



دومین همایش بین المللی نفت، گاز و پتروشیمی، ۲۷ آذر ماه ۱۳۹۳، تهران، ایران

## رفتار خوردگی مخازن فولاد کربنی ساده در محیط خاکی

حمزه فراتی راد<sup>۱</sup>، حمید رضا مهاجرانی<sup>۲</sup>، مهدی نجات پیشکناری، علی مالکی فارسانی،

سعید مومن زاده، محمد رستم نژاد، محسن اسدیان

مهندس، شرکت پسمانداری صنعت هسته ایران، hamzeforati@yahoo.com

مهندس، شرکت پسمانداری صنعت هسته ای ایران، hmohajerani@aeoi.org.ir

### چکیده

مطالعه خاک به عنوان یک محیط خوردنده از زمانی که تخریب مواد به وسیله برهمکنش های فیزیکی و شیمیایی بین ماده و محیط خاکی مشاهده شد، حائز اهمیت گردید. در این مقاله، رفتار خوردگی مخازن فولاد کربنی st37، با تحلیل مشخصه های فیزیکی و شیمیایی محیط خاکی مورد بررسی قرار گرفت. عوامل موثر خاک که خوردگی خارجی مخازن دهن شده را تحت تاثیر قرار می دهد عبارتند از: رطوبت، مقاومت الکتریکی خاک، هدایت الکتریکی خاک، نمک های محلول، کلریدها، اسیدیت، پتانسیل اکسیداسیون- احیاء و غلظت آنیون ها و کاتیون ها. خوردگی نمونه های خاکی با استفاده از استاندارد AWWA C105 مورد ارزیابی قرار گرفت. نرخ خوردگی با روش های اتلاف وزنی و پلاریزاسیون پتانسیودینامیک اندازه گیری شد. نتایج آزمایش های خوردگی نشان داد که خاکی با غلظت بالای آنیون های کلریدی و سولفات های هدایت الکتریکی بالا و در نتیجه خوردگی بالاتری دارد.

### کلمات کلیدی

فولاد کم کربن، مشخصات فیزیکی - شیمیایی، هدایت الکتریکی خاک، اتلاف وزن، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک.

## Corrosion behavior of Low Carbon Steel container in Soil Environment

Hamze Forati Rad, Hamidreza Mohajerani, Mehdi Nejat Pishkenari, Ali Maleki Faresani, Saeed Momenzade, Mohamad Rostam Nejad, Mohsen Asadian

### Abstract

The study of soil as a corrosive environment has become necessary, since material deterioration caused by physico-chemical interactions between the material and the soil environment has been displayed. In this article, Corrosion behavior of st37 carbon steel containers was investigated by analyzing the physico-chemical characteristics of the soil environment. The effective soil parameters that influence the exterior corrosion of buried container are: moisture, soil electrical resistivity, electrical conductivity, soluble salts, Chloride, pH, redox potential and anions and cations content. Corrosivity of the soil samples was evaluated using the AWWA C105 standard. The rate of corrosion was measured by weight loss and Potentiodynamic Polarization methods. The result of corrosion tests showed that the soil with high concentration of chloride and sulfate anions have high electrical conductivity and so higher corrosivity.

### Keywords

low carbon steel, physico-chemical characteristics, soil electrical conductivity, weight loss, Potentiodynamic polarization.

<sup>۱</sup> حمزه فراتی راد، امیر آباد شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت پسمانداری صنعت هسته ای ایران، تلفن ۰۲۱۸۲۰۶۴۵۱۲

خورندگی خاک مورد استفاده قرار گیرند.

در این تحقیق ابتدا مشخصه های فیزیکی و شیمیایی خاک چهار نقطه از مناطق مرکزی ایران تعیین شد و سپس با استفاده از ۱۰ امتیازی موجود در استاندارد (ANSI/AWWA C105/A21.5 (1999) میزان خورندگی خاک این مناطق ها با یکدیگر مقایسه شد [۴].

در نهایت میزان خورندگی خاک مناطق چهارگانه روی فولاد ساده کربنی ANSI st37 با آزمایش های خوردگی میدانی و الکتروشیمیایی بررسی شد. فولاد ساده کربنی اگرچه بسیار مستعد به خوردگی است، ولی به دلایل اقتصادی (هزینه نسبتاً کم)، استحکام بالا و جوش پذیری و شکل پذیری بسیار مناسب به صورت گسترده ای در ساخت مخازن مورد استفاده قرار می گیرد.

## ۲- روش آزمایش

جهت انجام آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی خاک از چهار نقطه از مناطق کویر مرکزی ایران و در عمق ۱/۵ متری از سطح زمین نمونه های خاک جمع آوری شدند و بلافاصله درون کیسه زیبی ریخته شده و بعد از کد گذاری به صورت CR1، CR2، CR3 و CR4 به آزمایشگاه منتقل شدند. با توجه به اینکه وقوع خوردگی در خاک به وسیله عوامل شیمیایی نظیر pH، فعالیت میکروبی، میزان کربنات ها، بی کربنات ها، سولفات ها، کلرایدها و همچنین غلظت کاتیون های مختلف در خاک تاثیر می پذیرد، آزمایش های شیمیایی مندرج در جدول ۱ برای تعیین این خواص انجام شد. خواص فیزیکی خاک نظیر هدایت الکتریکی، میزان رطوبت، نوع دانه بندی خاک، تراکم پذیری نیز به صورت موثری بر میزان خورندگی خاک تاثیر گذار هستند. جدول ۲ لیست آزمایش های فیزیکی انجام شده بر روی خاک های منطقه چهارگانه را نشان می دهد.

