

تعیین کلاس خوردگی اتمسفری شهر تهران

محمد زینلی^۱، احسان شفیعی^{۲*}، ابوالفضل سلیمان آهی^۳ و علیرضا نصر اصفهانی^۴

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران

۳- کارشناس، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

۴- مربی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران

*Shafiei.ehsan.mse@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۸/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۱/۲۷)

چکیده

در این تحقیق به تعیین کلاس خوردگی اتمسفری شهر تهران بر پایه اطلاعات محیطی و سرعت خوردگی نمونه‌های استاندارد در طی یک سال نمونه گذاری پرداخته شد. بر این اساس نمونه‌هایی به فرم‌های مسطح و فتری از جنس آلومینیوم، مس و روی تهیه شد و در بازه‌های زمانی مشخص، میزان کاهش وزن آن‌ها ثبت گردید. همچنین بر اساس استاندارد ایزو ۹۲۲۳ نرخ رسوب آلاینده‌های کلریدی و سولفوری و مدت زمان خیس بودن طی مدت نمونه گذاری برای پنج نقطه از شهر تهران تعیین شد.

واژه‌های کلیدی:

خوردگی اتمسفری، آلومینیوم، مس، روی، آلاینده‌های کلریدی و سولفوری.

۱- مقدمه

تخمینی داشته و به دلیل عدم ارائه اطلاعات کمی در بسیاری از موارد ناکارآمد می‌باشد [۴]. هر چند نرخ خوردگی اتمسفری به فاکتورهای زیادی وابسته است اما تنها تعداد اندکی از آن‌ها بر حسب زمان قابل اندازه‌گیری می‌باشند، از جمله آن‌ها می‌توان به نرخ رسوب آلاینده‌ها، مدت نمونه گذاری و مدت زمان خیس بودن اشاره کرد [۵]. با توجه به اثر اسیدی کننده آلاینده‌های اتمسفری به خصوص کلریدها و دی اکسید گوگرد، افزایش نرخ رسوب این مواد منجر به افزایش تخریب ناشی از خوردگی خواهد شد [۶]. البته آلاینده‌های اتمسفری دیگری نیز وجود دارند

عبارت «خوردگی اتمسفری» در برگزیده تخریب سطحی فلزات در معرض هوا می‌باشد و به واسطه کاربرد وسیع فلزات متداول در هوای آزاد، شایع‌ترین نوع خوردگی محسوب می‌شود [۱-۲]. بر همین اساس مطالعات بین‌المللی در زمینه هزینه‌های خوردگی نشان داده است که ۴-۲٪ تولید ناخالص هر کشور صرف مقابله با این نوع خوردگی می‌شود [۳]. میزان مهاجم بودن ترکیبات اتمسفری به ۲ روش قابل تعیین است، یکی با اندازه‌گیری متغیرهای محیطی و دیگری با اندازه‌گیری نرخ خوردگی نمونه‌های فلزی، نشان داده شده است که روش اول تنها جنبه

که به واسطه حلالیت بسیار بالای دی اکسید گوگرد (حدود ۲۶۰۰ برابر اکسیژن)، این ترکیب می‌تواند در مناطق کاتدی با سرعت بیشتری نسبت به اکسیژن کاهش یابد و در نتیجه آن باعث افزایش نرخ حلالیت آندی شود. نقش دی اکسید گوگرد به عنوان یک تسریع کننده سرعت خوردگی کاملاً مشهود است. بر اساس مطالب ذکر شده در استاندارد ایزو ۹۲۲۵ در ارتباط با اندازه‌گیری نرخ رسوب دی اکسید گوگرد به روش صفحات قلیایی، نرخ رسوب دی اکسید گوگرد طبق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد [۱۰].

$$R_{(SO_2)} = \frac{m}{A.t} \quad (2)$$

m: جرم دی اکسید گوگرد رسوب کرده بر حسب میلی گرم.
A: سطح صفحات قلیایی بر حسب مترمربع (منظور سطح مؤثر در تماس با هوا است).
t: مدت نمونه گذاری بر حسب روز.

