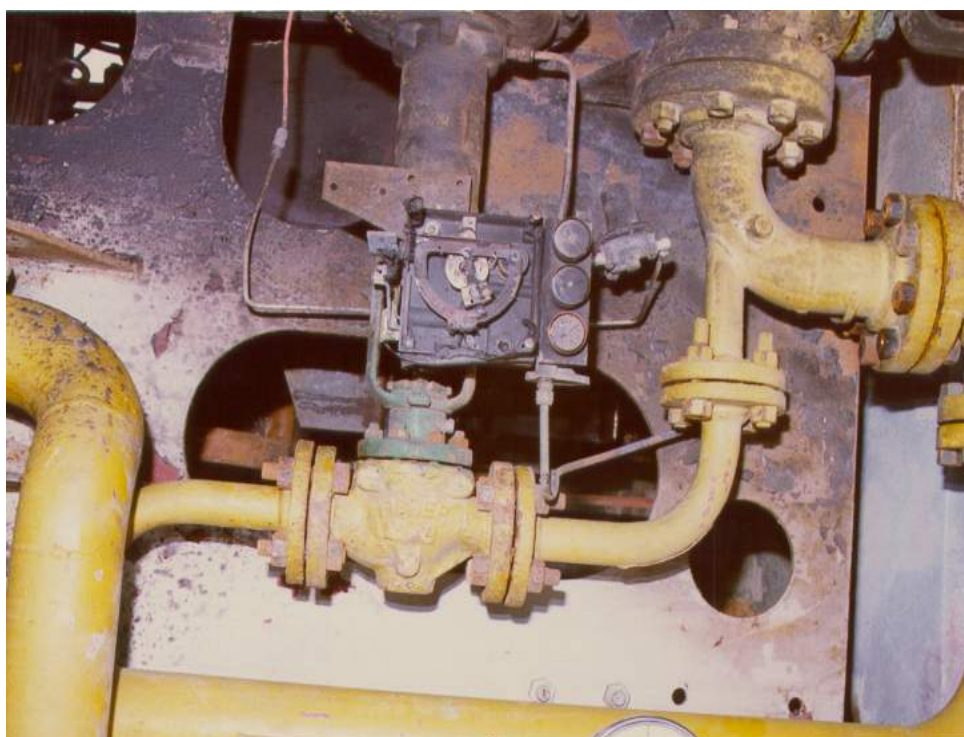


شرکت ملی گاز ایران - آموزش و تجهیز نیروی انسانی - آموزش فنی و تخصصی



شرکت ملی گاز ایران

آموزش و تجهیز نیروی انسانی



آموزش فنی و تخصصی شرکت ملی گاز ایران

آبان ماه ۱۳۸۷

نام کتاب: خوردگی فلزات و روش های جلوگیری از آن

مؤلف: مهندس فرید بن سعید

تایپ و صفحه آرایی: فتنانه زاده احمد

نوبت چاپ: اول

تیراژ: ۲۰۰ نسخه

ویرایش: آموزش فنی و تخصصی شرکت ملی گاز ایران

ناشر: انتشارات داخلی شرکت ملی گاز ایران

سال نشر: آبان یک هزار و سیصد و هشتاد و هفت هجری شمسی

حق چاپ برای ناشر محفوظ می باشد

آدرس: تهران میدان هفت تیر خیابان مفتح جنوبی - خیابان شیروودی - پلاک ده -  
ساختمان آموزش شرکت ملی گاز ایران - طبقه دوم - آموزش فنی و تخصصی

نمابر ۰۲۱-۸۱۳۴۵۷۴۴ -

تلفن ۰۲۱-۸۱۳۱۵۷۲۰-۲ -

## مقدمه آموزش فنی و تخصصی

اهداف اصلی هر سازمان را می توان در دو عنوان بیان کرد ؛ جلب رضایت ارباب رجوع یا به عبارت دیگر مشتری مداری و سود آوری سازمان . سازمان ها برای رسیدن به اهداف خود اقدام به وضع قوانین و قرارداد های خاصی جهت طی این فرآیند می نمایند .قرار داد های وضع شده تحت استاندارد های مشخص از منابع هر سازمان که شامل منابع انسانی و منابع اطلاعاتی و منابع مادی می باشند استفاده کرده تا به اهداف تعیین شده دست یابند .

جدای از سه محور اصلی هر سازمان یعنی منابع ، فرآیند و اهداف سازمان ، آنچه این چرخه را از لحاظ درستی عملکرد تضمین می کند بازبینی و نظارت مستمر و موثر واحد های سنجش عملکرد سازمان با قرارداد های وضع شده می باشد هر گونه عدم تطابق عملکرد یک یا چندین واحد مختلف از سازمان با استاندارد های تعیین شده برای آن سازمان یک مساله و مشکل به حساب می آید که در چرخه ذکر شده اثر نا مطلوبی خواهد داشت . منابع هر سازمان اساس فعالیت و راهکار ها محسوب می شود . داده ها و اطلاعات هر سازمان نسبت به دو منبع دیگر ( منابع انسانی و منابع مالی ) از جایگاه ویژه ای برخوردار است از آنجا که موفقیت کارکنان ریشه در اطلاعات و آگاهی افراد سازمان از قوانین استاندارد های وضع شده و داده های مختلف مرتبط با نوع فعالیت آن ها داشته و نقش جهت دهی به کارکنان را به عهده دارد. منابع انسانی با آموزش هایی که در راستای ارتقای سطح دانش فردی و گروهی می بینند به نوعی فرایند رسیدن به اهداف مورد نظر از طریق راهکار سازمان را تضمین می کنند .

آموزش های هدف مند خود نیز بر اساس منابع اطلاعاتی استوارند که در اثر تجربیات گذشته و مراحل آزموده شده قبلی بدست آمده اند .مبنی بر این دیدگاه میزان اثر بخشی فعالیت های سازمان در جهت رسیدن به اهداف والای خود رابطه مستقیم با منابع آن سازمان داشته و پرورش کارکنان و آگاهی بخشی به آنها نیز با میزان سودمند بودن منابع اطلاعاتی رابطه مستقیم دارد . منابع اطلاعاتی سازمانها را مستنداتی چون کتب و جزوات آموزشی تایید شده توسط واحد های مرتبط با سطح سنجی منابع آموزشی تشکیل می دهد .

از این رو آموزش و تجهیز نیروی انسانی شرکت ملی گاز ایران در راستای اهداف خود و استاندارد نمودن دوره های آموزشی و یکسان نمودن منابع تدریس اقدام به تهیه کتاب های آموزشی مرتبط با هر دوره آموزشی نموده است که منطبق بر سرفصل آن دوره می باشد .کتابی که در پیش رو دارید توسط

مهندس فرید بن سعید تهیه شده و منبع اصلی تدریس دوره خوردگی عمومی فلزات و روش های  
جلوگیری از آن با کد آموزشی ۱۷۹۱۴ می باشد که ضمن تشکر از ایشان لازم است کلیه ادارات  
آموزش شرکت های تابعه جهت تدریس آن دوره از این منبع استفاده نمایند امید است همکاران با ارائه  
نظرات و پیشنهادات از طریق آدرس الکترونیکی [training.nigc@gmail.com](mailto:training.nigc@gmail.com) ما را در این  
امر مهم همچون گذشته یاری نمایند .

آموزش فنی و تخصصی شرکت ملی گاز ایران

آبان ماه هزار و سیصد و هشتاد و هفت

## پیش‌گفتار :

اهمیت و نقش علم خوردگی در صنایع نفت و گاز و همچنین گستردگی و تنوع این علم بر کسی پوشیده نیست و به همین دلیل کتب فراوانی در این زمینه منتشر شده ، که این امر منجر به پراکندگی و گسترده شدن موضوعات خوردگی برای کارآموزان و کارکنانی که در ابتدای ورود به صنعت نفت و گاز می باشند شده است . بدین جهت برآن شدم تا آنچه که نیاز آموزشی کارآموزان را پوشش می دهد در این کتاب تحت عنوان اصول و مفاهیم خوردگی جمع آوری نمایم تا قدمی هرچند کوچک در راستای اهداف آموزش فنی و تخصصی برداشته باشم. این کتاب شامل هفت بخش کلی به شرح ذیل می باشد :

فصل اول : تعاریف، مفاهیم و ماهیت خوردگی ،فصل دوم : مبانی متالورژی فلزات،فصل سوم :انواع خوردگی عمومی فلزات ،فصل چهارم : روش‌های عمومی جلوگیری از خوردگی فلزات ،فصل پنجم : خوردگی در صنایع نفت و گاز و روش‌های رایج پایش آن،فصل ششم هزینه های خوردگی ،فصل هفتم : ضوابط و اصطلاحات رایج در علم خوردگی

بی شک این مجموعه دارای نواقصی از نظر کیفی و کمی مطالب می باشد که انتظار می رود دوستان و همکاران آن را مطالعه و نظرات و پیشنهاد های اصلاحی خود را جهت بهبود این مجموعه به آدرس الکترونیکی من در سایت گوگل [bensaeedsh@gmail.com](mailto:bensaeedsh@gmail.com) ارسال نمایند . در پایان از رئیس محترم آموزش و تجهیز نیروی انسانی شرکت ملی گاز ایران جناب آقای مهندس سید محمود حسینی پژوه و رئیس محترم آموزش فنی و تخصصی آقای مهندس خلیل قنادی و همچنین کارشناس ارشد آموزش فنی و تخصصی آقای مهندس جواد دانشیار که امکان تالیف کتاب را برای اینجانب فراهم نمودند و همچنین همسرم خانم زاده احمد که زحمت تایپ و صفحه آرایی را متحمل شدند تشکر نموده و برای آن ها آرزوی توفیق و سربلندی را از خداوند منان خواستارم .

فرید بن سعید کارشناسی ارشد مهندسی نفت

<http://faridbensaeed.blogspot.com>

آبان ۱۳۸۷

مدت: ۲۵ ساعت		کد دوره: ۱۷۹۱۴	عنوان دوره: خوردگی و روش های جلوگیری از آن
شرایط شرکت کنندگان: کلیه کارکنان فنی مهندسی			
نوع پودمان: عمومی		سطح: کلیه مقاطع تحصیلی	
پیش نیاز: شیمی معدنی و آلی			
امکانات اجرایی: آزمایشگاه <input type="checkbox"/> کارگاه <input checked="" type="checkbox"/> کلاس <input checked="" type="checkbox"/> کتاب <input checked="" type="checkbox"/> جزوه <input checked="" type="checkbox"/> فیلم/ CD <input checked="" type="checkbox"/>			
اهداف آموزشی: آشنایی با انواع خوردگی و روشهای کنترل و پایش آن در صنعت نفت و گاز			
زمان	محتوا	جزء پودمان	
۵ ساعت	قلمرو و حوزه فعالیت خوردگی / تعریف خوردگی / مهندسی خوردگی / خسارات ناشی از خوردگی / اصول خوردگی / واکنش های الکتروشیمیایی / پلاریزاسیون / پتانسیل خوردگی / روئین شدن / واکنش های شیمیایی در خوردگی / خوردگی در محیط	تعاریف / مفاهیم و ماهیت خوردگی	
۴ ساعت	تبلور ابتدایی / گرمای ذوب و انجماد / متالوژیکی / آلیاژها / نقص های شبکه ای / نقص های نقطه ای	مبانی متالوژی فلزات	
۴ ساعت	خوردگی یکنواخت / خوردگی گالوانیکی / خوردگی شیاری / خوردگی حفره ای / خوردگی بین دانه ای / جدایش انتخابی / خوردگی سایشی / خوردگی تنشی / خسارت هیدروژنی	انواع خوردگی عمومی	
۴ ساعت	انتخاب مواد / تغییر محیط خورنده / طراحی / ممانعت کننده / پوشش ها / حفاظت کاتدی / حفاظت آندی / مقایسه حفاظت آندی و کاتدی	روش های عمومی جلوگیری از خوردگی فلزات	
۶ ساعت	خوردگی در تاسیسات نفت و گاز / خوردگی در بخش تولید / خوردگی در بخش حمل و نگهداری / خوردگی در عملیات پالایش / روش های پایش خوردگی در صنایع نفت و گاز / مشاهده و کنترل خوردگی در سیستم های گاز ترش /	خوردگی در صنایع نفت و گاز و روش های رایج پایش آن	
۱ ساعت	اهمیت اقتصادی / هزینه های خوردگی	هزینه خوردگی	
۱ ساعت		اصطلاحات	

## فهرست مطالب

## صفحه

فصل یک - تعاریف / مفاهیم و ماهیت خوردگی .....	۹
قلمرو و حوزه فعالیت خوردگی .....	۱۰
تعریف خوردگی .....	۱۱
مهندسی خوردگی .....	۱۲
خسارات ناشی از خوردگی .....	۱۳
اصول خوردگی .....	۱۷
واکنش های الکتروشیمیایی .....	۱۸
پلاریزاسیون .....	۳۱
پتانسیل خوردگی .....	۳۶
روئین شدن .....	۴۰
واکنش های شیمیایی در خوردگی .....	۴۲
خوردگی در محیط های شیمیایی .....	۴۲
محصولات خوردگی .....	۴۶
سنجش خوردگی .....	۴۷
فصل دوم - مبانی متالورژی فلزات .....	۵۲
تبلور ابتدایی .....	۵۳
گرمای ذوب و انجماد .....	۵۵
متالورژیکی .....	۵۸
آلیاژها .....	۵۹

۶۱	.....	نقص های شبکه ای
۶۱	.....	نقص های نقطه ای
۶۸	.....	نقص های خطی
۷۰	.....	نقص های صفحه ای
۷۳	.....	فصل سوم - انواع خوردگی عمومی
۷۴	.....	انواع خوردگی
۷۴	.....	خوردگی یکنواخت
۷۵	.....	خوردگی گالوانیکی
۸۰	.....	خوردگی شیلیاری
۸۲	.....	خوردگی حفره ای
۸۵	.....	خوردگی بین دانه ای
۸۶	.....	جدایش انتخابی
۸۸	.....	خوردگی سایشی
۹۰	.....	خوردگی تنشی
۹۲	.....	خسارت هیدروژنی
۹۵	.....	فصل چهارم - روش های عمومی جلوگیری از خوردگی فلزات
۹۶	.....	انتخاب مواد
۹۶	.....	تغییر محیط خورنده
۹۷	.....	طراحی
۹۸	.....	ممانعت کننده



۱۰۱	پوشش ها
۱۰۴	حفاظت کاتدی
۱۱۰	حفاظت آندی
۱۱۲	مقایسه حفاظت آندی و کاتدی
۱۱۳	فصل پنجم - خوردگی در صنایع نفت و گاز و روش های رایج پایش آن
۱۱۴	خوردگی در تاسیسات نفت و گاز
۱۱۷	خوردگی در بخش تولید
۱۱۹	خوردگی در بخش حمل و نگهداری
۱۱۹	خوردگی در عملیات پالایش
۱۲۲	روش های پایش خوردگی در صنایع نفت و گاز
۱۳۵	مشاهده و کنترل خوردگی در سیستم های گاز ترش
۱۴۰	فصل ششم - هزینه های خوردگی
۱۴۶	فصل هفتم - ضرائب و اصطلاحات
۱۶۷	اصطلاحات رایج در علم خوردگی
۱۹۴	منابع



# فصل اول

## تعاريف، مفاهيم و

## ماهيت خوردگي

## قلمرو و حوزه فعالیت خوردگی

### مقدمه:

هنگام مطالعه خوردگی اولین چیزی که باید مورد قبول واقع شود، این است که خوردگی را می‌توان در بیشتر اوقات یک واکنش ساده منفرد تصور کنیم که اگر یک بار مورد بررسی و شناخت قرار گیرد قادر خواهیم بود در بسیاری موارد برای حل مشکلات مشابه آن را مورد استفاده قرار دهیم. اگر هزینه و قابلیت دسترسی از فاکتورهای انتخاب مواد نباشد و بهترین مواد همیشه انتخاب شوند، با این وجود همیشه از موادی مانند طلا و پلاتین می‌بایست صرف‌نظر نمود و در مورد مواد قابل حصول‌تر برای استفاده عملی در خانه‌ها، صنایع و اتومبیل‌ها تصمیم گرفته شود.

