

# بررسی تأثیر جریان سیال بر نرخ خوردگی فولاد ساده کربنی در محلول آبی به کمک الکتروود صفحه چرخان

امیر محقق، جواد سرگلزایی\*<sup>+</sup>

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، صندوق پستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۴۴

داریوش باستانی

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، صندوق پستی ۹۴۶۵ - ۱۱۳۶۵

**چکیده:** خوردگی به معنای تخریب یک ماده در اثر واکنش با محیطی که در آن قرار دارد، می‌باشد. یکی از مهمترین عامل‌های مؤثر بر نرخ خوردگی در داخل لوله‌ها، سرعت سیال در تماس با فلز می‌باشد. در این پژوهش اثر سرعت سیال بر دانسیته جریان خوردگی برای فولاد کربنی ساده (ST37 (AISI 1020) در محلول آب همراه با گاز چاه‌های بندرعباس در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  بررسی شده است. به منظور بررسی مکانیسم و سینتیک فرایند خوردگی در شرایط هیدرودینامیکی، از دستگاه صفحه چرخان استفاده شده است. برای اعمال پتانسیل‌های مورد نظر و ایجاد پلاریزاسیون بر روی قطعه مورد آزمایش از دستگاه پتانسیواستات استفاده شده و برای تحلیل داده‌ها، روش مقاومت پلاریزاسیون خطی به کار برده شد. در این پژوهش، با تغییر سرعت چرخشی صفحه چرخان از  $100\text{ rpm}$  تا  $1700\text{ rpm}$  ترسیم منحنی‌های پلاریزاسیون آنها، افزون بر به دست آوردن رابطه تجربی انتقال جرم این سامانه  $(Sh=0.8433 Re^{0.497} Sc^{-1/3})$  که بسیار نزدیک به رابطه لویچ بود. این نتیجه‌ها نیز به دست آمد که با افزایش سرعت چرخشی تا  $1000\text{ rpm}$  به دلیل زیاد شدن میزان انتقال جرم، نرخ خوردگی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سرعت الکتروود به مقدارهای بالاتر، با تغییر مکانیسم خوردگی همراه می‌باشد که در پژوهش مورد بررسی واقع قرار گرفت. در پایان به ارتباط بین نتیجه‌های آزمایشگاهی و جریان سیال در خط لوله پرداخته شد و معادله ای برای محاسبه سرعت سیال جاری در خط لوله به عنوان تابعی از سرعت چرخشی معادل در سامانه آزمایشگاهی به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** فولاد کربنی ساده (AISI 1020)، الکتروود صفحه چرخان، اثر جریان سیال، ضریب انتقال جرم.

**KEY WORDS:** Carbon steel ST37 (AISI 1020), Rotating disk electrode, Fluid flow effect, Mass transfer coefficient.

## مقدمه

زیان‌های فراوانی از قبیل خوابیدن کارخانه، اختلال در تولید و کاهش تولید را در پی دارد. از جمله مواردی که به شناخت خوردگی و یافتن روش مناسب جهت کنترل آن کمک می‌کند

پرداختن به مبحث خوردگی از این جهت دارای اهمیت است که خوردگی کار مداوم را در صنایع تهدید می‌کند و از طرف دیگر هزینه‌های بازرسی، شناسایی، تعمیر و یا تعویض قطعه‌های خورده شده

+E-mail: sargolzaei@um.ac.ir

\*عهده دار مکاتبات

جدول ۱- ترکیب شیمیایی نمونه فولادی.

C	S	P	Mn	C <sub>E</sub>
۰٫۱۷	۰٫۰۲۵	۰٫۰۲۵	۱٫۴۰	$C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Cu+Ni)/15$

و خوردگی به منظور محاسبه نرخ خوردگی در دیگر سامانه‌های هیدرودینامیکی می‌باشد.

### بخش تجربی

#### چگونگی انجام آزمایش‌ها

نمونه مورد استفاده در این پژوهش فولاد کربنی ساده ST37 (AISI 1020) با ترکیب شیمیایی جدول ۱ می‌باشد و محلول در تماس با آن، آب همراه با گاز چاه‌های بندر عباس است. برای تهیه الکتروود کاری ابتدا برشی از نمونه با سطح مقطعی به قطر ۱ سانتیمتر تهیه شد که به‌طور کامل مانت می‌شد به‌نحوی که پس از مانت کردن سطح معینی برابر با ۰٫۷۸۵ سانتی‌متر مربع فراهم شد.

پس از سمباده زدن و زدودن آن از رسوب‌های سطحی، میله‌ای فولادی به نمونه متصل شد که برای اتصال محکم، نمونه مانت شده قلاویز شده و میله فولادی به آن پیچ شد. برای اتصال الکتروود کاری به الکتروود صفحه‌ی چرخان، نیاز به قطعه فولاد دیگری بود که از یک طرف به الکتروود صفحه‌ی چرخان (قطر ۱/۴ اینچ و ۲۸ رزوه‌ای) و از طرف دیگر به میله فولادی قلاویز و پیچ شود. باید توجه داشت که تمامی اتصالات محکم شده و در مرکز قرار گیرند چون در غیر این‌صورت افزون بر حرکت دورانی، حرکت افقی نیز ایجاد می‌شود و سبب خطا در داده‌های آزمایشگاهی می‌شود.

برای آماده‌سازی سطح برای انجام آزمایش‌های الکتروشیمیایی پیش از شروع هر آزمایش، در آغاز عملیات سمباده و صیقل کاری با شماره‌های ۶۰۰ و ۱۲۰۰ و سرانجام شستشوی سطح نمونه توسط استن (به‌منظور چربی‌زدایی) انجام شد. شکل ۱ به صورت شمایی الکتروود کاری و سطح مقطع نمونه را نشان می‌دهد. این محلول آبی درون ظرف ویژه‌ی آزمایش (مطابق شکل ۲ که سل الکتروشیمیایی مورد استفاده را نشان می‌دهد) ریخته شد.

در آزمایش‌ها از الکتروود مرجع کالومل استفاده شد که در فاصله‌های بین آزمایش‌ها در محلول اشباع از KCl نگهداری می‌شود. الکتروود خنثی نیز از جنس فولاد زنگ نزن مورد استفاده قرار گرفت.

آشنایی با محیطی است که فلز با آن در تماس می‌باشد. در هنگام تماس فلز با سیال، حرکت نسبی بین سطوح فلز و سیال وجود دارد، مثال روشن برای این گفته، کشتی‌ها هستند که بدنه کشتی‌ها در میان توده آب حرکت می‌کند، در چگالنده‌ها و یا تجهیزهای انتقال آب شهری، سیال روی جداره لوله حرکت می‌کند، در تمامی این حالت‌ها همرفتی اجباری در محیط وجود دارد [۱].

