



بررسی اثر خوردگی خاک روی بشکه‌های دفن پسمان‌های با پرتوزایی کم

حمزه فراتی‌راد^{۱*}، حمیدرضا مهاجرانی^۲، مهدی نجات پیشکناری^۲، علی مالکی فارسانی^۲، سعید مومن‌زاده^۲، محمد رستم نژاد^۲، محسن اسدیان^۲
۱. پژوهشکده‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۳۶۵، تهران - ایران
۲. شرکت پسمانداری صنعت هسته‌ای ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵۵۹۳۱، تهران - ایران

چکیده: در این مقاله، خوردگی بشکه‌های دفن پسمان‌های با پرتوزایی کم از جنس فولاد AISI st37 با تحلیل ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی محیط خاکی بررسی شده است. ترکیب شیمیایی خاک آثار خوردگی مهمی بر بشکه‌های فولادی دارد. عوامل اصلی که خوردگی خارجی بشکه‌های دفن پسمان را تحت تأثیر قرار می‌دهند، عبارتند از: رطوبت خاک، مقاومت الکتریکی خاک، نمک‌های محلول، کلریدها، قدرت اسیدی، پتانسیل اکسایش-کاهش و مقدار آنیون‌ها و کاتیون‌ها. در این پژوهش، میزان خوردگی خاک در مناطق کویر مرکزی ایران با استفاده از استاندارد AWWA C105 مطالعه شد. در این مناطق، چهار نمونه خاک از نقاط پیرامون محل‌های دفن پسمان جمع‌آوری و به صورت CR1، CR2، CR3 و CR4 نام‌گذاری شدند. در ابتدا به منظور ارزیابی بهتر خوردگی خاک‌ها، آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی روی خاک‌ها و محلول‌های آماده شده با خاک‌ها انجام گرفت. سپس، نرخ خوردگی بشکه‌های فولادی با آزمایش‌های کاهش وزنی و پلاریزاسیون پتانسیودینامیک اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در تمام روش‌ها، نمونه‌ی خاک CR4، با کم‌ترین هدایت الکتریکی نسبت به خاک‌های دیگر، دارای نرخ خوردگی پایین‌تر است. سرعت خوردگی نمونه‌ها در این منطقه در روش کاهش وزنی ۱۸۰-روزه و در روش الکتروشیمیایی به ترتیب برابر با ۰/۰۶۲۵ و ۰/۰۲۹ mm/y است.

کلیدواژه‌ها: خوردگی مخزن پسمان، مشخصات فیزیکی-شیمیایی، هدایت الکتریکی خاک، اتلاف وزن، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

Investigation of Soil Corrosivity Effect on Low Radioactive Wastes Burial Casks

H. Forati Rad^{*1}, H.R. Mohajerani², M. Nejat Pishkenari², A. Maleki Faresani², S. Momenzade², M. Rostam Nejad², M. Asadian²
1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran
2. Iran Nuclear Waste Management Company, AEOI, P.O.Box: 1439955931, Tehran – Iran

Abstract: In this study, corrosion of AISI st37 steel waste casks was investigated by analyzing the physico-chemical characteristics of the soil medium. The chemical composition of soil has important effects on steel casks. Moisture, soil electrical resistivity, soluble salts, chlorides, pH, redox potential and anions and cations content, as the major parameters, influence the exterior corrosion of waste casks. To carry out this research, the corrosivity of the soil in the central desert regions of Iran has been studied using the AWWA C105 standard. In these regions, 4 samples have been collected at varied points located in the vicinity of the site, named CR1, CR2, CR3 and CR4. At first, for a better assessment of the soils corrosivity, the physical and chemical analyses were conducted on the soil and in the solutions prepared from the soil samples. Then, the rate of corrosion was measured by the weight loss and potentiodynamic polarization methods. The obtained results showed that the CR4 soil sample with the lowest electrical conductivity, compared with the other samples, has the lower corrosion rate in the whole method. Corrosion rates of the samples in this region in the 180-day weight loss method, and in the electrochemical method are equal to 0.0625 and 0.029 mm/y, respectively.

Keywords: Waste Container Corrosion, Physico-Chemical Characteristics, Soil Electrical Conductivity, Weight Loss, Potentiodynamic Polarization

*email: hforatirad@aepi.org.ir



۱. مقدمه

پسمان‌های سطح پایین یا پسمان‌هایی با پرتو زایی کم، از عملیات رآکتورها، بازیافت سوخت مصرفی (یا لوله‌های فلزی که شامل سوخت و دیگر اجزای میله‌های سوخت است) و یا تجهیزات رآکتورهای از رده خارج ناشی می‌شوند. پسمان‌های سطح پایین به صورت جامد خشک هستند یا مایع اضافی آنها به صورت فیزیکی و شیمیایی در زمینه‌ی مناسبی مانند بتن و یا جاذب‌هایی مانند ورمیکولیت مخلوط، و در درون بشکه‌های فولادی جاسازی می‌شوند تا حجمی یکپارچه از مواد پسمان ایجاد شود. دفن پسمان‌های پرتوزا بر این مبنا است که محیط‌های خاکی عمیق، پایدار هستند و به شکل گسترده‌ای به وسیله‌ی تغییرات محیطی برای صدها و یا هزاران سال تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند. موادی که برای ذخیره‌سازی پسمان‌های پرتوزا استفاده می‌شوند، معمولاً به علت خوردگی در زیر زمین در معرض تخریب و نابودی هستند. به منظور تخمین دوره‌ی محدودسازی پسمان‌های پرتوزای دفن شده در بشکه‌های فولادی، مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مناطق دفن پسمان با هدف تعیین میزان خوردگی آنها، باید بررسی شوند [۱].

مهم‌ترین عامل تخریب لوله‌ها و مخازن دفن شده در زیر خاک، خوردگی خاک است [۲، ۳]. عواملی که میزان خوردگی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند بسیار گوناگون هستند که از آن جمله می‌توان به نوع خاک، درصد رطوبت، دما، مقاومت خاک، مقدار یون‌های محلول، pH خاک، پتانسیل اکسایش - کاهش و میزان فعالیت‌های میکروبی در خاک اشاره کرد [۴]. پیسیلو و همکاران [۵] در آزمایشگاه ملی مدیریت پسمان هسته‌ای بروک هاون جهت بررسی اثر محیط دفن روی عملکرد بشکه‌های دفن پسمان، مشخصه‌های مقاومت الکتریکی خاک، pH، دانه‌بندی و نوع خاک، مقدار یون‌های محلول از قبیل Cl^- ، Na^+ ، Mg^{2+} و SO_4^{2-} را اندازه‌گیری کردند.

فولاد ساده‌ی کربنی اگرچه بسیار آماده‌ی خوردگی است، ولی به دلایل اقتصادی (هزینه‌ی نسبتاً کم)، استحکام بالا، جوش‌پذیری و شکل‌پذیری بسیار مناسب، در ساخت بشکه‌های دفن پسمان به شکل گسترده‌ای استفاده می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی میزان خوردگی خاک‌های مناطق کویر مرکزی ایران بر بشکه‌های دفن پسمان فولادی از جنس st37 است.

