



# آزمایشگاه خوردگی فلزات

(رشته شیمی)

دکتر زهرا منصف خوش حساب      زری هوشیار

## بسم الله الرحمن الرحيم

### پیشگفتار ناشر

کتاب‌های دانشگاه پیام نور حسب مورد و با توجه به شرایط مختلف یک درس در یک یا چند رشته دانشگاهی، به صورت کتاب درسی، متن آزمایشگاهی، فرادرسی، و کمک درسی چاپ می‌شوند.

**کتاب درسی** ثمره کوشش‌های علمی صاحب اثر است که براساس نیازهای درسی دانشجویان و سرفصل‌های مصوب تهیه و پس از داوری علمی، طراحی آموزشی، و ویرایش علمی در گروه‌های علمی و آموزشی، به چاپ می‌رسد. پس از چاپ ویرایش اول اثر، با نظرخواهی‌ها و داوری علمی مجدد و با دریافت نظرهای اصلاحی و متناسب با پیشرفت علوم و فناوری، صاحب اثر در کتاب تجدیدنظر می‌کند و ویرایش جدید کتاب با اعمال ویرایش زبانی و صوری جدید چاپ می‌شود.

**متن آزمایشگاهی** (م) راهنمایی است که دانشجویان با استفاده از آن و کمک استاد، کارهای عملی و آزمایشگاهی را انجام می‌دهند.

**کتاب‌های فرادرسی** (ف) و **کمک درسی** (ک) به منظور غنی‌تر کردن منابع درسی دانشگاهی تهیه و بر روی لوح فشرده تکثیر می‌شوند و یا در وبگاه دانشگاه قرار می‌گیرند.

**مدیریت تولید محتوا و تجهیزات آموزشی**



## فهرست مطالب کتاب

|     |                                                                                                                   |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| هفت | پیشگفتار                                                                                                          |
| ۱   | بخش اول آشنایی با مفاهیم خوردگی                                                                                   |
| ۳   | مقدمه                                                                                                             |
| ۷   | فصل اول مواردی که باید قبل از انجام آزمایش های خوردگی مورد توجه قرار گیرند                                        |
| ۷   | ۱-۱ آماده کردن قطعه فلزی                                                                                          |
| ۷   | ۲-۱ تمیز کردن نمونه ها                                                                                            |
| ۸   | ۳-۱ اندازه گیری و توزین                                                                                           |
| ۸   | ۴-۱ روش های قرار دادن قطعه فلزی در محیط خورنده                                                                    |
| ۹   | ۵-۱ زمان آزمایش                                                                                                   |
| ۹   | ۶-۱ سرعت خوردگی                                                                                                   |
| ۱۴  | ۷-۱ تفسیر آزمایش های خوردگی                                                                                       |
| ۱۷  | فصل دوم آشنایی با دستگاه های الکتروشیمیایی                                                                        |
| ۱۷  | ۱-۲ پیل های الکتروشیمیایی                                                                                         |
| ۲۱  | ۲-۲ پیل های خوردگی                                                                                                |
| ۲۲  | ۳-۲ الکترودهای مورد استفاده در مطالعات خوردگی                                                                     |
| ۲۴  | ۴-۲ پتانسیواستات                                                                                                  |
| ۲۷  | بخش دوم آزمون های خوردگی                                                                                          |
| ۲۹  | آزمایش ۱ اثر pH بر خوردگی آهن در آب                                                                               |
| ۲۹  | هدف: مطالعه سرعت خوردگی آهن در محیط های اسیدی، خنثی و قلیایی با استفاده از آزمون غوطه وری                         |
| ۳۴  | آزمایش ۲ پیل غلظتی                                                                                                |
| ۳۴  | هدف: اثر اختلاف غلظت یون فلزی در محلول، بر خوردگی در اتصال گالوانیکی دو فلز                                       |
| ۳۷  | آزمایش ۳ خوردگی دو فلزی                                                                                           |
| ۳۷  | هدف: اندازه گیری پتانسیل الکترودها به تنهایی و در حالت زوج گالوانیکی و مشاهده تأثیر زوج گالوانیکی بر خوردگی فلزات |