۱-۱-۲- کلریدها:

شوری اتمسفری در کل منجر به افزایش نرخ خوردگی اتمسفری می‌گردد. جدای از نقش نمک‌های رطوبت دوست مانند $MgCl_2$ و $NaCl$ در تشکیل سریع تر فیلم مرطوب سطحی، شرکت مستقیم یون‌های کلرید در واکنش‌های الکتروشیمیایی نیز بسیار محتمل است. از فلزات آهنی، عمدتاً بیان شده است که آنیون‌های کلریدی برای ترکیب با کاتیون‌های آهنی ناشی از واکنش آندی، با یون‌های هیدروکسیل در رقابت هستند این در حالی است که ترکیبات آهن - کلرید عمدتاً ناپایدار بوده و حل می‌شوند. اما در مورد فلزات غیر آهنی مانند روی و مس که نمک‌های کلریدشان تمایل کمتری به حلالیت دارند، نرخ خوردگی اتمسفری به میزان کمتری نسب به آهن و فولاد به نرخ رسوب این آلاینده وابسته است [۱۱]. بر اساس مطالب گفته شده در استاندارد ایزو ۹۲۲۵ در ارتباط با اندازه‌گیری نرخ رسوب کلریدها به روش شمع خیس^۲، نرخ رسوب ذرات کلریدی طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد [۱۰].

که مطالعات کمتری بر روی مکانیزم عملشان انجام شده است. که این مورد می‌تواند یا به دلیل خوردگی کم این آلاینده‌ها باشد مانند بسیاری از ترکیبات آلی، یا علی‌رغم قدرت تخریب بالایشان غلظت پایینی در جو دارند، مانند کلرین [۷].

۱-۱-۱- آلاینده‌های محیطی

۱-۱-۱-۱- دی اکسید گوگرد

دی اکسید گوگرد، به عنوان محصول احتراق سوخت‌های فسیلی، نقش مهمی را در خوردگی اتمسفری در محیط‌های صنعتی و شهری ایفا می‌کند. به واسطه حلالیت بالا در آب، این ترکیب تمایل بسیار زیادی به تشکیل اسید سولفوریک در حضور لایه‌ی مرطوب سطحی فلزات دارد. بر همین اساس اکسید شدن دی اکسید گوگرد به یون‌های سولفات در سطح فلزات طبق واکنش (۱) صورت می‌گیرد:



الکترون‌های مورد نیاز در واکنش (۱-۱) از واکنش انحلالی آندی فلز تأمین می‌شود. از تشکیل یون‌های سولفات از دی اکسید گوگرد به عنوان مهم‌ترین عامل سرعت بخشی خوردگی یاد شده است. برای آهن و فولاد، حضور همین یون‌های سولفات منجر به تشکیل سولفات آهن شده و در نهایت یون‌های سولفات آزاد شده از تشکیل سولفات آهن منجر به ایجاد حمله کاتالیتی اتوماتیک بر روی سطح آهن می‌شوند [۸]. خاصیت اسیدی کننده دی اکسید گوگرد می‌تواند منجر به افزایش سرعت خوردگی شود اما این اثر به دلیل محافظت کنندگی اکسیدها و هیدروکسیدها از مرتبه دوم اهمیت برخوردار است. در فلزات غیر آهنی مانند روی نیز یون‌های سولفات نقش محرک خوردگی را ایفا می‌کنند اما فرآیند کاتالیتی اتوماتیک به دلیل حضور اکسیدها و هیدروکسیدهای چسبنده به سطح برقرار نخواهد بود. در مقادیر بیشتر، سولفات‌های موجود در لایه‌های مرطوب سطحی پیوند قوی‌تری ایجاد کرده و باعث حل شدن فیلم اکسیدی روی سطح خواهند شد که این خود باعث افزایش سرعت خوردگی خواهد شد [۹]. روزن فیلد^۱ بیان کرد

دارد، شروع می‌شود و به تبع آن فیلمی محافظ از کربنات روی پایه $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$ تشکیل خواهد شد. بر همین اساس در نمونه گذاری‌های طولانی مدت روی، ترکیبات متفاوتی وابسته به سرعت رسوب آلاینده‌های کلریدی و سولفیدی تشکیل خواهند شد. در محیط‌های دریایی که مشخصه آن‌ها میزان بالای Cl^- نسبت به دی اکسید گوگرد می‌باشد، لایه‌ای با قدرت محافظت کنندگی کم از کلرید روی $Zn_5Cl_2(OH)_8.H_2O$ در طی مدت نمونه گذاری تشکیل می‌شود [۱۵].