۲. روش کار

در این پژوهش ابتدا با روش ۱۰ امتیازی و براساس استاندارد AWWA C105 [۶] خاک‌ها از جهت خوردگی طبقه‌بندی می‌شوند. در روش ۱۰ امتیازی، مهم‌ترین ویژگی‌های خاک از جمله میزان مقاومت الکتریکی خاک، pH، درصد رطوبت، پتانسیل اکسایش - کاهش و میزان سولفیدها یا سولفات‌ها و کلریدها به منظور تعیین میزان پتانسیل خوردگی خاک اندازه‌گیری می‌شوند. برای تعیین میزان پتانسیل خوردگی خاک به هر کدام از عوامل اشاره شده، براساس ضرایب موجود در جدول ۱ امتیاز داده می‌شود و مجموع امتیازها محاسبه و به صورت معیاری برای تعیین میزان خوردگی خاک در نظر گرفته می‌شوند. در این روش، اگر مجموع امتیازات بیش‌تر از ۱۰ باشد، خاک به عنوان خاکی با پتانسیل خوردگی بالا در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱. روش ۱۰ امتیازی برای محاسبه‌ی نرخ خوردگی خاک [۶]

امتیاز	مقدار	مشخصات خاک
۱۰	< ۱۵۰۰	مقاومت خاک ($\Omega\text{-cm}$)
۸	۱۵۰۰ - ۱۸۰۰	
۵	۱۸۰۰ - ۲۱۰۰	
۲	۲۱۰۰ - ۲۵۰۰	
۱	۲۵۰۰ - ۳۰۰۰	
۰	> ۳۰۰۰	
۵	۰ - ۲	pH
۳	۲ - ۴	
۰	۴ - ۶٫۵	
۰	۶٫۵ - ۷٫۵	
۰	۷٫۵ - ۸٫۵	
۳	> ۸٫۵	
۰	> +۱۰۰	پتانسیل اکسایش - کاهش (mV)
۳٫۵	(+۱۰۰) - (+۵۰)	
۴	۰ - (+۵۰)	
۵	منفی	
۳٫۵	مثبت	سولفیدها*
۲	اثر یا نشانه	
۰	منفی	
۲	زهکشی ضعیف، معمولاً خیس	رطوبت
۱	زهکشی متوسط، معمولاً مرطوب	
۱۰	زهکشی خوب، معمولاً خشک	

اگر سولفیدها موجود باشند و پتانسیل اکسایش - کاهش منفی و یا پایین (کم‌تر از ۱۰۰ mV) باشد، سه عدد باید به محدوده‌ی سولفیدها اضافه گردد.



و عددی، فقط به ویژگی‌هایی که به ندرت مقادیر عددی به آنها اختصاص می‌یابد (مانند دانه‌بندی) به صورت کیفی امتیاز داده می‌شود و برای سایر ویژگی‌ها ضرایب مقیاس با دو معادله‌ی (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند [۷].

ابتدا یک ویژگی در نظر گرفته می‌شود و به بهترین مقدار در فهرست، مقدار اسمی ۱۰۰ داده می‌شود و دیگر مقادیر به تناسب آن مقیاس می‌گردند. برای یک ویژگی معین، در صورتی که مقادیر بیش‌تر مطلوب باشد، به بیش‌ترین مقدار آن، عدد ۱۰۰ تخصیص داده می‌شود و ضریب مقیاس با رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود [۴]:

$$(1) \text{ مقدار بیشینه‌ی ویژگی } / (100 \times \text{ مقدار عددی هر ویژگی}) = \beta$$

و برای ویژگی‌هایی که مقدار کم‌تر آن مطلوب‌تر است، به کم‌ترین مقدار آن، عدد ۱۰۰ اختصاص داده می‌شود و ضریب مقیاس با رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود:

$$(2) \text{ مقدار عددی هر ویژگی } / (100 \times \text{ مقدار کمینه‌ی ویژگی}) = \beta$$

بعد از مقیاس دادن ویژگی‌های متفاوت، شاخص عملکرد هر خاک (γ) با رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود:

$$(3) \gamma = \sum_i \beta_i \alpha_i$$

در این رابطه i بیان‌گر هر یک از ویژگی‌ها از n خاصیت خاک است [۷].

بعد از طبقه‌بندی خاک‌ها با استفاده از روش ۱۰ امتیازی و وزن‌دهی ویژگی‌ها، آزمایش‌های خوردگی میدانی و الکتروشیمیایی روی نمونه‌های فولادی تهیه شده انجام شد. سپس نتایج آزمایش‌های روش‌های ۱۰ امتیازی، وزن‌دهی ویژگی‌ها و آزمون‌های خوردگی با یک‌دیگر مقایسه شدند.

جهت انجام نمونه‌برداری از خاک‌های منطقه، با توجه به گستردگی سایت و با در نظر گرفتن ملاحظات موجود به منظور دفن شبکه‌های پسمان، چهار نقطه به صورت شاخص انتخاب شدند. این نقاط با موقعیت‌های جغرافیایی مشخص به صورت

در روش ۱۰ امتیازی، تمام عواملی که در میزان خوردگی خاک تأثیرگذار هستند، در نظر گرفته نشده است. از طرفی با استفاده از این روش نمی‌توان مقایسه‌ای بین چند نوع خاک انجام داد. در این پژوهش، به منظور تأثیر دادن تمامی عوامل فیزیکی و شیمیایی خاک و مقایسه خاک‌ها، روش وزن‌دهی خواص با استفاده از روش منطق رقمی استفاده شد. در روش وزن‌دهی خواص، به هر یک از ویژگی‌های خاک یک وزن معین نسبت داده می‌شود که میزان آن وابسته به اهمیت آن ویژگی است. مقادیر منحصر به فرد وزن هر کدام از ویژگی‌های خاک، برای به‌دست آوردن شاخص عملکرد نسبی هر یک از خاک‌ها (γ) به کار برده می‌شود. خاک‌هایی با ضریب عملکرد بالاتر، برای استفاده مناسب‌تر هستند [۷].

در مواردی که ویژگی‌های زیادی از یک خاک که هر کدام به شکل مؤثری روی خوردگی خاک بدون روشن بودن نسبت اهمیت هر یک از آنها تأثیرگذار هستند، ابعاد و ضرایب وزنی، a ، خودبه‌خود اهمیت پیدا می‌کنند. نگارش منطق رقمی $(DL)^{(1)}$ می‌تواند به صورت یک ابزار هدفمند برای محاسبه‌ی a استفاده شود. بنابراین فرایندهای ارزیابی آنچنان ترتیب داده می‌شوند که فقط دو خاصیت در یک زمان در نظر گرفته شوند. در مقایسه‌ی دو خاصیت یا هدف، هدف مهم‌تر با عدد ۳ و هدف کم‌اهمیت‌تر با عدد ۱ ارزش‌گذاری می‌شود. در صورتی که دو خاصیت، اهمیت یکسانی داشته باشند نیز به هر یک از آنها عدد ۲ اختصاص می‌یابد. تعداد تمام تصمیم‌های احتمالی با رابطه‌ی $N=m(m-1)/2$ تعیین می‌شود که m تعداد ویژگی‌ها یا اهداف مطرح شده است. ضریب وزنی، a ، برای هر هدف با تقسیم تعداد تصمیم‌های مثبت برای هر هدف به شمار کل تصمیم‌های احتمالی به دست می‌آید. در این مورد باید مجموع تمام ضرایب وزنی برابر با یک باشد [۷].