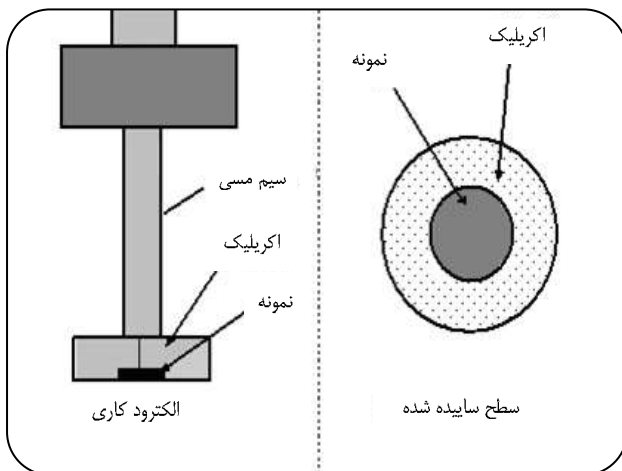
خوردگی فلزها در محلول‌های آبی در سه مرحله صورت می‌گیرد:  
 ۱- انتقال مواد واکنشگر از توده محلول به سطح فلز  
 ۲- تولید الکترون و انجام واکنش در فصل مشترک  
 ۳- انتقال فراورده‌های خوردگی از سطح فصل مشترک به توده محلول [۱-۳].

بیشتر، انواع خوردگی در محلول‌های ساکن بررسی شده است درحالی که در صنعت، اغلب سیال‌ها در حال حرکت بوده و در این حالات، انتقال جرم و تنش برشی بر نرخ خوردگی تأثیر می‌گذارند این تأثیرها بدین ترتیب است که با افزایش انتقال جرم واکنشگرها به سطح فلز و یا فراورده‌ها از سطح فلز به توده سیال و همچنین تنش برشی که سبب کنده شدن نوار باریکی از فیلم‌های محافظ تشکیل شده در سطح فلز می‌شود نرخ خوردگی افزایش می‌یابد. با توجه به اهمیت خوردگی و صدمه‌های وارده‌ی این فرایند به صنایع، پیش بینی نرخ خوردگی و کاهش آن ضرورت می‌یابد در این ارتباط بایستی در آزمایشگاه‌ها با یک شبیه‌سازی دقیق از پدیده خوردگی که در صنعت اتفاق می‌افتد وجود دارد شرایط هیدرودینامیکی در سامانه را ایجاد و تأثیر آن را بر خوردگی مطالعه نمود [۴].

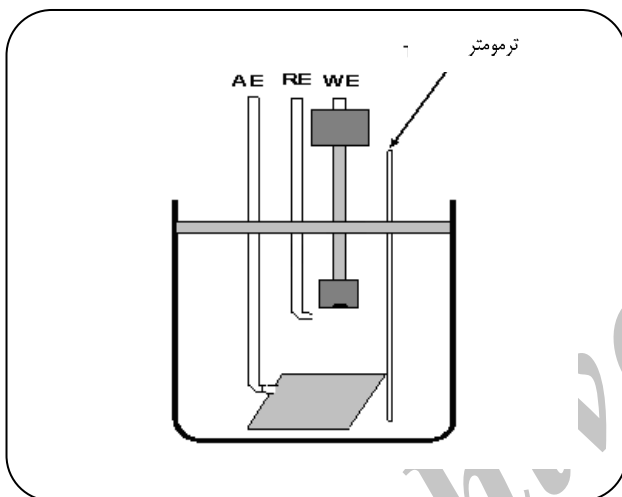
در حالت کلی، سرعت سیال سبب دو اثر بر خوردگی می‌شود: اثر انتقال جرم و اثر تنش برشی [۱].

مطالعه‌های زیادی به‌منظور ایجاد شرایط هیدرودینامیکی از دستگاه صفحه‌ی چرخان برای بررسی خوردگی [۵] و خوردگی سایشی بر فلزاتی همچون روی در محیط آب دریا [۶] و محیط اسیدی و غیره [۷-۹] انجام شده است.

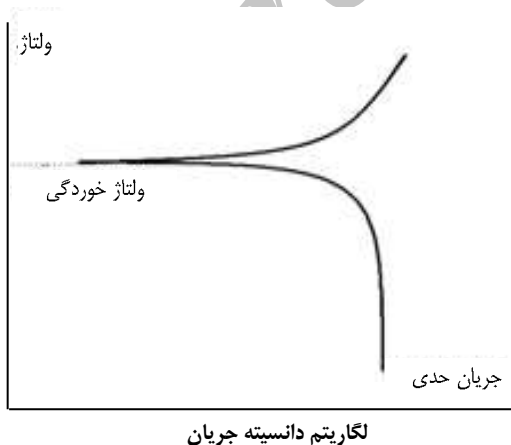
هدف‌های اصلی در این مطالعه، بررسی رفتار خوردگی فولاد ساده کربنی ST37 در سامانه صفحه‌ی چرخان برای محلول آبی چاه‌های گازی بندر عباس و به‌دست آوردن رابطه‌های انتقال جرم



شکل ۱- سمت چپ: الکتروود کاری، سمت راست: سطح مقطع نمونه.



شکل ۲- نمای شمایی سل الکتروشیمیایی آزمایش.



شکل ۳- شمایی نمودارهای پلاریزاسیون فولاد ساده کربنی در محلول آبی.

### ایجاد شرایط هیدرودینامیکی مناسب با استفاده از دستگاه صفحه چرخان

با توجه به اینکه استفاده از دستگاه صفحه‌ی چرخان روش بسیار مناسب برای ایجاد حالت‌های تکرار پذیر و تعریف شده از انتقال جرم است که معادله‌های آن به روش تحلیلی قابل حل می‌باشند، همچنین دستیابی به اطلاعات کمی هنگام استفاده از این سامانه، کم‌هزینه و در عین حال سریع بوده و سرانجام نتیجه‌های تغییر به دست آمده در همرفت را می‌توان پیش‌بینی کرد [۱۰-۱۳].

دستگاه صفحه چرخانی که در این پژوهش استفاده شده است از نوع ROTATING ELECTRODE 616 EG&G PARC می‌باشد که سرعت بیشینه چرخشی آن ۹۹۹۹ rpm است که سرعت‌های ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۱۷۰۰ (دور بر دقیقه) برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است. پس از اتصال نمونه به دستگاه صفحه‌ی چرخان، سرعت چرخشی مطابق با دستورالعمل آزمایش تنظیم کرده و سرانجام الکتروود کاری به داخل محلول هدایت شد.