۱-۲-۳- آلومینیوم

آلومینیوم یکی از فراوان ترین عناصر طبیعت است و به واسطه خواصی همچون دانسیته پایین، مدول الاستیک بالا، رسانایی حرارتی و الکتریکی بالا و مقاومت نسبی به خوردگی کاربرد بسیاری در صنایع دارد [۱۶]. در صورت قرارگیری آلومینیوم و آلیاژهایش در معرض هوای مرطوب لکه‌هایی مشکی و خاکستری رنگ روی آن ایجاد می‌شود. میزان این لکه‌ها وابستگی چندانی به ترکیب فیلم مرطوب سطحی نداشته و نرخ لکه دار شدن عمدتاً توسط نرخ نفوذ اکسیژن به فیلم مرطوب سطحی کنترل می‌شود. البته توافقی جمعی در مورد اثر آلاینده‌های محیطی چون Cl^- و SO_2 بر روی آلومینیوم وجود دارد. در حضور SO_2 بایستی نقش عوامل خوردنده دیگر همچون O_3 و H_2O_2 را نیز در نظر گرفت. در مقایسه با دیگر فلزات، آلومینیوم سرعت خوردگی کمتری را در هوای آزاد از خود نشان می‌دهد که دلیل آن را می‌توان در تشکیل لایه اکسیدی قوی و تقریباً نامحلول آن جستجو کرد. به طوری که ذکر شده است این لایه اکسیدی در pH های ۴-۸/۶ پایدار خواهد بود [۹].

۱-۲-۳- مدت زمان خیس بودن

بر اساس استاندارد ایزو ۹۲۲۳ بیان می‌شود که مدت زمان خیس بودن عبارت است از تعداد ساعاتی از سال که رطوبت نسبی بالای ۸۰٪ و دما بالای $5^{\circ}C$ می‌باشد. لازم به ذکر است که در این استاندارد تنها اثر متقابل دما و رطوبت نسبی در تعیین مدت زمان

$$R_{(Cr)} = \frac{2(V_3 - V_4)C_2 \times 35.5V_T}{V_A \cdot At} \quad (3)$$

V_3 : حجم نترات جیوه مورد استفاده برای تیتراسیون نمونه‌ها به میلی‌لیتر

V_4 : حجم نترات جیوه مورد استفاده برای تیتراسیون نمونه‌های خام به میلی‌لیتر

V_A : حجم محلول استفاده شده برای تیتراسیون (در اینجا ۱۰ میلی‌لیتر = V_A)

V_T : حجم کل محلول تهیه شده بر حسب میلی‌لیتر

C_2 : غلظت تیتراست بر حسب مول در لیتر (در اینجا $C_2 = 0.0075$)

۱-۲-۲- فلزات مورد آزمایش

۱-۲-۱- مس

مطالعات بسیار وسیعی بر روی خوردگی اتمسفری مس و آلیاژهای آن چه در محیط بیرون و چه محیط‌های کنترل شده صورت گرفته است [۱۲]. این تحقیقات نشان می‌دهند که رنگ سطحی تمیز از مس تحت شرایط نمونه‌گذاری محیطی از صورتی روشن به قهوه‌ای تیره تغییر می‌کند که پتینا^۳ نامیده می‌شود. پتینا حاصل از واکنش شیمیایی مس با مقادیر ناچیز آلاینده‌های اتمسفری به خصوص کلریدها و سولفات‌ها می‌باشد بر همین اساس ترکیب پتینا و به تبع آن کاهش وزن نمونه وابستگی زیادی به شرایط محیطی خواهند داشت [۱۳]. مندوزا و کوروو^۴ [۱۴] در اطلاعاتی که در مورد خوردگی اتمسفری کوبا منتشر کردند بیان نمودند که خوردگی اتمسفری مس به فاکتورهایی چون مدت زمان خیس بودن و ترکیب شیمیایی لایه سطحی وابسته است که این فاکتورها خود به نوعی بیان کننده مدت اثر لایه سطحی بر روی فلز هستند.