برای محاسبه‌ی ضریب مقیاس (β)، می‌توان از دو روش ارزشیابی کیفی و ارزشیابی کیفی- عددی استفاده کرد. در روش اول هر ویژگی به صورت کیفی و مقایسه‌ای ارزش‌یابی می‌شود و از عبارت‌های خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف استفاده می‌شود و به بهترین ویژگی، مقدار ۱۰۰ اختصاص می‌یابد سپس به مقادیر بعدی هر ویژگی به ترتیب اعداد ۷۵/۱۴، ۵۶/۴۹ و ۳۷/۸۵ اختصاص می‌یابد. در روش دوم یا روش ارزشیابی کیفی



مکانیکی تا سمباده‌ی ۱۵۰۰ پولیش شدند. سپس با روشی مشابه با نمونه‌های آزمایش‌های میدانی، چربی‌زدایی و اکسیدزدایی شدند. جهت جلوگیری از خوردگی اتمسفری، نمونه‌ها بلافاصله بعد از انجام فرایند آماده‌سازی سطح، به صورت مناسبی بسته‌بندی و در داخل کیف‌های زیپی محتوی سیلیکاژل نگه‌داری شدند.

در روش پلاریزاسیون خطی، چون خاک دارای مقاومت الکتریکی بسیار بالایی است و توسط دستگاه Autolab جریان بسیار کوچکی از آن عبور می‌کند، از الکترولیت خاک استفاده می‌شود. الکترولیت خاک، محلول صاف شده‌ای از مخلوط خاک کاملاً خشک (حرارت‌دهی به مدت ۴h در دمای ۱۰۵°C در آون) و آب مقطر به نسبت ۲:۱ بعد از ۱۲h اختلاط است. آزمایش پلاریزاسیون با توجه به استاندارد ASTM G59 [۹] انجام گرفت. برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه گالوانواست- پتانسیو استا با ولتاژ قابل اندازه‌گیری ۸V± و سرعت روبش ۲۰V/s و دقت اندازه‌گیری جریان و ولتاژ به ترتیب ۱nA و ۱۰۰μV استفاده شد. آزمایش‌ها با استفاده از یک الکتروود کار (نمونه‌ها با سطح ۱cm^۲)، یک الکتروود مرجع کالومل (SCE)^(۱) و یک الکتروود کمکی پلاتین و در محلول خاکی و نسبت به الکتروود کالومل اشباع (SCE)^(۲) و سرعت روبش ۱mV/s انجام شد. قبل از شروع آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۱h در محلول آزمایش خوردگی قرار گرفتند تا حالت پایدار ایجاد شود. آزمایش‌های خوردگی برای هر نمونه سه بار تکرار شد و برای به‌دست آوردن جریان خوردگی و پتانسیل، از آنها میانگین‌گیری شد. جهت استخراج جریان خوردگی، ابتدا خطی افقی از پتانسیل خوردگی رسم و مماس‌هایی از شاخه‌های آندی و کاتدی در محدوده‌ی حداکثر تا ۲۰۰ mV رسم می‌شوند. این مماس‌ها باید بر روی خط افقی همدیگر را قطع کنند. نقطه‌ی تقاطع برای جریان خوردگی در نظر گرفته شد. با استفاده از رابطه‌ی Stern-Geary [رابطه‌ی (۴)] نیز می‌توان جریان خوردگی را محاسبه کرد [۱۰]:

$$I_{\text{corr}} = \frac{b_a b_c}{2.303 \times (b_a + b_c) \times R_p} \quad (۴)$$

نقاط CR_۱، CR_۲، CR_۳ و CR_۴ نام‌گذاری شدند. نمونه‌برداری از عمق ۱/۵ متری خاک و در محل این نمونه‌های آزمایش‌های خوردگی میدانی انجام شد. نمونه‌های خاک، درون کیسه‌های زیپی پلی‌اتیلنی جمع‌آوری شدند و به منظور جلوگیری از تغییر مشخصه‌های خاک، فوراً جهت انجام آزمون‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل شدند.

سرعت خوردگی کوپن‌های فولادی با استفاده از دو روش کاهش وزنی و آزمایش‌های پلاریزاسیون خطی اندازه‌گیری شد. کوپن‌های مورد استفاده برای آزمایش‌های خوردگی میدانی و الکتروشیمیایی از جنس فولاد St37 که یک فولاد کربنی ساده معمول برای ساخت بشکه است، انتخاب شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ که با روش کوانتومتری تعیین می‌شود، در جدول ۲ گزارش شده است. جهت انجام آزمون‌های خوردگی به روش میدانی که برگرفته از استاندارد NACE-TM 0169 [۸] است، کوپن‌هایی با ابعاد ۱۰×۱۰ cm^۲ تهیه شدند و سپس لایه‌های اکسیدی با استفاده از سنگ مغناطیسی از روی سطح نمونه‌ها حذف شدند. به منظور چربی‌زدایی، نمونه‌ها به مدت ۲۰ min در محلول سود ۱۰٪ در دمای ۶۰°C نگه‌داری و برای اکسیدزدایی به مدت ۱۵ min در دمای آزمایشگاه در محلول هیدروکلریک اسید ۱۰٪ غوطه‌ور شدند. پس از انجام این مراحل، کوپن‌ها توسط جریان هوای گرم، خشک شدند و پس از توزین، در داخل کیف‌های زیپی حاوی سیلیکاژل نگه‌داری شدند. در آزمایش‌های کاهش وزن میدانی، در هر کدام از محل‌های تعیین شده، سه نمونه در عمق ۱/۵ متری و با فاصله ۰/۵ متر در درون خاک دفن شدند. نمونه‌ها به ترتیب بعد از ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ d از محل‌های دفن شده خارج و بلافاصله با ترازویی با دقت ۱۰^{-۴} g توزین شدند.

به منظور انجام آزمون‌های خوردگی الکتروشیمیایی، کوپن‌هایی با ابعاد ۲×۲ cm^۲ آماده و بعد از حذف لایه‌ی اکسیدی سطحی با سنگ مغناطیسی، سطح نمونه‌ها به روش

جدول ۲. ترکیب شیمیایی آلیاژ St37 مورد استفاده در پژوهش

DIN	C	Mn	Si	S	P	Cu	Mo	Ni	Cr	Fe
درجه،										
St37	۰/۱۷	۰/۵۰۱	< ۰/۳	< ۰/۰۵	< ۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۲۶۳	۰/۰۰۸	موازنه شده



الکترولیت مناسب منجر به تسریع فرایندهای خوردگی می‌شود. خاکی با هدایت الکتریکی بالاتر از $100 \text{ m}\Omega/\text{m}$ دارای مقاومت الکتریکی کم‌تر از $1000 \Omega\text{-cm}$ است و در زمره‌ی خاک‌های بسیار خورنده قرار می‌گیرد [۱۱]. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی عصاره‌ی اشباع خاک‌های منطقه (جدول ۳)، نشان می‌دهد که خاک هر چهار منطقه در زمره‌ی خاک‌های بسیار خورنده قرار می‌گیرد و در روش ۱۰ امتیازی، بالاترین امتیاز یعنی ۱۰ به آنها تخصیص می‌یابد [۱۲، ۱۳].