### آزمون‌های الکتروشیمیایی

آزمون‌های الکتروشیمیایی توسط دستگاه پتانسیواستات نوع EG & G 273 PARC انجام شد و نتیجه‌های آن با دستگاه کامپیوتر IBM 386 DX به وسیله نرم افزار خوردگی Soft 352 EG & G گزارش شد. پس از آن نمودارهای مربوطه توسط نرم افزار EXCEL رسم شد. با استفاده از آزمون الکتروشیمیایی مقاومت پلاریزاسیون خطی (LPR) و مکانیسم عملکرد سرعت سیال بر نرخ خوردگی تعیین شد. منحنی‌های مقاومت پلاریزاسیون در بازه‌ی  $(\pm 80 \text{ mV})$  نسبت به پتانسیل خوردگی نمونه و با سرعت روبش  $1 \text{ mV/sec}$  رسم شد.

### نتیجه‌ها و بحث

#### نمودارهای پلاریزاسیون

شمای نمودارهای پلاریزاسیون که با قرار دادن فولاد کربنی ساده در محلول آبی به دست می‌آید در شکل ۳ نشان داده شده است [۱-۳]. در رسم این نمودارها با اسکن پتانسیل از  $-800 \text{ mV}$  نسبت به پتانسیل مدار باز شروع شده و تا  $800 \text{ mV}$  بالای این پتانسیل ادامه یافت. شکل‌های ۴ و ۵ نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌های پلاریزاسیون برای سرعت‌های ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰ و ۱۷۰۰ الکتروود چرخان را نشان می‌دهند.

تغییر دهد، می‌توان با پلاریزه کردن نمونه در محدوده‌های کمتر و نزدیک به پتانسیل خوردگی ( $\pm 10 \text{ mV}$ ) و با استفاده از رابطه زیر جریان خوردگی را محاسبه نمود. بر اساس تقریب استرن-گری جریان به صورت خطی و نه لگاریتمی با پتانسیل تغییر می‌کند [۱-۳]:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i_{app}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(i_{corr})(\beta_a + \beta_c)} \quad (1)$$

$\beta_a$  و  $\beta_c$  شیب‌های تافل آندی و کاتدی منحنی‌های ایوانز ( $E - \log i$ ) می‌باشند که واحد آن  $V/\text{decade}$  می‌باشد. مقاومت پلاریزاسیون  $R_p$  دارای واحد  $\Omega \cdot m^2$  می‌باشد. نمایش پتانسیل به صورت خطی نسبت به جریان، محاسبه شیب خط ( $R_p$ ) را امکان‌پذیر می‌کند که سرانجام با استفاده از شیب به دست آمده و طبق فرمول، دانسیته جریان خوردگی را می‌توان به دست آورد.

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c) R_p} \quad (2)$$

مقدارهای عددی دانسیته جریان حدی نفوذی، نرخ خوردگی و دانسیته جریان خوردگی برای سرعت‌های گوناگون صفحه چرخان در جدول ۲ داده شده است. محاسبه چگالی جریان به روش مقاومت پلاریزاسیون خطی به دست آمده است. [۱۴، ۱۵].

#### وابستگی نرخ خوردگی به تغییر سرعت صفحه چرخان

با افزایش سرعت صفحه‌ی چرخان، شاخه کاتدی نمودارها به سمت راست میل می‌کند. این امر سبب افزایش نرخ خوردگی می‌شود روند فوق تا افزایش سرعت به مقدار  $1000 \text{ rpm}$  دیده می‌شود (شکل ۴).

افزایش سرعت به مقدارهای بالاتر دیگر تأثیری بر شیب نمودارها در قسمت‌های اول و دوم ندارد. بررسی دقیق‌تر این نمودارها نشان می‌دهد که افزایش سرعت چرخشی سبب افزایش جریان حدی می‌شود (فقط بر قسمت سوم نمودار مؤثر می‌باشد). بنابراین با افزایش سرعت به مقدارهای بیشتر از  $1000 \text{ rpm}$  نرخ خوردگی مستقل از سرعت نسبی سیال می‌شود و در حقیقت تأثیر افزایش سرعت چرخشی در قسمت کنترل اکتیواسیون نمودار بر نرخ خوردگی چشمگیر نیست. بیشترین تأثیر افزایش سرعت الکتروکاتدی بر جریان حدی نفوذی می‌باشد به طوری که با افزایش سرعت نمونه جریان حدی به طور مرتب زیاد می‌شود و با تغییر سرعت چرخشی نمونه از  $100 \text{ rpm}$  به  $1700 \text{ rpm}$  مقدار جریان حدی حدود ۴ برابر می‌شود (شکل ۵).

در تمام این آزمایش‌ها، پتانسیل مدار باز در بازه‌ی  $550 \text{ mV}$  تا  $650 \text{ mV}$  در نوسان بود. تغییرهای ناچیز و قابل چشم‌پوشی پتانسیل مدار باز با توجه به نبود تغییر در شرایط محلول و الکتروکاتدی به طور کامل قابل انتظار بود. بعد از این پتانسیل، منطقه آندی شروع می‌شد. در این ناحیه نمودار کاملاً صاف می‌باشد و نوسان‌هایی که معمولاً در محیط‌های خورنده دیده می‌شود، وجود ندارد. این موضوع به دلیل خورنده نبودن محلول و نبود یون‌های تأثیر گذار بر لایه غیرفعال تشکیل شده می‌باشد. بنابراین در بررسی این نمودارها سعی می‌شود که بیشتر به بررسی شاخه کاتدی نمودارها پرداخته شود که با توجه به نوع سامانه در درجه اول دارای اهمیت می‌باشند. با اسکن پتانسیل از پتانسیل‌های منفی تا پتانسیل خوردگی (شاخه کاتدی) تغییر شیب‌های متوالی در نمودارها دیده می‌شود. شیب شاخه کاتدی مربوط به نمونه آزمایش شده در سرعت  $100 \text{ rpm}$  در پتانسیل  $585 \text{ mV}$  نسبت به مقدار حدود  $675 \text{ mV}$  نسبت به الکتروکاتدی، دوباره تغییرها در شیب شاخه کاتدی نمودار رخ می‌دهد.

قسمت اول که از پتانسیل خوردگی  $545 \text{ mV}$  شروع شده و تا  $40 \text{ mV}$  نسبت به آن ادامه دارد به پدیده پلاریزاسیون فعالیت مربوط می‌باشد، در این قسمت مانع سینتیکی در انجام واکنش کاتدی به عنوان کنترل کننده واکنش عمل می‌کند.