|    |                                                                                                        |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۴۰ | آزمایش ۴ پیل حرارتی                                                                                    |
| ۴۰ | هدف: بررسی اثر اختلاف دما بر خوردگی مس در یک الکترولیت                                                 |
| ۴۳ | آزمایش ۵ پیل اختلاف دمشی                                                                               |
| ۴۳ | هدف: بررسی اثر غلظت اکسیژن بر خوردگی فلز در تماس با محلول                                              |
| ۴۶ | آزمایش ۶ روئین شدن آهن در محیط اسیدی                                                                   |
| ۴۶ | هدف: مشاهده روئین شدن آهن در محلول اسید سولفوریک با استفاده از پلاریزاسیون آندی                        |
| ۴۹ | آزمایش ۷ آزمون پاشش نمک و مه آب نمک                                                                    |
| ۴۹ | هدف: بررسی خوردگی فولاد در محیط آب نمک                                                                 |
| ۵۲ | آزمایش ۸ تأثیر حرارت بر خوردگی فولاد                                                                   |
| ۵۲ | هدف: ارزیابی خوردگی فولاد در اثر حرارت در محیط خشک                                                     |
| ۵۴ | آزمایش ۹ تشخیص خوردگی بین دانه ای در فولاد زنگ زن                                                      |
| ۵۴ | هدف: ارزیابی و تشخیص خوردگی بین دانه ای در فولاد زنگ زن با استفاده از آزمایش استرایکر                  |
| ۵۷ | آزمایش ۱۰ حفاظت کاتدی فولاد                                                                            |
| ۵۷ | هدف: جلوگیری از خوردگی فولاد در محیط اسیدی با استفاده از روش حفاظت کاتدی                               |
| ۶۰ | آزمایش ۱۱ آبکاری مس به روش الکتروشیمیایی                                                               |
| ۶۰ | هدف: ایجاد پوشش مس بر روی قطعه فلزی به منظور حفاظت از خوردگی با استفاده از آبکاری به روش الکتروشیمیایی |
| ۶۳ | آزمایش ۱۲ ارزیابی خوردگی حفره ای فولاد زنگ زن در محلول فرو کلرید                                       |
| ۶۳ | هدف: آشنایی با چگونگی بررسی خوردگی حفره ای فولاد زنگ زن                                                |
| ۶۸ | آزمایش ۱۳ تشخیص عیوب در فلز                                                                            |
| ۶۸ | هدف: استفاده از آزمایش جریان گردابی برای تشخیص ترک یا عیب در یک آلیاژ برنج                             |
| ۷۰ | آزمایش ۱۴ مقایسه محیط های خورنده                                                                       |
| ۷۰ | هدف: بررسی خوردگی میخ آهنی در محیط های مختلف شیمیایی و در حضور فلزات دیگر                              |
| ۷۳ | پیوست                                                                                                  |
| ۷۶ | واژه نامه                                                                                              |
| ۷۷ | منابع                                                                                                  |

## پیشگفتار

اگر چه به دلیل تنوع فرایندهای خوردگی، روش‌های ارزیابی خوردگی و همچنین روش‌های محافظت از خوردگی، طرح آزمایش‌هایی که بتواند در برگیرنده همه مطالب فوق باشد برای نویسنده میسر نبود، اما تلاش جدی به عمل آمد که با طرح آزمایش‌های نسبتاً ساده، مفاهیم اساسی که به صورت تئوری آموخته می‌شود به دانشجویان دانشگاه پیام‌نور معرفی شود تا آن‌ها ضمن مواجهه با پدیده خوردگی به‌طریق عملی، بتوانند با هدف مهار خوردگی و کاهش اثرات زیانبار آن، جهت کسب مهارت‌های لازم گام‌های مؤثری بردارند.