نتایج اندازه‌گیری‌های قدرت اسیدی نشان می‌دهد که خاک‌های هر چهار منطقه در بازه‌ی $\text{pH } 8.47$ تا 9.19 و محدوده‌ی قلیایی ضعیف قرار دارند که بدون ملاحظه‌ی سایر عوامل خوردگی، در گروه خاک‌های غیرخورنده قرار می‌گیرند. در روش ۱۰ امتیازی، به خاک CR_4 با قدرت اسیدی 8.47 امتیاز صفر، و برای سه خاک دیگر که دارای قدرت اسیدی بالاتر از 8.5 هستند، امتیاز ۳ در نظر گرفته شد.

در این رابطه، R_p مقاومت پلاریزاسیون ($\Omega \text{ cm}^{-2}$)، I_{corr} دانسیته جریان خوردگی و b_a و b_c به ترتیب شیب‌های تافل آنودی و کاتدی هستند. برای محاسبه‌ی R_p منحنی جریان خوردگی برحسب ولتاژ که تقریباً یک خط ثابت است، در محدوده‌ی باریک $\pm 20 \text{ mV}$ در نقطه‌ی E_{corr} رسم می‌شود. شیب این خط، مقاومت پلاریزاسیون، R_p ، نامیده می‌شود. شیب‌های تافل آنودی و کاتدی با رسم مماس‌هایی بر روی قسمت‌های خطی منحنی‌های پلاریزاسیون آنودی و کاتدی محاسبه می‌شوند. نتایج محاسبه‌ی جریان خوردگی (I_{corr})، براساس دو روش فوق از هم‌خوانی مناسبی با یک‌دیگر برخوردار است و مقادیر گزارش شده در این پژوهش، مقدار متوسط حاصل از دو روش فوق است.

۳. نتایج و بحث

جدول‌های ۳، ۴ و ۵، نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی انجام گرفته روی خاک مناطق CR_1 ، CR_2 ، CR_3 و CR_4 را نشان می‌دهند. خاکی با هدایت الکتریکی بالا به صورت یک

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های فیزیکی خاک‌های منطقه

ردیف	آزمایش‌های فیزیکی	استاندارد مورد استفاده	CR_1	CR_2	CR_3	CR_4
۱	هدایت الکتریکی بر روی عصاره اشباع خاک ($\text{m}\Omega/\text{m}$)	BS-1377 [۱۴]	۳۸۶۲	۳۹۷۵	۵۲۹۰	۳۵۸۴
۲	رطوبت (%)	ASTM D2216 [۱۵]	۲.۸	۴.۵	۳.۲	۵

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های شیمیایی، الکتریکی و مکانیکی خاک‌های منطقه

ردیف	آزمایش‌های شیمیایی	استاندارد مورد استفاده	CR_1	CR_2	CR_3	CR_4
۱	pH	ASTM G51 [۱۶]	۸.۹	۹.۰۴	۹.۱۹	۸.۴۷
۲	سولفات محلول در اسید خاک در ۱۰۰ گرم خاک (%)	نشریه‌ی ۴۶۷ [۱۷]	۰.۳۸	۰.۲۳	۰.۲۴	۱.۳۸
۳	میزان کربنات‌ها در عصاره ۱ به ۱۰ در ۱۰۰ گرم خاک (%)	BS-1377	۰.۰۰۴	۰.۰۰۳	۰.۰۰۸	Nil
۴	میزان بی‌کربنات‌ها در عصاره ۱ به ۱۰ در ۱۰۰ گرم خاک (%)	BS-1377	۰.۰۲۴	۰.۰۳۵	۰.۰۴۶	۰.۰۲۶
۵	کلرید خاک در ۱۰۰ گرم خاک (%)	BS-1377	۰.۰۶	۰.۰۶	۰.۱۳	۰.۰۷
۶	پتاسیم اکسید (K_2O) در ۱۰۰ گرم خاک (%)	نشریه‌ی ۴۶۷	۱.۷۵	۱.۸	۱.۷۳	۲.۰۹
۷	سدیم اکسید (Na_2O) در ۱۰۰ گرم خاک (%)	نشریه‌ی ۴۶۷	۱.۶۹	۱.۵۶	۱.۵۹	۱.۱۰
۸	منیزیم اکسید (MgO) در ۱۰۰ گرم خاک (%)	نشریه‌ی ۴۶۷	۳.۰	۲.۷۶	۲.۵	۳.۰۳
۹	کلسیم اکسید (CaO) در ۱۰۰ گرم خاک (%)	نشریه‌ی ۴۶۷	۸.۲۸	۷.۰۳	۸.۷۵	۱۵.۲۳
۱۰	مجموع کاتیون‌ها در ۱۰۰ گرم خاک (%)	-	۱۵.۱	۱۳.۳۸	۱۴.۸۱	۲۲.۸۳

جدول ۵. توزیع اندازه‌ی ذرات بزرگ‌تر از الک مش ۳۰۰ براساس استاندارد ASTM D422 [۱۸]

نمونه	CR_1	CR_2	CR_3	CR_4
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 $67 \mu\text{m}$)	۱۰.۱	۱۵	۱۷.۵	۴۹



جدول ۶ مجموع امتیاز خاک‌های هر ۴ نقطه CR۱، CR۲، CR۳ و CR۴ را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشخص است، مجموع امتیاز خاک‌های هر چهار منطقه بالاتر از ۱۰ است که در نتیجه در زمره‌ی خاک‌هایی با میزان خوردگی بالا تقسیم‌بندی می‌شوند. ولی از بین چهار منطقه‌ی بررسی شده، منطقه CR۴ نسبت به سایر مناطق، خوردگی پایین‌تری دارد.

مقایسه‌ی میزان خوردگی خاک‌ها با روش وزن‌دهی و ویژگی‌ها، ارزشیابی می‌شوند. خاکی با pH پایین، یک الکترولیت مناسب به شمار می‌آید. زیرا یون‌های هیدروژن زیادی موجود هستند که به عنوان پذیرنده‌ی الکترون عمل کنند. در حالی که خاک با pH بالا، بیان‌کننده‌ی حضور مقدار زیادی نمک حل شده در خاک است که منجر به افزایش هدایت الکتریکی خاک می‌شود. بنابراین مناسب‌ترین وضعیت، خاکی با pH خنثی است.

خاک‌هایی با هدایت الکتریکی بالا، ارتباط الکتریکی بین دو مقطع در برگرفته‌ی آند و کاتد را به خوبی فراهم می‌کنند. همان‌طوری که گفته شد، هدایت الکتریکی بالاتر به معنی جریان راحت‌تر الکترون‌ها و در نتیجه افزایش نرخ خوردگی است. بنابراین در روش وزن‌دهی و ویژگی‌ها، امتیاز ۱۰۰ به خاکی با کم‌ترین هدایت الکتریکی اختصاص می‌یابد.