پس از این قسمت، منحنی تغییر شیب داده و تا حدود  $90 \text{ mV}$  ادامه دارد. در این منطقه می‌توان گفت به علت افزایش شدت واکنش کاتدی، شیب غلظتی از جزء کاتدی به وجود می‌آید و پلاریزاسیون غلظتی و فعالیت، هم‌زمان کنترل کننده نرخ خوردگی هستند. با عبور از این ناحیه منطقه ای شروع می‌شود که شیب منحنی به شدت زیاد شده و وابستگی جریان نسبت به پتانسیل به تقریب از بین می‌رود. در این ناحیه جریان فقط از طریق انتقال جرم کنترل می‌شود و در واقع سینتیک واکنش بر دانسیته جریان بی اثر است که این جریان، همان جریان حدی است که به وسیله پلاریزاسیون غلظتی کنترل می‌شود.

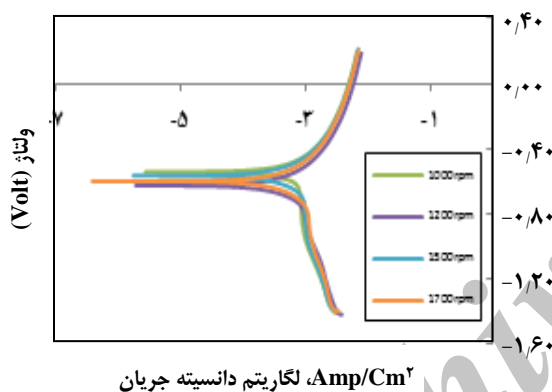
#### نمودارهای پلاریزاسیون خطی

مقاومت پلاریزاسیون خطی عبارتی است که به تقریب خطی رفتار پلاریزاسیون در پتانسیلی نزدیک به پتانسیل خوردگی اشاره دارد. اگر بیم آن رود که به واسطه پلاریزاسیون آندی شرایط سطح نمونه دچار تغییرهای گسترده شود یا به واسطه پلاریزاسیون کاتدی احیاء هیدروژن و نفوذ آن به درون نمونه، شرایط تعادلی را

جدول ۲- مقادیر عددی دانسیته جریان حدی نفوذی، نرخ خوردگی و دانسیته جریان خوردگی بر اساس پلاریزاسیون خطی برای سرعت های گوناگون صفحه چرخان.

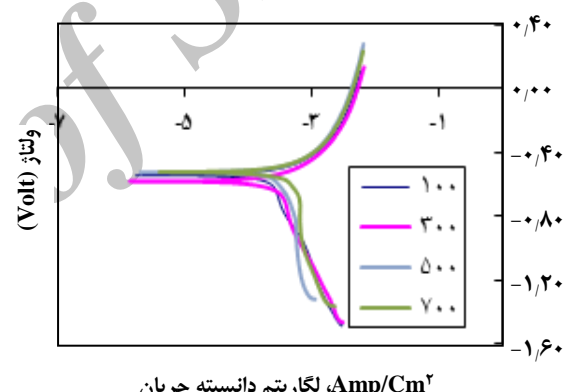
سرعت صفحه چرخان (rpm)	دانسیته جریان خوردگی $I_{corr}$ (mA/Cm <sup>2</sup> )	نرخ خوردگی (mpy)	جریان حدی متأثر از نفوذی (mA/Cm <sup>2</sup> )
۱۰۰	۱۶٫۸۱	۹٫۸۹	۳٫۱۶
۳۰۰	۱۷٫۷	۱۰٫۴۱	۳٫۹۸
۵۰۰	۲۳٫۱	۱۴٫۰۰۶	۴٫۲۶
۷۰۰	۲۴٫۱	۱۴٫۱۸	۶٫۶۰۷
۱۰۰۰	۳۲٫۲	۱۸٫۹۵	۸٫۳۱۸
۱۲۰۰	۱۹٫۶	۱۱٫۵۳	۹٫۳۳
۱۵۰۰	۲۴٫۵	۱۴٫۴۲	۱۰۰
۱۷۰۰	۲۲٫۳۸	۱۳٫۱۷	۱۲٫۵۹

سرعت‌های چرخشی ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰ و ۱۷۰۰ (دور بر دقیقه)



لگاریتم دانسیته جریان

سرعت‌های چرخشی ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ (دور بر دقیقه)



لگاریتم دانسیته جریان

شکل ۵ - منحنی پلاریزاسیون به دست آمده در آزمایشگاه با سرعت‌های چرخشی ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰ و ۱۷۰۰ (دور بر دقیقه).

واکنش کاتدی عمل می‌کند به طوری که با افزایش سرعت چرخشی، تغییرهای نرخ ناچیز است.

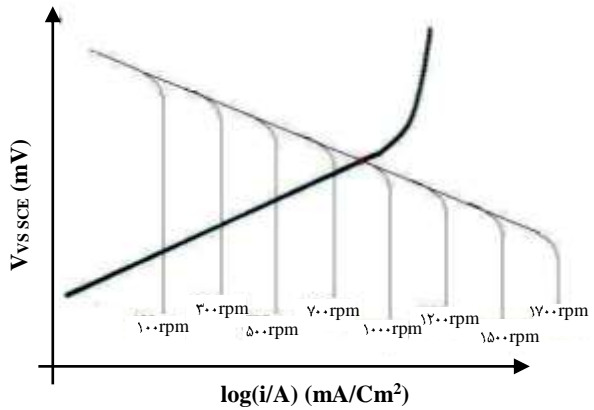
اگر سرعت باز هم افزایش یابد و تنش برشی به حدی برسد که سبب کنده شدن فیلم محافظ از سطح فلز شود خوردگی سایشی در سطح فلز ایجاد خواهد شد (شکل ۶).

در شکل ۷ تأثیر تغییرهای سرعت چرخشی الکتروود (سرعت نسبی سیال) بر نرخ خوردگی نشان داده شده است. در این نمودارها، شاخه های آندی و کاتدی به صورت جدا از یکدیگر رسم شده‌اند و با توجه به نتیجه‌های آزمایشگاهی، نقاط تقاطع آنها پیش‌بینی شده‌اند. در سرعت ۱۰۰ rpm مقدار پتانسیل خوردگی

شکل ۴ - منحنی پلاریزاسیون به دست آمده در آزمایشگاه با سرعت‌های چرخشی ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ (دور بر دقیقه).