## بخش اول

### آشنایی با مفاهیم خوردگی



## مقدمه

خوردگی را می‌توان یک واکنش فیزیکی- شیمیایی متقابل بین یک شیء و محیط اطراف آن دانست که باعث تغییر در خواص شیء و یا محیط اطراف آن می‌شود. واژه خوردگی از کلمه لاتین کروژن<sup>۱</sup> به معنای جویدن یا گاز زدن گرفته شده که به خورده شدن سطح فلز مربوط می‌شود. یکی از واژه‌های غلط در مورد خوردگی آن است که خوردگی را با زنگ‌زدگی<sup>۲</sup> یکسان دانست. زنگ‌زدگی به نوع خاصی از خوردگی آلیاژهای آهن و فولاد اطلاق می‌شود، در حالی که خوردگی شامل بیشتر فلزات می‌باشد. علاوه بر این، برای بیان وقوع ضایعات در غیر فلزات از واژه‌های دگردیسی<sup>۳</sup> و یا تدریوریشن<sup>۴</sup> به معنای پوسیدگی استفاده می‌شود که با مکانیزم خوردگی فلزی تفاوت دارد. نیروی محرکه اصلی در خوردگی، پایداری ترمودینامیکی است. به عبارت دیگر، در تمام مواد بخصوص فلزات، تمایل ترمودینامیکی برای از دست دادن الکترون‌های اضافی و رسیدن به حالت پایدار ترمودینامیکی وجود دارد که اساس فرایند خوردگی را تشکیل می‌دهد. هنگامی که فلز به صورت ترکیبات کانی در سنگ معدن وجود دارد از نظر ترکیبی پایدار است اما طی فرایندهای استخراج فلز از سنگ معدن، عمل کاهش (گرفتن الکترون) رخ می‌دهد که سبب تشکیل فلز خالص می‌شود که از نظر ترمودینامیکی نیمه پایدار است. چنانچه این فلز در شرایط مساعد قرار گیرد شروع به اکسایش (از دست دادن الکترون) می‌کند که به این فرایند خوردگی گفته می‌شود. بنابراین خوردگی فلز یک واکنش طبیعی است که خسارات و صدمات بسیار زیادی را به صنایع وارد می‌کند. تخمین هزینه‌های سالانه خوردگی در ایران صدها هزار میلیارد ریال است. علاوه بر این خوردگی سبب تمام شدن منابع طبیعی می‌شود. بطور مثال فولاد از سنگ آهن بدست می‌آید. برای تولید فولاد بیش‌تر، سنگ آهن بیشتری از معادن استخراج می‌شود و مقدار سنگ آهن در طبیعت به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین کاهش مقدار خوردگی سبب کاهش زیان اقتصادی و منابع طبیعی می‌گردد.

---

1. Corrosion  
2. Rust  
3. Degradation  
4. Deterioration

مکانیزم‌های مختلفی در خوردگی دخالت دارند که باعث ایجاد انواع خوردگی‌ها می‌شوند. علیرغم تنوع خوردگی‌ها، می‌توان آن‌ها را براساس مکانیزم خوردگی، نوع محیط خورنده و روش‌های محافظت در برابر خوردگی به شکل زیر تقسیم کرد:

خوردگی بر اساس مکانیزم شامل خوردگی شیمیایی، الکتروشیمیایی و یا خوردگی با ماهیت فیزیکی (مکانیکی) می‌شود.

خوردگی بر حسب نوع محیط خورنده شامل خوردگی در محیط‌های آبی (الکتروشیمیایی)، خوردگی در حلال‌های آلی و عاری از آب (شیمیایی)، خوردگی در املاح مذاب (الکتروشیمیایی)، خوردگی در فلزات مذاب (فیزیکی) و خوردگی به وسیله گازهای خشک (شیمیایی) است که با توجه به نوع محیط خورنده، با مکانیزم‌های مختلفی رخ می‌دهد. برای مثال خوردگی در حلال‌های آلی دارای ماهیت شیمیایی است چون که محیط خورنده غیر الکترولیت است.

بطور کلی روش‌های حفاظت از خوردگی شامل روش‌های الکتروشیمیایی (نظیر حفاظت کاتدی)، شیمیایی (مثل تبدیل سطح فلز به آلیاژ)، فیزیکی (مثل پوشش سطح فولاد کربن‌دار با فولاد زنگ نزن بوسیله جوشکاری) و روش‌های مکانیکی (مانند پاشش فلز مذاب بر سطح فلز مورد نظر و ایجاد روکش) می‌باشند.

آزمون‌های خوردگی با هدف شناخت علل و مکانیزم خوردگی و به منظور شناسایی مواد مناسب‌تر جهت ارائه روش‌های حفاظت و جلوگیری از خوردگی فلزات انجام می‌شوند. آزمون‌های خوردگی یا به‌صورت آزمون‌های خدماتی و یا آزمون‌های آزمایشگاهی اجراء می‌شوند.