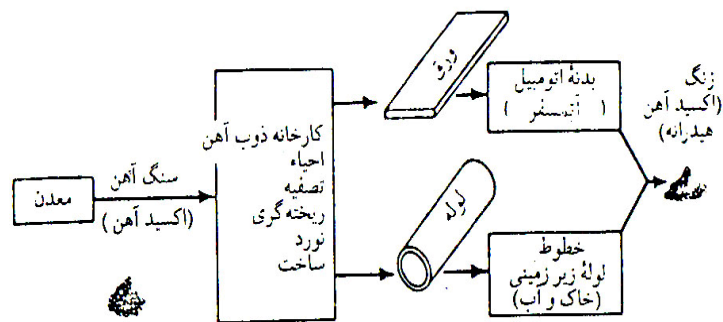
مواد قابل استفاده مانند فولاد، آلومینیوم و آلیاژهای مس، پلاستیک، سرامیک، چوب، مواد مقاوم، فولاد زنگ نزن و تعداد زیادی از سایر آلیاژهای مدرن همگی به همان اندازه‌ی مزیت‌هایشان دارای زیان‌هایی هستند. هر کدام از این آلیاژها و یا گروهی از آنها ممکن است به شکل بهترین انتخاب برای عملکرد خاصی به خدمت گرفته شوند ولی چیزی که در این باره باید یاد بگیریم آن است که انتخاب هر کدام از این مواد می‌بایست همراه با تجربه و دانش کافی انجام گیرد. تمام پدیده‌های خوردگی شبیه به هم نیستند، بنابراین دلیل اینکه چرا چنین انتخاب گوناگونی از مواد در یک محیط معین برحسب تنزل قابلیت‌های آنها درجه‌بندی و لیست می‌شوند به علت مکانیزم‌های مختلف حملات خوردگی است که قبلاً تجربه شده‌اند. همچنین در این درجه‌بندی‌ها خواص و ویژگی‌های مواد توضیح داده می‌شود. درک بهتر تمام این پارامترهای شرکت‌کننده در ایجاد خوردگی هنگام تجزیه و تحلیل مشکلات و توصیه‌های پیشگیرانه اساسی می‌باشد. در خوردگی مانند بسیاری از علوم تدوین شده کلمات معین، روش‌های ارائه اطلاعات و علائم اختصاری که ویژه کاربردهای عملیاتی هستند مورد استفاده قرار گرفته است اگر اصلاحات مخصوص این رشته شناخته شود در آینده شما قادر خواهید بود موضوعات خوردگی را با درک و اطمینان بیشتری بخوانید و مورد بحث قرار دهید. همچنین لازم است از جنبه‌های گوناگون روش‌های کنترل خوردگی شناخته و بررسی شود. خیلی افراد فقط در یک حوزه از زمینه فوق به

فعالیت مشغول هستند. شناخت میزان گستردگی فعالیت‌هایی که امروزه در تجزیه و تحلیل خوردگی و مبارزه با آن انجام می‌گیرد بسیار مهم می‌باشد. بسیاری از این تجربیات و تعداد زیادی راه‌حل‌های توسعه یافته در یک حوزه از کارهای خوردگی می‌تواند سبب بهبود روش‌های کنترل در زمینه‌های دیگر گردد. یکی از بهترین روش‌هایی که هم اکنون برای آشکار کردن خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعیین مقاومت مواد یا ارزیابی میزان کارایی دستورالعمل‌های کنترل خوردگی می‌باشد که به کمک وسایل بازرسی، روزانه به منظور مقابله با حملات خوردگی به کمک هزاران نفر پرسنلی که در این رابطه مشغول می‌باشند انجام می‌گیرد. در این رابطه نیز لازم است آشنائی و شناخت کاملی وجود داشته باشد. یقیناً هر کسی در رابطه با کار خوردگی در ابتدا به روش‌ها و دستورالعمل‌هایی توجه دارد که استفاده اقتصادی و ایمن از مواد را در محیط‌ها و شرایط ویژه اجازه می‌دهد. بنابراین به جنبه‌های مقدماتی بیشتر روش‌های متداول در کنترل خوردگی نیز می‌بایست توجه نمود. بعد از یادگیری اساسی هر روش و دستورالعمل‌های مربوط به آن می‌توان امکان استفاده از این راه‌ها را برای حل سایر مشکلات مورد مطالعه و بررسی بیشتر قرار داد.

### تعریف خوردگی

خوردگی را تخریب یا فاسد شدن یک ماده در اثر واکنش با محیطی که در آن قرار دارد تعریف می‌کنند. بعضی‌ها اصرار دارند که این تعریف بایستی محدود به فلزات باشد، ولی غالباً مهندس خوردگی بایستی برای حل یک مسئله هم فلزات و هم غیرفلزات را در نظر بگیرد. در صورتی که سرامیک‌ها، پلاستیک‌ها، لاستیک و مواد غیر فلزی دیگر نیز خورده می‌شوند. مثلاً، تخریب رنگ و لاستیک به وسیله نور خورشید یا مواد شیمیائی، خورده شدن جداره‌ی کوره‌ی فولادی‌سازی، و خورده شدن یک فلز جامد به وسیله مذاب یک فلز دیگر تماماً خوردگی نامیده می‌شوند. خوردگی می‌تواند سریع یا کند صورت گیرد. فولاد زنگ نزن ۸-۱۸ در حالت حساس شده به وسیله اسیدپلی تیونیک ظرف چند ساعت به شدت خورده می‌شود. ریل‌های راه‌آهن معمولاً به آهستگی زنگ می‌زنند. ولی سرعت زنگ زدن آنقدر نیست که بر کارایی آن‌ها در طول سال‌های زیاد اثری بگذارد. ستون آنی معروف دهلی در هندوستان حدود ۲۰۰۰ سال پیش

ساخته شده و هنوز به خوبی روز اول است. ارتفاع آن ۳۲ فوت و قطر آن ۲ فوت است. لکن بایستی توجه شود که این ستون آهنی عموماً" در شرایط جوی خشک قرار داشته است. خوردگی فلزات را همان‌طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است می‌توان برعکس متالورژی استخراجی در نظر گرفت. در متالورژی استخراجی، هدف عمدتاً به دست آوردن فلز از سنگ معدن و تصفیه یا آلیاژسازی آن برای مصارف مختلف می‌باشد. اکثر سنگ معدن‌های آهن حاوی اکسیدهای آهن هستند و زنگ زدن فولاد به وسیله آب و اکسیژن منجر به تشکیل اکسید آهن هیدراته می‌گردد. اگرچه اکثر فلزات موقعی که خورده می‌شوند تشکیل اکسیدهایشان را می‌دهند ولی لغت زنگ زدن فقط در مورد آهن و فولاد به کار می‌رود. بنابراین می‌گوئیم فلزات غیرآهنی خورده می‌شوند و نمی‌گوئیم زنگ می‌زنند.



شکل ۱-۱ متالورژی استخراجی آهن و برعکس آن

**مهندسی خوردگی: مهندسی خوردگی کاربرد دانش و فن یا هنر جلوگیری یا کنترل خسارت ناشی از خوردگی به روش اقتصادی و مطمئن می‌باشد. در حل مسائل خوردگی، مهندس خوردگی باید روشی را انتخاب نماید که بیشترین بهره را داشته باشد**  
**شرایط مهندس خوردگی**

شرایطی را که باید یک مهندس خوردگی دارا باشد تا بتواند از عهده وظایف خود برآید به دو بخش اختصاصی و عمومی می‌توان تقسیم نمود:

## شرایط اختصاصی

- آشنایی با اصول خوردگی
- آشنایی با عملیات مبارزه با خوردگی
- آشنایی با ماهیت محیط های خورنده
- آشنایی با قیمت مواد اولیه
- آشنایی با نحوه ساخت و تولید
- آشنایی با رایانه و طراحی قطعات با نرم افزارهای مربوطه

## شرایط عمومی

- توانایی ارتباط برقرار کردن با دیگران
- صداقت
- توانایی تفکر و تجزیه و تحلیل کردن
- آگاهی عمیق از اهمیت خطرات در عمل
- عقل سلیم (شعور)
- منظم و مرتب بودن
- در عمیق و صحیح مسائل اقتصادی

علاوه بر شرایط فوق مهندسين خوردگی باید با مهندسين مواد، صنايع و طراح همکاري نزديک داشته باشند و از شروع پروژه عضو تيم طراحی باشند و جنبه های مکانیک شکست و همچنین روش های بازرسی و بررسی های غیر مخرب را بدانند .

## خسارات ناشی از خوردگی

توجه به خوردگی و اشکال و ارزیابی خسارت آن سه بعد اصلی اقتصادی، ایمنی و کاهش ضایعات دارد . جهت پی بردن به نقش و اهمیت کنترل و جلوگیری از خوردگی لازم می باشد موارد زیان بار آن را توضیح داده شود خسارات ناشی از خوردگی به شرح ذیل می باشد :

- شکل ظاهری
- مخارج تعمیر و نگه داری و بهره برداری

- ✚ از کار انداختن کارخانه برای مدت زمان طولانی
- ✚ آلوده شدن محصول
- ✚ نشت یا از بین رفتن محصولات با ارزش
- ✚ اثرات بر امنیت و قابلیت اعتماد
- ✚ مسئولیت عملکرد محصول
- ✚ کاهش راندمان

### شکل ظاهری

شکل ظاهری ادوات و وسایلی که با آنها در طول شبانه روز سر و کار داریم نقش عمده ای در عملکرد ما دارد و بالطبع هر چه شکل ظاهری زیباتر باشد روحیه کاری اشخاص نیز بالاتر می رود. برای مثال رنگ کردن اتومبیل ها و روکش نمودن سطوح خارجی ادوات ساختمانی بوسیله فولاد زنگ نزن ، آلومینیوم و مس نمونه هایی از این قبیل می باشند .

### مخارج تعمیر و نگه داری و بهره برداری

هزینه های نیروی انسانی ایجاب می کند، که به منظور کم کردن قیمت تمام شده محصول، هزینه های تعمیرات و نگه داری به دقت بررسی شوند همکاری نزدیک بین مهندسی خوردگی و پرسنل بهره برداری و طراحی قبل از ساخت یک کارخانه باعث حذف یا کاهش عمده مخارج تعمیر و نگه داری می شود. حذف یک خط از روی نقشه ارزان تر و راحت تر است تا تعمیر و تعویض یک وسیله در یک کارخانه . برای مثال یک کارخانه صرفاً با تغییر جنس پیچ های مورد استفاده به یک فلز مقاوم تر در شرایط کار سالانه ده هزار دلار صرفه جویی نمود و یا با کاربرد حفاظت کاتدیک در مورد خطوط لوله های زیر زمینی از سوراخ شدن و در نتیجه صرفه جویی بزرگی در مخارج تعمیراتی به عمل می آید .

### از کار انداختن کارخانه برای مدت زمان طولانی

غالبا" بدلیل خوردگی، واحدی را متوقف می سازد یا قسمتی از یک سیستم را می خواباند گاهی اوقات ممکن است این توقف جهت اجرای پروژه های حفاظت خوردگی که در طراحی اولیه در



نظر گرفته نشده باشد صورت گیرد . نظارت دائمی بر فرآیند و محیط خورنده در جلوگیری از اندام های غیر منتظره و توقف واحد نقش بسزایی دارد . همچنین نظارت بر تجهیزات و قراردادن نمونه هایی از فلزی که تجهیزات از آن ساخته شده ، در معرض فرآیند و کنترل و بازرسی متناوب آن ها با استفاده از یک الکتروود که دائماً "سرعت خوردگی را ثبت می نمایند از این قبیل می باشند.

**آلوده شدن محصول:** در اکثر موارد قیمت یک محصول در بازار به درجه خلوص و کیفیت آن بستگی دارد . عاری بودن از آلودگی های جزئی فاکتور حیاتی در تولید و حمل و نقل پلاستیک های شفاف، رنگ ها ،مواد غذایی ،داروها و نیمه هادی ها است و مقدار کمی خوردگی تجهیزات که باعث وارد شدن یون های فلزی به داخل محصول می گردد باعث تجزیه کاتالیزوری یک محصول می گردد. درموردی که با آلودگی و تجزیه محصول مواجه هستیم عمر قطعه فاکتور مهمی نخواهد بود . با وجود اینکه فولاد معمولی ممکن است سال ها دوام بیاورد ولی فلز گرانتتری بکار برده می شود تا از آلودگی محصول به زنگ ناشی از فولاد معمولی اجتناب گردد.

**نشت یا از بین رفتن محصولات با ارزش:** نشت جزئی اسید سولفوریک به فاضلاب نگرانی حادی ایجاد نمی کند زیرا اسید سولفوریک ماده ارزان قیمتی است ولی نشت یا از بین رفتن ماده ای که گالنی چند صد دلار ارزش دارد باید سریعاً متوقف گردد. نشت جزئی ترکیبات یا محلول های اورانیم خطرناک است و می تواند خیلی گران تمام شود و محیط را آلوده نماید ، در چنین مواردی استفاده از طراحی گران تر و موارد بهتر برای ساخت تجهیزات بخوبی قابل توجیه هستند

**اثرات بر امنیت و قابلیت اعتماد**

کار کردن با مواد خطرناک مثل گازهای سمی ، اسید کلریدریک ،اسید سولفوریک ،اسید نیتریک غلیظ ،مواد منفجره و قابل اشتعال ،مواد رادیو اکتیو و شیمیایی در دما و فشارهای بالا مستلزم استفاده از نوعی مواد ساختمانی است که خطر خوردگی را به حداقل برساند و خطرات جانی و مالی که در اثر ترکیدن ادوات پیش می آید به حداقل ممکن برسد . صرفه جویی در مواد ساختمانی در مواردی که امنیت به خطر می افتد جایز نمی باشد همچنین آلوده شدن آب

مصرفی، شیر، لبنیات و مواد ضد عفونی کننده از این نوع می باشند. خوردگی در فلزاتی که در داخل بدن بکار می روند مانند مفصل ها، پیچ ها، ورقه ها و دریچه های قلب که نیاز به قابلیت اعتماد آن ها می باشد نقش عمده ای دارد.

**مسئولیت عملکرد محصول:** در رابطه با محصولات کارخانه می بایست عمر مفید هر دستگاه مشخص و در پایان آن محصول منهدم گردد. و همچنین در هنگام ساخت بر کیفیت محصول نظارت داشت و سازنده مسئول مواد مصرفی و کنترل کیفیت محصولات خود باشد تا در برابر حوادث پیش آمده مسئول باشد.

**کاهش راندمان:** در مواردی به علت رسوب و یا تجمع محصولات خوردگی اشکالاتی از نظر کاهش انتقال حرارت و یا گرفتگی کامل لوله ها بوجود می آید. به منظور بر طرف کردن مسائل ایجاد شده علاوه بر خارج نمودن دستگاه از سرویس جهت انجام تعمیرات باید تمهیدات مقتضی اتخاذ گردد که اجرای آن نیز مخارجی را در بر خواهد داشت. همچنین صدمات ناشی از خوردگی جداره رینگ و پیستون ها در موتورهای احتراق داخلی توسط گازهای سوختی که منجر به کاهش اندازه های طراحی اولیه شده و نیز افزایش مصرف سوخت و روغن می گردد مثال هایی از این صدمات می باشند.

**انتخاب مواد:** بطور کلی از مجموعه عناصر شناخته شده در حدود هشتاد مورد آن ها فلز می باشند که هر کدام دارای خواص مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی خاصی بوده و نیز میزان و سرعت و رفتار خوردگی در محیط ها و شرایط معینی با دیگری متفاوت می باشد. در تهیه و ساخت آلیاژهای مختلف که نیمی از عناصر فلزی شرکت دارند پیشرفت سریعی انجام گرفته، به طوریکه تا کنون بیش از چهل هزار نوع آلیاژ ساخته شده است که در حال افزایش نیز می باشند. در عمل عوامل مختلفی در کاربرد مواد مد نظر قرار می گیرند. مثلاً "اگر قیمت ها و قابل دسترس بودن به عنوان عامل موثر محسوب نمی شد می توانستیم بهترین و مقاوم ترین مواد در برابر خوردگی را انتخاب کنیم. به هر حال عوامل مهم مداخله گر در این مورد عبارتند از:

- ایمنی
- قیمت
- رفتار خوردگی
- قابلیت لحیم‌کای و جوشکاری
- خواص شکل‌پذیری (خمیدگی، کشیدگی و...)
- خواص مکانیکی مناسب (مقاومت کششی، مقاومت ضربه‌پذیری، خستگی و...)
- استحکام دمای بالا و پائین
- قابلیت دسترسی به ماده
- سازگاری با سایر مواد در سیستم
- شکل ظاهری
- خواص ویژه از قبیل دانسیته کم، خاصیت حرارتی و مغناطیسی و رادیواکتیو

### اصول خوردگی

به طور کلی پایه و اساس اینکه چه عواملی منجر به خوردگی فلزات می‌شوند را تحت عنوان اصول خوردگی در پنج بخش ذیل می‌توان بررسی نمود:

- الکترو شیمیایی<sup>۱</sup>
- شیمیایی<sup>۲</sup>
- متالوژی<sup>۳</sup>
- فیزیکی<sup>۴</sup>
- ترمودینامیک<sup>۵</sup>

که دو مورد اول به دلیل اهمیت در اینجا شرح داده می‌شوند و مورد سوم نیز در فصل دوم و موارد چهار و پنج به دلیل مرتبط نبودن با این مبحث خودداری خواهد شد.