افزایش سرعت همچنین بر نفوذ واکنشگرها و لایه نفوذی تشکیل شده در سطح نمونه تأثیر می‌گذارد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. در سرعت‌های کم، نرخ خوردگی به طور کامل و یا تا قسمتی به وسیله انتقال جرم کنترل می‌شود و افزایش سرعت سبب افزایش غلظت اجزای خورنده (مثل اکسیژن) و کاهش غلظت فراورده‌های خوردگی در سطح فلز می‌شود و در نتیجه نرخ خوردگی افزایش می‌یابد [۱].

در سرعت‌های بالاتر نیز (سرعت‌های بیشتر از ۱۰۰۰ rpm) انتقال جرم افزایش می‌یابد ولی واکنش احیاء تحت کنترل پلاریزاسیون اکتیواسیون قرار دارد و مانع سینتیکی در انجام



شکل ۷- پیش‌بینی منحنی پلاریزاسیون در سرعت‌های گوناگون الکتروود چرخان.

ضریب انتقال جرم برای این سیستم‌ها به‌وسیله‌ی عددهای بدون بعد شروود و استانتون بیان می‌شود:

$$Sh = K_m x_0 / D \quad (5)$$

$$St = Sh / (Re \cdot Sc) = K_m / u \quad (6)$$

معادله‌ی انتقال جرم (رابطه تجربی شروود) برای یک سامانه خاص به‌وسیله داده‌های آزمایشگاهی به‌دست می‌آید که شکل معمول آن طبق معادله‌ی زیر می‌باشد.

$$Sh = a Re^m Sc^n \quad (7)$$

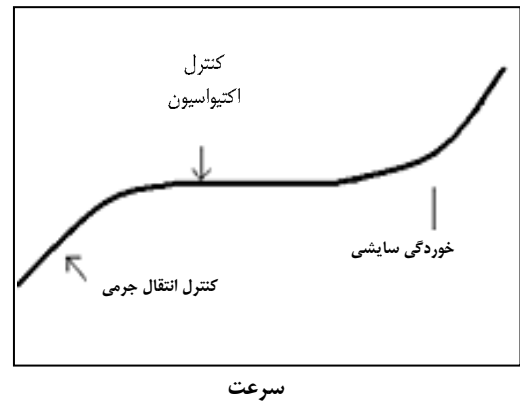
ضریب  $a$  و توان‌های  $m$  و  $n$  تجربی هستند که به‌طور معمول در محدوده  $0.5 < m < 1$  و  $0.25 < n < 1$  است. برای واکنش‌های الکتروشیمیایی که به‌وسیله‌ی انتقال جرم کنترل می‌شود، دانسیته جریان حدی نفوذی که نشان‌دهنده بیشترین سرعت احیاء برای یک سامانه می‌باشد و از معادله زیر پیروی می‌کند:

$$i_{Lim} = nFK_m C_b \quad (8)$$

با توجه به اینکه  $K_m = D/\delta$  است وابستگی جریان حدی به ضخامت لایه نفوذی طبق رابطه زیر می‌باشد [۱]:

$$i_{Lim} = \frac{DnFC_b}{\delta} \quad (9)$$

تغییر در سرعت چرخشی صفحه‌ی چرخان بر ضخامت لایه نفوذی تأثیر می‌گذارد. افزایش سرعت سیال سبب افزایش به‌هم خوردن محلول، کاهش ضخامت لایه نفوذی، افزایش ضریب انتقال جرم شده و سرانجام باعث افزایش جریان حدی نفوذی می‌شود [۱۶-۱۸]. طبق معادله (۸) ضریب انتقال جرم را برای سرعت‌های چرخشی گوناگون



شکل ۸- تأثیر سرعت بر نرخ خوردگی.

۵۴۵ mV و دانسیته جریان خوردگی برابر ۱۶/۸۱ mA می‌باشد. سرعت چرخشی صفحه چرخان را تا ۳۰۰ rpm افزایش داده که مقدارهای پتانسیل خوردگی ۵۸۲ mV- و دانسیته جریان خوردگی ۱۷/۷ mA به دست می‌آید.

که این نتیجه‌ها مؤید این موضوع است که واکنش احیاء تحت کنترل پلاریزاسیون غلظتی قرار دارد و محل تقاطع شاخه‌های آندی و کاتدی در قسمت کنترل غلظتی شاخه کاتدی واقع شده است و این روند افزایشی نرخ خوردگی تا سرعت ۱۰۰۰ rpm ادامه دارد. همچنین با افزایش سرعت چرخشی تأثیر لایه‌های نفوذی سطح فلز کمتر می‌شود و واکنش احیاء تحت کنترل اکتیواسیون قرار می‌گیرد. بدین ترتیب محل تقاطع شاخه‌های آندی و کاتدی در قسمت اکتیواسیون شاخه کاتدی حادث می‌شود. در سرعت‌های خیلی زیاد، نرخ خوردگی مستقل از سرعت حرکت سیال می‌باشد و با افزایش سرعت به مقدارهای بالاتر از ۱۰۰۰ rpm نرخ خوردگی ثابت می‌ماند.

#### رابطه انتقال جرم به‌دست آمده در سیستم هیدرودینامیکی به‌کار رفته در آزمایشگاه

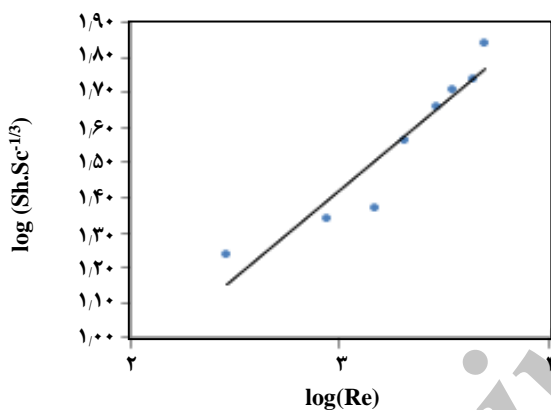
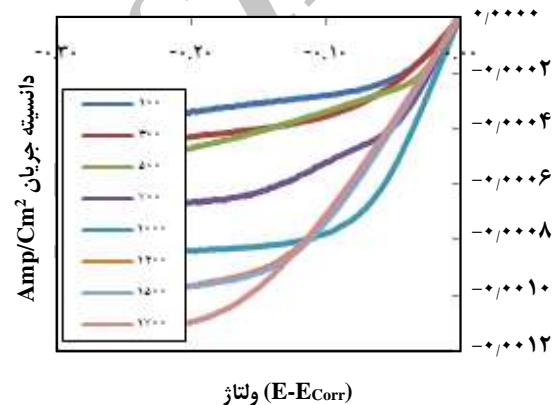
در این بخش سعی شده تا با استفاده از نتیجه‌های به‌دست آمده توسط الکتروود صفحه چرخان رابطه بین اعداد بدون بعد مؤثر در انتقال جرم جهت پیش‌بینی نرخ خوردگی به‌دست آید. در سامانه‌های در حال حرکت، عددهای بدون بعد رینولدز و اشمیت بسیار مؤثرند:

$$Re = \rho u x_0 / \mu \quad (3)$$

$$Sc = \mu / \rho D \quad (4)$$

جدول ۳- مقادارهای عددهای بدون بعد شروود، رینولدز و اشمیت را برای سرعت‌های چرخشی مختلف.

