصل می گردد.

خوردگی شدید فولاد توسط باکتری های احیاء سولفات با دو مکانیزم زیر انجام می شود:

۱- مصرف هیدروژن پولاریزه کننده کاتد توسط باکتری ها

۲- تولید سولفید آهن

مصرف هیدروژن از طریق کاهش عوامل پولاریزه کننده کاتد سبب افزایش سرعت خوردگی می شود. تشکیل سولفید آهن از طریق افزایش خوردگی محیط باعث افزایش سرعت خوردگی می شود (قابل ذکر است که سولفید آهن حاصل از فعل و انفعالات باکتری ها نسبت به آهن بسیار خورنده است). در ضمن، هنگامیکه سولفید آهن در تماس با فولاد قرار گیرد، تشکیل یک پیل خوردگی می دهد که در آن، سولفید آهن بمنزله یک کاتد مؤثر عمل می کند. باکتری های احیاء کننده سولفات تا زمانیکه محیط غیرهوازی بوده و دارای رطوبت و همچنین مواد غذایی برای رشد باکتری ها باشد، رشد کرده و تکثیر می شوند. اگر چه باکتری ها بطور معمول از مواد آلی موجود در محیط تغذیه می کنند ولی گزارش شده که آنها همچنین از مواد پوشش های بکار رفته بر سازه های فولادی نیز بعنوان مواد غذایی استفاده می کنند. موادی چون آسفالت، انواع نوارهای چسبنده پلیمری و نمدی، بعضی از انواع چسب ها و مواد پر کننده بکار رفته در چسب ها و رنگ ها می توانند بعنوان مواد غذایی مورد استفاده باکتری ها بحساب آیند. شرائطی که باعث رشد و تکثیر باکتری ها می شود عبارت از درجه حرارت بین ۲۴-۳۵ درجه سانتی گراد و pH بین ۵/۵-۸/۵ می باشد.

۴-۱- ارزیابی عوامل مهم فیزیکی و شیمیایی

۴-۱-۱- اندازه گیری مقاومت مخصوص

مهندسان خوردگی از دو روش برای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و آب استفاده می نمایند. روش اول به نام "محفظه خاک" معروف است که در آن، نمونه کوچکی از خاک یا آب برای سنجش مقاومت به کار می رود و روش دوم روش "آزمایش در محل" است که در آن، یک مقدار متوسط برای نمونه ای بزرگ به دست می آید، بدون اینکه نمونه از محل طبیعی خود جدا شود. به هر حال در هر دو روش، کمیت اندازه گیری شونده مقاومت^(۱) است. سپس مقدار مقاومت مخصوص^(۲) از روی یک رابطه که به هندسه و ابعاد اجزاء آزمایش بستگی دارد، محاسبه می گردد.

(۱) Resistance

(۲) Resistivity

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۱۱
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

ساده ترین نوع محفظه خاک که در شکل (۲) نشان داده شده است، محفظه ای است به شکل مکعب مستطیل که سطح بالایی آن باز می باشد. جنس محفظه از ماده ای غیرهادی و معمولاً پلاستیک بوده، اما دو سطح جانبی مقابل آن از جنس فلز می باشد. این محفظه بطور کامل با خاک (یا آب) پر شده و مقاومت بین دو انتهای فلزی اندازه گیری می شود. سپس از روی رابطه مقاومت، یعنی:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

مقدار مقاومت مخصوص به صورت زیر استخراج می گردد:

$$\rho = R \frac{WD}{L}$$

که در آن، W و D و L ابعاد محفظه بوده و برای هر محفظه ثابت می باشند، بر این اساس، رابطه بالا به شکل زیر ساده می شود:

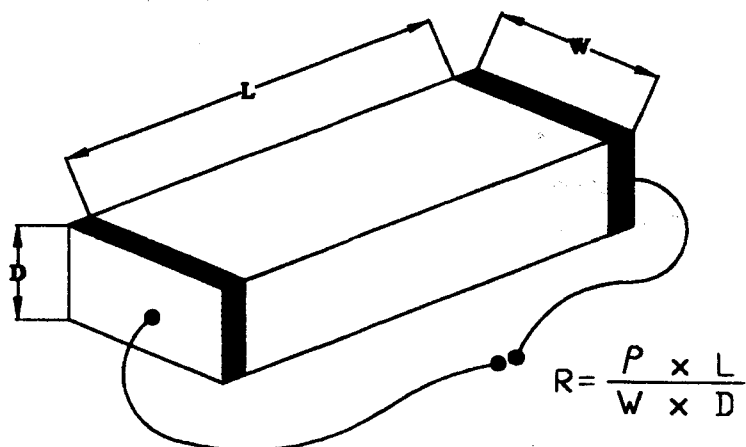
$$\rho = RC$$

در اینصورت، C را "ثابت محفظه" نامیده و بسته به کاربرد مورد نظر، اعداد مناسب و گرد شده ای مانند ۱، ۱۰ یا ۰/۱ به جای C جایگزین می شود.