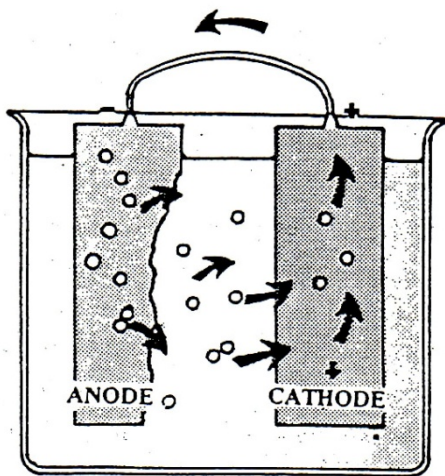
---

۱-ELECTROCHEMICAL  
 ۲-CHEMICAL  
 ۳-METALLURGICAL  
 ۴-PHYSIOLOGICAL  
 ۵-THERMODYNAMICS

## واکنش های الکترو شیمیایی

می‌دانیم ماده، از اتم ساخته شده است و همچنین از ذرات کوچک‌تری که اتم را ساخته‌اند. تعداد بی‌شماری از این ذرات طوری کنار هم قرار گرفته‌اند که حاصل بار مثبت می‌شوند و دسته‌های خنثی از این ذرات با تجمع اطراف یکدیگر هسته‌ای تشکیل داده‌اند که ذراتی با بار منفی در مدارهائی خیلی شبیه به چرخش سیارات اطراف خورشید به دور این هسته در حال گردش هستند. در یک اتم طبیعی ذرات منفی را الکترون می‌نامند که دقیقاً با بارهای مثبت روی هسته موازنه شده‌اند. الکترون‌ها لایه‌هائی در اطراف هسته را اشغال می‌کنند که اصطلاحاً پوسته (SHELL) می‌نامند. این لایه‌ها در مورد آهن زمانی که ۸ الکترون بر روی آن‌ها قرار گیرد کامل می‌شوند و در مواردی ممکن است الکتروهای اضافی که برای موازنه بارهای مثبت هسته مورد نیاز می‌باشد به آن‌ها اضافه شود. همچنین الکترون‌های موجود در لایه آخر پوسته قادرند از اتم جدا شود در این حالت اتم باردار شده را یون می‌نامند و به این فرآیند یونیزاسیون می‌گویند. معمولاً این تغییرات با علائم شیمیائی نشان داده می‌شود، برای مثال Fe یک علامت شیمیائی برای اتم آهن طبیعی است. در حالی که علامت  $Fe^{++}$  اتم آهنی را که ۲ الکترون خود را از دست داده است مشخص می‌نماید و یون فروس (FERRUS) نامیده می‌شود. به همین صورت  $Fe^{+++}$  مشخص می‌نماید یک اتم آهن ۳ الکترون خود را از دست داده است و یون فریک نامیده می‌شود. فرآیند از دست دادن الکترون از اتم با مراجعه به الکتروشیمی اکسیداسیون (OXIDATION) نامیده می‌شود. یک فرآیند مثبت نیز وجود دارد و آن زمانی است که الکترون‌های دیگری به اتم اضافه شده و بار منفی به آن می‌دهند. هر افزایشی در بار منفی (یا کاهش در بار مثبت) یک اتم احیاء (REDUCTION) نامیده می‌شود. خیلی از ترکیبات شیمیائی وقتی در آب حل می‌شوند خود به خود به ۲ یا چند یون جداگانه تقسیم می‌شوند که بارهای مخالف یکسان دارند. این فرآیند نیز یونیزاسیون نامیده می‌شود. این ذرات هستند که عامل جریان‌های الکتریکی در محلول‌های آبی هستند. زمانی خوردگی می‌تواند هر کدام از واکنش‌هائی که قبل توضیح داده شد را داشته باشند، که مکانیزم حملات خوردگی در

محللول‌های آبی با بعضی جنبه‌های الکتروشیمیائی انجام شده باشد و جریان الکتروسیسته از ناحیه مشخصی از سطح فلز به سایر نواحی از طریق محلولی دارای هدایت الکتریکی، مانند آب دریا یا آب سخت ایجاد گردد. در این حالت به آن بخش از سطح فلز که خورده می‌شود و از آنجا جریان فلز را به طرف محلول ترک می‌کند، آند گفته می‌شود. در مقابل بخشی از سطح فلز که از آن قسمت جریان محلول را ترک کرده و به طرف فلز بر می‌گردد کاتد نامیده می‌شود. مدار الکتریکی در خارج از محلول از طریق فلز یا اتصال الکتریکی دو قطعه فلز کامل می‌گردد. اجزاء اصلی این مدار کامل شده در شکل 2-1 داده شده است.



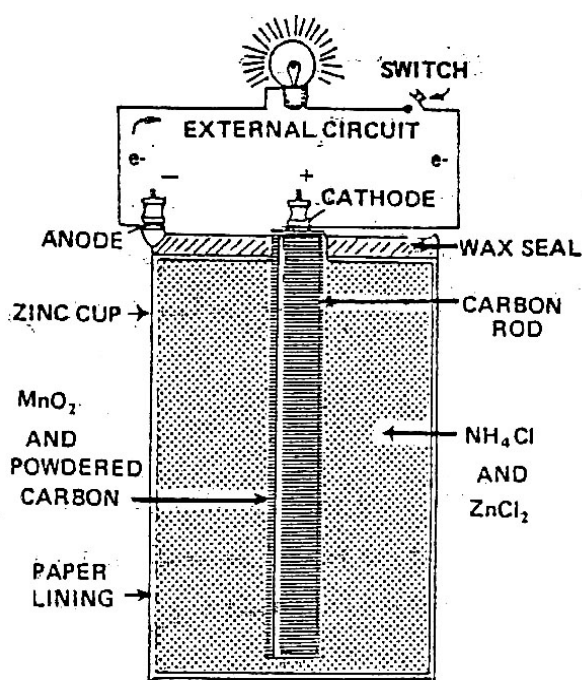
شکل ۲-۱ مدار الکتروشیمیایی خوردگی

نقطه‌های شکل نشان‌دهنده آن است که الکتروسیسته (نه الکترون‌ها) در داخل محلول از آند (-) به طرف کاتد (+) جریان یافته و از آنجا از طریق سیم رابط فلزی مجدداً به طرف آند برمی‌گردد. محلولی که قابلیت هدایت الکتروسیسته را دارا باشد "الکترولیت" نامیده می‌شود و این محلول قادر است الکتروسیسته را از طریق یون‌ها هدایت کند. یون‌ها، اتم‌ها یا گروهی از اتم‌هایی با بار مثبت یا منفی می‌باشند. الکترولیتی که به صورت یک محیط خورنده عمل می‌کند هر

محلولی ممکن است باشد. باران و یا حتی رطوبت هوا، می‌تواند در آب تازه یا آب نمکی محدوده‌ایی به صورت قلیائی یا اسیدی شدید داشته باشد. آندها و کاتدهایی که در واکنش‌های خوردگی ایجاد می‌شوند الکتروود نامیده می‌شوند. این الکتروودها ممکن است از دو نوع مختلف فلز یا نواحی مختلف بر روی سطح یک قطعه فلز یکسان تشکیل شده باشند در این حالت الکتروود منفی جایی است که خوردگی در آنجا اتفاق می‌افتد.


### خوردگی الکتروشیمیایی در یک پیل خشک


یک واکنش الکتروشیمیایی به این صورت تعریف شده است: واکنش شیمیایی که در آن انتقال الکترون صورت می‌پذیرد. یا واکنش شیمیایی است که در آن اکسیداسیون و احیا نیز انجام می‌شود، از آنجا که واکنش‌های خوردگی فلزات اغلب یک فرآیند الکتروشیمیایی است، خیلی مهم است که پارامترهای اساسی واکنش‌های الکتروشیمیایی شناخته شود. تعاریف بالا از واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌تواند خیلی ساده با بررسی جزئیات بعضی از واکنش‌های خوردگی نشان داده شود. یک باطری خشک رایج‌ترین واکنش خوردگی شناخته شده می‌باشد که در آن می‌توان تمام واکنش‌های الکتروشیمیایی گفته شده را مورد بررسی قرار داد. در شکل 1-3 نمونه‌ایی از آن نشان داده شده است. در این باطری به دلیل خوردگی گالوانیکی جریان الکتریکی تولید می‌شود. همان‌طوری که دیده می‌شود روی (آند) در یک مدار الکتریکی در حضور یک الکتروولیت با گرافیت یا کربن قرار داده شده‌اند. وقتی در این مدار یک لامپ کوچک یا زنگ اخبار نصب شود و کلید مدار بسته شود، جریان الکتریکی بین این دو الکتروود برقرار می‌شود. علت برقرار شدن جریان شدت گرفتن خوردگی روی و ایجاد واکنش کاتدی در الکتروود گرافیت می‌باشد. زمانی که روی به طور کامل خورده شود، قدرت باتری نیز کاملاً تخلیه می‌گردد در این حالت امکان ایجاد سوراخ در محفظه روی ونشتی الکتروولیت داخل آن به بیرون می‌باشد که با قرار دادن در داخل یک روکش استیلی این مشکل حل شده است.





شکل ۱-۳ مدار الکتریکی در یک باطری خشک

در اینجا چهار پارامتر اساسی برای این پیل مورد نیاز است:

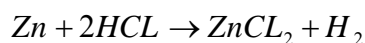
یک آند (Zn) 

یک کاتد (C) 

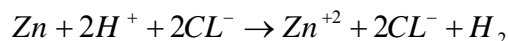
الکتrolیت ( $NH_4Cl, ZnCl_2$ ) 

مدار خارجی 

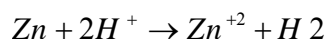
تمام پیل‌های خوردگی باید این چهار پارامتر را داشته باشند. پتانسیل قابل توجهی بین الکتروود بسیار کاتدیک کربن و آند روی ایجاد می‌شود. واکنش‌های موجود را می‌توان به روشنی به وسیله خوردگی روی در اسید کلریدریک که قبلاً مورد بررسی قرار گرفت. نشان داد.



در این واکنش اسید کلریدریک و کلرید روی به صورت زیر در محلول آب یونیزه می‌شوند.

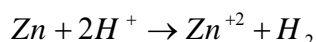
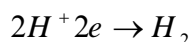


در این حالت دیده می‌شود که یون کلراید مستقیماً در واکنش شرکت نمی‌کنند. یون کلرید در هر دو طرف واکنش دیده می‌شود ولی در واکنش خوردگی تغییر نمی‌کنند (ظرفیت آن بدون تغییر باقی می‌ماند) بنابراین می‌توان واکنش بالا را با حذف کلراید ساده‌تر نشان داد.



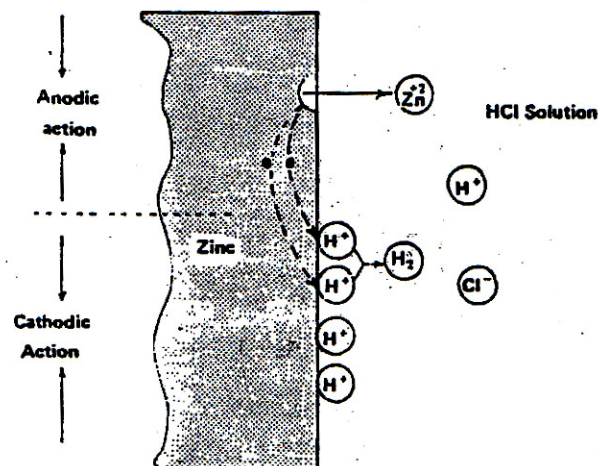
از این واکنش به سادگی دیده می‌شود که خوردگی روی توسط اسید کلریدریک شامل واکنش بین روی و یون هیدروژن است که حاصل آن یون روی و گاز هیدروژن می‌باشد. در ضمن این واکنش، فلز روی، به یون اکسید شده و ظرفیت آن افزایش می‌یابد. یون هیدروژن نیز به گاز هیدروژن تبدیل می‌شود (ظرفیت آن کاهش می‌یابد).

این واکنش را باز هم به صورت ساده‌تر با تقسیم آن به دو واکنش اکسیداسیون و احیاء می‌توان نمایش داد.



یک واکنش اکسیداسیون، مانند واکنش بالا با یک افزایش در ظرفیت یا تولید الکترون مشخص می‌شود. به همین صورت یک واکنش احیاء با کاهش در ظرفیت یا مصرف الکترون مشخص می‌گردد. در اصطلاحات مورد استفاده در خوردگی، واکنش اکسیداسیون به نام "واکنش آندیک" و واکنش احیاء به نام "واکنش کاتدیک" شناخته شده است. در واکنش‌های فوق، خوردگی حداقل از یک واکنش اکسیداسیون و یک واکنش احیاء تشکیل شده است. در شکل 1-4 این موضوع به صورت شماتیک نشان داده شده است.



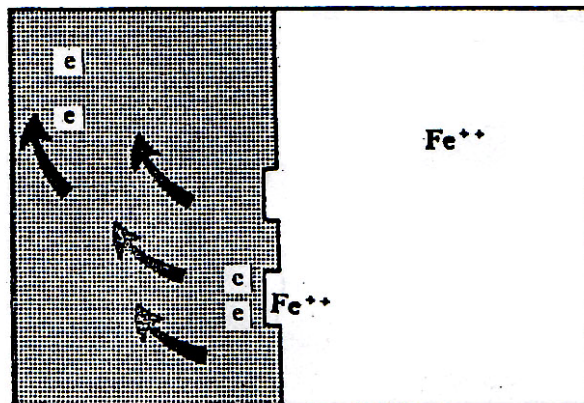


شکل ۱-۴ شماتیک واکنش اکسیداسیون و احیاء

در این شکل، قسمتی از یک فلز روی در اسید کلریدریک قرار داده شده است. در این حالت در بعضی نقاط سطح، فلز روی به یون روی تغییر شکل می‌دهد، بر طبق واکنش آندی، این واکنش تولید الکترون می‌نماید و این الکترون‌ها از طریق عبور از فلز به قسمت‌های دیگر، جایی که یون هیدروژن به گاز هیدروژن تبدیل می‌شود (واکنش کاتدی) انتقال می‌یابند. دو واکنش گفته شده در بالا و این شکل، اساس یک واکنش الکتروشیمیایی را نمایش می‌دهند. در طی چنین واکنش‌هایی الکترون‌ها انتقال می‌یابند یا به گفته دیگر، یک فرآیند اکسیداسیون همراه با فرآیند احیاء رخ می‌دهد. بطور اختصار می‌توان گفت زمانی که خوردگی اتفاق می‌افتد، تشکیل یون‌ها و آزادی الکترون‌ها در یک سطح آندی جایی که اکسیداسیون یا تجزیه یا زوال فلز رخ می‌دهد انجام می‌شود. همچنین در سطح کاتدی الکترون‌های تولید شده از آند باید پذیرفته شوند. این قبول الکترون می‌تواند بصورت خنثی ساختن یون هیدروژن مثبت یا تشکیل یک یون منفی باشد. واکنش آندی و کاتدی در یک لحظه یکسان و با یک سرعت مساوی انجام می‌شود. با این حال خوردگی تنها در ناحیه‌ای که به صورت آندی می‌باشد رخ می‌دهد.

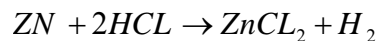
## فرآیندهای آندی

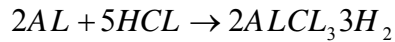
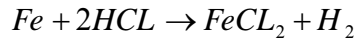
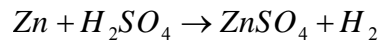
در این قسمت، اتفاقاتی که در آند هنگام خوردگی رخ می‌دهد با جزئیات بیشتری توضیح داده شده است. اتم‌ها با بار مثبت سطح فلز را ترک می‌کنند و به صورت یون داخل محلول می‌شود. هم‌زمان بر روی سطح فلز به همان اندازه بار منفی و به شکل الکترون‌هایی که می‌توانند در فلز یا هر هادی الکتریکی خارجی جریان یابند، باقی می‌گذارند. اتم‌های یونیزه می‌تواند یک یا تعداد بیشتری بار مثبت داشته باشند. در خوردگی آهن، هر اتم به یک یون آهن با دو بار مثبت تبدیل شده و ۲ الکترون نیز تولید می‌کند.