مهم‌ترین آنیون‌های حل شده در سیستم‌های خاکی، کلرید، سولفات، فسفات و بی‌کربنات است که کلرید و سولفات مهم‌ترین عامل آنیونی در پدیده خوردگی است. به طور کلی می‌توان گفت که کلریدها، سولفات‌ها و دیگر نمک‌های حل شده مقاومت خاک را کاهش داده و جریان خوردگی را افزایش می‌دهند. بنابراین بالاترین امتیاز به خاک‌هایی با کم‌ترین میزان سولفات اختصاص می‌یابد. یون‌های الکترونگاتیوی مانند آنیون کلرید به سطح لایه‌ی دی‌الکتریک نفوذ کرده و با جذب کاتیون‌های Fe^{2+} تشکیل کلریدهای فلزی سنگین خورنده می‌دهند و این واکنش منجر به مصرف اتم‌های آهن شده (یعنی تسریع در واکنش آندی فلز) و سرعت خوردگی افزایش می‌یابد. در نتیجه خاکی با کم‌ترین میزان یون کلرید، بالاترین امتیاز را به خود اختصاص می‌دهد.

پتانسیل اکسایش - کاهش نشان می‌دهد که آیا یک خاک، قابلیت حفظ باکتری کاهنده‌ی سولفات را دارد یا خیر؟ پتانسیل اکسایش - کاهش پایین نشان‌دهنده‌ی مقدار اندک اکسیژن خاک است و می‌توان نتیجه گرفت که شرایط ایده‌آلی برای تکثیر باکتری کاهنده‌ی سولفات^(۴) (SRB) وجود دارد. باکتری احیاءکننده‌ی سولفات، یک گروه خاص از میکروب‌ها را تشکیل می‌دهد که از سولفات به عنوان قطب گیرنده‌ی الکترون برای تبادل اکسیژن و تولید H_2S به عنوان محصول نهایی استفاده می‌کند. حضور همه جانبه‌ی این باکتری‌ها منجر به خوردگی گسترده در قطعات فلزی می‌شود. این باکتری‌ها یک محیط کم‌اکسیژن را دوست دارند و می‌توانند خوردگی خاک نسبت به فولاد کربنی را تحت تأثیر قرار دهند. باکتری‌های بی‌هوازی کاهنده‌ی سولفات می‌توانند با مقدار اندک یا منفی اکسیژن در خاک پیشرفت کنند. خاکی با پتانسیل اکسایش - کاهش بالای $+100\text{ mV}$ می‌تواند به اندازه کافی هوادار شود به گونه‌ای که رشد باکتری‌ها را به تأخیر بیندازد. در حالی که خاک‌هایی با پتانسیل اکسایش - کاهش اندک یا منفی، محیطی را نشان می‌دهند که برای فعالیت باکتری‌های کاهنده سولفات مناسب هستند. در این مطالعه پتانسیل اکسایش - کاهش تعیین نشد و امتیاز این ویژگی از مقدار سولفات و نوع خاک تخمین زده شد. رس‌ها به علت تراکم بالا، بسیار مستعد به بی‌هوازی شدن و یا عدم تهویه مناسب هستند و بنابراین پتانسیل اکسایش - کاهش پایینی خواهند داشت. خاک‌هایی مانند ماسه‌ها و شن‌ها به علت تهویه‌ی مناسب، احتمال کم‌تری از نظر بی‌هوازی شدن دارند و بنابراین پتانسیل اکسایش - کاهش بالاتری را خواهند داشت. با توجه به مقدار قابل توجه سولفات در هر چهار نوع خاک، پتانسیل اکسایش - کاهش منفی، و در نتیجه امتیاز ۵ برای هر چهار نوع خاک در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، با توجه به ماهیت رسی خاک‌های منطقه، وجود سولفات‌های قابل حل در آب و شرایط قدرت اسیدی، احتمال وجود سولفید منتفی نیست. بنابراین برای اطمینان، در مورد سولفیدها در خاک، امتیاز ۳/۵ در نظر گرفته می‌شود. درصد رطوبت خاک‌های منطقه با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده اندک است ولی به علت زهکشی تقریباً نامناسب، امتیاز ۱ برای هر چهار نوع خاک در نظر گرفته می‌شود.



جدول ۶. مجموع امتیاز خاک‌های ۴ نقطه‌ای CR_۱، CR_۲، CR_۳ و CR_۴ از نظر قدرت خوردگی (در روش ۱۰ امتیازی)

پارامتر اندازه‌گیری شده	مقاومت الکتریکی یا هدایت الکتریکی	pH	پتانسیل اکسایش - کاهش	سولفیدها	رطوبت	مجموع امتیازها
CR _۱	۱۰	۳	۵	۳٫۵	۱	۲۲٫۵
CR _۲	۱۰	۳	۵	۳٫۵	۱	۲۲٫۵
CR _۳	۱۰	۳	۵	۳٫۵	۱	۲۲٫۵
CR _۴	۱۰	۰	۵	۳٫۵	۱	۱۹٫۵

می‌توان گفت که آنیون‌های کربنات و بی‌کربنات، به دلیل این که لایه‌ی چسبنده‌ای روی سطح فلزات تشکیل می‌دهند، موجب کاهش سرعت خوردگی می‌شوند، اما دخالت مستقیمی در فرایندهای خوردگی ندارند [۱۱]. کاتیون‌ها در هدایت الکتریکی خاک مؤثر هستند. با توجه به اعداد به دست آمده برای سدیم و پتاسیم می‌توان گفت با کاهش غلظت این یون‌ها، هدایت الکتریکی نیز کاهش یافته است. کاتیون‌ها به دلیل این که حامل بار مثبت هستند، در واکنش‌های خوردگی دخالت مستقیمی ندارند، و تأثیر مستقیم آنها در pH خاک خواهد بود. یعنی خاک‌هایی که دارای سدیم و منیزیم زیاد باشند دارای خاصیت قلیایی، خاک‌هایی که دارای کلسیم بیش‌تر باشند دارای pH خنثی، و خاک‌هایی که دارای آلومینیم فراوان باشند دارای خاصیت اسیدی خواهند بود. در خاک‌هایی که مقدار سدیم زیاد باشد، نفوذپذیری خاک کاهش یافته و در واقع حرکت آب در داخل بسیاری از این خاک‌ها متوقف می‌شود [۱۲]. بنابراین می‌توان در حالت کلی نتیجه گرفت که با افزایش مقدار سدیم خاک، تراکم خاک افزایش و مقاومت ویژه کاهش می‌یابد. در محیط‌های قلیایی، کاتیون‌های کلسیم و منیزیم، تمایل به تشکیل رسوب‌های اکسیدی و کربناته روی سطح خورده شده دارند و با تشکیل لایه‌ی محافظ، سرعت خوردگی را کاهش می‌دهند. این لایه‌های کربناتی به همراه لایه‌ی اکسید آهن تشکیل شده در روی سطح نمونه، نرخ خوردگی طولانی مدت را کاهش می‌دهند. خاک‌های هر ۴ منطقه، تماماً از نوع خاک‌هایی با ماهیت رسی هستند که در زمره‌ی خاک‌های بسیار خورنده قرار می‌گیرند [۱۱]. درصد رد شده از الک ۳۰۰، مطابق با نتایج جدول ۶ برای خاک مناطق CR_۱، CR_۲، CR_۳ و CR_۴ به ترتیب برابر با ۱۰/۱، ۱۵، ۱۷/۵ و ۴۹ است. در نتیجه، منطقه‌ی

CR_۴ با درصد بالای ذرات ریز، شرایط بسیار مناسبی برای دستیابی به تراکم بالا و عدم نفوذ آب‌های سطحی را فراهم می‌کند که برای کاهش نرخ خوردگی خاک نیز مناسب است [۱۱].