۱-۲-۲- روی

روی به واسطه کاربرد وسیع در صنایع پوشش دهی و گالوانیزه کردن فولادها جهت جلوگیری از خوردگی، اهمیت بسیاری زیادی دارد. خوردگی اتمسفری روی با تشکیل سریع فیلمی نازک از هیدروکسید روی که به نظر می‌رسد ساختاری متفاوت

شکل (۲) نمایی کلی از سایت نمونه گذاری را نشان می دهد.



شکل (۱): موقعیت سایت‌های برای اندازه‌گیری دو آلاینده کلر و دی اکسید گوگرد



شکل (۲): نمایی کلی از سایت نمونه گذاری

خیس بودن در نظر گرفته شده‌اند [۴]. این در حالی است که نایزین زو^۵ و همکارانش بر اساس مطالعات آزمایشگاهی دریافتند که وجود ذرات نمکی رطوبت دوست و همچنین گرد و غبار منجر به تسریع تشکیل شبنم شده و در نتیجه آن در رطوبت‌های نسبی کمتر از حد بحرانی نیز احتمال تشکیل فیلم مرطوب وجود خواهد داشت [۲]. از این منظر که این پارامتر نقش تعیین کننده‌ای در فرآیندهای خوردگی الکتروشیمیایی دارد از اهمیت بسزایی برخوردار است [۱۷]. در این تحقیق به تعیین کلاس خوردگی اتمسفری شهر تهران بر پایه اطلاعات محیطی و سرعت خوردگی نمونه‌های استاندارد در طی یک سال نمونه گذاری پرداخته شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

شهر تهران در ۵۱ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است و ارتفاع آن بین ۱۸۰۰ متر در شمال تا ۱۲۰۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰ متر در جنوب متغیر است [۱۸].

نمونه گذاری فلزات آلومینیوم، مس و روی در مرکز شهر تهران و در منطقه عباس آباد مطابق با استاندارد ایزو ۹۲۲۶ انجام گردید [۱۹]. همچنین طبق استاندارد ایزو ۹۲۲۵ نمونه گذاری برای اندازه‌گیری دو آلاینده کلر و دی اکسید گوگرد در مرکز، شمال، جنوب، شرق و غرب تهران انجام گردید. شکل (۱) موقعیت سایت‌های مزبور را نشان می دهد. نمونه های فلزی به صورت مسطح در ابعاد $۱۰۰ \times ۱۵۰ \times ۳$ میلی متر و تهیه شدند. آنالیز شیمیایی نمونه‌ها در جدول (۱) آمده است. پس از تهیه نمونه‌ها در ابعاد فوق الذکر فرآیند کد گذاری، آماده سازی سطحی و شستشوی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM G1-03 صورت گرفت. آنگاه وزن اولیه آن‌ها با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت 10^{-4} کیلوگرم اندازه گیری و جهت انتقال به سایت بسته بندی شدند [۲۰]. برای جلوگیری از تماس مستقیم نمونه‌های فلزی با فلز سازنده میز و تشکیل پیل گالوانیکی از پایه‌های تفلونی برای نگه داشتن نمونه‌ها استفاده می شود.