شکل ۵-۱ شماتیک فرآیند آندی در آهن

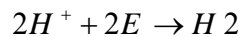
این الکترون‌ها از طریق فلز یا هر هادی الکتریکی خارجی انتقال می‌یابند و مدار الکتریکی را در کاتد (جایی که یک واکنش مشابه آن‌ها را مصرف می‌کند) می‌نمایند. در مدت حملات خوردگی، واکنش آندیک همیشه اکسیدکننده فلز به یک ظرفیت بالاتر (معمولاً از صفر به ظرفیت مثبت) می‌باشد. معادلات زیر را به عنوان مثال می‌توان ملاحظه نمود:



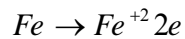
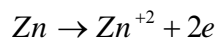


در تمام این واکنش‌ها مطابق واکنش زیر، یون هیدروژن مثبت به گاز هیدروژن احیا

می‌گردد:



تنها اختلاف، اختلاف در واکنش‌های بالا اختلاف در فرآیندهای آندیک با اکسیداسیون می‌باشد. بنابراین درک خوردگی به وسیله اسید به خاطر آنکه تمام واکنش‌های کاتدیک آن تنها تغییر یون هیدروژن به گاز هیدروژن می‌باشد بسیار ساده می‌شود. در حالت در مورد تعداد زیادی از واکنش‌های فلزات در اسیدها به طور مثال، کلریدریک، سولفوریک، فسفریک و دیگر اسیدهای قوی اتفاق می‌افتد. بنابراین اگر واکنش‌هایی که قبلاً گفته شد به صورت واکنش‌های آندی و کاتدی جدا کنیم تنها اختلافی که پیدا می‌شود در واکنش‌های اکسیداسیون می‌باشد. در زیر واکنش‌های آندیک آورده شده است:



در این حالت می‌توان واکنش‌های آندیک را که در زمان خوردگی رخ می‌دهد بطور کلی به صورت زیر نمایش داد:

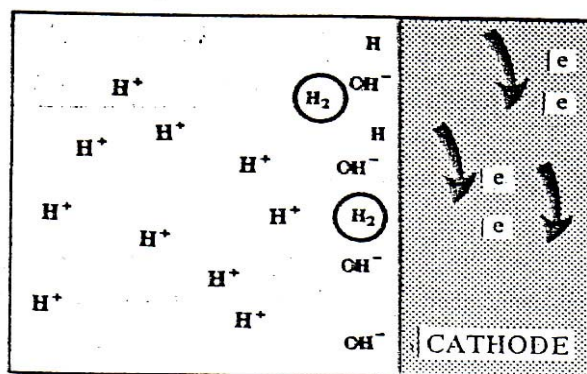


بعضی فلزات مانند نقره، یک ظرفیتی هستند در حالی که دیگر فلزات مانند آهن، تیتانیوم،

اورانیوم چند ظرفیتی هستند و بارهای مثبت بیش از ۶ مطابق این واکنش که یک واکنش کلی است و برای تمام واکنش‌های خوردگی قابل اجراست، پیدا می‌کنند.

### فرآیندهای کاتدی

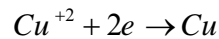
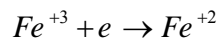
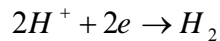
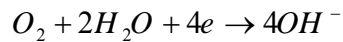
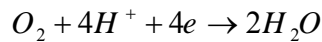
در این قسمت نیز به اتفاق‌هایی که به موازات واکنش‌های آندی در کاتد رخ می‌دهد با توضیحات بیشتر اشاره شده است. الکترون‌های تولید شده توسط یون‌های فلزی در آند از فلز به سطح کاتد یک فلز که در الکترولیت قرار دارد عبور می‌نمایند. و در آنجا موازنه الکتریکی سیستم با واکنش خنثی‌سازی یون‌های مثبت الکترولیت مانند یون هیدروژن انجام می‌گیرد. یون هیدروژن، می‌تواند به شکل اتمی احیا گردد و اغلب به صورت گاز هیدروژن در سطح کاتدی واکنش نماید. احیا هیدروژن در سطح کاتدی موازنه بین یون‌های هیدروژن اسیدی ( $H^+$ ) و یون‌های هیدرواکسید قلیائی ( $OH^-$ ) را بر هم می‌زند و یک محلول کمتر اسیدی و بیشتر قلیائی در آن ناحیه ایجاد می‌نماید.



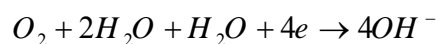
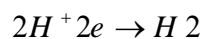
شکل ۱-۶ شماتیک فرآیند کاتدی

این تغییر در غلظت هیدروژن را می‌توان با استفاده از معرف‌های شیمیائی مشاهده و بدین طریق نیز می‌توان محلی از سطح فلز که در آن قسمت واکنش کاتدی خوردگی رخ می‌دهد تعیین و اثبات نمود. واکنش‌های کاتدی دیگر نیز وجود دارد که در هنگام خوردگی فلزات با

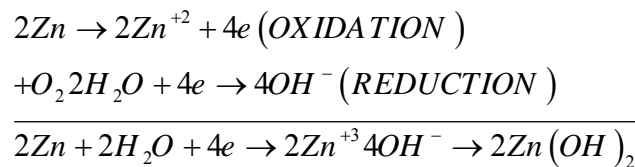
آن‌ها مواجه می‌شویم. بعضی از این واکنش‌ها به صورت زیر می‌باشند:



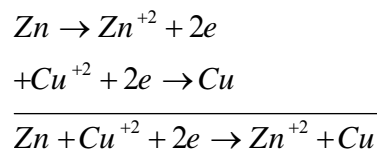
مجموع این واکنش‌ها را به صورت 2HM2 می‌توان به خاطر سپرد، که نشان‌دهنده‌ی آن است که می‌توان ۲ واکنش اکسیژن، یک واکنش ئیدروژن و ۲ واکنش فلز در کاتد ملاحظه نمود. احیا یون ئیدروژن و تشکیل گاز ئیدروژن همان‌طور که قبلاً بحث شد از واکنش‌های کاتدی است که در طی خوردگی اسیدها رخ می‌دهد. احیا اکسیژن نیز به دلیل آنکه اکسیژن در اتمسفر و محلول‌های در تماس با آن حضور دارد یک واکنش کاتدی خیلی معمول می‌باشد. احیا یون فلز و رسوب آن اگرچه کمتر معمول است لیکن در صورت مشاهده سبب مشکلات خوردگی شدیدی می‌شود. در مورد واکنش‌های بالا، موضوع قابل توجه آن است که همه آن‌ها در یک مورد یعنی مصرف الکترون شبیه به هم هستند تمام واکنش‌های خوردگی ترکیبی از واکنش‌های آندی و یک یا چند واکنش کاتدی گفته شده در بالا هستند و در هر مورد خوردگی در فلزات، تقریباً این ۶ واکنش به تنهایی یا به صورت مرکب می‌تواند ایجاد شود. برای مثال همان‌طور که قبلاً دیدیم خوردگی اسید می‌تواند با واکنش‌های اکسیداسیون فلز، احیا هیدروژن و احیا اکسیژن مطابق زیر ایجاد شود:



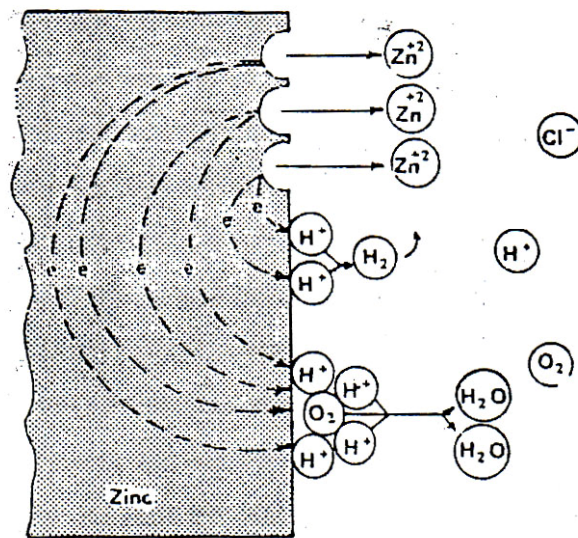
واکنش خوردگی روی توسط آب و یا هوای مرطوب را نیز می‌توان مورد بررسی قرار داد. با ضرب کردن واکنش اکسیداسیون روی در ۲ و جمع آن با واکنش احیا اکسیژن، واکنش کلی به شکل ساده همان‌طور که قبلاً نمایش داده شد به صورت زیر می‌باشد:



محصول این واکنش  $Zn^{+2}$  و  $OH^-$  هستند که فوراً به شکل محلول  $Zn(OH)_2$  بر هم اثر می‌کنند. مورد دیگر خوردگی روی توسط سولفات مس می‌باشد که مجموعی از واکنش اکسیداسیون روی و واکنش رسوب فلز توسط یون به صورت زیر می‌باشد:



مقایسه این واکنش با واکنش  $Zn + CuSO_4 \rightarrow ZnSO_4 + Cu$  نشان می‌دهد که این دو واکنش اساساً یکسان هستند. هنگام خوردگی ممکن است تعداد واکنش‌های اکسیداسیون و احیائی که رخ می‌دهد، بیشتر از یک واکنش باشد، برای مثال در طی حملات خوردگی بر روی یک آلیاژ ترکیبات اتمی فلزات تشکیل‌دهنده این آلیاژ، به صورت یونی به داخل محلول وارد می‌شوند. بنابراین در خوردگی آلیاژ آهن - کروم، کروم و آهن هر دو اکسید می‌شوند و بیش از یک واکنش کاتدی نیز می‌تواند بر روی سطح فلز اتفاق بیفتد. بررسی واکنش خوردگی روی در اسیدکلریدریک محتوی اکسیژن محلول نشان می‌دهد که انجام دو واکنش کاتدی محتمل می‌باشد تشکیل گاز نیدروژن و احیاء اکسیژن در این حالت به دلیل آنکه، ۲ واکنش کاتدی یا بیشتر وجود دارد که در آن‌ها الکترون به مصرف می‌رسد بنابراین سرعت کلی خوردگی روی افزایش می‌یابد.



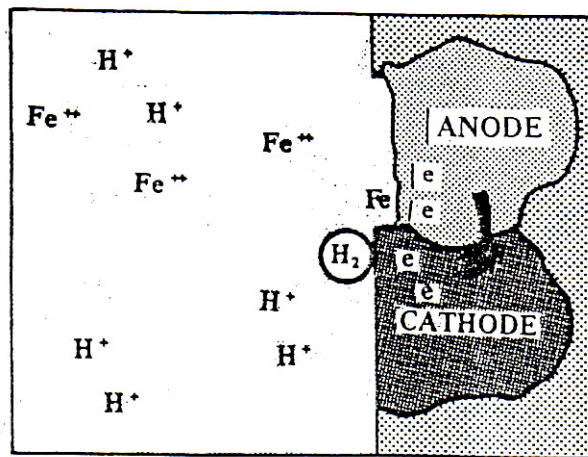
شکل ۷-۱ شماتیک خوردگی روی در برابر اسید کلریدریک

بنابراین محلول اسیدی که محتوی اکسیژن محلول می‌باشد یا در معرض هوا قرار دارد، خیلی خورنده‌تر از اسید عاری از هواست. در این حالت با خارج نمودن اکسیژن از محلول‌های اسیدی، می‌توان خوردگی ناشی از آن‌ها را به شدت کاهش داد. این روش یکی از معمول‌ترین راه‌ها برای کاهش خوردگی بسیاری از محیط‌ها، خصوصاً محیط‌های اسیدی می‌باشد. حذف اکسیژن ممکن است به وسیله روش‌های شیمیائی یا مکانیکی انجام گیرد. اگر یک قطعه فولاد نرم (MILD STEEL) در یک محلول اسید کلریدریک قرار داده شود، تشکیل بسیار شدید حباب‌های هیدروژن مشاهده می‌شود در چنین شرایطی، فلز نیز خیلی سریع خورده می‌شود. در این حالت همان‌طور که قبلاً گفته شد حل شدن فلز فقط در سطوح آندی رخ می‌دهد و حباب‌های هیدروژن نیز تنها در سطوح کاتدی ایجاد می‌گردد ولی با این وجود ممکن است به نظر آید که خروج حباب‌های هیدروژن از داخل سطح فلز انجام می‌شود. دلیل این امر آن است که نواحی آندیک و کاتدیک به تناوب لحظه به لحظه با یکدیگر تغییر مکان می‌دهند. بطوری که در این حالت نمودی از خوردگی یکنواخت به خوبی قابل مشاهده است. اگر این پدیده را از طریق یک

میکروسکوپ مناسب بررسی نمائیم، مشاهده می‌شود که نواحی خیلی کوچک آندیک و کاتدیک بر روی یک سطح دائماً تغییر مکان می‌دهند. این نواحی اغلب به قدری کوچک هستند که غیرقابل مشاهده می‌باشند و تعداد آن‌ها آنقدر بیشتر است که قابل جداسازی نمی‌باشند.

### ترکیب فرآیندهای آندیک و کاتدیک

بطور خلاصه اگر تنها یک آند و یک کاتد را بخواهیم در یک نما و در یک قطه آهن که در محلول اسید قرار دارد مورد بررسی قرار دهیم، خواهیم دید که الکترون‌هایی از تشکیل یون‌های فروس تولید می‌شوند و از سطح فلز از یک ناحیه آندی به طرف ناحیه کاتدی حرکت می‌کنند.



شکل ۸-۱ شماتیک فرآیندهای آندی و کاتدی در خوردگی آهن در محلول اسید

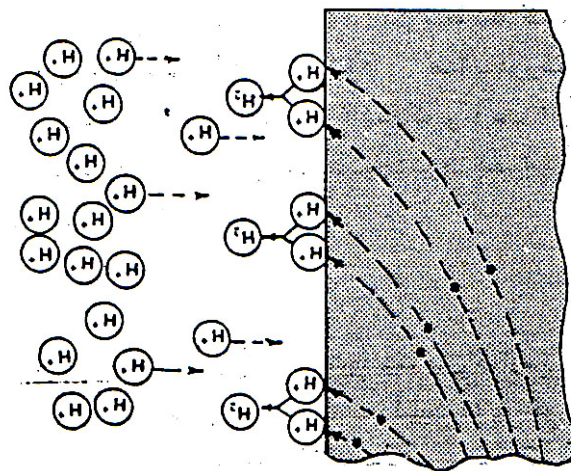
در سطح کاتدی، این الکترون‌ها با یون‌های هیدروژن محلول ملاقات می‌کنند، یک یون هیدروژن یک الکترون را می‌پذیرد و به اتم هیدروژن تبدیل می‌شود که می‌تواند داخل فلز شود و تردی هیدروژنی ایجاد نماید و یا در بسیاری موارد با دیگر اتم‌های هیدروژن ترکیب می‌شود و یک مولکول هیدروژن ایجاد می‌نماید که به سطح فلز می‌چسبد یا به صورت حباب‌هایی از سطح کاتد آزاد می‌شود. همان‌طوری که این فرآیند ادامه می‌یابد، اکسیداسیون (خوردگی) آهن در سطح آندیک و احیا هیدروژن در سطح کاتدیک رخ می‌دهد. در اینجا باید به این نکته توجه شود که



واژه اکسیداسیون لزوماً در رابطه با واکنش با اکسیژن نمی‌باشد.

## پلاریزاسیون

بررسی واکنش‌های شیمیایی نشان می‌دهد که این واکنش‌ها تمایل دارند به سرعت تعادلی کمتر از سرعت اولیه واکنش برسند. به همین صورت در فعالیت‌های خوردگی نیز به دلیل اثرات ناشی از محصولات واکنش‌های آندیک و کاتدیک، روند کند شدن واکنش‌ها دیده می‌شود. واکنش کاتدیک و همراه با آن واکنش کلی خوردگی آهسته‌تر می‌شود. اگر محصول هیدروژن تولید شده از آن با ایجاد گاز ئیدروژن با دیگر واکنش‌ها با اکسیژن مصرف نشود، در این حالت گفته می‌شود این کاهش سرعت در واکنش از پلاریزاسیون کاتدیک نتیجه شده است. بررسی این اثر با اندازه‌گیری پتانسیل فلز در آن جایی که واکنش اتفاق می‌افتد امکان‌پذیر می‌باشد. برای مثال اگر پتانسیل سطح کاتدی فلز قبل و بعد از برقراری با سطح آندی آن اندازه‌گیری شود، مشخص می‌شود که پتانسیل اندازه‌گیری شده تغییراتی داشته و به مقداری نزدیک‌تر به پتانسیل آندی رسیده است. به همین صورت اندازه‌گیری پتانسیل قسمت آندی قبل و بعد از برقراری جریان نشان‌دهنده‌ی نزدیک‌تر شدن پتانسیل این قسمت به پتانسیل قسمت کاتدی می‌باشد که می‌تواند نتیجه افزایش غلظت یون‌های فلزی در ناحیه آندی و در مجاورت سطح فلز در حال خورده شدن باشد. دو نوع مختلف پلاریزاسیون یا راه‌هایی که واکنش‌های الکتروشیمی کندتر می‌شوند وجود دارد. این دو پلاریزاسیون ناشی از فعالیت و غلظت عوامل مؤثر به واکنش‌ها می‌باشند. واژه پلاریزاسیون ناشی از فعالیت در نشان دادن فاکتورهای کند کننده‌ای که خودشان از عوامل اصلی واکنش هستند به کار می‌رود. برای مثال در واکنش احیا یون ئیدروژن که قبلاً توضیح داده شد، سرعتی که یون‌های ئیدروژن را به گاز ئیدروژن احیا می‌کند، به عوامل بستگی دارد که در سرعت انتقال الکترون به سطح فلز مؤثر هستند. این عوامل شامل نوع فلز، غلظت یون هیدروژن و دمای سیستم می‌باشد. در حقیقت اختلاف زیادی در قابلیت‌های فلزات مختلف در انتقال الکترون به یون هیدروژن وجود دارد در نتیجه سرعت تشکیل هیدروژن از سطوح فلزات مختلف کاملاً متفاوت می‌باشد. در مقابل پلاریزاسیون ناشی از غلظت در مورد عوامل کندکننده واکنش به دلیل تغییرات غلظت محلول مجاور سطح فلز، به کار برده می‌شود.