سرعت صفحه چرخان (rpm)	$K_m$	Sh	Sc	Re	Log (Re)	Log (Sh.Sc <sup>-1/3</sup> )
۱۰۰	۰/۰۰۱۶۳۸	۱۶۳/۷۵	۸۹۳/۶۸۱	۲۹۲/۷۹	۲/۴۶	۱/۲۴۰
۳۰۰	۰/۰۰۲۰۶۳	۲۰۶/۲۵	۸۹۳/۶۸۱	۸۷۸/۳۸	۲/۹۴	۱/۳۴۰
۵۰۰	۰/۰۰۲۲۰۸	۲۲۰/۷۶	۸۹۳/۶۸۱	۱۴۶۳/۹۸	۳/۱۶	۱/۳۷
۷۰۰	۰/۰۰۳۴۲۴	۳۴۲/۳۸	۸۹۳/۶۸۱	۲۰۴۹/۵۷	۳/۳۱	۱/۵۶
۱۰۰۰	۰/۰۰۴۳۱۱	۴۳۱/۰۵	۸۹۳/۶۸۱	۲۹۲۷/۹۶	۳/۴۶	۱/۶۶
۱۲۰۰	۰/۰۰۴۸۳۵	۴۸۳/۴۹	۸۹۳/۶۸۱	۳۵۱۳/۵۵	۳/۵۴	۱/۷۱
۱۵۰۰	۰/۰۰۵۱۸۲	۵۱۸/۲۱	۸۹۳/۶۸۱	۴۳۹۱/۹۴	۳/۶۴	۱/۷۴
۱۷۰۰	۰/۰۰۶۵۲۴	۶۵۲/۴۳	۸۹۳/۶۸۱	۴۹۷۷/۵۴	۳/۶۹	۱/۸۴

شکل ۹- منحنی  $\log(\text{Sh.Sc}^{-1/3})$  بر حسب  $\log(\text{Re})$  جهت به‌دست آوردن معادله انتقال جرم.شکل ۸- محاسبه دانسیته جریان حدی نفوذ  $i_{lim}$ .

$$\text{Sh} = 0.8433 \text{Re}^{0.497} \text{Sc}^{1/3} \quad (10)$$

این معادله با معادله ارایه شده توسط لویج  $\text{Sh} = 0.6205 \text{Re}^{0.5} \text{Sc}^{0.33}$  قابل مقایسه است. مقایسه رابطه‌های ارتباط نزدیکی بین آنها نشان می‌دهد [۱۳].

#### پیش بینی نرخ خوردگی در لوله‌ها با استفاده از تشابه

یکی از مهمترین فرایندهای خوردگی که در صنعت به‌ویژه صنایع نفت و گاز بسیار اتفاق می‌فتد، خوردگی در دیواره خطوط لوله که دارای جریانی از سیال هستند، می‌باشد [۱۹]. بنابراین به کار بردن داده‌های به‌دست آمده در آزمایشگاه (الکتروود صفحه چرخان) جهت پیش بینی نرخ خوردگی در دیواره لوله‌ها

با استفاده از دانسیته جریان حدی نفوذی (شکل ۸) که مقادارهای آن در جدول ۲ آورده شده است، می‌توان به‌دست آورد با داشتن ضرایب انتقال جرم و خواص فیزیکی محلول (خواص فیزیکی محلول به تقریب با خواص فیزیکی آب یکی می‌باشد) می‌توان مقادارهای عددهای بدون بعد شروود  $(K_m d/D)$ ، رینولدز  $(\rho u_{disk} F_0 / \mu)$  و اشمیت  $(\mu / \rho D)$  را برای سرعت‌های چرخشی گوناگون به‌دست آورد که نتیجه‌ها در جدول ۳ آمده است.

با انتقال داده‌ها بر نمودار  $\log(\text{Sh.Sc}^{-1/3})$  بر حسب  $\log(\text{Re})$ ، شیب و عرض از مبدأ خط راست عبوری از نقاط آن (شکل ۹)، توان رینولدز  $(0.497)$  و ضریب عددی  $(0.8433)$  در معادله شروود به‌دست آمدند که سرانجام معادله شروود برای سامانه‌ی هیدرودینامیکی که به‌کار رفته در آزمایش‌ها به‌صورت زیر به‌دست آمد:

تقسیم کرد؛ لایه اول، از دیواره شروع می‌شود و ضخامت آن  $\delta$  است. در این لایه انتقال جرم از طریق نفوذ ملکولی انجام می‌شود. لایه دوم، ضخامت آن  $\delta_1$  بوده و بیشتر انتقال جرم در آن از طریق همرفتی انجام می‌شود اما همزدن محلول به واسطه جابه‌جایی گردابه‌ها کاهش می‌یابد. لایه سوم، لایه مرزی درهم است که انتقال جرم تنها به روش همرفتی و جابه‌جایی صورت می‌پذیرد.