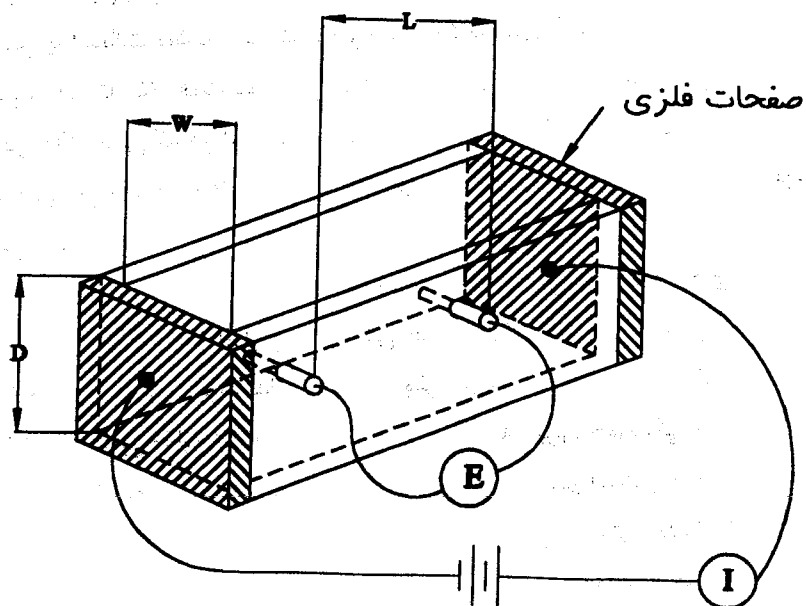
عیب محفظه این است که دو فلز انتهایی آن ممکن است پتانسیلی ایجاد کنند که بتواند در اندازه گیری تداخل نماید. حتی اگر از ابتدا دو فلز یکسان باشند، خود خاک ممکن است کاملاً یکنواخت نباشد. حتی اگر خاک و الکترودها کاملاً یکنواخت باشند، عبور جریان لازم برای اندازه گیری ممکن است سبب ایجاد پولاریزاسیون در یکی از الکترودها شود. به منظور پرهیز از این مشکلات، مرسوم است که از جریان متناوب برای این آزمایشات استفاده شود. یکی از جدی ترین مشکلات این محفظه آن است که مقاومت سیمهای ارتباطی و اتصالات به نتایج فوق افزوده شده و ایجاد خطا خواهد کرد. شکل (۳) نوع بسیار پیشرفته ای از محفظه خاک را نشان می دهد که به منظور برطرف کردن این مشکلات طراحی شده است. این نوع نیز همانند محفظه ساده تر، دو صفحه انتهایی فلزی دارد اما علاوه بر آن، دارای دو میله است که از یکی دیگر از سطوح جانبی وارد گردیده است. معمولاً این دو میله را پس از انباشتن خاک به درون محفظه فرو می کنند تا پر کردن و تمیز کردن محفظه آسانتر باشد. در این حالت صرفاً مقاومت ستون خاک بین این دو میله اندازه گیری می شود. جریان توسط دو صفحه انتهایی اعمال و پتانسیل بین دو میله اندازه گیری می شود. این دو مقدار، جداگانه اندازه گیری شده و نسبت آنها ($R = \frac{E}{I}$) به عنوان مقاومت در همان رابطه محفظه ساده فوق الذکر استفاده می گردد. مجدداً مقتضی است که جریان متناوب به کار رود، اگر چه با بکارگیری تجهیزات ساده تر با جریان مستقیم نیز می توان نتایج مطلوب به دست آورد.