شکل ۹-۱ تشکیل هیدروژن بروی سطح فلز در حال خوردگی

در شکل ۹-۱ تشکیل هیدروژن بر روی سطح فلزی که به سرعت خورده می‌شود، نشان داده شده است. برای سادگی واکنش‌های اکسیداسیون فلز نشان داده نشده است. اگر این واکنش با سرعت نسبتاً خوبی پیشرفت کند و غلظت یون‌های هیدروژن در محلول نسبتاً پائین باشد، می‌توان دید که ناحیه خیلی نزدیک به سطح فلز از یون‌های هیدروژن خالی خواهد شد و این موضوع به دلیل آن است که این یون‌ها به وسیله واکنش کاتدیک مصرف می‌شوند. تحت این شرایط واکنش توسط میزان نفوذ یون‌های هیدروژن به سطح فلز کنترل می‌شود. پلاریزاسیون میزان فعالیت، معمولاً فاکتور کنترل‌کننده خوردگی در اسیدهای قوی است و پلاریزاسیون ناشی از غلظت معمولاً وقتی غلظت عوامل فعال کم باشد، تسلط می‌یابد برای نمونه در اسیدهای ضعیف و در آب‌های هوادهی شده و محلول‌های آبی اثرات این نوع پلاریزاسیون را می‌توان دید. شناخت انواع پلاریزاسیونی که رخ می‌دهد بسیار مفید می‌باشد بطوری که می‌تواند به پیش‌بینی مشخصات سیستم‌های خورنده کمک زیادی نماید. به عنوان مثال، اگر خوردگی به وسیله پلاریزاسیون ناشی از غلظت کنترل گردد، در این حالت هر تغییری که موجب افزایش سرعت نفوذ عوامل فعال (مانند  $H^+$ ) شود، می‌تواند باعث سرعت خوردگی گردد. در چنین سیستمی، این انتظار هم وجود دارد که آشفته نمودن محلول یا به هم زدن و تکان دادن آن، تمایل به افزایش خوردگی فلز را بیشتر می‌نماید. در حالی که اگر فعالیت واکنش کاتدی کنترل می‌شود، به

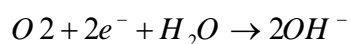
هم زدن یا تکان دادن هیچ اثری بر روی سرعت خوردگی نخواهد داشت. شناخت نوع پلاریزاسیون که واکنش خوردگی را کنترل می‌کند، به ما اجازه می‌دهد که پیش‌بینی‌های خیلی مفید در رابطه با اثرات نسبی بر روی سرعت خوردگی داشته باشیم. بطور کلی می‌توان گفت: نوع پلاریزاسیونی که در آند و کاتد رخ می‌دهد میزان خوردگی ایجاد شده را در بیشتر پیل‌های الکتروشیمیائی تعیین می‌کند. همان‌طور که قبلاً گفته شد، تأثیر مقدار جریان خوردگی بر روی پدیده پلاریزاسیون نه تنها به مقدار کلی مقدار جریان بلکه همچنین به دانسیته جریان یا مقدار جریان در واحد سطح هم بستگی دارد. در واقع به راحتی می‌توان فهمید که اگر مقدار معینی جریان به صورت متمرکز بر روی یک ناحیه کوچک از سطح فلز بسیار بیشتر از زمانی است که همان مقدار جریان بر روی سطح خیلی بزرگ‌تر پراکنده شده باشد. اگر اندازه سطح و مقدار دانسیته جریان در مورد دو فلز فولاد و مس وقتی که به صورت ورقه یا میخ پرچ در یک محلول خورنده قرار می‌گیرند مورد بررسی قرار گرفته است. در حالتی که میخ پرچ استیلی برای اتصال ورقه مسی استفاده می‌شود، دانسیته جریان بر روی ورقه‌های مسی دارای سطح کاتدیک نسبتاً بزرگ کم خواهد شد، پلاریزاسیون کاتدیک بر روی مس مقدار ناچیزی می‌شود و ولتاژ دو فلز نا همجنس (جفت گالوانیکی) دارای مقداری نزدیک به پتانسیل مقدار باز آن‌ها خواهد شد. در همین زمان، دانسیته جریان بر روی پرچ استیلی دارای سطح آندیک کوچک خیلی زیاد می‌شود و نتیجتاً موجب خوردگی خیلی شدید در این قسمت می‌شود. برعکس هنگامی که از پرچ مسی در اتصال دادن ورقه‌های استیلی استفاده می‌شود، دانسیته جریان بر روی پرچ‌های مسی کاتد شده زیاد می‌شود در نتیجه به دلیل پلاریزاسیون قابل ملاحظه پرچ‌های مسی پتانسیل مدار باز جفت گالوانیکی کمتر از مقدار اولیه خواهد شد. در این حالت جریان آند یک کاهش یافته بر روی ورقه‌های استیلی بزرگ پخش می‌شود و از اثر نامطلوب ناشی از اتصال دو فلز غیر هم جنس به شدت کاسته می‌شود. اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز برای پیش‌بینی اندازه و مقدار اثرات ناشی از دو جفت گالوانیکی نامناسب می‌باشد. به دلیل آنکه با این اندازه‌گیری نمی‌توان اندازه سطح و میزان اثرات پلاریزاسیون را محاسبه نمود. بلکه این اندازه‌گیری تنها برای پیش‌بینی جهت چنین اثراتی قابل اطمینان و استفاده می‌باشد.

## اهمیت اکسیژن

اکسیژن شناخت شده‌ترین کاهش دهنده پلاریزاسیون (دی پلاریزر) واکنش‌های کاتدیک می‌باشد. نقش اکسیژن را در افزایش خوردگی به آسانی با قرار دادن دو قطعه آهن در ۲ ظرف پر شده با آب می‌توان نشان داد. در داخل ظرف اول لوله‌هائی برای ورود اکسیژن قرار داده شده و در ظرف دوم برای حذف اکسیژن محلول آب با گاز نیتروژن اشباع می‌شود. پس از آنکه بعد از چند ساعت در دو ظرف گازهای اکسیژن و نیتروژن وارد گردید خواهیم دید که آهن قرار گرفته در آب بدون اکسیژن براق و روشن باقی می‌ماند. اما آهن قرار داده شده در آب اشباع از اکسیژن شروع به زنگ زدن می‌کند. اکسیژن موجود در هر محلول یکی از مهمترین فاکتورهای مؤثر در خوردگی آهن و مقدار زیادی از دیگر فلزات قرار می‌گیرد. حذف اکسیژن به وسیله عملیات هوازدائی یک وسیله مؤثر جلوگیری می‌باشد. به عنوان مثال در مورد دیگ‌های بخار عملیات هوازدائی و آب ورودی به صورت کامل انجام می‌شود.

## پیل‌های غلظت اکسیژن

نقش اکسیژن در واکنش‌های خوردگی، این حقیقت را نشان داده است که اکسیژن نه تنها می‌تواند به انجام شدن و تداوم یک واکنش کاتدی کمک نماید بلکه می‌توان موجب گسترش و پیشرفت این واکنش نیز گردد.



این واکنش در جایی که اختلاف در غلظت اکسیژن محلول بر روی قسمتی از سطح فلز نسبت به سایر قسمت‌ها وجود دارد رخ می‌دهد. از آنجا که این واکنش نیز تمایل دارد که به سمت تعادل پیش برود. تنها راه رسیدن به تعادل به وسیله خوردگی و با کاهش غلظت اکسیژن در جایی که بیشترین غلظت را دارد امکان‌پذیر می‌باشد. چنین واکنشی می‌تواند با مصرف اکسیژن انجام شود، در نتیجه جایی که اختلاف غلظت اکسیژن محلول در دو نقطه روی سطح فلز وجود دارد قسمت‌هائی در تماس با غلظت اکسیژن بیشتر نسبت به قسمت‌های در تماس با غلظت اکسیژن کمتر کاتدیک می‌شوند. در این حالت قسمت‌های در معرض غلظت اکسیژن کمتر به

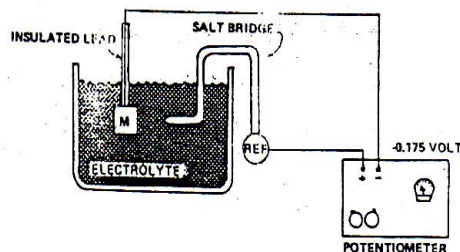
صورت آندهایی در یک پیل ناشی از اختلاف غلظت اکسیژن به خوردگی شدیدی دچار می‌شوند. یک پیل ناشی از اختلاف غلظت اکسیژن می‌توان به سادگی در یک شرایط آزمایشگاهی در دو ظرف مرتبط همانند دستگاهی که برای اثبات پیل ناشی از اختلاف یون فلز به کار می‌رود نشان داد. در این آزمایش قطعات آهن در محلول کلرید سدیم در هر دو ظرف قرار داده می‌شوند. محلول در یک ظرف با اکسیژن و در ظرف دیگر به وسیله نیتروژن اشباع می‌شود. این حالت موجب به وجود آمدن اختلاف زیادی در غلظت اکسیژن محلول در تماس با دو قطعه آن می‌گردد. غلظت زیاد اکسیژن در محلول ظرف اول سطح آهن را شدیداً نسبت به ظرف دوم کاتدیک می‌سازد. پتانسیل اندازه‌گیری شده میزان اختلاف در غلظت اکسیژن و اندازه جریان را با توجه به مساحت سطوح فلز مورد نظر و مقاومت مدار تعیین می‌کند. اختلاف و غلظت اکسیژن می‌توند به وسیله گرادیان سرعت و همچنین وجود شکاف‌ها و درزها ایجاد گردد. محل آندها و کاتدها در این پیل درست برخلاف پیل غلظت یون‌های فلزی می‌باشد، در این حالت این سطوح کاتدیک شده و سطوح با قابلیت دسترسی کمتر به اکسیژن که در سرعت کمتری در حال حرکت هستند نقش آدیک خواهند داشت. به عنوان مثال معمولاً در سطوح نزدیک مرکز دیسک نوار خوردگی شدیدی دیده می‌شود.

شدت خوردگی به وسیله یک پیل ناشی از اختلاف غلظت اکسیژن در داخل درزهای یا زیر رسوبات بیشتر از خارج آن می‌باشد. مشابه حالت قبلی در این مورد نیز حل آندها و کاتدها برخلاف پیل حاصل از اختلاف و غلظت یون‌های فلزی می‌باشد. این اختلاف بین دو نوع پیل غلظتی پیش‌بینی شدت و محل خوردگی ناشی از فعالیت آن‌ها را پیچیده می‌نماید. به صورت یک قانون کلی، آن فلزاتی که در بالای سری الکتروموتیو قرار گرفته‌اند به عنوان مثال آهن با احتمال زیادتری برای حملات شدید ناشی از پیل‌های اختلاف غلظت اکسیژن مساعد می‌باشند. در حالی که آن دسته از فلزاتی که در سمت پائین سری فوق قرار می‌گیرند به عنوان مثال مس، در مقابل فعالیت پیل اختلاف یون فلز آسیب‌پذیرتر می‌باشند. فلزات و آلیاژهای قرار گرفته در محدوده وسط به عنوان مثال، آلیاژ مس - نیکل از اثرات مخالف دو نوع پیل بهره می‌برند. آلیاژهای ساخته شده از ترکیب فلزات نزدیک به قسمت بالای سری الکتروموتیو به عنوان مثال آهن و کرومینیوم

(فولاد ضد رنگ) که پتانسیلی خنثی‌تر از فلزات تشکیل‌دهنده دارند به دلیل اثر فیلم خنثی ناشی از واکنش با اکسیژن به طور ویژه‌ای در مقابل قابلیت دسترسی به اکسیژن حساس هستند و بنابراین در مقابل فعالیت پیل اختلاف غلظت اکسیژن آسیب‌پذیر می‌باشند.

### پتانسیل خوردگی

پتانسیل فلزی که در حال خورده شدن می‌باشد در مطالعه خوردگی آن خیلی مفید می‌باشد و خوشبختانه می‌توان آن را در آزمایشگاه یا تحت شرایط عملیاتی اندازه‌گیری نمود. پتانسیل خوردگی با تعیین اختلاف ولتاژ فلز قرار گرفته در محیط خورنده و الکتروود مرجع مناسب اندازه‌گیری می‌شود. الکتروود کالومل اشباع، الکتروود مس - سولفات مس و الکتروود پلاتین - نیدروژن مثال‌هایی از این نوع الکتروودهای مرجع هستند. شکل زیر یک روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی یک نمونه فلز (M) قرار داده شده در یک الکتروولیت را نشان می‌دهد. این روش با اندازه‌گیری اختلاف ولتاژ بین الکتروود مرجع و فلز با استفاده از یک پتانسیومتر انجام می‌شود. در این روش از پتانسیومتر به دلیل آنکه قابلیت اندازه‌گیری ولتاژهای کم را بطور دقیق و بدون عبور جریان‌های ناچیز دارا می‌باشد، استفاده شده است. در این روش از یک پل نمکی بین الکتروود مرجع و محلول خورنده نیز استفاده می‌شود که به منظور جلوگیری از آلودگی الکتروود مرجع به وسیله مایع خورنده می‌باشد.



شکل ۱-۱ شماتیک روش آزمایشگاهی محاسبه پتانسیل خوردگی

در اندازه‌گیری و گزارش پتانسیل خوردگی نشان دادن اندازه ولتاژ و جهت آن ضروری می‌باشد. در مثال شکل بالا، پتانسیل خوردگی فلز M، ۰/۱۷۵ می‌باشد. جهت منفی نشان می‌دهد که فلز

نسبت به الکتروود مرجع منفی می‌باشد. علامت منفی همچنین مشخص می‌نماید که فلز به ترمینال منفی پتانسیومتر اتصال یافته است. مورد احتمال جابجائی این اتصالات نیز جای نگرانی وجود ندارد به دلیل آنکه پتانسیومتر تا زمانی که اتصال فلز و رفرنس الکتروود به درستی انجام نشده باشد، متعادل نمی‌شود. بنابراین در انجام اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی اول لازم است اتصال فلز به هر دو ترمینال مثبت و منفی پتانسیومتر آزمایش شود تا معلوم شود که این اتصالات در پتانسیومتر حالت بالانس و متعادل را ایجاد نموده است. علاوه بر گزارش ولتاژ و مثبت یا منفی بون علامت آن، لازم است نوع رفرنس الکتروودی که در این اندازه‌گیری به کار رفته است مشخص شود. برای مثال اگر یک الکتروود کامل اشباع استفاده می‌شود، نتایج آزمایش مربوط به شکل بالا باید به این صورت باشد. ۰/۱۷۵- ولت از طریق الکتروود اشباع کالوسل. اندازه و علامت پتانسیل خوردگی تابعی از جنس فلز، ترکیبات الکتروولیت، دما و میزان آشفستگی و تلاطم الکتروولیت می‌باشد.

پتانسیل‌های اکسیداسیون و احیاء: پتانسیل اکسیداسیون - احیاء به پتانسیل نسبی یک واکنش الکتروشیمی تحت شرایط تعادل یا (جریان صفر) اتلاق می‌گردد. این پتانسیل‌ها با روش‌های الکتروشیمیایی ویژه‌ای تحت شرایط کنترل کاملاً دقیق، اندازه‌گیری می‌شوند. در جدول زیر مقادیری برای واکنش‌های گوناگون ارائه شده است. به دلیل آنکه این پتانسیل‌ها به حالت تعادل مربوط می‌شود سرعت واکنش‌ها به صورت مساوی در هر دو جهت نشان داده شده است. همچنین این پتانسیل‌ها با واژه‌های دیگری مانند پتانسیل رداکس (REDOX). پتانسیل نیم پیل و نیروی الکترویکی موتیو یا سری‌های EMF نیز نامگذاری شده‌اند.