در آزمون‌های آزمایشگاهی خوردگی، مطالعات آزمایشگاهی تحت شرایط مشابه با شرایط واقعی محیط خوردگی فلز، اما در مقیاس کوچک تر اجراء می‌شوند. آزمون‌های آزمایشگاهی برای کنترل کیفیت مواد فلزی و ارزیابی نقش حفاظتی پوشش‌های حاصل مورد استفاده قرار می‌گیرند. آزمون‌های آزمایشگاهی شامل "آزمون‌های دراز مدت" و "آزمون‌های کوتاه مدت (سرعت یافته)" هستند. در آزمون‌های کوتاه مدت شرایط آزمایش طوری تنظیم می‌شوند که یک یا چند عامل مؤثر بر خوردگی تقویت شده تا خوردگی در زمان کوتاه تری رخ دهد در حالیکه در آزمون‌های دراز مدت، خوردگی آنچنان که در عمل رخ می‌دهد مورد بررسی قرار می‌گیرد. باید توجه شود که در

آزمون‌های سرعت یافته، ترکیب شیمیایی محیط خورنده حفظ می‌شود و فقط عواملی نظیر دما، رطوبت و یا غلظت مواد خورنده تقویت می‌شوند. هرچه زمان آزمایش بیش‌تر کاهش داده شود نتایج بدست آمده در شرایط آزمایشگاهی از نتایج واقعی متفاوت‌تر خواهند شد. باید توجه داشت که پیش‌بینی درست طول عمر مواد و دوام قطعات با استفاده از نتایج حاصل از آزمون‌های کوتاه مدت غیر ممکن است و این نتایج فقط جهت بررسی مقدماتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال از این آزمون‌ها می‌توان مقاومت در برابر خوردگی و نقش حفاظتی موادی را که برای اولین بار مورد مصرف قرار گرفته‌اند بررسی کرد.



## فصل اول

# مواردی که قبل از انجام آزمایش‌های خوردگی باید مورد توجه قرار گیرند

### ۱-۱-۱ آماده کردن قطعه فلزی

بر روی هر سطح فلزی مقداری پوسته سطحی یا اکسید و همچنین آلودگی‌های متفاوتی وجود دارد که سبب ایجاد خطا در تعیین سرعت خوردگی می‌شود. بنابراین ابتدا باید سطح فلز را کاملاً تمیز نمود. پرداخت کاری به وسیله سنباده شماره ۱۲۰ یا معادل تقریبی، آن یک روش ساده برای تمیز کردن سطح نمونه است. اگر سطح نمونه دارای پوسته اکسیدی ضخیم و یا بسیار زبر باشد لازم است قبل از پرداخت کاری با سنباده، از عملیات ماشین‌کاری، سنگ‌زنی یا پرداخت کاری با سنباده‌های خشن‌تر (با شماره بیشتر) استفاده شود. در تمام این مراحل باید از گرم شدن بیش از حد نمونه در اثر سایش جلوگیری شود.

### ۱-۱-۲ تمیز کردن نمونه‌ها

نظافت نمونه در انجام آزمون‌های خوردگی بسیار مهم است. نمونه‌ها باید قبل از انجام آزمون با استفاده از مواد گریس‌زدا تمیز و چربی‌گیری شوند. چون ماهیت شیمیایی مواد روغنی و گریس‌ها متفاوت است. بنابراین برحسب نوع آلودگی سطح می‌توان از حلال گریس‌زدای مناسب استفاده نمود. معمولاً حلال‌های الی فرار مانند اتانول و کلروفرم استفاده می‌شوند. گریس‌زدایی را می‌توان با غوطه‌ور ساختن شیء در یک مخزن حاوی حلال گریس‌زدا و یا به وسیله یک مسواک آغشته به حلال انجام داد. پس از این مرحله

سطح مورد نظر را به وسیله آب شستشو داده و آبکشی می‌کنند چنانچه قطرات آب در سطح نمونه باقی نمانند گریس‌زدایی درست و نمونه تمیز تلقی می‌شود. پس از مرحله گریس‌زدایی، نمونه‌ها را به وسیله الکل یا استن شسته و سپس خشک می‌نمایند (به منظور اجتناب از آلوده شدن نمونه‌ها از تماس آن‌ها با انگشت باید جلوگیری شود). علاوه بر این، در بعضی از موارد مانند آزمون غوطه‌وری، تمیز کردن سطح نمونه پس از انجام آزمایش برای تعیین مقدار کاهش وزن فلز ضروری است. به طوری که تمیز کردن ناقص بر نتیجه آزمایش تأثیر مستقیم دارد. یکی از روش‌های متداول، سائیدن سطح فلز با یک قطعه لاستیکی در زیر شیر آب است. در این روش فرض بر این است که رسوباتی که در این حالت کنده می‌شوند موقع استفاده عملی نیز از سطح فلز کنده شده و بقیه رسوبات برجا مانده به هنگام استفاده کنده نخواهند شد و باقی می‌مانند. چنانچه رسوبات برجای مانده بر روی سطح، بسیار ضخیم باشند باید با استفاده از روش‌های مکانیکی مانند کاردک زدن، برس زدن، سائیدن با سنباده، ماسه پاشی و یا روش‌های شیمیایی (استفاده از حلال‌ها و مواد شیمیایی) و یا روش الکترولیتی، سطح نمونه مورد نظر را تمیز نمود.