رابطه کلی نرخ انتقال برای رژیم جریان توسعه یافته درهم در خطوط لوله و ضخامت لایه نفوذی برای این سامانه طبق رابطه‌های زیر می‌باشد (غلطت توده سیال و ثابت واکنش برای هر دو سیستم یکسان فرض شده است) [۲۰، ۲۱]:

$$J_p = \frac{DG_b}{\sqrt{5}\delta_p + D/k} \quad (16)$$

$$\delta_p = 44/8 \frac{d}{Sc^{1/2} Re_p^{1/4}} \quad (17)$$

$$J_p = \frac{DG_b}{67/5 \frac{d}{Sc^{1/2} Re_p^{1/4}} + D/k} \quad (18)$$

اکنون برای مرتبط کردن دو سامانه با الگوهای جریانی مختلف، بایستی شار انتقال جرم در دو سامانه را با هم مساوی قرار داده و سرعت سیال جاری در خط لوله به‌عنوان تابعی از سرعت چرخشی معادل در سامانه آزمایشگاهی به دست می‌آید.

$$J_p = J_D \quad (19)$$

$$u = 1.014 d^{1/4} \gamma^{6/14} \omega^{1/4} \quad (20)$$

همچنین رابطه بین سرعت خطی و دورانی و زاویه‌ای طبق این معادله می‌باشد:

$$U_{disk} = \omega r_{disk} = \pi d_{disk} F_0 / 60 \quad (21)$$

با توجه به رابطه بالا، نرخ خوردگی در داخل لوله با استفاده از داده‌های خوردگی به دست آمده در سامانه آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. به‌عنوان مثال با حل معادله (۲۰) برای سرعت چرخشی  $\omega$ ، می‌توان نرخ خوردگی را در داخل لوله که سیال با سرعت  $u$  در آن جاری است محاسبه نمود. پس نرخ خوردگی در سامانه آزمایشگاهی با سرعت چرخشی  $\omega$  همان نرخ خوردگی در لوله با سرعت  $u$  خواهد بود.

برای پیش بینی دقیق تر نرخ خوردگی بایستی دما، ترکیب جزئی محلول و سینتیک واکنش در دو سامانه یکسان باشند. در ضمن در معادله (۲۰) جمله واکنش دیده نمی‌شود پس سامانه

دارای اهمیت است که برای دقیق بودن این پیش بینی بایستی فرضیه‌های زیر در نظر گرفته شوند [۲۰].

۱- سطح لوله صاف باشد. ۲- مکانیسم خوردگی برای هر دو سامانه یکسان باشد. ۳- با توجه به سرعت سیال جاری در خط لوله، طبق رابطه ای که در ادامه به‌دست می‌آید سرعت چرخشی معادل در سامانه آزمایشگاهی تنظیم شده است و به دقت با هم برابر باشند.

اگر فیلمی از فرآورده‌های خوردگی در سطح فلز تشکیل نشود، نرخ واکنش کاتدی در سطح طبق این رابطه است [۱۸]:

$$J_s = kC_s = D \left( \frac{\partial C_s}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (11)$$

در ضمن جهت تعادل الکتریکی بایستی نرخ واکنش کاتدی و آندی به دقت با هم برابر باشند در نتیجه نرخ هر دو واکنش، طبق معادله (۱۱) بیان می‌شود. رابطه ضریب انتقال جرم با ضخامت لایه نفوذی طبق این رابطه است:

$$K_m = D / \delta_D \quad (12)$$

با توجه به این رابطه، نرخ انتقال جرم برای این سامانه هیدرودینامیکی بدین ترتیب خواهد بود:

$$J_D = \frac{DG_b}{\delta_D + D/k} \quad (13)$$

مخرج این رابطه دارای دو جمله می‌باشد که جمله اول مربوط به ضخامت لایه نفوذی جریان آرام در صفحه چرخان می‌باشد و جمله دوم ( $D/k$ ) می‌توان ضخامت لایه واکنش و یا مقاومت در برابر انجام واکنش در نظر گرفت.

با داشتن ضریب انتقال جرم از معادله شروود (معادله (۱۰))، می‌توان  $\delta_D$  (ضخامت لایه نفوذی) را با توجه به معادله (۱۲) برای این سامانه به‌دست آورد.

$$\delta_D = 1.186 \gamma^{1/2} D^{1/2} \omega^{-1/2} \quad (14)$$

با جایگذاری معادله (۱۴) در معادله (۱۳) رابطه کلی نرخ انتقال جرم به‌دست می‌آید:

$$J_D = \frac{DG_b}{1.186 \gamma^{1/2} D^{1/2} \omega^{-1/2} + D/k} \quad (15)$$

در ادامه جهت به‌دست آوردن رابطه نرخ انتقال جرم در خطوط لوله، در مورد لایه های سیال جاری در لوله ها بحث می‌شود. رژیم جریانی توسعه یافته درهم در لوله را می‌توان به ۳ لایه



فرایند خوردگی می‌شود و نوسان نرخ خوردگی با افزایش سرعت به واسطه مکانیسم‌هایی به جز انتقال جرم جزء واکنشگر می‌باشد.

### فهرست نمادها

$C_h$	غلظت جزء در توده محلول، mol/L
$C_s$	غلظت جزء در سطح الکتروود، mol/L
$D$	ضریب نفوذ، $cm^2/s$
$d$	قطر لوله، cm
$e$	زبری دیواره‌ی لوله، cm
$F$	ضریب فارادی
$F_0$	سرعت چرخشی، rpm
$i_{Lim}$	دانسیته جریان حدی نفوذی، mA/cm <sup>2</sup>
$I_{corr}$	دانسیته جریان خوردگی، mA/cm <sup>2</sup>
$J_D$	نرخ انتقال جرم در صفحه چرخان mol/cm <sup>2</sup> .s
$J_p$	نرخ انتقال جرم در لوله، mol/cm <sup>2</sup> .s
$J_s$	نرخ انتقال جرم در سطح الکتروود، mol/cm <sup>2</sup> .s
$K_f$	ضریب اصطکاک
$K_m$	ضریب انتقال جرم، m/s
$k$	ثابت واکنش، cm/s
$n$	تعداد الکترون‌های شرکت کننده
$r_0$	شعاع صفحه چرخان، cm
$Re$	عدد بدون بعد رینولدز
$R_p$	مقاومت لاریزاسیون، $\Omega.m^2$
$Sh$	عدد بدون بعد شروود
$St$	عدد بدون بعد استانتون
$u$	سرعت خطی، cm/s
$x_0$	فاصله مشخصه، cm
$\beta_a$	شیب تافل آندی
$\beta_c$	شیب تافل کاتدی
$\delta$	ضخامت لایه نفوذی، cm
$\delta_D$	ضخامت لایه نفوذی در صفحه چرخان، cm
$\delta_p$	ضخامت لایه نفوذی در لوله، cm
$\rho$	دانسیته محلول، g/cm <sup>3</sup>
$\mu$	ویسکوزیته محلول، g/cm.s
$\gamma$	ویسکوزیته سینماتیکی محلول، cm <sup>2</sup> /s
$\omega$	سرعت دورانی، rad/s