جدول ۱. لیست آزمایش های شیمیایی انجام شده بر روی خاک های

مناطق کویر مرکزی ایران

ردیف	آزمایش	استاندارد
۱	تعیین pH خاک	ASTM G51
۲	تعیین سولفات محلول در اسید خاک	نشریه ۴۶۷ [۵]
۳	تعیین سولفات محلول در آب خاک	BS-1377
۴	تعیین میزان کربنات خاک	BS-1377
۵	تعیین میزان بی کربنات خاک	BS-1377
۶	تعیین کلر خاک	نشریه ۴۶۷
۷	تعیین درصد اکسید پتاسیم (K <sub>2</sub> O)	نشریه ۴۶۷
۸	تعیین درصد اکسید سدیم (Na <sub>2</sub> O)	نشریه ۴۶۷
۹	تعیین درصد اکسید منیزیم (MgO)	نشریه ۴۶۷
۱۰	تعیین درصد اکسید کلسیم (CaO)	نشریه ۴۶۷

## ۱- مقدمه

سازه های فولادی با فرآیندهای الکتروشیمیایی پیچیده که به علت ماهیت متفاوت الکترولیت های خاکی است، خورده می شوند. پدیده خوردگی در شرایط زیر زمینی هنوز به صورت کامل روشن نشده است زیرا خاک یک ماده پیچیده، متخلخل، غیر همگن و یک محیط ناپیوسته است که متشکل از فازهای جامد معدنی یا آلی، فاز مایع آبی، هوا و دیگر فازهای گازی است. به همین دلیل بررسی اختصاصی هر سایت مشخص جهت تشریح مدل های سازوکارهای خوردگی امری ضروری است. عواملی که خوردگی در خاک را تحت تاثیر قرار می دهند بسیار متعدد هستند و عبارتند از: مقدار رطوبت و موقعیت آب های زیر زمینی، مقاومت الکتریکی خاک و مقدار یون های قابل حل، اسیدیته خاک، پتانسیل اکسیداسیون - احیاء و مقدار میکروب های موجود در خاک. ویژگی های خاک وابسته به توزیع اندازه ذرات، مقدار مواد آلی، ساختار و ترکیب کانی شناختی است [۱]. ترکیب معدنی خاک یک عامل مهم در فهم چگونگی تاثیر گذاری یک خاک در خوردگی سازه های دفن شده در خاک است. رس ها از معمول ترین مواد معدنی موجود در پوسته زمین است. رس ها زمانی که مرطوب می شوند، به صورت قابل ملاحظه ای حالت خمیری پیدا کرده و قابلیت برجسته ای برای چسبندگی به سطح فلز دارند. از لحاظ فیزیکی رس ها جزء گروه مونت مریلینت هایی مانند بنتونیت هستند که به راحتی می توانند از طریق رطوبت گیری و رطوبت زدایی یا تبادل یونی تغییر حجم دهند. این انقباض و تورم خاک های غنی از مونت مریلینت ها می تواند نیروهایی را به سازه های دفن شده در خاک اعمال کند که منجر به خسارت های بالقوه بعدی شود. ماسه های سیلیکایی درشت به صورت قابل توجهی نفوذ پذیر هستند و شرایط نامناسبی را برای خوردگی فراهم می کنند. کربنات های حل شده در خاک محلولی را که در محدوده اسیدیته قلیایی یا خنثی قرار دارد، بافری می کنند. در صورتی که سطوح فولادی در معرض این محلول های اشباع قرار گیرند، به وسیله واکنش های الکتروشیمیایی القا شده با یک سیستم حفاظت کاتدی موثر، پوسته های کربناتی سفید سخت روی سطح فلز رسوب می کند که می تواند منجر به تشدید فرآیند خوردگی شود [۲-۳].

عوامل فیزیکی - شیمیایی خاک از جمله مقاومت و هدایت الکتریکی، پتانسیل ردوکس (اکسیداسیون و احیاء)، اسیدیته و مقدار رطوبت می توانند سریعاً جهت تخمین خورندگی خاک تعیین شوند. اندازه گیری های اتلاف وزن در محیط خاکی مهمترین عامل جهت تعیین میزان خورندگی خاک است ولی این آزمایشات تاحدی زمان بر هستند. مقادیر حاصله از آزمایش های الکتروشیمیایی مانند دانسیته جریان خوردگی ( $I_{corr}$ ) و مقاومت پلاریزاسیون ( $R_p$ ) می توانند به آسانی و با دقت زیاد به عنوان عواملی برای ارزیابی

جدول ۲. لیست آزمایش های فیزیکی انجام شده بر روی خاک های

مناطق کویر مرکزی ایران

ردیف	آزمایش	استاندارد
۱	تعیین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک	BS-1377
۲	تعیین درصد رطوبت خاک	ASTM D2216
۳	تعیین منحنی دانه بندی	ASTM D422

برای انجام آزمایش های خوردگی میدانی و الکتروشیمیایی فولاد ساده کربنی st37 تهیه شد. ترکیب شیمیایی این فولاد که با آنالیز کوانتومتری تعیین شده است، در جدول ۳ گزارش شده است. در آزمایش های خوردگی میدانی که در آن ها نمونه های تهیه شده در عمق ۱/۵ متری خاک دفن شدند، به منظور افزایش سطح تماس و نزدیک شدن به شرایط واقعی کوپن هایی در ابعاد  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  بریده شدند. جهت انجام آزمون های خوردگی به روش میدانی که بر گرفته از استاندارد NACE-TM 0169 است، ابتدا لایه های اکسیدی با استفاده از سنگ مغناطیسی از روی سطح نمونه ها حذف شد. به منظور چربی زدایی، نمونه ها به مدت ۲۰ دقیقه در محلول سود ۱۰٪ در دمای  $60^\circ\text{C}$  نگهداری شدند و برای اکسید زدایی به مدت ۱۵ دقیقه در دمای آزمایشگاه در محلول اسید کلریدریک ۱۰٪ غوطه ور شدند. پس از انجام این مراحل کوپن ها توسط جریان هوای گرم خشک شدند و پس از توزین در داخل کیف های زیبی حاوی سیلیکاژل نگهداری شدند. در آزمایشات کاهش وزن میدانی در هر کدام از محل های تعیین شده سه نمونه در درون خاک دفن شدند. نمونه ها به ترتیب بعد از ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ روز از محل های دفن شده خارج و بلافاصله با ترازویی با دقت  $10^{-4} \text{ gr}$  توزین شدند.