در این پژوهش، جهت مقایسه‌ی نرخ خوردگی خاک‌های مختلف با استفاده از روش وزن‌دهی خواص و منطق رقمی، خواص هدایت الکتریکی، pH، کلریدها، سولفات‌ها، رطوبت، دانه‌بندی و مجموع کاتیون‌ها بررسی شد. بنابراین تعداد تصمیم‌های احتمالی برابر با $N=21$ است. جدول ۷ محاسبه‌ی ضرایب وزنی را با استفاده از داده‌های موجود در جدول‌های ۴ تا ۶، برای هر یک از ویژگی‌ها نشان می‌دهد. نحوه‌ی ارزشیابی و اهمیت هر ویژگی در مقایسه‌ی دو به دو با توجه به روش ده امتیازی انجام شده است. اهمیت ویژگی‌ها در این روش به ترتیب مقاومت الکتریکی (یا هدایت الکتریکی)، نوع خاک و کلریدها، pH و مقدار سولفات، رطوبت و در پایان مجموع کاتیون‌ها هستند. جدول ۸ محاسبه‌ی شاخص عملکرد را با روش ارزشیابی کیفی، و جدول ۹ محاسبه‌ی شاخص عملکرد را با روش ارزشیابی کیفی - عددی نشان می‌دهد.

شکل ۱، مقایسه‌ی شاخص‌های محاسبه شده در روش‌های ارزیابی کیفی و کیفی - عددی را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشخص است، منطقه‌ی CR_۴ در هر دو روش ارزشیابی کیفی و هم‌چنین ارزشیابی کیفی - عددی دارای بالاترین شاخص است که به معنی میزان خوردگی کم‌تر این منطقه نسبت به سایر مناطق است و به خوبی با روش تعیین میزان خوردگی با روش ۱۰ امتیازی مطابقت دارد. با توجه به کم‌تر بودن میزان خوردگی نسبت به سایر مناطق، این منطقه مناسب‌ترین و کم‌خطرترین منطقه جهت دفن مخازن پسمان فولادی است.



جدول ۷. محاسبه ضرایب وزنی برای هر یک از ویژگی‌ها در مقایسه نرخ خوردگی خاک با روش منطق رقیمی

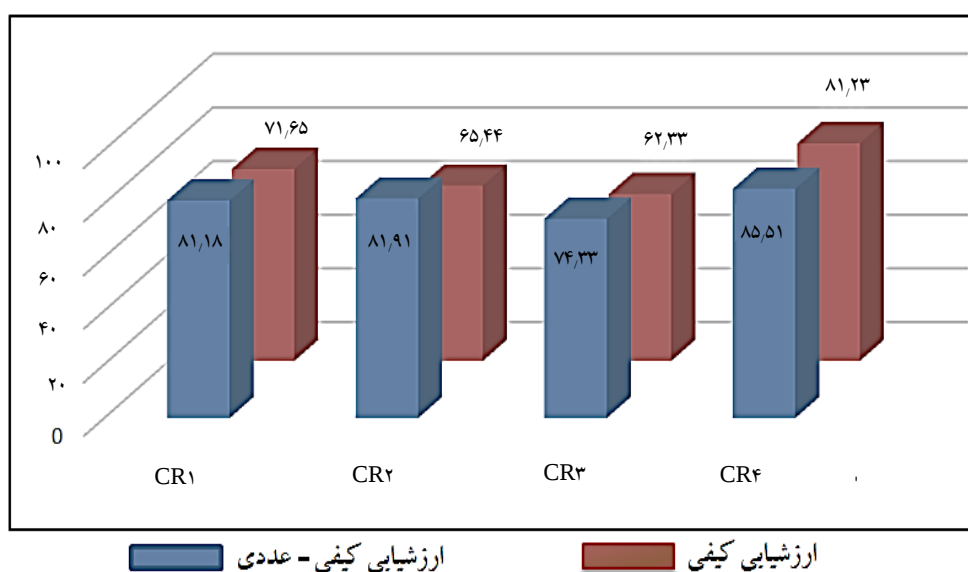
اهداف	تعداد تصمیم‌های احتمالی																			ضرایب وزنی، α_i	تصمیم مثبت
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱
هدایت	۳	۳	۳	۳	۳															۱۸	۰٫۲۱
pH	۱						۱	۲	۳	۱	۳									۱۱	۰٫۱۳
کلریدها												۳	۳	۲	۳					۱۵	۰٫۱۸
سولفات‌ها			۱					۲				۱				۳	۱			۱۱	۰٫۱۳
رطوبت				۱					۱				۱			۱			۱	۳	۸
نوع خاک					۱					۳				۲			۳		۳	۳	۱۵
مجموع کاتیون‌ها						۱					۱				۱			۱		۱	۶

جدول ۸. محاسبه شاخص عملکرد با روش ارزشیابی کیفی

ویژگی منطقه	هدایت الکتریکی	pH	کلریدها	سولفات‌ها	رطوبت	دانه‌بندی	مجموع کاتیون‌ها	$\gamma = \sum \beta_i \alpha_i$
CR۱	۷۵٫۱۴	۷۵٫۱۴	۱۰۰	۵۶٫۴۹	۱۰۰	۳۷٫۸۵	۵۶٫۴۹	۷۱٫۶۵
CR۲	۵۶٫۴۹	۵۶٫۴۹	۱۰۰	۷۵٫۱۴	۵۶٫۴۹	۵۶٫۴۹	۳۷٫۸۵	۶۵٫۴۴
CR۳	۳۷٫۸۵	۳۷٫۸۵	۵۶٫۴۹	۱۰۰	۷۵٫۱۴	۷۵٫۱۴	۷۵٫۱۴	۶۲٫۳۳
CR۴	۱۰۰	۱۰۰	۷۵٫۱۴	۳۷٫۸۵	۳۷٫۸۵	۱۰۰	۱۰۰	۸۱٫۲۳

جدول ۹. محاسبه شاخص عملکرد با روش ارزشیابی کیفی - عددی

ویژگی منطقه	هدایت الکتریکی	pH	کلریدها	سولفات‌ها	رطوبت	دانه‌بندی	مجموع کاتیون‌ها	$\gamma = \sum \beta_i \alpha_i$
CR۱	۹۲٫۸۰	۹۵٫۱۶	۱۰۰	۷۶	۱۰۰	۳۷٫۸۵	۶۶٫۱۴	۸۱٫۱۸
CR۲	۹۰٫۱۶	۹۳٫۶۹	۱۰۰	۹۵	۶۲٫۲۲	۵۶٫۴۹	۵۸٫۶۰	۸۱٫۹۱
CR۳	۶۷٫۷۵	۹۲٫۱۶	۴۶٫۱۵	۱۰۰	۸۷٫۵	۷۵٫۱۴	۶۴٫۸۷	۷۴٫۳۳
CR۴	۱۰۰	۱۰۰	۸۵٫۷۱	۴۲٫۲۲	۵۶	۱۰۰	۱۰۰	۸۵٫۵۱



شکل ۱. مقایسه میزان خوردندگی خاک‌های ۴ نقطه‌ای CR۱، CR۲، CR۳ و CR۴ در مناطق کوبیری مرکزی ایران.