جدول (۱): آنالیز شیمیایی نمونه‌ها

فلز	Cd%	Mg%	Pb%	Sn%	Zn%	Al%	Cu%	Mn%	% S	P%	Si%	Fe%
آلومینیوم	۰/۱۹	۰/۴۶	۰/۸	۰/۰۵	۱/۸۲	۹۴/۹۱	۰/۵۳	۰/۰۷۴	-	-	۰/۲۷	۰/۸۱
مس	-	-	۰/۳	۰/۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۵	۹۹/۰۱	۰/۰۳	-	-	۰/۲	۰/۱۵
روی	۰/۶۶	-	۰/۸۷	-	۹۸/۶۷	۰/۳۹	۰/۰۱	-	-	-	-	-

دهد [۵]. اما با توجه به بررسی‌های انجام شده توسط مورسلو و کوروو [۲۱]، تشکیل سریع لایه محافظ در آلومینیوم به واسطه واکنش پذیری بالای آن و همچنین وجود آلاینده‌های دیگر از جمله H_2S می‌تواند منجر به ایجاد این ناهماهنگی شود.

به این ترتیب بیشترین سرعت خوردگی در مراحل ابتدایی نمونه گذاری به ترتیب برای روی، مس و آلومینیوم به دست آمد. با بررسی نمودارهای کاهش وزن و سرعت خوردگی کلیه نمونه‌ها مشاهده می‌شود که با گذشت زمان نمونه گذاری، میزان کاهش وزن نمونه‌ها افزایش و سرعت خوردگی کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به تشکیل بیشتر لایه‌های اکسیدی و همچنین رسوب بیشتر ذرات آلودگی و گرد و غبار نسبت داد. با تشکیل بیشتر لایه‌های اکسیدی و با توجه به عدم تمایل زیاد این لایه در فلزات مذکور در جذب رطوبت، در نهایت سرعت خوردگی به واسطه کم شدن سطح تماس فلز با محیط کاهش می‌یابد. علت افزایش نرخ رسوب دی اکسید گوگرد در فصول سرد سال را می‌توان در افزایش استفاده عمومی از وسایل گرمای فسیلی دانست. همچنین نوسانات نرخ رسوب ذرات کلریدی را می‌توان در اثر متقابل شویندگی باران و قدرت انتقال ذرات نمکی توسط باد جستجو کرد [۲]. بدین ترتیب علت بیشتر بودن نرخ رسوب دی اکسید گوگرد در مناطق جنوبی تهران را می‌توان فعالیت بیشتر واحد های صنعتی در این منطقه دانست. با توجه به محدوده های ذکر شده در استاندارد اینزو ۹۲۲۳ کلاس نرخ رسوب آلاینده‌ی کلریدی S_1 و برای آلاینده‌ی سولفور P_0 تعیین شد.

نمونه‌های مورد استفاده در دوره‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه به تعداد مشخص برداشته شده و پس از شستشو با محلول‌های ذکر شده در جدول (۲)، میزان کاهش وزن نمونه‌ها ثبت گردید. اطلاعات سرعت خوردگی و کاهش وزن نمونه‌ها بر اساس استاندارد اینزو ۹۲۲۶ در اشکال (۳ و ۴) نشان داده شده‌اند.

همچنین با استفاده از روش‌های گفته شده در قسمت‌های (۱-۱) و (۱-۲) نرخ رسوب کلرید و دی اکسید گوگرد در ۵ نقطه از شهر تهران در زمان‌های مشخص اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است جهت حفظ دقت و تکرارپذیری فرآیند، در تمامی مراحل سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. اطلاعات مربوط به نرخ رسوب آلاینده‌ها به صورت مقایسه‌ای در اشکال (۵) و (۶)، نشان داده شده‌اند. با رسم نمودارهای رطوبت نسبی بر حسب ساعت، مدت زمان خیس بودن در سال نیز برای شهر تهران تعیین شد.