جدول ۳. ترکیب شیمیایی آلیاژ st37 مورد استفاده در تحقیق

C	Mn	Si	S	P
۰/۱۷	۰/۵	< ۰/۳	< ۰/۰۵	< ۰/۰۵
Cu	Mo	Ni	Cr	Fe
۰/۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۲۶۳	۰/۰۰۸	Balanced

جهت انجام تست های خوردگی الکتروشیمیایی کوپن هایی با ابعاد  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  آماده شدند و بعد از حذف لایه اکسیدی سطحی با سنگ مغناطیسی، سطح نمونه ها به روش مکانیکی و با استفاده از کاغذ سنباده، تا سباده ۱۵۰۰ پولیش شدند. سپس با روشی مشابه با نمونه های آزمایش های میدانی، چربی زدایی و اکسید زدایی شدند. جهت جلوگیری از خوردگی اتمسفری، نمونه ها بلافاصله بعد از انجام فرآیند آماده سازی سطح به صورت مناسبی بسته بندی شدند و در داخل کیف های زیبی محتوی سیلیکاژل نگهداری شدند. در روش پلاریزاسیون خطی، چون خاک دارای مقاومت بسیار بالایی است، از الکترولیت خاک استفاده می شود. الکترولیت خاک،

محلول صاف شده ای از مخلوط خاک کاملاً خشک (حرارت دهی به مدت ۴ ساعت در دمای  $105^\circ\text{C}$  در آون) و آب مقطر به نسبت ۱ : ۲ بعد از ۱۲ ساعت اختلاط است. آزمایش پلاریزاسیون به توجه با استاندارد ASTM G59 انجام گردید. برای انجام آزمایشات دستگاه گالوانواستات - پتانسیو استات با ولتاژ قابل اندازه گیری  $\pm 8\text{V}$  و سرعت روبش  $20\text{V/s}$  و دقت اندازه گیری جریان و ولتاژ به ترتیب  $1\text{nA}$  و  $100\mu\text{V}$  مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش ها با استفاده از یک الکتروود کار (نمونه ها با سطح  $1\text{cm}^2$ )، یک الکتروود مرجع کالومل (SCE) و یک الکتروود کمکی پلاتین و در محلول خاکی و نسبت به الکتروود کالومل اشباع (SCE) و سرعت روبش  $1\text{mV/s}$  انجام شد. قبل از شروع آزمایش نمونه ها به مدت یک ساعت در سلول آزمایش خوردگی قرار گرفتند تا حالت پایدار ایجاد شود. جهت استخراج جریان خوردگی از دو روش زیر استفاده گردید:

- ابتدا خطی افقی از پتانسیل خوردگی رسم و مماس از شاخه آندی و کاتدی در محدوده حداکثر تا  $200\text{mV}$  رسم شد. این مماس ها باید بر روی خط افقی همدیگر را قطع کنند. نقطه تقاطع به عنوان جریان خوردگی در نظر گرفته شد.

- با استفاده از رابطه Stern-Geary (رابطه ۱) جریان خوردگی محاسبه می شود [۶]:

$$I_{corr} = \frac{b_a b_c}{(b_a + b_c) \times R_p} \quad (1)$$

در این رابطه  $R_p$  مقاومت پلاریزاسیون ( $\Omega \text{ cm}^2$ )،  $I_{corr}$  دانسیته جریان خوردگی و  $b_a$  و  $b_c$  به ترتیب شیب های تافل آندی و کاتدی می باشند. برای محاسبه  $R_p$  منحنی جریان خوردگی بر حسب ولتاژ که تقریباً یک خط ثابت است را در محدوده ی باریک  $\pm 20\text{mV}$  در نقطه  $E_{corr}$  رسم می شود. شیب این خط مقاومت پلاریزاسیون،  $R_p$ ، نامیده می شود. شیب های تافل آندی و کاتدی با رسم مماس هایی بر روی قسمت های خطی منحنی های پلاریزاسیون آندی و کاتدی محاسبه گردید. نتایج محاسبه جریان خوردگی ( $I_{corr}$ )، بر اساس دو روش فوق از هم خوانی مناسبی با یکدیگر برخوردار است و مقادیر گزارش شده در این تحقیق، مقدار متوسط حاصل از دو روش فوق می باشد.