عیب روش محفظه خاک این است که رسیدن به یک ایده صحیح از مقاومت مخصوص در طول یک خط لوله، کار چندان ساده ای نیست، زیرا این روش نیاز به صدها نمونه برداری دارد. این نمونه ها را می توان در محل مورد سنجش قرار داد یا اینکه لازم است آنها را پس از بسته بندی و نشانه گذاری به آزمایشگاه برده و اندازه گیری نمود. سپس همه قرائتها را جدول بندی کرده و منحنی نتایج حاصله را نسبت به طول خط لوله رسم نمود. مشکل اصلی در این است که نمونه ها خیلی کوچک هستند. وانگهی، بجز وقتی که زمین حفر شود، خاک نمونه برداری شده نمی تواند نمونه ای واقعی از خاک در عمق مربوط به خط لوله باشد. در ضمن، وقتی الکترولیت مورد آزمایش آب باشد، اندازه گیری به روش محفظه خاک غالباً بهترین راه است اما برای خاکها معمولاً از روش دیگری استفاده می شود.

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۱۲
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹



شکل (۲) - نمایی از محفظه خاک که در آن از عوامل مربوط به حجم معینی از خاک استفاده می شود.



شکل (۳) - نمایی از مدار محفظه خاک پیشرفته که نتایج دقیق تری را ارائه میدهد.

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۱۳
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

در سال ۱۹۱۶، ونر^(۱) نشان داد که مقاومت مخصوص حجمی از خاک را می توان با قراردادن چهار میله در داخل خاک در امتداد یک خط مستقیم و در فواصل مساوی اندازه گیری نمود (شکل ۴). بدین صورت که یک جریان مستقیم با مقدار مشخص بین دو میله بیرونی اعمال نموده و سپس افت ولتاژ بین دو میله درونی اندازه گیری می شود. بدین ترتیب مقاومت خاک با بهره گیری از متد ونر و استفاده از قانون اهم به دست می آید. سپس می توان مقاومت مخصوص را بوسیله رابطه زیر و برحسب اهم - سانتیمتر، محاسبه نمود:

$$\rho = 191/5 \text{ RL}$$

در رابطه فوق، L فاصله بین میله ها برحسب فوت و R مقاومت خاک برحسب اهم می باشد. این روش به متد چهار میله ای ونر^(۲) معروف است. این روش در واقع رایج ترین راه اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک است. با استفاده از این روش می توان بطور متوسط مقاومت مخصوص خاک را تا عمقی معادل با فاصله میله ها اندازه گیری کرد. از آنجا که مقاومت مخصوص خاک با عمق خاک تغییر می کند (شکل ۵)، بنابر این معمولاً توصیه می شود مقاومت الکتریکی با فواصل مختلف میله ها (مثلاً ۵، ۱۰، ۲۰ فوت) اندازه گیری گردد. بدین ترتیب می توان مقاومت مخصوص خاک را در عمق مورد نظر تخمین زد.

وقتیکه مقاومت مخصوص خاک نسبت به عمق تغییرات عمده ای داشته باشد، حتی استفاده از روش ونر با فواصل زیاد میله ها نیز نمی تواند اندازه گیری دقیقی را ارائه نماید. برای مثال شن های خشک در کنار ساحل های شنی دارای مقاومت مخصوص حدود ۱۰۰۰۰۰۰ اهم - سانتیمتر است، حال آنکه خاک اشباع از آب دریا در اطراف خط لوله مدفون در این مناطق می تواند دارای مقاومت مخصوص ۵۰ اهم - سانتیمتر باشد. در این شرایط اگر از روش ونر استفاده شود، حتی برای حالتی که فاصله بین میله ها بیش از عمق دفن لوله ها باشد، مقاومت مخصوص متوسط خاک خیلی بیشتر از ۵۰ اهم - سانتیمتر می شود. برای مثال اگر در این حالت مقاومت مخصوص متوسط اندازه گیری شده ۱۵۰۰۰ اهم - سانتیمتر شود، ممکن است اشتباهاً نتیجه گرفته شود که این خاک یک الکترولیت ضعیف بوده و در آن نیاز به اعمال روشهای حفاظتی نمی باشد و این یکی از محدودیت های استفاده از روش ونر است. استفاده از روش ونر، همچنین در مواردیکه خاک توسط بتن یا آسفالت پوشیده می شود نیز بسیار مشکل می باشد، در ضمن اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک در فواصلی حدود ۵۰ تا ۷۵ فوت دورتر از سازه زیرزمینی منجر به اندازه گیری های غیرواقعی می شود. هنگامیکه از روش ونر در خاک هایی که در آن تعداد زیادی خطوط لوله مدفون هستند استفاده می شود، باید توجه شود که حتماً میله ها بطور عمود بر خطوط لوله قرار گیرند. زیرا قرار گرفتن میله ها بطور موازی با خطوط لوله باعث بوجود آمدن ارقام غیرواقعی می شود.