جدول (۲-۱): محلول‌های شستشو مورد استفاده

فلز	محلول	دما
آلومینیوم	200gr CrO3+ 800 gr water	۸۰°C
مس	500gr HCL+500gr Water	۲۵°C
روی	50ml Phosphoric acid + 20gr CrO3+Water	۸۰°C

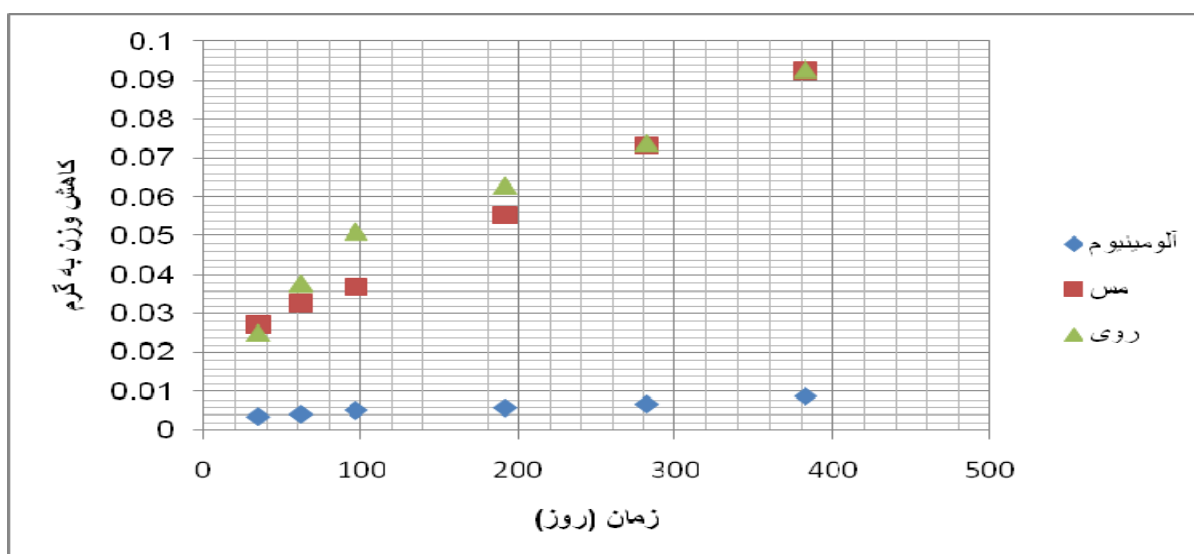
۳- نتایج و بحث:

با توجه به اینکه مس در میان این سه فلز نجیب تر از بقیه است انتظار می‌رود که کنترل سرعت خوردگی را به خود اختصاص

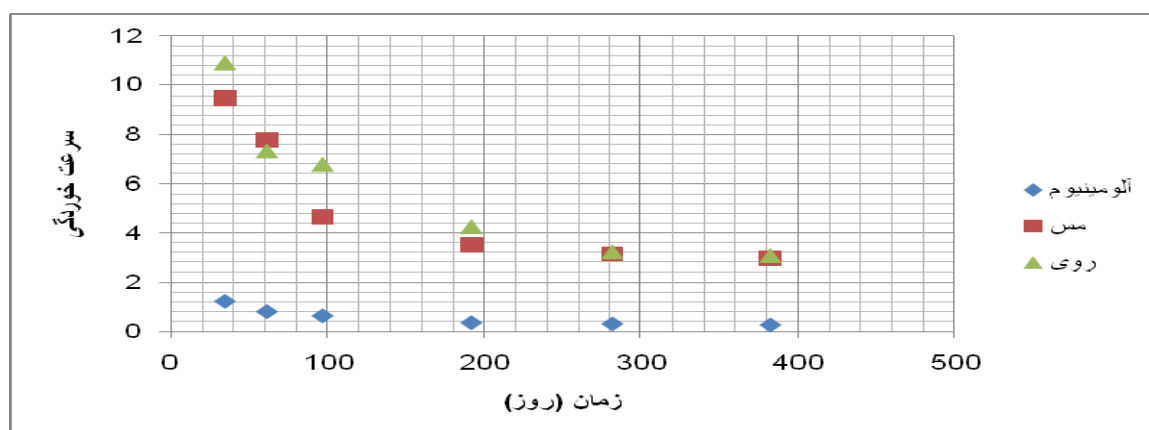
همچنین مدت زمان خیس بودن به طور میانگین برای شهر تهران در محدوده t_3 به دست آمد. جدول (۳) کلاس خوردگی و محیط را برای فلزات مس، روی و آلومینیوم به صورت تخمینی و قطعی بر اساس ایزو ۹۲۲۳ بیان می کند.