### ۳- نتایج

جدول ۴ و ۵ نتایج آزمایشات فیزیکی و شیمیایی انجام گرفته بر روی خاک مناطق CR1، CR2، CR3 و CR4 را نشان می دهد. مقاومت خاک به صورت معکوس با هدایت الکتریکی خاک در ارتباط است و با واحد اهم- سانتی متر مشخص می شود. مقاومت پایین خاک به منزله ی خاکی با هدایت الکتریکی بالا است. خاکی با هدایت الکتریکی بالا به عنوان یک الکترولیت مناسب منجر به تسریع فرایندهای خوردگی می شود. به علت دشواری در تعیین مقاومت

های قلیایی کاتیون های کلسیم و منیزیم، تمایل به تشکیل رسوب های اکسیدی و کربناته بر روی سطح خورده شده دارند و با تشکیل لایه محافظ سرعت خوردگی را کاهش می دهند. این لایه های کربناتی به همراه لایه های اکسید آهن تشکیل شده در روی سطح نرخ خوردگی طولانی مدت را کاهش می دهند. از جهت نوع خاک نیز خاک های هر چهار منطقه از نوع خاک هایی با ماهیت رسی می باشند که به علت تراکم بالا بسیار مستعد به بی هوازی شدن و یا عدم تهیه مناسب هستند و در نتیجه در زمره خاک های بسیار خورنده قرار می گیرند. با توجه به مطالب ذکر شده خاک منطقه CR4 نسبت به سایر مناطق دارای کمترین نرخ خوردگی می باشد و سایر مناطق دارای نرخ خوردگی تقریباً مشابهی می باشند [۱۱]. اغلب خواص فیزیکی و بسیاری از خواص شیمیایی خاک شدیداً تحت تاثیر کلاس های توزیع اندازه ذرات خاک قرار می گیرد. تعیین توزیع اندازه ذرات خاک، اندازه گیری توزیع اندازه ذرات مجزا در نمونه خاک است.

جدول ۶ توزیع اندازه ذرات برای خاک مناطق چهارگانه را نشان می دهد. همان طوری که مشخص است خاک منطقه CR4 و بعد از آن به ترتیب خاک مناطق CR3، CR2 و CR1 دارای توزیع اندازه ریزتری هستند. توزیع اندازه ریزتر به معنی کاهش نفوذ آب، تراکم بیشتر و در نتیجه کاهش نرخ خوردگی است.

روش های مختلفی برای تخمین میزان خوردگی خاک با استفاده از عوامل فیزیکی و شیمیایی خاک وجود دارد. یکی از این روش ها، روش ۱۰ امتیازی است [۴]. در روش ۱۰ امتیازی مهمترین ویژگی های خاک از جمله میزان مقاومت الکتریکی خاک، pH، درصد رطوبت، پتانسیل اکسیداسیون و احیاء و میزان سولفیدها یا سولفات ها و کلریدها به منظور تعیین میزان پتانسیل خوردگی خاک اندازه گیری می شوند. برای تعیین میزان پتانسیل خوردگی خاک به هر کدام از عوامل ذکر شده براساس ضرایب تعریف شده در جدول موجود در این استاندارد امتیاز داده می شود و مجموع امتیازات محاسبه می گردد و به عنوان معیاری برای تعیین میزان خوردگی خاک در نظر گرفته می شود. در این روش اگر مجموع امتیازات بیشتر از ۱۰ باشد، خاک به عنوان خاکی با پتانسیل خوردگی بالا در نظر گرفته می شود. هدایت الکتریکی خاک به صورت مستقیم مقاومت الکتریکی در ارتباط است [۶].

خاکی با هدایت الکتریکی بالاتر از ۱۰۰ mmhos/m دارای مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰۰۰ ohm/cm است و در زمره خاک های بسیار خورنده قرار می گیرد و در نتیجه در روش ۱۰ امتیازی بالاترین امتیاز یعنی ۱۰ به آنها اختصاص می یابد.

در این مطالعه پتانسیل ردوکس تعیین نشد و تصمیم گرفته شد که امتیاز این ویژگی از مقدار سولفات و نوع خاک تخمین زده شود. رس ها به علت تراکم بالا بسیار مستعد به بی هوازی شدن و یا عدم

الکتریکی به صورت میدانی، هدایت الکتریکی چهار نقطه از خاک های منطقه اندازه گیری شد که بر اساس استاندارد C105/A21.5 (ANSI/AWWA, 1999) خاک هر چهار منطقه در زمره خاک های بسیار خورنده قرار می گیرند. نتایج اندازه گیری های pH نشان می دهد که خاک های هر چهار منطقه در محدوده pH ۸/۴۷ تا ۹/۱۹ و محدوده قلیایی ضعیف قرار دارند که بدون ملاحظه سایر عوامل خوردگی، در گروه خاک های غیر خورنده قرار می گیرند.

آنیون های اصلی محلول در خاک شامل سولفات ها، کلریدها، کربنات ها و بی کربنات ها هستند که در بین این آنیون ها سولفات ها و کلریدها بیشترین تاثیر را در فرآیند خوردگی خاک دارند. ظرفیت خاک برای جذب سطحی آنیون ها با افزایش قدرت اسیدی در آن ها افزایش می یابد و در تمام مقادیر pH، یون دو ظرفیتی سولفات نسبت به یون تک ظرفیتی کلرید جذب بیشتری دارد. بنابراین در محلول خاک یون کلرید کوچکتر قدرت نفوذ بیشتری نسبت به یون سولفات دارد. آنیون های کلرید به سطح فلز نفوذ کرده و با جذب کاتیون های  $Fe^{2+}$  کلریدهای فلزی سنگین خورنده را تشکیل می دهند که در نتیجه منجر به مصرف اتم های آهن می شود (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. بنابراین می توان گفت که از نظر غلظت آنیون کلرید خاک CR3 دارای قدرت خوردگی متوسط و خاک های CR1، CR2 و CR4 دارای قدرت خوردگی ضعیف می باشند. از جهت آنیون سولفات نیز خاک CR4 دارای خوردگی متوسط و سایر خاک ها دارای خوردگی ضعیف هستند [۱۲].