### ۱-۳-۱ اندازه‌گیری و توزین

قطعه فلزی آماده شده برای هر آزمایشی باید به طور دقیق با ترازو توزین و ابعاد آن با کولیس اندازه گرفته شود. بعد از توزین و تعیین اندازه، قطعه باید بلافاصله در محیط خورنده یا دسیکاتور قرار داده شود، بخصوص اگر فلز در برابر اتمسفر مقاوم نباشد.

### ۱-۴-۱ روش‌های قرار دادن قطعه فلزی در محیط خورنده

باید توجه کافی شود که قطعه فلزی کاملاً در تماس با محیط خورنده باشد و از عایق یا ایزوله کردن آن به شدت پرهیز شود. نمونه‌ها باید طوری در محیط قرار گیرند که قابل دسترس باشند و از نگه داشتن قطعه با گیره‌هایی که در محیط خورده می‌شوند جلوگیری شود.

## ۱-۱-۵ زمان آزمایش

مدت زمانی که هر قطعه در محیط خورنده قرار می‌گیرد بسیار مهم است. معمولاً در زمان‌های اولیه مقدار خورده شدن فلز بسیار زیاد است و سپس کاهش می‌یابد. یک روش بسیار متداول، انجام ۵ دوره ۴۸ ساعته با محلول‌های تازه تهیه شده برای هر دوره است. به هنگام گزارش نتایج خوردگی، زمان آزمایش باید ذکر گردد. یک فرمول تقریبی برای کمترین زمان آزمایش به صورت:

$$(۱) \quad \text{زمان آزمایش (ساعت)} = \frac{2000}{\text{سرعت خوردگی (mpy)}}$$

mpy<sup>۱</sup> سرعت خوردگی بر حسب هزارم اینچ بر سال است. واضح است که هر چه سرعت خوردگی کمتر باشد زمان آزمایش باید افزایش یابد.

## ۱-۱-۶ سرعت خوردگی<sup>۲</sup>

خوردگی را می‌توان با توجه به میزان کاهش وزن، تغییر ضخامت سطح و یا بر حسب عمق حفره‌ها (در مورد خوردگی حفره‌ای)، وقتی که جسم در محیط خورنده قرار گرفته باشد، بیان نمود. از آنجائیکه میزان خورده شدن یک جسم در محیط خورنده به مدت زمان تماس آن با محیط خورنده بستگی دارد، بنابراین خوردگی را به وسیله سرعت خوردگی که در آن تأثیر زمان نیز لحاظ شده است بیان می‌کنند. از طرفی دیگر، چون میزان خورده شدن یک جسم در یک محیط به سطح تماس آن بستگی دارد (با افزایش سطح تماس خوردگی افزایش می‌یابد)، بنابراین، بیان سرعت خوردگی بر حسب میزان کاهش وزن بر واحد سطح در واحد زمان، تأثیر سطح را بهتر نشان می‌دهد. علاوه بر این، چون عمر یک قطعه به وسیله نرخ نازک شدن (کاهش ضخامت) آن پیش‌بینی می‌شود. در اغلب موارد کمیت متداول برای بیان سرعت خوردگی، بر اساس ضخامت خورده شده فلز بر حسب زمان است که با واحد هزارم اینچ در سال (mpy) بیان می‌شود. در جدول ۱-۱ انواع واحدهای مورد استفاده در بیان سرعت خوردگی و

1. Mili inch per year  
2. Corrosion rate

ضرایب تبدیل بین واحدها ارائه شده است. برای مثال سرعت خوردگی بر حسب هزارم اینچ در سال را می‌توان به وسیله رابطه زیر به سایر واحدها تبدیل کرد:

$$1 \text{ mpy} = 0/0254 \text{ mm/y} = 2/9 \text{ nm/h} = 0/805 \text{ pm/s} \quad (۲)$$

که در این رابطه mm میلی متر ( $۱۰^{-۳}$  متر)، nm نانومتر ( $۱۰^{-۹}$  متر) و pm پیکومتر ( $۱۰^{-۱۲}$  متر) و h, y, s بترتیب نشان‌دهنده زمان برحسب سال، ساعت و ثانیه هستند.