جدول (۳): کلاس خوردگی محیط را برای فلزات مس، روی و آلومینیوم به صورت تخمینی و قطعی.

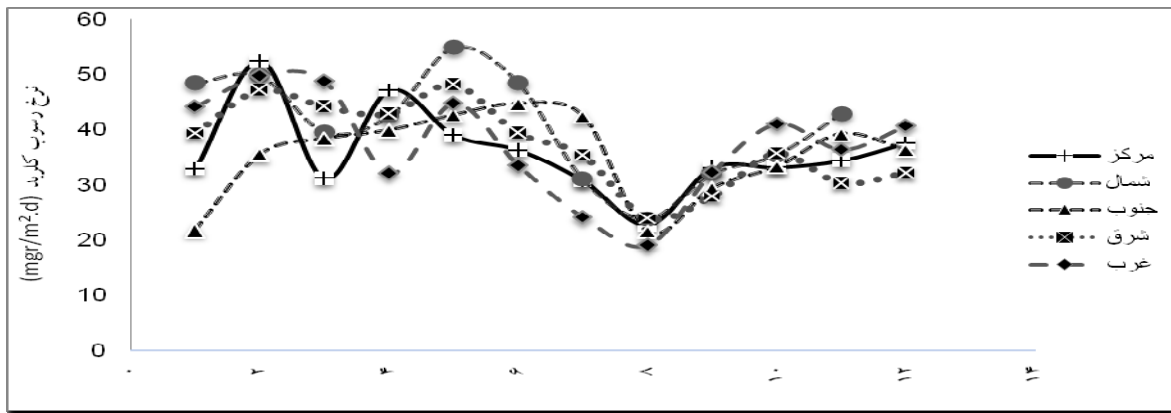
نوع فلز	کلاس متغیرهای محیطی	کلاس خوردگی قطعی محیط	کلاس خوردگی تخمینی محیط
مس	S1,P0,t3	C2-C3	C3
روی	S1,P0,t3	C2-C3	C3
آلومینیوم	S1,P0,t3	C2-C3	C3



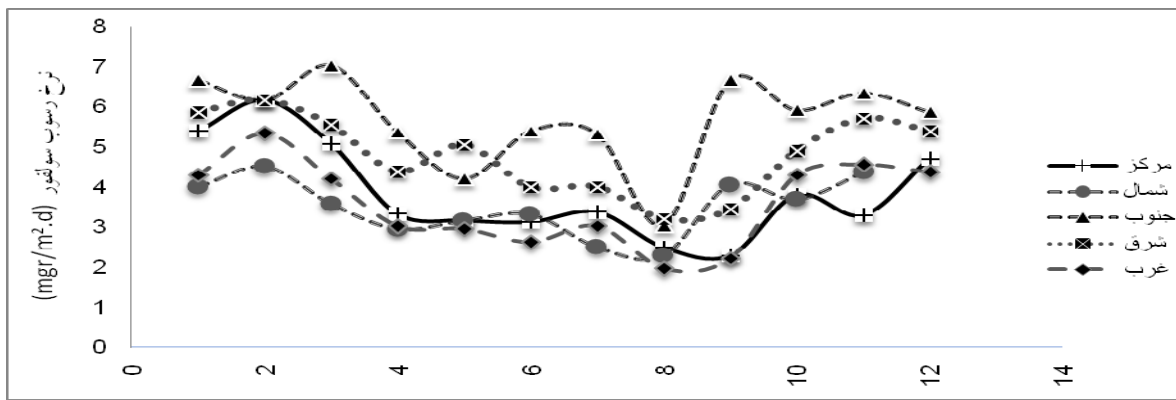
شکل (۳): مقایسه کاهش وزن نمونه‌های فلزی



شکل (۴): مقایسه سرعت خوردگی نمونه‌های فلزی



شکل (۵): نمودار نرخ رسوب کلرید برحسب ماه برای پنج منطقه از شهر تهران



شکل (۶): نرخ رسوب سولفور برحسب ماه در پنج نقطه از شهر تهران

۴- نتیجه گیری:

رسوب آلاینده‌ها و مدت زمان خیس بودن و همچنین به صورت قطعی بر اساس نرخ خوردگی اتمسفری نمونه‌های استاندارد تعیین شد.
۶- تطابق نسبتاً خوبی بین دو روش تخمینی و قطعی در تعیین کلاس خوردگی محیط احساس می‌شود.