آنیونهای کربنات و بی کربنات به دلیل اینکه لایه چسبنده ای روی سطح فلزات تشکیل می دهند موجب کاهش سرعت خوردگی شده و دخالت مستقیمی در فرآیندهای خوردگی ندارند [۸]. کاتیونها در هدایت الکتریکی خاکها مؤثر بوده و در مورد اعداد بدست آمده برای سدیم و پتاسیم می توان گفت با کاهش غلظت این یون ها، هدایت الکتریکی نیز کاهش یافته است. کاتیون ها به دلیل اینکه حامل بار مثبت هستند، در واکنش های خوردگی دخالت مستقیمی ندارند و تأثیر مستقیم آنها در pH خاک خواهد بود. یعنی خاکی که دارای سدیم و منیزیم زیاد باشد خاصیت قلیایی، خاکی که دارای کلسیم بیشتر باشد دارای pH خنثی و خاکی که دارای آلومینیوم فراوان باشد دارای خاصیت اسیدی خواهند بود. در خاک هایی که مقدار سدیم زیاد باشد نفوذپذیری خاک کاهش یافته و در واقع حرکت آب در داخل بسیاری از خاک ها متوقف می شود [۱۱]. بنابراین می توان در حالت کلی نتیجه گرفت با افزایش مقدار سدیم خاک، تراکم خاک افزایش و مقاومت ویژه کاهش می یابد. در محیط

دومین همایش بین المللی نفت، گاز و پتروشیمی، ۲۷ آذر ماه ۱۳۹۳، تهران، ایران

جدول ۴. نتایج آزمایش های شیمیایی، الکتریکی و مکانیکی خاک های منطقه

ردیف	نام آزمایش	CR1	CR2	CR3	CR4
۱	هدایت الکتریکی بر روی عصاره اشباع خاک (mmhos/m)	۳۸۶۲	۳۹۷۵	۵۲۹۰	۳۵۸۴
۲	pH	۸/۹۰	۹/۰۴	۹/۱۹	۸/۴۷
۳	سولفات محلول در اسید خاک در ۱۰۰ گرم خاک (%)	۰/۳۸	۰/۲۳	۰/۲۴	۱/۳۸
۴	کلر خاک در ۱۰۰ گرم خاک (%)	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۰۷
۵	میزان کربنات ها در عصاره ۱ به ۱۰ در ۱۰۰ گرم خاک (%)	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	Nil
۶	میزان بی کربنات ها در عصاره ۱ به ۱۰ در ۱۰۰ گرم خاک (%)	۰/۰۲۴	۰/۰۳۵	۰/۰۴۶	۰/۰۲۶
۷	رطوبت (%)	۲/۸	۴/۵	۳/۲	۵/۰
۸	اکسید پتاسیم (K <sub>2</sub> O) در ۱۰۰ گرم خاک (%)	۱/۷۵	۱/۸۰	۱/۷۳	۲/۰۹
۹	اکسید سدیم (Na <sub>2</sub> O) در ۱۰۰ گرم خاک (%)	۱/۶۹	۱/۵۶	۱/۵۹	۱/۱۰
۱۰	اکسید منیزیم (MgO) در ۱۰۰ گرم خاک (%)	۳/۰۰	۲/۷۶	۲/۵۰	۳/۰۳
۱۱	اکسید کلسیم (CaO) در ۱۰۰ گرم خاک (%)	۸/۲۸	۷/۰۳	۸/۷۵	۱۵/۲۳
۱۲	مجموع کاتیون ها در ۱۰۰ گرم خاک (%)	۱۵/۱۰	۱۳/۳۸	۱۴/۸۱	۲۲/۸۳

جدول ۵. نتایج آزمایش های فیزیکی خاک های منطقه

ردیف	آزمایشات فیزیکی	CR1	CR2	CR3	CR4
۱	هدایت الکتریکی بر روی عصاره اشباع خاک (mmhos/m)	۳۸۶۲	۳۹۷۵	۵۲۹۰	۳۵۸۴
۲	رطوبت (%)	۲/۸	۴/۵	۳/۲	۵

جدول ۶. توزیع اندازه ذرات بزرگتر از الک مش ۳۰۰

نمونه	CR1	CR2	CR3	CR4
درصد رد شده از الک ۳/۱۶ اینچ	۹۹/۵	۹۹/۵	۹۹/۱	۱۰۰
درصد رد شده از الک ۸	۸۸/۴	۹۰/۶	۸۹/۶	۹۶/۵
درصد رد شده از الک ۳۰	۵۰/۳	۵۵/۶	۵۵/۱	۸۳/۱
درصد رد شده از الک ۵۰	۳۰/۵	۳۷/۲	۳۷/۶	۶۸/۴
درصد رد شده از الک ۱۰۰	۱۷	۲۲/۵	۲۴/۷	۵۴/۸
درصد رد شده از الک ۲۰۰ (قطر چشمه ۶۷ μm)	۱۰/۱	۱۵	۱۷/۵	۴۹

جدول ۷. مجموع امتیاز خاک های ۴ نقطه CR1, CR2, CR3 و CR4 در روش ۱۰ امتیازی

پارمتر اندازه گیری شده	مقاومت الکتریکی یا هدایت الکتریکی	pH	پتانسیل ردوکس	سولفید ها	رطوبت	مجموع امتیازها
CR1	۱۰	۳	۵	۳/۵	۱	۲۲/۵
CR2	۱۰	۳	۵	۳/۵	۱	۲۲/۵
CR3	۱۰	۳	۵	۳/۵	۱	۲۲/۵
CR4	۱۰	۰	۵	۳/۵	۱	۱۹/۵