جدول ۱-۱ سری الکتروشیمیایی فلزات بر مبنای پتانسیل اکسیداسیون در دمای ۲۵ درجه سلیوس

فلز	علامت اختصاری	اختلاف پتانسیل	شاخص فعالیت
<u>پتاسیم</u>	<u>K/K+</u>	<u>2/92</u>	<u>Active 1</u>
کلسیم	Ca/Ca <sup>+2</sup>	+2/87	2
سدیم	Na/Na <sup>+</sup>	+2/71	3
منیزیم	Mg/Mg <sup>+2</sup>	+2/37	4
آلومینیم	Al/Al <sup>+3</sup>	+1/66	5
منگنز	Mn/Mn <sup>+2</sup>	+۱۸/۱	6
روی	Zn/Zn <sup>+2</sup>	+0/76	7
کروم	Cr/Cr <sup>+3</sup>	+0/744	8
آهن	Fe/Fe <sup>+2</sup>	+0/44	9
کادمیم	Cd/Cd <sup>+2</sup>	+0/4	10
کبالت	Co/Co <sup>+2</sup>	+0/277	11
نیکل	Ni/Ni <sup>+2</sup>	+0/25	12
قلع	Sn/Sn <sup>+2</sup>	+0/14	13
سرب	Pb/Pb <sup>+2</sup>	+0/13	14
<u>هیدروژن</u>	<u>H<sub>2</sub>/H+</u>	<u>صفر</u>	<u>Reference</u>
آنتیموان	Sb/Sb <sup>+3</sup>	-0/18	15
بیسموت	Bi/Bi <sup>+3</sup>	-0/28	16
مس	Cu/Cu <sup>+2</sup>	-0/34	17
نقره	Ag/Ag <sup>+</sup>	-0/80	18
پلاتین	Pt/Pt <sup>+</sup>	-1/2	19
<u>طلا</u>	<u>Au/Au+</u>	<u>-1/498</u>	<u>Noble 20</u>



با توجه به سری الکتروشیمیایی فلزات در مورد رفتار شیمیایی هر فلزادر واکنش های شیمیایی سه نتیجه کلی حادث می شود :

✚ در سری الکتروشیمیایی، هر فلزی فلزات بعداز را از محلول نمک های آن ها خارج می کند و خود جانشین آن می شود. به عبارت دیگر هر فلز یون مربوط به فلز بعد از خود را از نظر بار الکتریکی خنثی می کند و خود با از دست دادن الکترون به صورت یون در می آید.

✚ فلزاتی که در سری الکتروشیمیایی قبل از هیدروژن قرار دارند می توانند در محلول اسیدی به جای هیدروژن قرارگیرند و آن را آزاد کنند ولی فلزات بعداز هیدروژن نمی توانند

✚ فلزاتی که بالاتر از هیدروژن قرار گرفته اند پتانسیل و فعالیت بیشتری دارند و قدرت احیاء کنندگی آن ها نسبت به یون های فلزات دیگر زیادتر است. هر قدر فلزات آسان تر به یون تبدیل شوند به همان نسبت دشوارتر احیاء می شوند.

### کاربرد پتانسیل های اکسیداسیون احیاء در سنجش خوردگی

پتانسیل های اکسیداسیون احیاء به دلیل آنکه برای پیش بینی خوردگی یک فلز در محیط معینی می توانند استفاده شوند، خیلی مفید هستند. این موضوع به سادگی با قانون کلی زیر انجام می گیرد. در هر واکنش الکتروشیمیایی، نیم پیل منفی تر تمایل به اکسید شدن و نیم پیل مثبت تر تمایل به احیاء شدن دارد. برای مثال فرض کنید که اصلاً نمی دانیم تمایل روی برای واکنش با یک اسید چگونه است. با مراجعه به جدول 1-2، ملاحظه می گردد که پتانسیل نیم پیل روی به یون از نیم پیل، پیل یون ئیدروژن گاز ئیدروژن منفی تر است. بنابراین، با توجه به روش اجرا قانون گفته شده مشخص می شود که روی در محلول اسیدی میل به خوردگی دارد. در حقیقت می توان ملاحظه نمود که تمام فلزاتی که پتانسیل رداکس آن ها منفی تری از به نیم پیل گاز ئیدروژن - یون ئیدروژن می باشد، در محیط های اسیدی میل به خوردگی دارند. این رفتار در مورد فلزاتی مانند سرب، قلع، نیکل، آهن، کربن و مینیوم و آلومینیوم و سایر فلزات با پتانسیل منفی نیز صادق می باشد. پتانسیل اکسیداسیون - احیاء ارائه شده در این جدول تحت یک شرایط استاندارد به دست آمده و در صورت لزوم می بایست برای استفاده در سایر شرایط (دما، غلظت و غیره) تصحیح گردد. هر چند مقدار این تصحیح معمولاً کم و در

محاسبات خوردگی می‌تواند قابل اغماض باشد. در بررسی مشابه‌ای، می‌توان ملاحظه کرد که فلزاتی مانند مس، جیوه، نقره، پلادیوم و سایر فلزات با پتانسیلی مثبت‌تر از الکتروود گاز ئیدورژن - یو ئیدورژن در محلول اسیدی خورده نخواهند شد. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که فلز مس، به عنوان ظرف مناسبی در محیط‌های اسیدی قابل استفاده می‌باشد که این موضوع دقیقاً به وسیله آزمایشات خوردگی به اثبات رسیده است. از طرف دیگر به دلیل آنکه پتانسیل رداکس منفی‌تر از (دارای اندازه مثبت کمتر) از واکنش احیاء دو اکسیژن می‌باشد بنابراین مس در محیط‌های اسیدی یا هر محیط دیگری محتوی اکسیژن میل به خوردگی نشان می‌دهد. دو فلز پلاتین و طلا، به دلیل داشتن پتانسیل مثبت نسبتاً زیاد، حتی در محیط‌های اسیدی اکسیژن‌دار، انتظار خوردگی آن‌ها نمی‌رود. مثال‌های گفته شده در بالا موارد استفاده پتانسیل اکسیداسیون - احیاء را در پیش‌بینی خوردگی نشان می‌دهد. از چنین پتانسیل‌هایی بطور گسترده در امکان انتخاب آلیاژهای مقاوم برای محیط‌های گوناگون استفاده می‌شود.

### روئین شدن و تشکیل فیلم‌های محافظ

همان‌طور که مختصراً در مباحث قبلی اشاره گردید. محصولات خوردگی و سایر فیلم‌های سطحی می‌توانند اثرات عمیق روی رفتار خوردگی فلزات داشته باشند. فیلم‌های اکسیدی بصورت طبیعی و به محض قرار گرفتن بیشتر فلزات در معرض هوا تشکیل می‌شود می‌تواند یک حفاظت قابل ملاحظه‌ای در مقابل بیشتر حملات خوردگی در محیط‌های مختلف ایجاد نمایند. اگر تشکیل چنین فیلمی برای خیلی از فلزات قرار گرفته در قسمت بالای سری‌های الکتروموتیو به عنوان مثال منیزیم و آلومینیوم وجود نداشته باشد. به سرعت در آب معمولی یا هوا خورده خواهند شد. به همین صورت سایر فیلم‌های محصولات خوردگی یا رسوبات مانند فیلم غیرمحلول سولفات عامل مقاومت خوردگی سرب در اسید سولفوریک می‌باشد. فیلم‌هایی که به روی آلیاژهای مس در آب دریا تشکیل می‌شود کمک زیادی به دوام این آلیاژها در آب دریا می‌نماید. قابلیت چسبندگی مقاومت در مقابل اثرات جریان‌های متلاطم و قابلیت ترمیم شدن صریح در صورت شکسته شدن این فیلم‌ها، شایستگی آلیاژهای مس را در مقابله با اثرات سرعت، به خوبی نشان می‌دهد.

اثر اکسیژن و سایر عوامل اکسیدکننده به روی خوردگی بسیار متفاوت و پیچیده می‌باشد. اکسیژن می‌تواند خوردگی را به دلیل شرکت در واکنش‌های کاتدیک شدت ببخشد گاهی اوقات اکسیژن و سایر عامل‌های اکسیدکننده می‌توانند با تشکیل فیلم‌های محافظ باعث کند شدن خوردگی شوند، فلزاتی مانند آهن، فیلم‌هایی خیلی نازک و غیرقابل مشاهده از اکسیژن یا سایر اکسیدکننده‌ها ایجاد می‌نمایند. بطوری که گفته می‌شود آن‌ها به وسیله تشکیل چنین فیلم‌هایی، روئین (PASSIVE) می‌شوند حالت روئین در آهن یا فولاد ضد زنگ و سایر فلزات در صورتی که اندازه پتانسیل آن‌ها نسبت به فلز بدون فیلم مشابه فلزات بی‌اثر (ماندن پلاتین یا طلا) شود، ایجاد می‌گردد. که در این صورت نیز مقاومت خوردگی خیلی بیشتری را در مقایسه با فلز بدون فیلم یا غیر روئین (فعال) خواهیم داشت. کاهش فعالیت شیمیائی فلزات و آلیاژها در شرایط محیطی ویژه، در این حالت فعالیت شیمیائی این قبیل فلزات شامل کروم، آهن، نیکل، تیتانیوم و یا آلیاژهایی از آن‌ها بطور طبیعی کند می‌شود و مشابه فلزات بی‌اثر عمل می‌کنند. همان‌طور که پتانسیل‌های اکسیداسیون - احیا این فلزات نشان می‌دهد آن‌ها در محلول اسیدی خورده می‌شوند ولی این حالت برای اتمام موارد صادق نمی‌باشد. با وجود اینکه پدیده ایجاد حالت روئین در فلزات پیش از صد سال است که مورد بررسی و مطالعه می‌باشد، هنوز بطور کامل ماهیت دقیق یا دلیل این اثرات شناخته نشده است، ولی بطور کلی عقیده به این است که این اثرات به دلیل تشکیل یک فیلم سطحی است که به صورت یک مانع در مقابل پیشرفت خوردگی مقاومت می‌کند. چگونگی ماهیت و ترکیبات این فیلم سطحی هنوز ناشناخته می‌باشد. بعضی دانشمندان اعتقاد دارند که این فیلم یک لایه اکسید خیلی نازک است که تمایل دارد مانعی بین فلز و الکترولیت ایجاد نمایند (مانند فیلمی که در مورد فلز آلومینیوم توضیح داده شد) در حالی که بعضی محققین به این اعتقاد هستند که این فیلم یک لایه دارای خاصیت جذب سطحی است و بطور ساده از یک فیلم تک مولکولی از موادی مانند اکسیژن یا بعضی از یون‌های موجود در محلول تشکیل یافته است. اینکه چرا تا کنون نظریه قطعی در مورد ماهیت این لایه فیلم داده نشده است به دلیل آن است که این لایه بی‌نهایت نازک و شکننده می‌باشد. ضخامت این فیلم معمولاً ۳۰ آنگسترم ( $10^{-8}$  سانتی‌متر) یا کمتر می‌باشد و محتوی مقدار قابل ملاحظه‌ای آب می‌باشد بنابراین هنگام برداشت و جداسازی این لایه از سطح فلز به منظور مطالعه، غالباً آب

موجود در خود را از دست می‌دهد و صدمات فیزیکی و مکانیکی در آن به وجود می‌آورد.

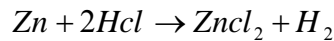
**واکنش های شیمیایی در خوردگی:** یون‌ها در یک محیط (معمولاً آب) هدایت الکتریکی را به وجود می‌آورند. وقتی در مورد محیط‌های آبی بحث می‌شود، معمولاً در بیشتر مواقع این سؤال مطرح می‌گردد که اسید در محلول چیست (یا آلکالین) در یک پاسخ ساده باید دید که در محلول آیا یون اضافی  $H^+$  (نیدروژن) وجود دارد یا یون اضافی  $OH^-$  (نیدرواکسید)، یون‌های اضافی  $H^+$  اسید و یون‌های اضافی  $OH^-$  منفی الکالین می‌باشد. اجزاء دیگر یک اسید یا آلکالین اضافه شده به آب هدایت الکتریکی یا سایر خواص مایع را افزایش می‌دهد. اما مقدار اسیدیته را افزایش یا کاهش نمی‌دهد. به عنوان مثال، تعداد معین یون  $H^+$  در آب توسط اضافه نمودن  $HCl$  و  $H_2SO_4$ ,  $H_2S$  یا به طور خیلی جزئی توسط اسیداسیتیک تولید می‌شود. در این حالت PH محلول در صورتی که مقدار اتم نیدروژن محلول به یک اندازه باشد. یکسان خواهد شد. دیگر خواص محلول ممکن است تغییر کند. اما PH پارامتری است که به اندازه غلظت  $H^+$  بستگی دارد. PH ممکن است به کمک دستگاه اندازه‌گیری تعیین شود و یا در صورت مهیا بودن پارامترهای معینی قابل محاسبه می‌باشد. آب نیز تجزیه شده و مقادیر جزئی و مساوی  $H^+$  و  $OH^-$  تولید نمی‌نماید. از آنجائی که مقادیر مساوی از  $H^+$  و  $OH^-$  در آب وجود دارد این محلول یک محلول خنثی نامیده می‌شود. در این حالت گفته می‌شود، محلول پ - هاش ۷ دارد. با تغییر مقدار یون‌های  $H^+$  و اگر عدد پ - هاش پیدا کند ( $PH < 7$ ) نشان‌دهنده‌ی آن است که مقادیر بیشتری  $H^+$  نسبت به  $OH^-$  وجود دارد و این محلول اسیدی است. اگر عدد پ - هاش افزایش یابد ( $PH > 7$ ) در این حالت مقدار یون‌های  $OH^-$  در محلول بیش از  $H^+$  بوده و محلول قلیائی می‌باشد. اختلاف بیشتر از عدد ۷، حالت اسیدی یا بازی بیشتری را به وجود خواهد آورد به عنوان مثال پ - هاش ۲ محلول بسیار اسیدی و پ - هاش ۱۲ محلول بسیار قلیائی را نشان می‌دهد.

**خوردگی در محیط های شیمیائی:** بطور کلی این خوردگی را می‌توان در دو محیط اسیدی و قلیایی و خنثی به شرح ذیل مشاهده نمود:

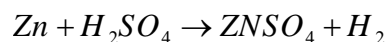
### خوردگی در اسیدها

یکی از راه‌های معمول تولید هیدروژن در آزمایشگاه قرار دادن روی در داخل یک محلول اسیدی رقیق مانند اسید کلریدریک یا اسید سولفوریک می‌باشد. وقتی این کار انجام شود، یک واکنش

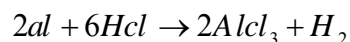
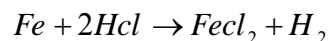
سریع انجام می‌گیرد که در آن روی مورد حمله قرار گرفته و هیدروژن به صورت گاز آزاد می‌شود.



در این واکنش یک اتم روی به دو مولکلو اسیدکلریدریک اثر نموده و یک مولکول کلرید روی (نمک) و مولکول گاز هیدروژن تشکیل می‌شود. به همین صورت روی یا اسید سولفوریک به صورت زیر اثر نموده و سولفات روی (نمک) و هیدروژن تولید می‌نماید.



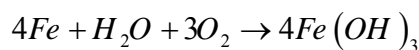
لازم است توجه شود که هر اتمی در موارد شرکت‌کننده در سمت چپ این واکنش وجود داشته باشد، باید در سمت راست نیز ظاهر گردد. همچنین قانونی وجود دارد که مشخص می‌کند اتم‌ها به چه نسبت در هر سمت می‌بایست با هم ترکیب شوند. فلزات دیگری نیز به وسیله اسید خورده یا حل می‌شوند و نتیجه آن یک نمک محلول و گاز هیدروژن می‌باشد.



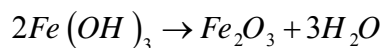
واکنش‌های فوق نشان می‌دهد که دو فلز آهن و آلومینیوم هر دو به وسیله اسید کلریدریک خورده می‌شوند. در این واکنش‌ها فلز روی و آهن با ۲ یون کلر در حالی که آلومینیوم با ۳ یون کلر ترکیب می‌شوند که نشان می‌دهد دو فلز آهن و روی هنگام خورده شدن ۲ الکترون از دست می‌دهند و ۲ بار مثبت در شکل یونی نمایش می‌دهند و گفته می‌شود دارای ۲ ظرفیت می‌باشند. در حالی که آلومینیوم هنگامی که سطح آندی را ترک می‌کند، ۳ الکترون از دست می‌دهد از اینرو ۳ بار مثبت را نشان می‌دهد و گفته می‌شود دارای ظرفیت ۳ می‌باشد. بعضی فلزات دارای چندین ظرفیت می‌باشند و بعضی از آن‌ها فقط یک ظرفیت دارند.

### خوردگی در محلول‌های خنثی و قلیائی

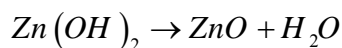
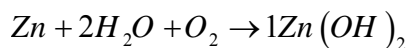
خوردگی فلزات همچنین می‌تواند در آب تازه، آب دریا، محلول‌های نمکی و قلیائی اتفاق بیافتد. در اغلب این سیستم‌ها خوردگی فقط هنگامی که اکسیژن حضور داشته باشد، رخ می‌دهد. محلول‌های آبی به سرعت اکسیژن هوا را که منبع تأمین اکسیژن در واکنش خوردگی است در خود حل می‌نماید. زنگ آهن شناخته شده‌ترین خوردگی از این نوع است، هنگامی که آهن در معرض هوای مرطوب با آب قرار می‌گیرد.



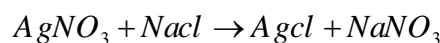
در این واکنش دیده می‌شود که آهن با آب و اکسیژن ترکیب می‌گردد و یک محصول خوردگی غیرمحلول قرمز متمایل به قهوه‌ای تولید می‌نماید. هنگام زنگ زدن آهن در اتمسفر، فرصت‌هایی هم برای خشک شدن به وجود می‌آید و هیدروآکسید فریک آب خود را از دست می‌دهد و اکسید قرمز متمایل به قهوه‌ای رنگ آهن که شناخته شده است، تولید می‌کند.