سرعت‌های خوردگی در سه دوره‌ی زمانی مختلف در شکل ۲ با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۱۰ و شکل ۲ مشاهده می‌شود که در تمام دوره‌های زمانی، خاک منطقه CR۴ با کم‌ترین هدایت الکتریکی، دارای کم‌ترین نرخ خوردگی است و خاک منطقه CR۳ با بیش‌ترین هدایت الکتریکی، دارای بالاترین نرخ خوردگی است. تفاوت موجود در mm/y در دوره‌های زمانی مختلف، به علت انجام آزمایش‌ها در دوره‌ی زمانی شش ماهه دوم سال و در نتیجه‌ی بارش‌های فصلی متفاوت در دوره‌های مختلف می‌باشند. مقدار بارش‌های فصلی متفاوت می‌تواند منجر به تغییر مقدار رطوبت خاک شود که به صورت مستقیم روی رفتار خوردگی خاک تأثیرگذار است. با افزایش میزان رطوبت، هدایت الکتریکی و در نتیجه میزان خوردگی خاک افزایش می‌یابد.

جدول ۱۱ نتایج آزمایش‌های خوردگی الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد که به روش پلاریزاسیون خطی که روی محلول‌های خاکی مناطق چهارگانه انجام شده است. شکل ۳ نیز منحنی‌های پلاریزاسیون را برای خاک‌های مناطق چهارگانه نشان می‌دهد. شیب‌های آندی و کاتدی با روش توضیح داده شده در مقدمه، تعیین و نرخ خوردگی برحسب mm/y نیز با استفاده از استاندارد ASTM G102 [۱۹] و با استفاده از رابطه‌ی (۶) محاسبه شد:

$$CR = K \frac{i_{corr}}{\rho} EW \quad (6)$$

که در این رابطه، i_{corr} جریان خوردگی برحسب واحد $\mu A/cm^2$ است. ثابت K برابر با $mm/g/\mu A \times 10^{-3}$ است، ρ برابر چگالی فلز یا آلیاژ مورد نظر برحسب واحد g/cm^3 و EW وزن معادل آلیاژ است.

در روش ارزشیابی کیفی، روند تغییر نرخ خوردگی به ترتیب برای خاک‌های مناطق CR۱، CR۲، CR۳ و CR۴ کاهشی است، در حالی که در روش ارزیابی کیفی و عددی، روند کاهشی نرخ خوردگی به صورت CR۱، CR۲ و CR۳ و CR۴ است. با توجه به این که روش منطق رقعی برای ارزیابی نرخ خوردگی خاک‌های منطقه، یک روش کاملاً نوآورانه است، به صورت دقیق نمی‌توان گفت که نحوه‌ی امتیازدهی به صورت کیفی و یا کیفی - عددی بهترین روش است. برای ارزیابی دقیق، نتایج حاصل از این دو روش با نتایج خوردگی آزمایش‌های میدانی و الکتروشیمیایی باید مقایسه شود.

نتایج کاهش وزن نمونه‌ها از آزمایش‌های خوردگی میدانی، در جدول ۱۰ نشان داده شده است. ΔW_1 ، ΔW_2 و ΔW_3 به ترتیب کاهش وزن نمونه‌ها بعد از ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰d است. مقادیر mm/y_1 ، mm/y_2 و mm/y_3 نیز به ترتیب سرعت خوردگی نمونه‌ها (میلی‌متر در سال) برای دوره‌های زمانی ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰d است. سرعت خوردگی نمونه‌ها با توجه به استاندارد NACE TM 0169 با استفاده از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود [۸]:

$$mm/y = 365 \cdot \left(\frac{\Delta W}{d \cdot A \cdot T} \right) \quad (5)$$

که در این رابطه، ΔW کاهش وزن فلز در معرض خوردگی برحسب g ، d چگالی فلز برحسب g/cm^3 ، A سطح در معرض خوردگی برحسب cm^2 و T مدت زمان خوردگی برحسب روز است. چگالی آلیاژ st37 برابر با $7.85 g/cm^3$ و سطح نمونه‌های دفن شده در خاک برابر با $220 cm^2$ است. با در نظر گرفتن دوره‌های زمانی ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰d و مقادیر کاهش وزن به دست آمده، مقادیر mm/y برای این دوره‌های زمانی، مطابق جدول ۱۰ محاسبه می‌شود.

جدول ۱۰. مقادیر کاهش وزن نمونه‌های دفن شده در مناطق چهارگانه بعد از ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰d

منطقه	ΔW_1 (gr)	ΔW_2 (gr)	ΔW_3 (gr)	mm/y _۱	mm/y _۲	mm/y _۳
CR۱	۱،۰۷۱۴	۳،۲۵	۶،۳۴۴	۰،۰۵۰۲	۰،۰۷۶۱	۰،۰۷۴۳
CR۲	۱،۹۱۵	۴،۲۸۳۷	۹،۵۵۱۸	۰،۰۸۹۷	۰،۱۰۰۴	۰،۱۱۱۹
CR۳	۱،۷۶۰۸	۴،۹۷۱۷	۱۵،۸۴	۰،۰۸۲۵	۰،۱۱۶۵	۰،۱۲۷۰
CR۴	۰،۴۸۷۶	۱،۲	۵،۳۴	۰،۰۲۲۸	۰،۰۲۸۱	۰،۰۶۲۵

جدول ۱۱. پارامترهای پلاریزاسیون برای خاک مناطق CR۱، CR۲، CR۳ و CR۴

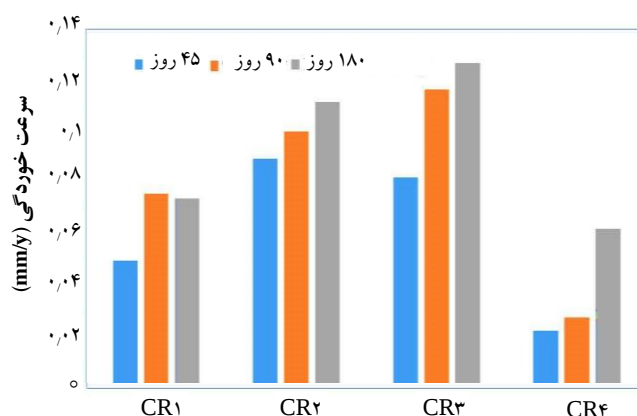
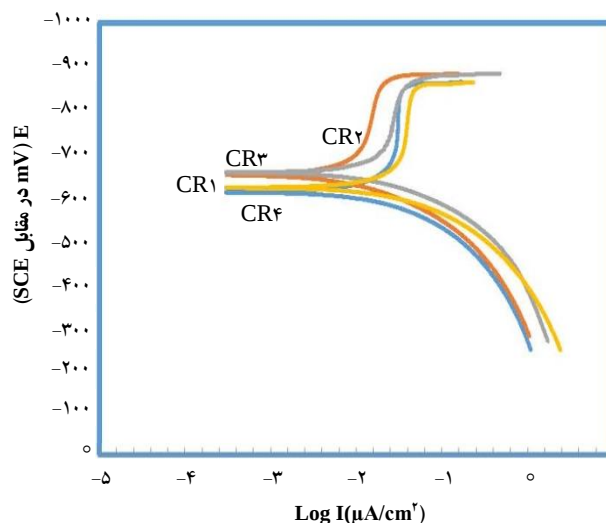
خاک	$R_p (\Omega)$	$B_a (V/dec)$	$B_c (V/dec)$	$\log I_{corr}$	$I_{corr} (\mu A/cm^2)$	$E_{corr} (V)$	mm/y
CR۱	۷۴۸۸	۹۹،۵۶	۶۴۸	-۲،۳۰	۵،۰۰۴	-۶۱۷،۲۰۳	۰،۰۵۷
CR۲	۶۸۰۹	۱۲۳	۴۸۶۲	-۲،۱۲	۷،۶۵	-۶۴۷،۳۸۴	۰،۰۸۸
CR۳	۵۵۹۲	۱۲۰،۵	۱۱۹۳	-۲،۰۷	۸،۴۹	-۶۵۲،۸۷۴	۰،۰۹۷
CR۴	۱۵۲۷۷	۱۰۶	۵۹۳،۵	-۲،۵۹	۲،۵۵	-۶۰۶،۶۹۶	۰،۰۲۹