جدول ۸. مقادیر mmpy محاسبه شده برای دوره های زمانی ۹۰، ۴۵ و ۱۸۰ روز

mmpy	mmpy <sub>1</sub>	mmpy <sub>2</sub>	mmpy <sub>3</sub>
CR1	۰/۰۵۰۲	۰/۰۷۶۱	۰/۰۷۴۳
CR2	۰/۰۸۹۷	۰/۱۰۰۴	۰/۱۱۱۹
CR3	۰/۰۸۲۵	۰/۱۱۶۵	۰/۱۲۷۰
CR4	۰/۰۲۲۸	۰/۰۲۸۱	۰/۰۶۲۵

دارای کمترین نرخ خوردگی است و خاک منطقه CR3 با بیشترین هدایت الکتریکی دارای بالاترین نرخ خوردگی است. تفاوت موجود در  $mmpy$  در دوره های زمانی مختلف به علت انجام آزمایش ها در دوره زمانی شش ماهه دوم سال و در نتیجه بارش های فصلی متفاوت در دوره های مختلف است. این نتایج با نتایج آزمایشات فیزیکی و شیمیایی انجام شده روی خاک های منطقه سازگاری خوبی دارد.

آزمایش های خوردگی الکتروشیمیایی به روش پلاریزاسیون خطی نیز روی محلول های خاکی مناطق چهار گانه انجام شد. جدول ۹ پارامترهای آزمایش های پلاریزاسیون و شکل ۳ منحنی های پلاریزاسیون برای خاک های مناطق چهار گانه را نشان می دهد.

همان طوری که از جدول ۹ مشخص است، پتانسیل خوردگی فولاد st37 در محلول خاکی CR3 نسبت به سه محیط دیگر منفی تر است که به این معنی است که مقاومت به خوردگی فولاد st37 در محیط خاکی CR3 نسبت به سه محیط دیگر کمتر و در نتیجه شدت خوردگی آن بیشتر است. مقاومت پلاریزاسیون خاک های CR2، CR1 و CR4 نیز به ترتیب با کاهش هدایت الکتریکی افزایش می یابد که به معنی کاهش شدت جریان خوردگی و در نتیجه کاهش میزان خوردگی این خاک ها است. مقایسه نتایج آزمایش های کاهش وزنی و پلاریزاسیون نشان می دهد که هر دو آزمایش بیانگر یک موضوع هستند. به عبارتی نتایج تمام آزمایش های تعیین میزان خوردگی نشان می دهد که خاک CR4 با کمترین هدایت الکتریکی، دارای کمترین میزان خوردگی است و خاک CR3 با بالاترین هدایت الکتریکی دارای بیشترین نرخ خوردگی در بین خاک های منطقه است. بنابراین می توان خاک های منطقه را به ترتیب کمترین نرخ خوردگی به صورت CR4، CR1، CR2 و CR3 تقسیم بندی کرد.

جهت محاسبه نرخ خوردگی بر حسب  $mm/yr$  (میلی متر در سال) با استفاده از استاندارد ASTM G102 می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$CR = K \frac{i_{corr}}{\rho} EW \quad (3)$$

که در این رابطه  $i_{corr}$  جریان خوردگی در واحد  $\mu A/cm^2$  است. ثابت  $K$  برابر با  $mm \ g/\mu A \ cm \ yr \times 10^{-3} \times 3/27$  است و  $\rho$  برابر چگالی فلز یا آلیاژ مورد نظر در واحد  $g/cm^3$  است. برای محاسبه وزن اکوالانت آلیاژ، اکسیداسیون واحد جرم واحد یک آلیاژ را در نظر بگیرید. اکوالانت الکترون برای ۱ گرم از این آلیاژ،  $Q$  برابر است با:

$$Q = \sum \frac{n_i f_i}{W_i} \quad (4)$$

تهویه مناسب هستند و بنابراین پتانسیل ردوکس پایینی خواهند داشت. خاک هایی مانند ماسه ها و شن ها به علت تهویه مناسب، احتمال کمتری از جهت بی هوای شدن دارند و بنابراین پتانسیل ردوکس بالاتری را خواهند داشت. در این مطالعه به خاک های رسی با توجه به حضور سولفات ها امتیاز ۳/۵ اختصاص داده شد. از طرفی با توجه به مقدار قابل توجه سولفات در هر چهار نوع خاک پتانسیل ردوکس منفی و در نتیجه امتیاز ۵ برای هر چهار نوع خاک در نظر گرفته می شود. با توجه به وجود سولفات های قابل حل در آب و شرایط pH میزان سولفیدها در خاک تقریباً صفر است ولی احتمال وجود سولفید منتفی نمی باشد. بنابراین جهت اطمینان برای سولفیدها در خاک امتیاز ۳/۵ در نظر گرفته می شود. درصد رطوبت خاک های منطقه با توجه به نتایج آزمایشات انجام شده اندک است ولی به علت زهکشی نسبتاً نامناسب امتیاز ۱ برای هر چهار نوع خاک در نظر گرفته می شود. جدول ۷ مجموع امتیاز خاک های ۴ نقطه در روش ۱۰ امتیازی را نشان می دهد [۷-۸].

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۷، مجموع امتیازات خاک های هر ۴ نقطه CR1، CR2، CR3 و CR4 بالاتر از ۱۰ است که در نتیجه خاک های هر ۴ منطقه در زمره خاک هایی با میزان خوردگی بالا تقسیم بندی می شوند. ولی از بین چهار منطقه بررسی شده، منطقه CR4 نسبت به سایر مناطق خوردگی پایین تری دارد. به منظور بررسی نحوه تاثیر گذاری خاک های منطقه بر مخازن فولاد ساده کربنی آزمایش های خوردگی میدانی و الکتروشیمیایی انجام شد تا نتایج حاصل از روش ۱۰ امتیازی با نتایج حاصل از آزمایشات خوردگی مقایسه شود.