در ضمن باید توجه کرد که محل دفن خطوط لوله، محل تجمع موضعی آب ها و آلودگی های سطحی همچون نمکهای ضد یخ جاده ها می باشد که این امر باعث افزایش خوردگی خاک می گردد. از آنجا که این تغییرات در مقاومت الکتریکی خاک اغلب بصورت موضعی صورت می گیرد، لذا استفاده از روش ونر برای ارزیابی این تغییرات منجر به نتایج دقیق نخواهد شد. علاوه بر آنکه با ارزیابی مقاومت مخصوص خاک می توان به میزان خوردگی خاک پی برد، این ارزیابی برای طراحی سیستم های حفاظت کاتدی نیز مفید می باشد. برای مثال در سیستم آندهای فدا شونده از اندازه گیری مقاومت مخصوص برای تعیین جریان خروجی (آندها، تعیین تعداد آندها و محل قرار گرفتن آندها) استفاده می شود. در سیستم حفاظت کاتدی با یکسو کننده نیز برای محاسبه مقاومت بستر آند و همچنین تعیین محلی که مقاومت مخصوص خاک کم و برای بستر آندی مناسب باشند نیز استفاده می شود. رابطه بین مقاومت مخصوص خاک و میزان خوردگی خاک در جدول (۱) ارائه شده است.

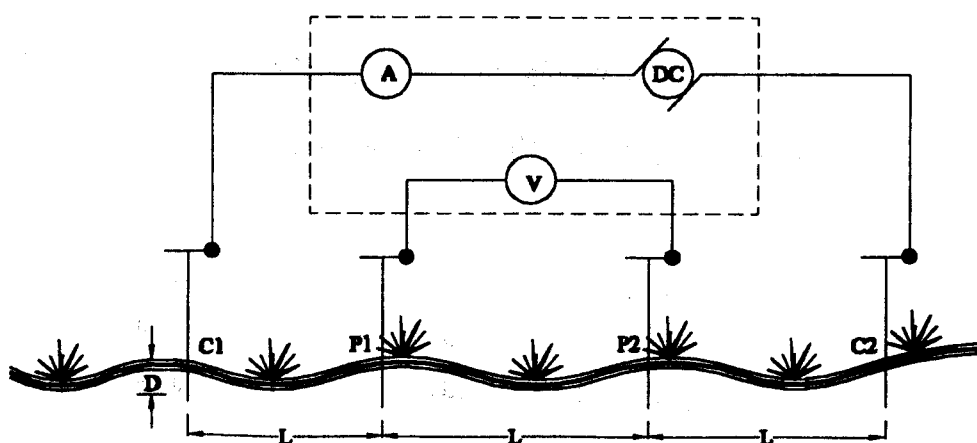
(۱) Wenner

(۲) Wenner Four - Pin Technique

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۱۴
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