شبهه همین واکنش هنگامی که روی در معرض آب قرار می‌گیرد، نیز رخ می‌دهد.

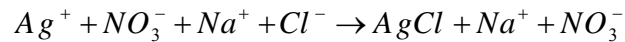


اکسید روی حاصل یک رسوب سفید رنگ است که بر روی سطوح‌های گالوانیزه، کانال‌های عبور آب باران، شیرهای با روکش ناقص کروم دیده می‌شود. به منظور مقایسه در زیر واکنشی را که الکتروشیمیائی نیست مورد بررسی قرار می‌دهیم. اگر یک محلول نیترات نقره به یک محلول کلرید سدیم اضافه شود، رسوب سفید رنگ کلرور نقره تشکیل می‌شود.

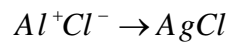


قبلاً گفته شد بعضی مواد در واکنش بالا می‌توانند به صورت یون‌های مجزا در محلول وجود

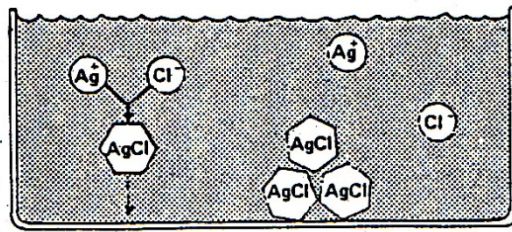
داشته باشند:



بررسی آزمایشگاهی این واکنش نشان می‌دهد که هر یون نیتрат و سدیم در هر دو طرف واکنش وجود دارند. بنابراین آن‌ها مستقیماً درگیر نمی‌شوند و می‌توان آن‌ها را نادیده گرفت. بنابراین واکنش بالا را می‌توان به صورت ساده شده به صورت زیر نشان داد:



همان‌طور که دیده می‌شود در واکنش فوق هیچ واکنش احیاء و اکسیداسیون (انتقال الکترون) وجود ندارد.



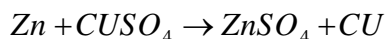
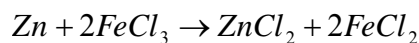
شکل ۱-۱ خوردگی در محیط‌های خنثی

ظرفیت هر دو نقره و کلرین در تمام مدت این واکنش بدون تغییر باقی می‌ماند و در نتیجه امکان تقسیم این واکنش به دو واکنش منفرد اکسیداسیون و احیاء وجود ندارد. واکنش‌های خوردگی معمولاً فرآیندهای الکتروشیمیایی هستند که انتقال الکترون در آن‌ها صورت می‌گیرد. بطور خلاصه واکنش‌های خوردگی اساساً الکتروشیمیایی هستند و دلیل این موضوع آن است که امکان تقسیم این واکنش‌ها به دو واکنش آن‌دیک و کاتدیک (اکسیداسیون و احیاء) وجود دارد و این امتیازی است که در بیشتر فرآیندهای خوردگی وجود دارد.

### خوردگی در سایر سیستم‌ها

فلزات ممکن است در محلول‌های خیلی خورنده بدون اکسیژن یا اسید نیز مورد حمله

واقع شوند. نمک‌های اکسیدکننده‌ای مانند ترکیبات فریک یا مس از بارزترین انواع این محلول‌ها هستند. در زیر واکنش‌های خوردگی از این نوع نشان داده شده است.



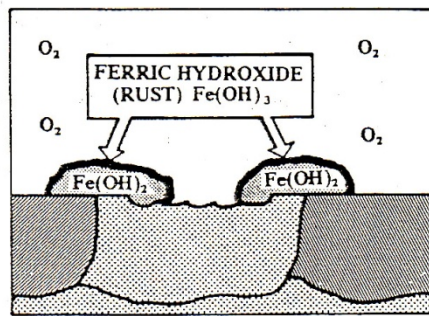
همان‌طور که دیده می‌شود در مورد اول کلراید فریک و در حالی که موجب خوردگی روی می‌شود به کلراید فروس تغییر می‌کند و در مورد دوم روی با سولفات مس ترکیب شده و سولفات روی به همراه جرم اسفنجی از رسوب فلزی مس بر روی سطح روی تشکیل می‌دهد. این واکنش اغلب به نام واکنش جایگزینی فلز نامیده می‌شود.

### محصولات خوردگی

واژه محصولات خوردگی به موادی که در طی واکنش خوردگی ایجاد می‌شوند اطلاق می‌گردد. این مواد می‌توانند مانند کلراید روی یا سولفات روی که در مثال قبلی ذکر شد، به صورت محلول یا مانند اکسید یا هیدروکسید آهن به صورت ترکیبات غیرمحلول باشند. وجود محصولات خوردگی یکی از راه‌های تشخیص خوردگی است. هرچند باید توجه نمود که محصولات خوردگی غیرمحلول همیشه قابل مشاهده نمی‌باشند. آلومینیوم به محض اینکه در معرض هوا قرار گیرد، اغلب یک فیلم اکسیدی غیرقابل مشاهده تشکیل می‌دهد که قادر است از ادامه خوردگی اتمسفری جلوگیری نماید. این فیلم به دلیل آنکه بسیار نازک می‌باشد غیرقابل مشاهده می‌باشد. این موضوع استفاده از آلومینیوم را به طور گسترده در پنجره‌ها و کرکره‌های بادشکن و تزئینات داخل اتومبیل توجیه می‌نماید. محصولات حاصل از فرآیندهای کاتدیک و آندیک غالباً در داخل محلول‌ها مهاجرت می‌نمایند و منجر به انجام واکنش‌هایی می‌شوند که خیلی از آن‌ها محصولات خوردگی قابل مشاهده تولید می‌نمایند. برای مثال در مورد واکنش آهن در آب، یون هیدرواکسید حاصل از واکنش کاتدیک که در داخل الکترولیت به طرف سطوح آندیک مهاجرت می‌کنند، با یون‌های آهن فروس که در جهت مخالف حرکت می‌کنند مواجه شده و ترکیب یونی هیدرواکسید فروس را به وجود می‌آورند که سرانجام با اکسیژن محلول واکنش نموده و



هیدرواکسید فریک را ایجاد می‌نمایند. در شکل زیر تشکیل زنگ آهن نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ تشکیل زنگ آهن

### سنجش خوردگی

تجربه نشان داده است هنگامی که خوردگی اتفاق می‌افتد موجب افزایش یا کاهش وزن می‌شود. از این موضوع بطور خیلی متداول در اندازه‌گیری میزان پیشرفت خوردگی استفاده می‌شود. البته اگر تغییر وزن معینی بر روی یک نمونه تحت شرایط مشخصی رخ بدهد، یک قطعه با دو سطح مختلف، دو تغییر وزن متفاوت خواهد داشت. بنابراین اندازه سطح باید در اندازه‌گیری مقدار خوردگی در نظر گرفته شود، همچنین طول مدت زمان نیز در تغییرات وزن نیز مؤثر می‌باشد به طوری که تغییر وزن برای مدت زمان طولانی‌تری که نمونه در معرض محیط خورنده قرار می‌گیرد، بیشتر خواهد بود. واحدهائی که در اندازه‌گیری مقدار خوردگی به کار می‌روند به صورت زیر می‌باشند:

### تغییر وزن

کاهش یا افزایش وزن بر واحد سطح و زمان، یک اندازه‌گیری رایج میلی‌گرم بر دسی مترمربع در روز می‌باشد که با Mdd نمایش می‌دهند (میلی‌گرم یک هزارم گرم و دسی متر ۱۰ سانتی‌متر یا معادل تقریباً ۴ اینچ می‌باشد). این واحد اندازه‌گیری معمولاً در آزمایشگاه جائی

که معمولاً آزمایشات تکراری از یک فلز بخصوص انجام می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### تغییر ابعاد

کاهش ضخامت فلز در واحد زمان، واحدهای که از این نوع متداول می‌باشند به صورت زیر می‌توان نام برد.

UM/Y (میکرون در سال) یک میکرون معادل یک میلیونوم متر می‌باشد.

MM/Y (میلی‌متر در سال)

MPY (میلی‌متر در سال) یک میل معادل یک هزارم اینچ می‌باشد.

واحدهای دیگری نیز برای اندازه‌گیری مقدار خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در مواقع لزوم می‌توان آن‌ها را به آسانی به سایر واحدها تبدیل نمود.

### تغییر خواص مکانیکی

درصد کاهش فلزات در مقاومت کششی، DUCTILITY, YIELD و سایر خواص مکانیکی این تغییرات بهترین نشانه‌های پیشرفت خوردگی است هنگامی که سایر حملات موضعی (مرزدانه‌ای، SCS) بر روی فلز رخ می‌دهد، تغییر در خواص مکانیکی (سختی، کشش، DUCTILITY) در ساختمان مواد قابل انعطاف، در بیشتر مواقع به منظور شناخت قطعی حملات خوردگی بر روی آن‌ها با اهمیت می‌باشد.

### روابط استاندارد سرعت خوردگی

در اکثر موارد، جدا از مسائل آلودگی، مهمترین مسئله، عمر (معمولاً به سال) تجهیزات مورد نظر می‌باشد. یک رابطه‌ی سرعت خوردگی خوب بایستی دارای این ویژگی‌ها باشد:

- دارای واحدهای متداول و مصطلح باشد.
- نحوه‌ی محاسبه‌ی آن آسان باشد و احتمال خطا در محاسبه کم باشد.

- به سهولت قابل تبدیل در واحد سال باشد.
  - عمق نفوذ خوردگی را به دست بدهد.
  - حتی الامکان نتیجه‌ی محاسبه اعداد صحیح بدون رقم‌های اعشاری باشد.
- پروفسور فوتانا از ۱۹۴۵ شروع به رواج دادن سرعت خوردگی به صورت هزارم اینچ نفوذ در سال (mpy) نموده، و امروزه این روش متداول شده است. برای محاسبه mpy از فرمول زیر می‌توان استفاده نمود.

$$\text{هزارم اینچ نفوذ در سال} = \frac{534W}{DAT}$$

برای تبدیل واحدهای دیگر به mpy می‌توان به صورت زیر عمل کرد:

۱۰۰۰	ضرب در	اینچ در سال
۱۲۰۰۰	ضرب در	اینچ در ماه

میلی‌گرم بر دسی‌مترمربع در روز (mdd) ضرب در ۱/۴۴ تقسیم بر وزن مخصوص ضخامت خورده شده برحسب هزارم اینچ در سال (mpy) در ایالات متحده متداول‌ترین رابطه برای بیان سرعت خوردگی است. علت محبوبیت mpy این است که سرعت خوردگی را برحسب عمق نفوذ با ارقام صحیح و کوچک نشان می‌دهد. برای تبدیل به سیستم متریک رابطه‌ی دیگری بایستی جایگزین گردد. بعضی سرعت‌های نفوذ متریک معادل عبارتند از:

$$1\text{mpy} = 0/0254 \frac{\text{mm}}{\text{yr}} = 25/4 \frac{\mu\text{m}}{\text{yr}} = 2/90 \frac{\text{nm}}{\text{hr}} = 0/805 \frac{\text{pm}}{\text{scc}} \quad (1-1)$$

در این رابطه nm (میلی‌متر برابر است با  $10^3$  متر،  $\mu\text{m}$ ) (میکرون)  $10^6$  متر، nm (نانومتر)  $10^9$  متر، و pm (پیکتومتر)  $10^{-12}$  متر می‌باشد. سرعت خوردگی مواد مورد استفاده

در خوردگی معمولاً بین ۱ تا ۲۰۰ قرار دارند. در جدول 1-2، mpy با روابط متریک فوق مقایسه شده است. میلی‌متر در سال به صورت اعشاری، و میکرون در سال به صورت اعداد صحیح بزرگ می‌باشند. سرعت‌های معادل برحسب نانومتر در ساعت اعداد صحیح کوچک‌تری هستند جالب توجه‌ترین رابطه پیکتومتر در ثانیه است که خیلی نزدیک به mpy می‌باشد.

قبل از انتخاب یک رابطه‌ی متریک برای بیان سرعت خوردگی، بایستی توجه نمود که در سیستم متریک برای اندازه‌گیری ابعاد چگونه عمل می‌شود. بطور کلی واحدها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند تا از اعداد اعشاری جلوگیری گردد. مثلاً یک لوله ۶ اینچی به ضخامت  $\frac{1}{4}$  اینچ را لوله‌ی ۱۰ سانتی‌متری به ضخامت ۶ میلی‌متر بیان می‌کنند. تغییر آحاد در سطح ۰/۱ انجام می‌شود مثلاً ۰/۱ میلی‌متر را با میکرون بیان می‌کنند (مثلاً ۱۰۰ میکرون = ۰/۱ میلی‌متر). اگرچه nm/hr و مخصوصاً  $\mu\text{m}/\text{sec}$  (جدول 5-1) اعداد صحیح کوچک و مناسبی هستند، ولی برای تبدیل آن‌ها به آحاد معمول در مهندسی بایستی در یک فاکتور دیگر ضرب شوند. به نظر می‌رسد برای سرعت‌های خوردگی پائین، میکرون در سال و برای سرعت‌های بالا، میلی‌متر در سال مفیدتر از بقیه باشند. بعد از مدتی کار کردن با سیستم متریک، احتمالاً هر دو رابطه‌ی فوق با یکدیگر بدون مشکل به کار برده خواهند شد (مثلاً فولاد با سرعت ۲ میلی‌متر در سال در مقایسه با ۷۵ میکرون در سال در مورد فولاد زنگ نزن ۳۱۶ خورده می‌شود). شاید در آینده برای نشان دادن میلی‌متر نفوذ در سال از mpy و برای نشان دادن میکرون در سال از  $\mu\text{mpy}$  استفاده شود.

جدول ۲-۱ مقایسه سرعت خوردگی برحسب هزام اینچ نفوذ در سال با سرعت‌های خوردگی در سیستم متریک

### معادل تقریبی متریک<sup>۱</sup>

مقاومت خوردگی نسبی <sup>۲</sup>	mpy	$\frac{mm}{yr}$	$\frac{\mu m}{yr}$	$\frac{nm}{br}$	$\frac{pm}{sec}$
برجسته	< ۱	< ۰/۰۲	< ۲۵	< ۲	< ۱
عالی	۱-۵	۰/۰۲-۰/۱	۲۵-۱۰۰	۲-۵	۱-۵
خوب	۵-۲۰	۰/۱-۰/۵	۱۰۰-۵۰۰	۱۰-۵۰	۵-۲۰
متوسط	۲۰-۵۰	۰/۵-۱	۵۰۰-۱۰۰۰	۵۰-۱۵۰	۲۰-۵۰
ضعیف	۵۰-۲۰۰	۱-۵	۱۰۰۰-۵۰۰۰	۱۵۰-۵۰۰	۵۰-۲۰۰
غیر قابل قبول	۲۰۰+	۵+	۵۰۰۰+	۵۰۰+	۲۰۰+

دو رابطه‌ی فوق را به سادگی می‌توان با داشتن تقلیل وزن به وسیله معادله‌ای شبیه آنچه که در

$$2-2 \quad \frac{\mu m}{yr} = 87600 \frac{W}{DAT} \text{ محاسبه کرد.}$$

$$\frac{mm}{yr} = 87/6 \frac{W}{DAT}$$

که در این رابطه  $W$  تقلیل وزن به میلی‌گرم،  $D$  چگالی به گرم بر سانتی‌متر مکعب،  $A$  سطح به سانتی‌مترمربع و  $T$  زمان تماس فلز با محیط برحسب ساعت می‌باشد.

<sup>۱</sup> . مقادیر تقریبی برای ساده‌تر شدن ارقام و اعداد.  
<sup>۲</sup> . بر اساس آلیاژهای آهنی و نیکلی در مورد آلیاژهای گران‌تر سرعت‌های بیشتر از ۵ تا ۲۰ mpy، معمولاً مجاز نیستند. سرعت‌های بالاتر از ۲۰۰ mpy نیز گاهی اوقات برای مواد ارزان با ضخامت زیاد مجاز می‌باشد (مثل بدنه پمپ چدنی)

## فصل دوم

# مبانی متالوژی فلزات

در این مبحث از تشریح مفاهیم اولیه به دلیل بیان آن‌ها در دروس پایه دبیرستان و دانشگاه خودداری می‌شود و بیشتر به تشریح آلیاژها، کریستال و عیوب آن‌ها پرداخته می‌شود.

### تبلور ابتدایی یا کریستالیزاسیون

به طور کلی اتم‌های مواد کریستالی در حالت بخار و مایع به شکل منظم و مرتبی در کنار یکدیگر قرار نمی‌گیرند، بلکه به طور پیوسته در حال حرکت نامنظمی هستند. چنانچه درجه‌ی حرارت مذاب به تدریج تا نقطه‌ی آغاز انجماد کاهش یابد، متبلور شدن مذاب شروع می‌شود. اما بطور کلی می‌توان این چنین بیان کرد که کریستال‌ها می‌توانند از حالت بخار، مایع و جامد به وجود آیند. ساختاری که در حین انجماد تشکیل می‌شود، بر روی خواص مکانیکی تأثیر بسزایی دارد. معمولاً تبلور اولیه در دو مرحله انجام می‌گیرد، ابتدا مرحله‌ی جوانه‌زنی و سپس مرحله‌ی رشد بلور.