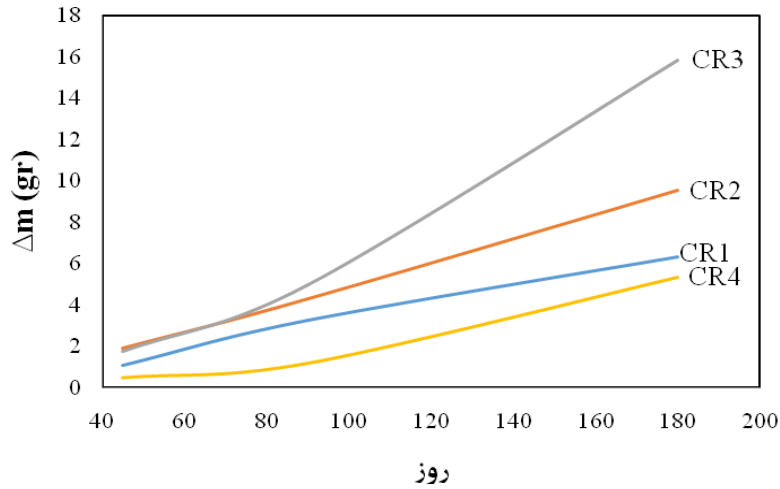
شکل ۱ نتایج آزمایشات کاهش وزنی نمونه ها در دوره های زمانی مختلف را نشان می دهد. سرعت خوردگی نمونه ها به صورت  $mmpy$  (میلی متر در سال) با توجه به استاندارد NACE TM 0169 به صورت رابطه ۲ محاسبه می شود:

$$mmpy = 3650 \left( \frac{\Delta W}{d \cdot A \cdot T} \right) \quad (2)$$

که در این رابطه  $\Delta W$  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 خوردگی بر حسب روز است. دانسیته آلیاژ st37 برابر با  $7/85 \ g/cm^3$  و سطح نمونه های دفن شده در خاک برابر با  $220 \ cm^2$  است. با در نظر گرفتن دوره های زمانی ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ روز و مقادیر کاهش وزن اندازه گیری شده، مقادیر  $mmpy$  برای این دوره های زمانی به صورت جدول شماره ۸ محاسبه می شود. مقادیر  $mmpy_1$ ،  $mmpy_2$  و  $mmpy_3$  به ترتیب برای دوره های زمانی ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ روز محاسبه شده است.

همان طوری که در شکل ۱ و جدول ۸ مشخص است، در تمام دوره های زمانی، خاک منطقه CR4 با کمترین هدایت الکتریکی

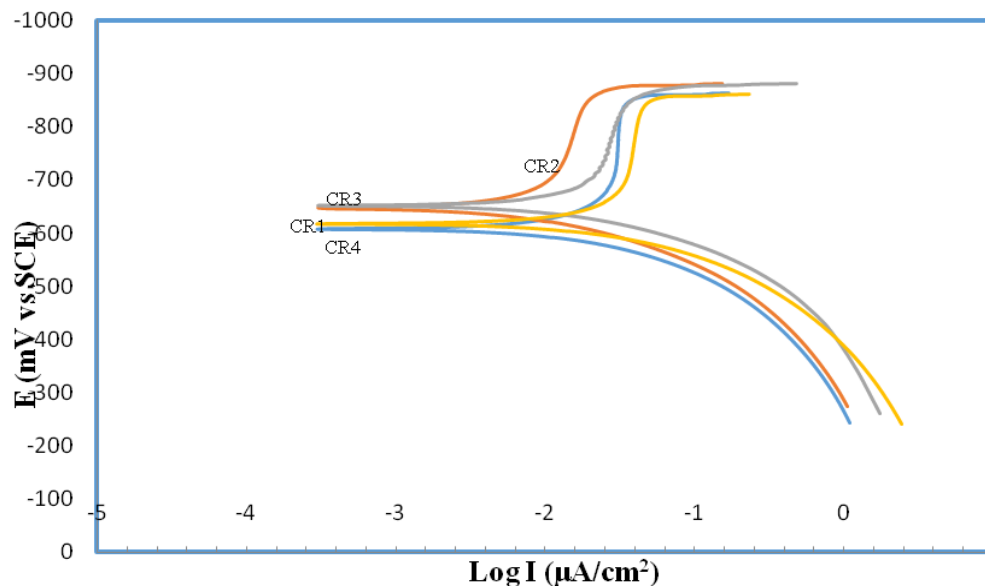




شکل ۱. منحنی های کاهش وزن نمونه های دفن شده در مناطق چهارگانه بعد از ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ روز.

جدول ۹. پارامترهای پلاریزاسیون برای خاک مناطق CR4 و CR3، CR2، CR1

خاک	$R_p$ ( $\Omega$ )	$B_a$ (v/dec)	$B_c$ (v/dec)	$\text{Log } I_{\text{corr}}$	$I_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{\text{corr}}$ (V)	mmpy
CR1	۷۴۸۸	۹۹/۵۶	۶۴۸	-۲/۳۰	۵/۰۰۴	-۶۱۷/۲۰۳	۰/۰۵۷
CR2	۶۸۰۹	۱۲۳	۴۸۶۲	-۲/۱۲	۷/۶۵	-۶۴۷/۳۸۴	۰/۰۸۸
CR3	۵۵۹۲	۱۲۰/۵	۱۱۹۳	-۲/۰۷	۸/۴۹	-۶۵۲/۸۷۴	۰/۰۹۷
CR4	۱۵۲۷۷	۱۰۶	۵۹۳/۵	-۲/۵۹	۲/۵۵	-۶۰۶/۶۹۶	۰/۰۲۹