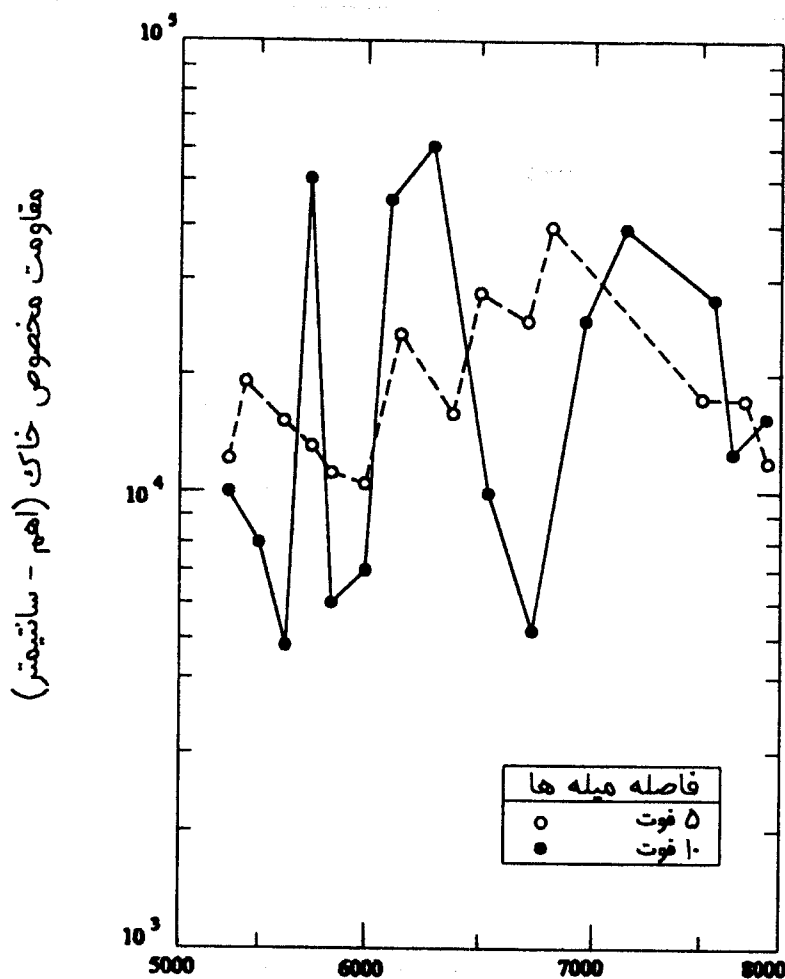
جدول (۱) - رابطه بین مقاومت مخصوص خاک و میزان خوردگی خاک

مقاومت مخصوص، اهم - سانتیمتر	خوردگی خاک
۰ - ۱۰۰۰	شدیداََ خورنده
۱۰۰۰ - ۱۰۰۰۰	خورنده
۱۰۰۰۰ - ۱۰۰۰۰۰	با خوردگی متوسط
> ۱۰۰۰۰۰	با خوردگی بسیار کم



شکل (۴) : روش چهار میله ای و نر برای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۱۵
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹



مسافت در امتداد خط لوله (فوت)

شکل (۵): ارزیابی مقاومت مخصوص خاک با استفاده از روش چهار میله ای و نر

۱-۴-۲- اندازه گیری pH

برای ارزیابی pH محیط اطراف خطوط لوله و در امتداد آنها از چندین روش استفاده می شود. یکی از روش های قابل قبول، اندازه گیری pH آب های زمینی درنواحی مورد نظر می باشد. در صورتیکه به آب های زمینی دسترسی نباشد، می توان با حل کردن یک حجم از خاک با یک حجم آب مقطر محلولی تهیه کرده و سپس pH آن را اندازه گیری نمود. البته در صورتیکه درصد مواد آلی در خاک بالا باشد، بهتر است یک حجم از خاک را در پنج حجم آب مقطر حل کرد. در مواردی که محلول شفاف نبوده و یا فیلتر شده باشد، باید مقدار pH را از طریق روش های الکترومتریک اندازه گیری کرد. کدر بودن بیش از حد محلول آب و خاک بر روی روش های مرسوم کالرمتریک اندازه گیری pH تأثیر می گذارد. برای تعیین pH خاک در محل می توان از روش اندازه گیری پتانسیل بین الکتروود آنتیموان و الکتروود مرجع مس-سولفات مس استفاده کرد. بهنگام استفاده از این روش باید سطح الکتروود آنتیموان را که در تماس با خاک است، قبل از بکارگیری کاملاً تمیز نمود.

مقدار pH خاک با استفاده از این روش، از رابطه زیر بدست می آید:

$$pH = \frac{1}{54} E_{sb} - \frac{1}{18}$$

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۱۶
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

در رابطه فوق E_{sh} عبارت از پتانسیل بین الکتروود آنتیموان و الکتروود مس - سولفات مس بوده و برحسب میلی ولت اندازه گیری می شود.

pH خاک یا باید در محل اندازه گیری شود و یا بمحض آنکه خاک از زمین برداشته شد، سریعاً مورد ارزیابی pH قرار گیرد. این نکته قابل تأکید است که pH بتنهایی برای ارزیابی خوردگی خاک بر روی خطوط لوله فولادی زیرزمینی کافی نیست.