یکی از روش‌های ساده برای تخمین سرعت خوردگی فلز، استفاده از آزمون غوطه وری است. در این آزمون، فلز به طور کامل در محیط خورنده قرار داده می‌شود، سپس از روی تغییرات وزن فلز، سرعت خورده شدن فلز بر اساس میزان کاهش وزن و یا کاهش ضخامت بیان می‌شود. سرعت خوردگی بر حسب نقصان ضخامت (عمق نفوذ) با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$R = \frac{543/4w}{DAT} \quad (۳)$$

$W$  = وزن اولیه - وزن نهایی برحسب میلی گرم (mg)

$D$  = چگالی فلز بر حسب گرم بر سانتی مکعب ( $\text{g/cm}^3$ )

$A$  = مساحت سطح بر حسب اینچ مربع ( $\text{in}^2$ )

$T$  = زمان تماس فلز با محیط بر حسب ساعت (h)

$R$  = سرعت خوردگی، mpy (هزارم اینچ در سال)

باید توجه داشت که در مورد خوردگی‌های حفره‌ای، کاهش وزن و یا کاهش ضخامت متداول نیست و خوردگی بر اساس عمق حفره‌ها ارزیابی می‌شود. به این نحو که در یک سطح معین عمق تعدادی از حفره‌ها را اندازه گرفته و مقدار متوسط را بدست می‌آورند. برای مثال در یک سانتی متر مربع، عمق ۱۰ حفره عمیق‌تر را اندازه گرفته و میانگین آن را محاسبه و گزارش می‌نمایند.

جدول ۱-۱-۱. یکاهای متداول در تخمین سرعت متوسط خوردگی و ضرایب تبدیل آن‌ها به یکدیگر

| ضریب تبدیل‌ها       |                  |                   |                           |                                  |            | نوع واحد                         |
|---------------------|------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
| ipy                 | mpy              | mm/year           | $\mu\text{m}/\text{year}$ | $\text{g}/\text{m}^2.\text{day}$ | mdd        |                                  |
| $\frac{0.00144}{p}$ | $\frac{1/44}{p}$ | $\frac{0.365}{p}$ | $\frac{36/5}{p}$          | $0/1$                            | ۱          | mdd                              |
| $\frac{0.0144}{p}$  | $\frac{14/4}{p}$ | $\frac{0.365}{p}$ | $\frac{365}{p}$           | ۱                                | ۱۰         | $\text{g}/\text{m}^2.\text{day}$ |
| $0.0000394$         | $0.394$          | $0.001$           | ۱                         | $0.00274 p$                      | $0.0274 p$ | $\mu\text{m}/\text{year}$        |
| $0.0394$            | $39/4$           | ۱                 | ۱۰۰۰                      | $2/740 p$                        | $2/74 p$   | mm/year                          |
| $0.001$             | ۱                | $0.0254$          | $25/4$                    | $0.0696 p$                       | $0.696 p$  | mpy                              |
| $1 p$               | ۱۰۰۰             | $25/4$            | $25400$                   | $69/6 p$                         | $696 p$    | ipy                              |

inch/year : ipy ،mili inch/year : mpy ، $\text{mg}/\text{dm}^2.\text{day}$  : mdd

علاوه بر این، سرعت خوردگی را می‌توان به کمک روش‌های الکتروشیمیایی تعیین کرد. یکی از متداول‌ترین روش‌های الکتروشیمیایی در تعیین سرعت خوردگی روش پلاریزاسیون<sup>۱</sup> است. در این روش با استفاده از یک پتانسیواستات، پتانسیل‌های ثابتی به جسم اعمال و جریان بوجود آمده در اثر اعمال پتانسیل، اندازه‌گیری می‌شود، سپس نمودار پتانسیل اعمال شده بر حسب جریان اندازه‌گیری شده (منحنی پلاریزاسیون) رسم می‌شود. برای تعیین سرعت خوردگی، ابتدا با استفاده از منحنی پلاریزاسیون

جریان خوردگی ( $I_{corr}$ ) تعیین و سپس بر اساس قانون فاراده و با استفاده از رابطه زیر، سرعت خوردگی محاسبه می‌شود:

$$R = k \frac{zi}{nD} \quad (۴)$$

$R$  = سرعت خوردگی بر حسب هزارم اینچ در سال (mpy)