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۷

چه تحت کنترل نفوذ و چه تحت کنترل واکنش شیمیایی باشد این معادله با فرض یکسان بودن مکانیسم واکنش به دست می‌آید. در به دست آوردن معادله (۲۰) فرض شده است که سطح لوله از نظر هیدرودینامیکی صاف باشد و البته این فرض در بیشتر حالت‌ها و شرایط امکان پذیر نبوده و حتی در بهترین شرایط، خوردگی در دیواره‌ی لوله سبب زبری سطح خواهد شد در نتیجه بر اساس مطالعه‌ها و تحلیل‌های داوینس ضریب اصطکاک و میزان انتقال جرم کلی برای سطح لوله که از نوع تعریف شده Sand-Type است طبق این رابطه می‌باشد [۲۰]:

$$\sqrt{\frac{K_f}{2}} = 0.139 \left(\frac{e}{d}\right)^{1/5} \quad (24)$$

$$J_p = \frac{DG_b}{127.4 \frac{d}{Sc^{1/3}} \left(\frac{e}{d}\right)^{1/5} Re_p + D/k} \quad (25)$$

که جمله‌ی اول در مخرج این رابطه، همان ضخامت لایه مرزی است که در آن انتقال واکنشگر به سطح الکتروود از طریق نفوذ ملکولی صورت می‌پذیرد. سرانجام با فرض یکسان بودن مکانیزم خوردگی برای دو سامانه می‌توان وابستگی سرعت سیال در خط لوله (زبر) را با سرعت چرخشی در سامانه هیدرودینامیکی در آزمایشگاه به دست آورد:

$$u = 1.07 Sc^{-1/6} \left(\frac{e}{d}\right)^{1/5} \sqrt{\gamma\omega} \quad (26)$$

### نتیجه گیری

اثر سرعت سیال بر نرخ خوردگی بررسی شد. برای این منظور از الکتروود صفحه‌ی چرخان استفاده شد و نتیجه‌های زیر به دست آمد: رابطه شروود برای سامانه اعمالی در آزمایشگاه به دست آمد  $(Sh=0.8433 Re^{0.497} Sc^{-1/3})$  که به رابطه لوویچ برای دستگاه صفحه چرخان به نسبت نزدیک است.  $(Sh=0.6205 Re^{0.5} Sc^{0.33})$ . می‌توان با به کار بردن داده‌های به دست آمده در سامانه آزمایشگاهی، نرخ خوردگی دیواره داخلی لوله که دارای جریانی از سیال می‌باشد را پیش بینی کرد. در سرعت‌های کم تا ۱۰۰۰ rpm افزایش سرعت صفحه چرخان سبب افزایش نرخ خوردگی می‌شود. به طوری که نرخ خوردگی از ۹/۸۹ به ۱۸/۹۵ (میلی اینچ ضخامت در سال) رسید. افزایش سرعت به مقدارهای بالاتر از ۱۰۰۰ rpm سبب تغییر مکانیزم خوردگی شده و پلاریزاسیون اکتیواسیون کنترل کننده

## مراجع

- [1] Fontana M.G., "Corrosion Engineering", Tata McGraw-Hill Education (2005).
- [2] Revie R.W., Uhlig H.H., "Corrosion and Corrosion Control", Fourth ed.: John Wiley. 496 (2008).
- [3] Philip A., Schweitzer P.E., "Corrosion of Linings & Coatings: Cathodic and Inhibitor Protection and Corrosion Monitoring", Taylor & Francis (2006).
- [4] Saremi M., Dehghanian C., Sabet M.M., The Effect of Molybdate Concentration and Hydrodynamic Effect on Mild Steel Corrosion Inhibition in Simulated Cooling Water, *Corrosion Science*, **48**(6): p. 1404-1412 (2006).
- [5] De Sanchez S., Schiffrin D., The Use of High Speed Rotating Disc Electrodes for the Study of Erosion-Corrosion of Copper Base Alloys in Sea Water, *Corrosion Science*, **28**(2): p. 141-151 (1988).
- [6] Magaino S., Corrosion Rate of Copper Rotating-Disk-Electrode in Simulated Acid Rain, *Electrochimica Acta*, **42**(3): p. 377-382 (1997).
- [7] Boto K.G., Williams L.F., Rotating Disc Electrode Studies of Zinc Corrosion, *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, **77**(1): 1-20 (1977).
- [8] Caprani A., Epelboin I., Morel P., Potentiostatic Investigation of the Evolution of the Cathodic Current, Near the Corrosion Potential, of a Titanium Rotating Disc Electrode in Aerated Sulphuric Acid Medium, *Journal of the Less Common Metals*, **69**(1): 37-48 (1980).
- [9] Han S. et al., Rotating Minidisk-Disk Electrodes, *Electrochemistry Communications*, **9**(7): 1434-1438 (2007).
- [10] Kreith F., Convection Heat Transfer in Rotating Systems, Thomas F.I., James P.H., (Editors), In: "Advances in Heat Transfer, Elsevier. p. 129-251 (1969).
- [11] Kreith F., Taylor J., Chong J., Heat and Mass Transfer from a Rotating Disk, *Journal of Heat Transfer*, **81**: 95-105 (1959).
- [12] LaQue F.L., Theoretical Studies and Laboratory Techniques In Sea Water Corrosion Testing Evaluation, *Corrosion*, **13**(5): 33-44 (1957).
- [13] Levich V.G., "Physicochemical Hydrodynamics", Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, Vol. 689. (1962).
- [14] Stern M., Geary A.L., Electrochemical Polarization I. A theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves, *Journal of the Electrochemical Society*, **104**(1): 56-63 1957.
- [15] Evans S., Koehler E., Use of Polarization Methods in the Determination of the Rate of Corrosion of Aluminum Alloys in Anaerobic Media, *Journal of the Electrochemical Society*, **108**(6): 509-514 (1961).
- [16] Ellison B.T., Cornet I., Mass Transfer to a Rotating Disk, *Journal of the Electrochemical Society*, **118**(1): 68-72 (1971).
- [17] Vahdat N., Newman J., Corrosion of an Iron Rotating Disk, *Journal of The Electrochemical Society*, **120**(12): 1682-1686 (1973).

- [18] De Waard C., Milliams D., [Carbonic Acid Corrosion of Steel](#), *Corrosion*, **31**(5): 177-181 (1975).
- [19] Barz F., Bervstein C., Vielstich W., [On the Investigation of Electrochemical Reactions by the Application of Turbulent Hydrodynamics](#), *Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering*, **13**: 261-353 (1984).
- [20] Davies J.T., "Turbulence Phenomena: an Introduction to the Eddy Transfer of Momentum, Mass, and Heat, Particularly at Interfaces", Elsevier (2012).
- [21] Chapman D.R., Kuhn G.D., [The Limiting Behaviour of Turbulence Near a Wall](#), *Journal of Fluid Mechanics*, **170**: 265-292 (1986).

Archive of SID