خاک‌های CR۱، CR۲ و CR۴ نیز به ترتیب با کاهش هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد که به معنی کاهش شدت جریان خوردگی و در نتیجه کاهش میزان خوردگی این خاک‌ها است. جریان خوردگی نیز که مهم‌ترین عامل در برآورد میزان خوردگی یک محیط است، به ترتیب برای خاک‌های مناطق CR۳، CR۲، CR۱ و CR۴ کاهش می‌یابد. مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های کاهش وزنی و پلاریزاسیون با روش وزن‌دهی ویژگی‌ها نشان می‌دهد که شیوه‌ی ارزشیابی کیفی- عددی تطابق بهتری با آزمایش‌های خوردگی دارد. نتایج تمام آزمایش‌های تعیین میزان خوردگی نشان می‌دهند که خاک CR۴ با کم‌ترین هدایت الکتریکی، دارای کم‌ترین میزان خوردگی است و خاک CR۳ با بالاترین هدایت الکتریکی دارای بیش‌ترین نرخ خوردگی در بین خاک‌های منطقه است [۲۰].

۴. نتایج

نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه، آزمایش‌های کاهش وزن میدانی و آزمایش‌های پلاریزاسیون خطی تأییدکننده‌ی یک‌دیگر هستند و هر سه آزمایش نشان می‌دهند که خاک منطقه CR۴ دارای کم‌ترین نرخ خوردگی است. سرعت خوردگی در این منطقه در روش کاهش وزنی در دوره‌های ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰d به ترتیب برابر با ۰،۰۲۲۸، ۰،۰۲۸۱ و ۰،۰۶۲۵ mm/y و در روش الکتروشیمیایی برابر با ۰،۰۲۹ mm/y است.

با وجود شرایط خوردگی شدید، منطقه‌ی CR۴ نسبت به سایر مناطق، محل مناسب‌تری برای دفن مخازن است. روند تغییر شدت جریان خوردگی به ترتیب برای خاک‌های CR۳، CR۲، CR۱ و CR۴ کاهش می‌یابد.


شکل ۲. مقایسه‌ی سرعت خوردگی در دوره‌های زمانی مختلف ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰d

شکل ۳. منحنی پلاریزاسیون برای چهار خاک CR۱، CR۲، CR۳ و CR۴

همان‌طوری که از جدول ۱۱ مشخص است، پتانسیل خوردگی فولاد St37 در محلول خاکی CR۳ نسبت به سه محیط دیگر منفی‌تر است که به معنی کم‌تر بودن مقاومت به خوردگی فولاد St37 در محیط خاکی CR۳ نسبت به سه محیط دیگر و در نتیجه شدت خوردگی بیش‌تر آن است. مقاومت پلاریزاسیون



[9] ASTM G59, Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, (2014).

[10] 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, (2001).

[11] A. Samouelian, I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, G. Richard, Electrical resistivity survey in soil science: a review, *Soil Till. Res.* **83** (2005) 173-193.

[12] M. Fukue, T. Inoue, Y. Fujimori, K. Tanabe, K. Kita, T. Chida, A. Nishihara, Resistivity change during transport of heavy metal in sand, *Eng. Geo.* **85** (2006) 46-52.

[13] A. Benmoussat, M. Hadjel, Corrosion behavior of low carbon line pipe steel in soil Environment, *Corr. Sci. Env.* **7** (2005) 23-28.

[14] BS 1377, Methods of test for soils for civil engineering purposes. General requirements and sample preparation, (1990).

[15] ASTM D2216, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, (1996).

[16] ASTM G51, Standard Test Method for Measuring pH of Soil for Use in Corrosion Testing, (2012).

[17] Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Planning and Supervision, Guidelines for Laboratory Analysis of Soil and Water Samples, No.467, (1995).

[18] ASTM D422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, (2007).

[19] ASTM G102, Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements, (2010).

[20] R. Rukeh, A. Kpofure, A. Watefe, J. Kehinde, Investigation of soil corrosivity in the corrosion of low carbon steel pipe in soil environment, *App. Sci. Res.* **2** (2006) 466-469.

مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های کاهش وزنی و پلاریزاسیون با روش وزن‌دهی ویژگی‌ها نشان می‌دهد که شیوه‌ی ارزشیابی کیفی- عددی، تطابق بهتری با آزمایش‌های خوردگی دارد. نتایج محاسبات mm/y حاصل از آزمایش‌های میدانی و الکتروشیمیایی، اندکی با یک‌دیگر متفاوت است، ولی با توجه به این که آزمایش‌های کاهش وزنی در شرایط واقعی انجام شده است، از اعتبار بیش‌تری برخوردار است.

پی‌نوشت‌ها

1. Digital Logic
2. SCE: Standard Calomel Electrode
3. SCE: Saturated Calomel Electrode
4. Sulfate-Reducing Bacteria

مرجع‌ها

[1] W.F. Holcomb, A Survey of Packaging for Solidified Low-Level Radioactive Waste, Ohio Press, (1978).

[2] E. Levlin, Corrosion of Water Pipe Systems due to Acidification of soil and Groundwater, Royal Institute of Technology, England, Ph.D. thesis, (1992).

[3] R.L. Starkey, K.M. Wight, Anaerobic Corrosion of Iron in soil, *Am. Gas Ass. Bull.* **17** (1983), 11-13.

[4] E. Schaschle, G.A. Marsh, Some New Views on Soil Corrosion, *Mat. Protect.* **2** (1963) 8-17.

[5] P.L. Piciulo, C.E. Shea, R.E. Barletta, Analyses of Soils at Commercial Radioactive-Waste-Disposal Sites, *Corro. Sci.* **45** (1993) 45-56.

[6] ANSI/AWWA, C105/A21.5, American National Standard for Polyethylene Encasement for Ductile-Iron Pipe Systems, (2005).

[7] 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, *Mat. Des.* **28** (2007) 8-15.

[8] NACE/ASTM TM0169, Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, Edition, ISBN: 1-57590-098, (2012).