$Z$  = جرم اتمی فلز (g)

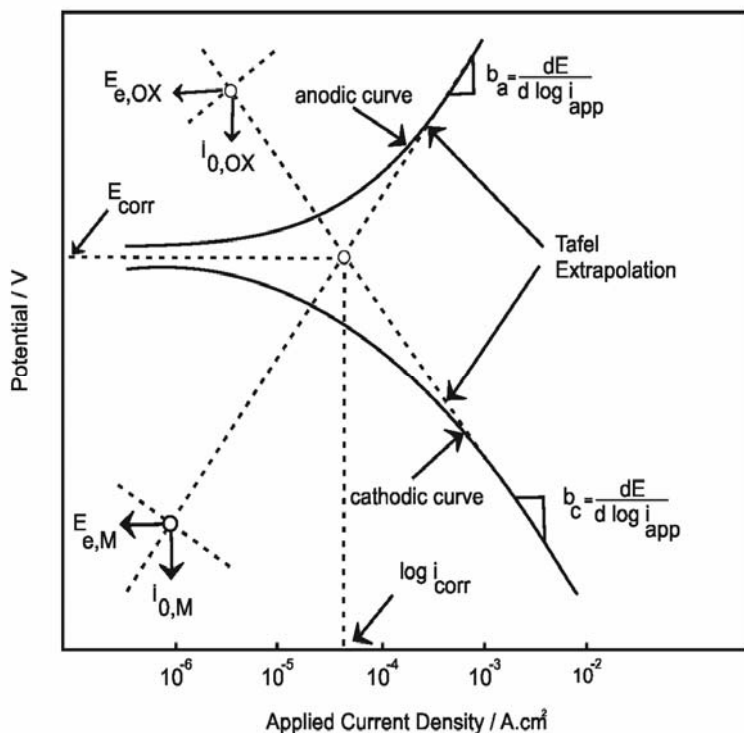
$i$  = چگالی جریان ( $\mu A/cm^2$ )

$n$  = تعداد الکترون‌های از دست رفته (ظرفیت فلز)

$D$  = چگالی فلز ( $g/cm^3$ )

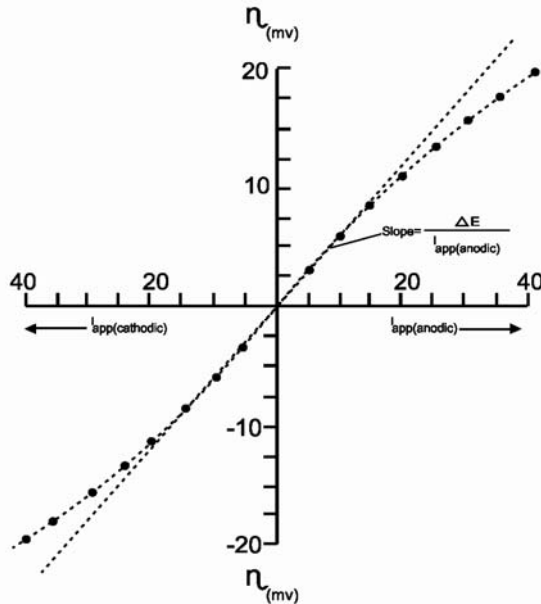
$k$  = مقدار ثابت که به واحد سرعت خوردگی بستگی دارد. چنانچه سرعت خوردگی بر حسب mpy باشد مقدار  $k$ ، ۰/۱۲۹ است.

تعیین جریان خوردگی ( $I_{corr}$ ) با استفاده از پلاریزاسیون، مبتنی بر رسم منحنی پلاریزاسیون به روش تافل<sup>۱</sup> (شکل ۱-۱-۱) و یا به روش مقاومت پلاریزاسیونی<sup>۲</sup> (شکل ۲-۱-۱) می‌باشد. در نمودار پلاریزاسیون تافل (شکل ۱-۱-۱) دو شاخه کاتدی و آندی مشاهده می‌شود که منحنی پلاریزاسیون کاتدی با اعمال پتانسیل حدود ۲۵۰ میلی ولت به سمت مقادیر منفی‌تر (۲۵۰- میلی ولت) و منحنی پلاریزاسیون آندی با اعمال همین قدر پتانسیل در جهت مثبت‌تر (۲۵۰+ میلی ولت) نسبت به پتانسیل خوردگی بدست می‌آید. همان‌گونه که در شکل ۱-۱-۱ نشان داده شده است در نمودار تافل (نمودار  $E$  بر حسب  $\log I$ )، منحنی‌های پلاریزاسیون آندی و کاتدی در جریان‌های کم غیرخطی و در جریان‌های زیاد خطی هستند. شیب‌های آندی ( $b_a$ )، کاتدی ( $b_c$ ) و جریان خوردگی ( $I_{corr}$ ) با امتداد قسمت‌های خطی هر یک از منحنی‌ها و نقطه تلاقی آن‌ها بر طبق شکل ۱-۱-۱ بدست می‌آیند.