شکل ۳. منحنی پلاریزاسیون برای چهار خاک CR4 و CR3، CR2، CR1

#### ۵- منابع

- [1] B. Spickelmire, Corrosion Consideration for Ductile Iron Pipe. Cathodic & Anodic Protection, Material performance, USA, 2011.
- [2] A. Benmoussat, M. hadjel, "Corrosion behavior of low carbon line pipe steel in soil environment", JCSE The journal of corrosion science and environment 7, 2013.
- [3] R. Mahmudi, B. Dehghan-Manshadi, H. Mahmudi, A. Abedian, A novel method for materials selection in mechanical design: Combination of non-linear normalization and a modified digital logic method, Materials & Design Volume 28, Issue 1, 2011, pp 8-15.
- [4] ANSI/AWWA, 2005. C105/A21.5. American National Standard for Polyethylene Encasement for Ductile-Iron Pipe Systems, AWWA, Denver.
- [5] مربوط به دفتر نظام فنی، اجرائی معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور می باشد.
- [6] A. Etor, "Electrochemical Measurement of Crevice Corrosion of Type AISI 304 Stainless Steel", A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for the Master of Science in the Department of Chemical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, 2011.
- [7] D.L. Growin, S.M. Leseh, Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity, computers and Electronics in Agriculture 46, 2010, pp135-152.
- [8] R. Rukeh, A. Kpofure, J. Kehinde, "Investigation of soil corrosivity in the corrosion of low carbon steel pipe in soil environment", Journal of applied sciences Research, Pages 466-469, 2011.
- [9] Fukue M., Inoue T., Fujimori Y., Tanabe K., Kita K., Chida T., Nishihara A., "Resistivity change during transport of heavy metal in sand", Engineering Geology, Vol 85, Pages 46-52, 2013.
- [10] A. Benmoussat, M. hadjel, "Corrosion behavior of low carbon line pipe steel in soil Environment", JCSE The journal of corrosion science and environment 7, Pages 23-28, 2012.
- [11] R. Rukeh, A. Kpofure and, J. Kehinde, Investigation of Soil Corrosivity in the Corrosion of Low Carbon Steel Pipe in Soil Environment, Journal of Applied Sciences Research, Volume 2, 2006, pp 466-469.
- [12] S. Srikanth, P. Sankaranarayana and K. Gopalakrishna, Corrosion in a buried pressurised water pipeline. Engineering Failure Analysis, Volume 12, Issue 4, 2011, pp 634-651.

که در این رابطه  $F_i$  کسر جرمی هر عنصر در آلیاژ،  $W_i$  جرم اتمی هر عنصر در آلیاژ و  $n_i$  ظرفیت هر عنصر در آلیاژ است. بنابراین وزن معادل آلیاژ،  $EW$ ، برای ۱ گرم از آلیاژ برابر با معکوس این رابطه است و می توان نوشت:

$$EW = \frac{1}{\sum \frac{n_i f_i}{W_i}} \quad (5)$$

به صورت معمول عناصر بالای ۱ درصد جرمی در آلیاژ در محاسبه منظور می شوند.

با توجه به ترکیب شیمیایی آلیاژ st37 درصد تمام عناصر آلیاژی برای این آلیاژ کمتر از ۱ درصد جرمی است و با توجه به اینکه ظرفیت عنصر آهن در آلیاژ برابر با ۲ و جرم مولی این عنصر برابر با ۵۵/۸۴۷ گرم بر مول است، وزن اکوالانت برای ۱۰۰ گرم از آلیاژ با توجه به معادله ۴ برابر با ۳/۵۸۱ است. بنابراین وزن اکوالانت برابر  $EW = (100 / 3/581) = 27/925$  است. با استفاده از معادله ۳ نرخ خوردگی برای خاک های CR1، CR2، CR3 و CR4 به ترتیب ۰/۰۵۷، ۰/۰۸۸، ۰/۰۹۷ و ۰/۰۲۹ محاسبه شد.

#### ۴- جمع بندی

- ۱- از نتایج اندازه گیری غلظت آنیون های کلرید و سولفات مشاهده می شود ارتباط مستقیمی بین غلظت یون کلرید و هدایت الکتریکی خاک ها وجود دارد و با افزایش غلظت یون کلرید، هدایت الکتریکی افزایش می یابد. از سوی دیگر، آنیون های کربنات و بی کربنات به صورت جزئی میزان خوردگی خاک را کاهش می دهند.
- ۲- با افزایش غلظت کاتیونهای سدیم و پتاسیم موجود در الکترولیت خاک، هدایت الکتریکی کاهش می یابد اما از آنجایی که این کاتیون ها دارای بار مثبت هستند، دخالت چندانی در فرآیندهای خوردگی ندارند و بیشتر بر روی pH خاک تاثیر گذار هستند.
- ۳- نتایج آزمایش های فیزیکی و شیمیایی خاک های منطقه، آزمایش های کاهش وزن میدانی و آزمایش های پلاریزاسیون خطی موید یکدیگر هستند و هر سه آزمایش نشان می دهد که خاک منطقه CR4 دارای کمترین نرخ خوردگی می باشد و با وجود شرایط خوردگی شدید، نسبت به سایر مناطق محل مناسب تری برای دفن مخازن است. شدت خوردگی خاک از منطقه CR3 به CR2 و CR1 کاهش می یابد.
- ۴- نتایج محاسبات mmpy حاصل از آزمایش های میدانی و الکتروشیمیایی اندکی با یکدیگر متفاوت است. ولی با توجه به اینکه آزمایش های کاهش وزنی در شرایط واقعی انجام شده است، از اعتبار بیشتری برخوردار است.