۱-۴-۳- ارزیابی فعالیتهای میکروبیولوژیکی در خاک

یک روش کیفی ساده برای ارزیابی و اطلاع از فعالیت باکتری های احیاء کننده سولفات در محل وجود دارد. براساس این روش با ریختن چند قطره اسید کلریدریک بر روی تولیدات حاصل از خوردگی می توان بوجود این باکتری ها پی برد. بدین صورت که اگر در اثر ریختن اسید کلریدریک بوی سولفید هیدروژن (بویی شبیه بوی تخم مرغ گندیده) بوجود آید، می توان نتیجه گیری کرد که اثرات میکروبیولوژیکی در فرآیند خوردگی موجود می باشد.

روش دیگر برای اطلاع از فعالیت میکروبیولوژیکی خاک، اندازه گیری پتانسیل احیاء - اکسیداسیون یا پتانسیل رداکس^(۱) محیط می باشد. برای انجام این کار باید پرب موسوم به پرب رداکس را در خاکی که تازه کنده شده و در عمقی که خط لوله دفن شده است قرار داده و سپس پتانسیل بین سطح الکتروود پلاتین تمیز و الکتروود مرجع کالومل اشباع را اندازه گیری کرد. پتانسیل رداکس برای یک محیط از طریق انجام تصحیحات لازم و تبدیل آن به واحد الکتروود هیدروژن استاندارد بدست می آید. پتانسیل رداکس پس از انجام این عملیات و برحسب ولت از رابطه زیر بدست می آید:

$$E_H = E_p + 0.250 + 0.06(pH - 7) \text{ میلی ولت}$$

در این رابطه E_H عبارت از پتانسیل رداکس و E_p عبارت از پتانسیل پرب و pH نیز عبارت از pH واقعی محیط است. پتانسیل رداکس و اطلاعات عملی که بیانگر چگونگی فعالیت باکتری های غیرهوازی در خاک می باشد در جدول (۲) ارائه شده است.

اندازه گیری پتانسیل رداکس بطور غیر معمول وقت گیر است و اغلب حدود نیم ساعت یا بیشتر نیاز است تا بتوان یک پتانسیل پرب پایدار بدست آورد. همچنین بدست آوردن اطلاعات و نتایج قابل تکرار^(۲) نیز دشوار است. شایان ذکر است که استفاده از این روش بیشتر برای محیط هایی که مشکوک به وجود فعالیت شدید باکتری های غیرهوازی هستند، مناسب تر می باشد.

باکتری های غیرهوازی احیاء سولفات تنها عوامل موجود در خاک نیستند که باعث خوردگی در خطوط لوله فولادی مدفون در زمین می شوند. باکتری های اکسید کننده گوگرد^(۳) می توانند در محیط های هوا دهی شده مانند کامپوستها و خاک هایی که در آنها ترکیبات گوگردی بطور کامل اکسیده نشده اند، موجود باشند. متابولیسم این باکتری ها بصورتی است که آنها اکسیژن مصرف کرده و سولفیدها را به سولفات خصوصاً اسید سولفوریک تبدیل می کنند. این باکتری ها حتی می توانند اسید سولفوریک با غلظت حدود ۱۰٪ (pH=۰/۵) نیز بوجود آورند. این گونه محیط ها برای فولاد بسیار خورنده می باشند. ممکن است شرایط بسیار حادی در امتداد خطوط لوله بوجود آید، بدین صورت که اگر محیط دارای باکتری های احیاء سولفات در خلال مدتی از سال بوده و سپس در قسمت دیگری از سال حاوی فعالیت باکتری های اکسید کننده گوگرد شود، سولفید های تولید شده توسط باکتری های غیرهوازی می توانند مجدداً توسط باکتری های هوازی به سولفات تبدیل شوند در طول سال با انجام این فعالیت ها، بطور نوسانی خوردگی شدیدی در فولاد

(۱) Redox potential

(۲) Reproducible

(۳) Thiobacillus Thiooxidans

شماره استاندارد ۲۰۱-۶۹	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۱۷
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

بوجود خواهد آمد و بطور پیوسته ادامه خواهد یافت. مخصوصاً این حالت در مواقعی که سطح آب های زیرزمینی بطور نوسانی به بالا یا پائین خطوط لوله کشیده می شود، انجام می پذیرد.