شکل ۱-۱-۱. نمایش منحنی پلاریزاسیون کاتدی و آنودی برطبق روش تافل

در روش مقامت پلاریزاسیونی، جریان خوردگی با اندازه‌گیری مقامت پلاریزاسیونی (مقاومتی است که نمونه در مقابل اعمال پتانسیل نشان می‌دهد)،  $R_p$ ، بر اساس رابطه استرن-گری<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود. چنانچه پتانسیل اعمال شده به نمونه در محدوده ۲۰- تا ۲۰+ میلی ولت نسبت به پتانسیل خوردگی باشد، نمودار پتانسیل بر حسب جریان، خطی (شکل ۱-۱-۲) و شیب قسمت خطی آن مقامت پلاریزاسیونی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲. نمودار مقاومت پلاریزاسیونی

با محاسبه شیب قسمت خطی نمودار ( $R_p$ ) و با مشخص بودن  $b_a$  و  $b_c$  مقدار جریان خوردگی ( $I_{corr}$ ) با استفاده از رابطه ۵ تعیین می‌شود:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{b_a b_c}{2/3 i_{corr} (b_a + b_c)} \quad (5)$$

### ۷-۱-۱ تفسیر آزمایش‌های خوردگی

مطالعات خوردگی باید همیشه در برگه‌های مخصوص نوشته شود. اعم از اینکه بررسی خوردگی در محل کار قطعه، آزمایش تسریع شده یا بررسی الکتروشیمیایی آزمایشگاهی باشد. این کار سبب می‌شود تا هنگام بررسی نتایج، تمام جزئیات آزمایش در دسترس باشند. لازم به ذکر است که هیچ‌گاه نتایج یکسانی از دو آزمایش حاصل نمی‌شود. اگر چه باید اطلاعات گزارش شده در دو آزمایش مشابه و شامل موارد زیر باشد:

۱. ترکیب شیمیایی، منبع تهیه و ناخالصی‌های موجود در فلز یا آلیاژ مورد استفاده.
۲. روش آماده کردن سطح نمونه.

۳. تاریخچه عملیات حرارتی، کار سرد و سخت کردن.
۴. ابعاد و شکل، مساحت و وزن نمونه.
۵. تعداد نمونه‌های استفاده شده در هر آزمایش.
۶. ترکیب شیمیایی و روش آماده کردن محیط آزمایش، درجه خلوص مواد مورد استفاده، pH و روش هوادهی یا هواگیری.
۷. مقدار هوادهی یا هواگیری و سرعت سیلان گاز و تغییرات سیلان گاز.
۸. درجه حرارت آزمایش، روش کنترل دما و حدود کنترل.
۹. سرعت سیلان محلول آزمایش یا نمونه و روش اعمال کنترل.
۱۰. نوع نگهدارنده مورد استفاده برای نمونه‌ها و اینکه آیا نمونه‌ها به تنهایی یا با هم در یک ظرف مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.
۱۱. مدت آزمایش و تغییراتی که در روش آزمایش به طور اتفاقی یا عمدی رخ داده است.
۱۲. روش اندازه‌گیری تغییرات وزن در اثر خوردگی و تغییرات ایجاد شده در ابعاد.
۱۳. ثبت تغییرات وزنی، چگالی حفره‌ای شدن، تغییرات چگالی جریان.
۱۴. بررسی تغییر خواص مکانیکی، میکروسکوپی، آنالیز محصولات خوردگی و آنالیز نمونه‌ها.
۱۵. محاسبه سرعت خوردگی.
۱۶. آنالیز جزییات مشاهده شده در هنگام آزمایش.
۱۷. بحث و بررسی در مورد چگونگی جلوگیری از خوردگی و یا کاهش اثرات آن.