۱- به ترتیب نرخ خوردگی اتمسفری از روی به مس و آلومینیوم در محیط شهر تهران کاهش می‌یابد.

۲- نرخ رسوب دی اکسید سولفور در فصول سرد سال به واسطه استفاده بیشتر سوخت‌های فسیلی در وسایل گرمازا افزایش می‌یابد.

۳- نرخ رسوب دی اکسید سولفور در مناطق جنوبی شهر تهران بیشتر از دیگر مناطق به دست آمد.

۴- کلاس نرخ رسوب آلاینده‌های کلریدی و سولفوری به ترتیب P_0 و S_1 تعیین شد.

۵- کلاس خوردگی محیط به صورت تخمینی بر اساس نرخ

۵- مراجع

- [1] Uhlig's Corrosion Handbook, 2th Ed. R.Winston, Revise, 2000.
- [2] N.Xu, L.Zhao, C.Ding, C.Zhang, R.Li, Q.Zhong, Corros. sci. 44 (2002) 163-170.

- ASM int., 1984.
- [17] C. Corvo, T. Perez, Y. Martin, J. Reyes, L.R. Dzib, J. Gonzalez, A. Castaneda, Corros, Sci, 50 (2008) 206 -207.
- [۱۸] محمد زینلی، ابوالفضل سلیمان آهی، تعیین خوردگی شهر تهران، پایان نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۹.
- [19] Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Determination of Corrosion Rate of Standard Specimens for the Evaluation of Corrosivity; ISO 9226; 1992.
- [20] ASTM G01, "Standard Practice for Preparing Characterization of Atmospheric Test Sites".
- [21] A. Mendoza, F. Corvo, Corros. sci. 42 (2000) 1123 - 1147.
- [3] M. Natesan, G. Venkatachari, N. Palanis wang, Corros, sci, 48 (2006) 3584-3585.
- [4] Corrosion of Metals and Alloys – Corrosivity of Atmospheres – Classification; ISO 9223; 1992.
- [5] J. Morales, F. Diaz, J. Hernandez, S. Gonzales, V. Cano, Corros. Sci, 49 (2007) 526-541.
- [۶] احسان شفیعی، تعیین خوردگی پالایشگاه آبادان، پایان نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۸.
- [7] A.R. Mendoza, A.F. Corvo, Corros Sci. 41 (1999)75.
- [8] K. Barton. Protection Against Atmospheric Corrosion, 1976, John Wiley and Sons, London.
- [9] S. Syed; Atmospheric Corrosion of Materials; Emirates Journal for Engineering Research, 11 (1), 1-24 (2006).
- [10] Corrosion of Metals and Alloys- Corrosivity of Atmospheres- Measurement of Pollution; ISO 9225; 1992 (E).
- [11] C. Arroyave, F.A. Lopez, M. Morcillo, Corros. Sci., 37 (1995) 1751.
- [12] I.T.E. Fonseca, R. Picciochi, M. H. Mendonca, A.C. Ramos, Corros. Sci. 46 (2004) 548.
- [13] R. Vera, D. Delgado, B. M. Rosales, Corros. Sci. 50 (2008) 1080.
- [14] A.R. Mendoza, A.F. Corvo, Corros. Sci. 41 (1999) 75.
- [15] D.de la Fuents, J.G. Castano, M. Morcillo, Corros. Sci. 49 (2007) 1420-1421.
- [16] E, Aluminum: Prop. And Physical Metallurgy, Metal Park,

۶- پی نوشت

- 1- Rozenfeld
- 2- Wet candle
- 3- Patina
- 4- Mendoza & Corvo
- 5- Naixin Xu
- 6- Marcillo & Corvo