از آنچه گفته شد، نتیجه می گردد که فعالیت میکروبیولوژیکی بشدت باعث خوردگی خطوط لوله فولادی مدفون در زمین می گردد. بطور خلاصه، این خوردگی در اثر مکانیزم های زیر حاصل می گردد:

- ۱- افزایش سرعت خوردگی توسط دیپلاریزه شدن کاتد پیل های خوردگی ،
- ۲- تولید شدن محصولات حاصل از خوردگی بر سطح فولاد که نقش کاتد را برای فولاد داشته و در نتیجه یک پیل خوردگی حاصل می شود،
- ۳- در تماس قرار گرفتن فولاد با محیط خورنده از طریق شکسته شدن پوشش های محافظ موجود بر سطح آن،
- ۴- بوجود آمدن محیط های خورنده،
- ۵- تولید شدن لایه هائی که باعث ایجاد پیل های اختلاف غلظت می شوند.

همه مکانیزم های گفته شده بالا باعث افزایش انحلال آندی فولاد شده و در نتیجه باعث افزایش مقدار جریان لازم برای حفاظت فولاد در این گونه محیط ها می گردد.

جدول (۲) - پتانسیل رداکس و میزان وجود فعالیت باکتری های غیرهوازی

پتانسیل رداکس خاک	میزان وجود باکتری های غیرهوازی
زیر ۱۰۰ میلی ولت	بسیار زیاد
۱۰۰-۲۰۰ mV	متوسط
۲۰۰-۴۰۰ mV	کم
بالای ۴۰۰ میلی ولت	هیچ

۵-۱- معیار بررسی درجه خوردگی خاکها

همانطور که قبلاً خاطر نشان گردید، عواملی چون هوادهی، pH، مقاومت مخصوص، رطوبت و نمکها، در تعیین میزان خوردگی خاکها نقش عمده ای دارند. قابل ذکر است که هر یک از این عوامل به تنهایی نمی توانند میزان خوردگی خاک را تعیین کنند، بلکه باید جهت تعیین میزان خوردگی خاکها تمام عوامل مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرند. جدول (۳) چگونگی ارزیابی درجه خوردگی خاکها را نشان می دهد. این جدول براساس امتیاز بندی شرکت مهندسی گاز و آب آلمان تهیه شده است.

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خوردگی آن	صفحه ۱۸
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

جدول (۳) - ارزیابی وضعیت خاکها براساس امتیاز بندی شرکت مهندسی گاز و آب آلمان

امتیاز	وضعیت یا مقدار	عوامل خاک
+۲ ۰ -۲ -۴	آهکی، صخره ای و شنی گل و لای همراه شن و خاک رس خاک رس، خاک رس آهکدار گل و لای ضخیم و فشرده، ذغال سنگ، خاک باتلاقی	ترکیب
۰ -۱ -۲	موجود نیست موجود است متغیر	آبهای زیرزمینی در عمق دفن سازه
۰ -۱ -۲ -۳ -۴	۱۰۰۰۰ اهم - سانتیمتر یا بیشتر ۵۰۰۰-۱۰۰۰۰ اهم - سانتیمتر ۵۰۰۰ - ۲۳۰۰ اهم - سانتیمتر ۲۳۰۰ - ۱۰۰۰ اهم - سانتیمتر ۱۰۰۰ یا کمتر	مقاومت مخصوص
۰ -۱	۲۰ درصد یا کمتر ۲۰ درصد یا بیشتر	میزان رطوبت
۰ -۲	۶ یا بیشتر ۶ یا کمتر	pH
۰ -۲ -۴	موجود نیست به مقدار ناچیز موجود است	سولفید
+۲ +۱ ۰	۵ درصد یا بیشتر ۱-۵ درصد ۱ درصد یا کمتر	یون کربنات
۰ -۱	۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم یا کمتر بیش از ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم	یون کلر
۰ -۱ -۲ -۳	۲۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم یا کمتر ۵۰۰ - ۲۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم ۱۰۰۰ - ۵۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم ۱۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم یا بیشتر	یون سولفات
۰ -۴	موجود نیست موجود است	خاکستر یا کک

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خورندگی آن	صفحه ۱۹
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹

جدول (۴) - درجه خورندگی خاکها براساس جمع امتیازات جدول (۳)

درجه خورندگی خاک	جمع امتیازات
غیرخورنده	۰ یا بیشتر
کمی خورنده	۰ تا ۴-
خورنده	۵- تا ۱۰-
خیلی خورنده	۱۰- یا کمتر

شماره استاندارد ۶۹-۲۰۱	روشهای اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و تعیین درجه خورندگی آن	صفحه ۲۰
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاندی	تاریخ: آذر ۱۳۷۹