### جوانه‌زنی

با کاهش تدریجی دمای مذاب، انجماد<sup>1</sup> آغاز می‌شود. ابتدا در نقاط مختلفی از مذاب اتم‌هایی که دارای حرکت کندتری هستند به شکل منظمی تجمع یافته و سلول‌های واحد یا کریستال‌های بسیار کوچک به عنوان جوانه‌های انجماد شکل می‌گیرند. سپس با کاهش بیشتر دما اتم‌های مجاور این جوانه‌ها به آن‌ها پیوسته و جوانه‌ها رشد می‌یابند و بدین ترتیب شبکه‌های بزرگ‌تر از تکرار شبکه‌های کوچک‌تر ایجاد می‌شود. وجود سطح جامد، برای مثال دیواره قالب و یا ناخالصی‌های حل نشده در ذوب در تشکیل جوانه، به ویژه وقتی که ناخالصی‌ها و عنصر اصلی دارای شبکه‌ی کریستالی مشابه باشند، بسیار مؤثر است. در عمل هنگام انجماد، تعداد زیادی سلول واحد همزمان و مستقل از یکدیگر در نقاط مختلف مذاب به وجود می‌آیند. تعداد جوانه‌هایی که در واحد زمان در واحد حجم مذاب در حین سرد شدن شکل می‌گیرد، یا ازدیاد افت درجه‌ی حرارت افزایش می‌یابد. معمولاً اگر مذاب فلزات حاوی ناخالصی‌هایی باشد، برای تشکیل جوانه فقط کاهش جزئی دما لازم است، در صورتی که در فلزات خالص مقدار کاهش درجه‌ی حرارت بیشتری لازم خواهد بود. جوانه‌زنی بر روی سطوح ناخالصی به عنوان جوانه‌زنی

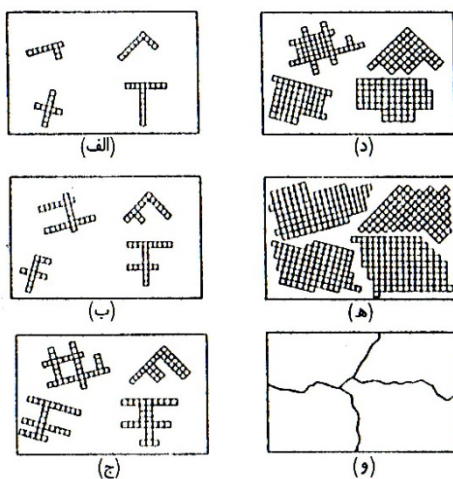
---

<sup>1</sup> . Crystallisation

ناهمگن معروف است. جوانه‌های تشکیل شده در دمای انجماد هنوز بسیار کوچک‌اند و به علت انرژی سطحی بالایی که در مقایسه با ذوب دارند ناپیدار بوده و ممکن است به حالت ذوب برگردند. وقتی که جوانه از اندازه‌ی بحرانی خود گذشت، پایدار شده و می‌تواند به رشد خود ادامه دهد. پایداری جوانه با بزرگ شدن اندازه‌ی آن افزایش می‌یابد.

### رشد جوانه‌ها

رشد جوانه به سرعت انتقال حرارت از مذاب و قسمت منجمد شده به دیواره‌ی قالب و محیط اطراف آن بستگی دارد. جوانه‌های تشکیل شده به رشد خود، تا جایی که بلورهای مجاور به یکدیگر مماس شوند. ادامه می‌دهد. (شکل ۱-۲). شکل خارجی بلورهای فلزی اکثراً تحت تأثیر بلورهای رشد کننده‌ی دیگری که آن‌ها را احاطه کرده‌اند، قرار می‌گیرد. هر بلور با شکل خارجی متفاوت «دانه» نامیده می‌شود. بنابراین دانه کریستالیا بلور با هر گونه شکل خارجی است که ساختار اتمی درون آن بر اساس شبکه‌ی فضایی خاص آن فلز است.

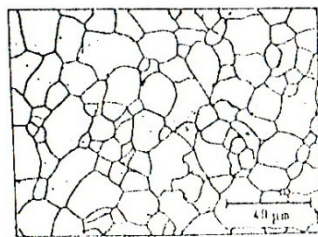


شکل ۱-۲: شکل شماتیکی به وجود آمدن دانه‌های کریستالی

به طوری که در شکل (۱-۲) نمایان می‌سازد، شبکه‌های بلورها در یک امتداد نیستند و به صورت نامنظمی در مجاورت یکدیگر قرار گرفته‌اند. تعداد و اندازه‌ی دانه‌های هر فلز تابع دو عامل



است. سرعت جوانه‌زنی و سرعت رشد جوانه‌ها. هر چه سرعت جوانه‌زنی یا به عبارتی اندازه‌ی آن‌ها ریزتر خواهد بود. بدین ترتیب مواد جامد کریستالی اکثراً دارای بلورهای زیادی بوده به نام پلی کریستال یا چندین بلوری نامیده می‌شوند، شکل (۲-۲) به ندرت و با روش‌های صنعتی خاصی می‌توان به تک بلورها که در قطعات الکترونیکی از قبیل ترانزیستورها، نورسنج‌ها و غیره استفاده می‌شود. دست یافت. هر اندازه سرعت رشد دانه‌ها کمتر باشد، دانه‌های حاصله کوچک‌تر است. یکی از روش‌هایی که به کمک آن می‌توان بر روی خواص مواد از جمله خواص فیزیکی و مکانیکی مواد، تأثیر بسزایی گذاشت و برای مثال تغییراتی را در استحکام جسم ایجاد کرد، کنترل اندازه‌ی دانه‌هاست.



شکل ۲-۲: ساختار میکروسکوپی یک چندین کریستالی (فاز فریتی از آلیاژ آهن - نیکل)

بررسی‌های میکروسکوپی و ریزساختاری نشان داده است که عموماً وضعیت اتم‌های یک بلور نسبت به بلورهای مجاور متفاوت است. چنانچه‌ی قطعه‌ی فلزی را کاملاً صیقلی و پولیش دهند و سپس برای مدت کوتاهی در محلول حک یا اچ‌کننده‌ای (مناسب با جنس آن قطعه) فرو برند، ماده‌ی مرزدانه‌ای بسیار بیش ماده‌ی درون دانه‌ای در محلول حک کننده، حل می‌شود و در نتیجه وقتی که جسم را زیر میکروسکوپ مشاهده می‌نمائیم مرز دانه‌ها تیره‌تر از خود دانه‌ها نمایان می‌شوند.

### گرمای ذوب و انجماد

در درجه‌ی حرارت صفر مطلق ( $-273^{\circ}C$ ) اتم‌های یک ماده‌ی کریستالی بی‌حرکت در محل‌های شبکه‌ی خود قرار گرفته و به اصطلاح یخ می‌زنند. با حرارت دادن به این ماده‌ی یخ زده از خارج، اتم‌ها در همان محل خود به ارتعاش در می‌آیند. هر چه درجه‌ی حرارت بالاتر رود،

دامنه‌ی نوسان ارتعاش اتم‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه انرژی داخلی آن با بالا رفتن درجه‌ی حرارت افزایش می‌یابد. وقتی دما به حد معینی رسید، دامنه‌ی نوسان اتم‌ها به قدری زیاد می‌شود که بر انرژی شبکه فائق آمده و شبکه به هم می‌ریزد و بلور ذوب می‌شود. بنابراین عمل ذوب به علت ضعیف شدن یا شکسته شدن اتصال‌هایی است که یون‌ها، اتم‌ها و یا مولکول‌ها را متصل به هم نگه می‌دارد. هر ماده‌ای براری ذوب شدن به مقدار مینی انرژی احتیاج دارد. این انرژی را «گرمای ذوب» یا به عبارتی «گرمای نهان ذوب» می‌نامند. حرارت دادن در درجه‌ی حرارت‌های بالا (نزدیک به نقطه‌ی ذوب) نه تنها باعث به وجود آمدن ارتعاشات حرارتی می‌شود، بلکه تعداد زیادی جای خالی تولید می‌کند. وقتی جاهای خالی برای مثال در یک ساختار کریستالی متراکم - به حدی رسید که باعث به هم خوردن عدد هماهنگی شد، در نتیجه نظم آرایشی اتمی از بین می‌رود و یک بی‌نظمی یا آشوب در آن به وجود می‌آید. در دمای ذوب بی‌نظمی حاصل از ذوب، حجم بسیاری از مواد را افزایش می‌دهد. از آنجا که گرمای ذوب، انرژی لازم برای ایجاد بی‌نظمی در یک مُل از اتم‌های ماده است، درجه‌ی حرارت ذوب مقیاسی برای اندازه‌گیری استحکام پیوند اتمی است. جدول (۱-۲) درجه‌ی حرارت ذوب و گرمای ویژه‌ی تعدادی از مواد فلزی را نشان می‌دهد. برعکس در موقع تبدیل حالت مایع به جامد یعنی در هنگام انجماد، مقداری گرما یا به عبارتی انرژی حرارتی آزاد خواهد شد. این مقدار انرژی آزاد شده که به عنوان «گرمای انجماد» یا «گرمای تبلور» (گرمای کریستالیزاسیون) نامیده می‌شود، برابر گرمای ذوب است. برای مثال انجماد سرب را در نظر می‌گیریم: انجماد سرب به طور ناگهانی انجام نمی‌گیرد، بلکه نسبت به مقدار مذاب و شرایط خارجی سرد شدن کم و بیش به مدت زمانی نیاز دارد که این مورد بررسی می‌شود. در ابتدا تمامی سرب به حلات مذاب است زیرا که درجه‌ی حرارتش بالای  $327^{\circ}C$  (نقطه‌ی انجماد)، قرار دارد. به محض اینکه درجه‌ی حرارت مذاب به دمای انجماد رسید، جوانه‌زنی در داخل مذاب شروع می‌شود و جوانه‌ها به مرور رشد می‌کنند و متناسب با شکل‌گیری و رشد جوانه‌های کریستالی گرمای انجماد آزاد می‌شود (گرمای تبلور) که از کاهش درجه‌ی حرارت جلوگیری می‌کند. با ادامه‌ی عمل انجماد از یک طرف کریستال‌های به وجود آمده رشد می‌کند و از طرف دیگر کریستال‌های جدیدی به وجود می‌آید و مرتب از مقدار مذاب کاهش یافته و به مقدار جامد افزوده می‌شود. و بالاخره تمام سرب منجمد

خواهد شد و چون در داخل سرب دیگر حرارت اضافی آزاد نمی‌شود، درجه‌ی حرارت شروع به پائین آمدن می‌کند. برعکس موقعی که سرب جامد حرارت داده شود و به نقطه‌ی ذوب ( $327^{\circ}\text{C}$ ) برسد باید به سرب جامد گرمای ذوب به مقدار  $23/9\text{J/g pb}$  داده شود تا اینکه تمامی سرب جامد به حالت مایع در آید. به همین جهت است که در نمودار گرم کردن نسبت به زمان برای یک فلز خالص نقطه‌ی ذوب به صورت خط افقی (خط ثابت درجه‌ی حرارت) نمایان می‌شود. برای اینکه این درجه‌ی حرارت ثابت در نمودار سرد کردن نیز با دمای انجماد مطابقت کند لازم است که سرد کردن تا حد امکان به آرامی انجام گیرد.

جدول ۱-۲: درجه حرارت و گرمای ذوب چند فلز

نام فلز	درجه حرارت ذوب $^{\circ}\text{C}$	گرمای ذوب یا گرمای تبلور $\text{J/g.Atom}$
تنگستن (W)	۳۳۸۷	۳۲۰۰۰
مولیبدن (Mo)	۲۶۲۳	۲۸۰۰۰
کُرْم (Cr)	۱۸۶۳	۲۱۰۰۰
تیتان (Ti)	۱۶۷۲	۲۱۰۰۰
آهن (Fe)	۱۵۳۸	۱۵۳۰۰
نیکل (Ni)	۱۴۵۵	۱۷۹۰۰
مس (Cu)	۱۰۸۴	۱۳۵۰۰
آلومینیوم (Al)	۶۶۰	۱۰۵۰۰
منیزیم (Mg)	۶۴۹	۹۰۰۰
روی (Zn)	۴۱۹	۶۶۰۰
سرب (Pb)	۳۲۷	۵۴۰۰

در غیر این صورت مذاب مقداری بیشتری سرد می‌شود و بدین ترتیب که متبلور شدن ابتدا در

درجه‌ی حرارت‌های پائین‌تر از نقطه‌ی ذوب شروع می‌شود. موقعی که سرعت سرد کردن چندان زیاد نباشد، درجه‌ی حرارت مذاب مقداری پائین‌تر از نقطه‌ی انجماد آمده و مجدداً هنگامی که گرمای انجماد آزاد می‌شود درجه‌ی حرارت بالا می‌رود. چنانچه سرعت سرد کردن بسیار زیاد باشد، گرمای آزاد شده به اندازه‌ای نیست که بتواند مذابی را که زیادتر از نقطه‌ی انجماد ( $327^{\circ}C$ ) سرد شده مجدداً به دمای انجماد برساند. در اینجا درجه‌ی حرارت ثابت در نمودار سرد کردن می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای از درجه‌ی حرارت حقیقی ذوب پائین‌تر باشد. این پدیده می‌تواند همچنین در موقع سرد کردن بسیار آرام مذاب ظاهر شود و غالباً موقعی پیش می‌آید که ایجاد اولین جوانه‌های تبلور به عللی کند شود و یا مانعی برای به وجود آمدن آن‌ها پیش آید که به وسیله‌ی به هم زدن مذاب یا اضافه کردن کریستال‌های بسیار کوچک از همان فلز (تقریباً معادل یک نوع تلقیح) می‌توان از این نوع پائین آمدن درجه‌ی حرارت انجماد جلوگیری به عمل آورد.

### متالورژیکی

فلزات و آلیاژها جامداتی کریستالی هستند، بدین معنی که اتم‌های یک فلز در شبکه‌های معینی قرار دارند که از تکرار آن‌ها جامد فلزی حاصل می‌گردد. متداول‌ترین شبکه‌های فلزی به شکل زیر می‌باشند:

✚ مکعبی مرکزدار: مانند ساختمان شبکه آهن و چدن همان‌طور که در شکل مشخص است صفحات به یک اتم مرکزی متصل می‌شود.

✚ مکعبی با وجوه مرکزدار مانند فولادهای زنگ نزن آستیننی، هر صفحه بطور جداگانه یک اتم دارد.

✚ منشور فشرده (هگزاگونال پر دانستیت) مانند منیزیم

**نکته:** خواص فلزی با خواص جامدات کریستالی دیگر مثل سرامیک‌ها و نمک‌های شیمیائی دیگر فرق دارد. فلزات انعطاف‌پذیر هستند یعنی می‌توان آن‌ها را تغییر شکل داد و همچنین هدایت الکتریسیته و گرمائی خوبی دارند. این خواص به علت پیوندهای غیرجهت‌دار

بین اتم‌ها در فلزات می‌باشد.

### مرزدانه

به هر کریستال اصطلاحاً دانه گویند که مجموعه دانه‌ها در مرحله ریختگری وقتی که فلز منجمد می‌شود، و همچنین در حالت مذاب تمایل به تشکیل و به دست آوردن نظم فلز منجمد می‌شود و همچنین در حالت مذاب تمایل به تشکیل و به دست آوردن نظم حالت جامد را دارند. فصل مشترک بین دو دانه را مرزدانه گویند. این مرزها پراثری و از نظر شیمیایی فعال‌تر می‌باشند. به همین دلیل خوردگی فلزات از این مرزها شروع می‌شود و با تیره شدن رنگ آثار خوردگی را نمایان می‌کنند.

### آلیاژها

آلیاژها مخلوط‌هایی از دو یا چند فلز یا عنصر می‌باشند که به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

#### Solid solution یا محلول‌های جامد

در این آلیاژها اجزا به هر نسبت در یکدیگر حل می‌شوند و آلیاژ تنها از یک فلز تشکیل می‌شود مانند فولاد زنگ نزن ۸-۱۸ که یک محلول جامد نیکل، کرم، در آهن می‌باشد.

#### آلیاژهای غیرهمگن

مخلوط‌های از دو یا چند فلز جداگانه می‌باشد. عناصر تشکیل‌دهنده این آلیاژها به طور کامل در یکدیگر حل نشده و به صورت فازهای جداگانه وجود دارند. ترکیب و ساختمان داخلی این آلیاژها یکنواخت نمی‌باشد.

مانند فولاد کربن که کربن با تعدادی از اتم‌های آهن ترکیب شده و کاربرد آهن می‌دهد. کاربرد آهن معمولاً به صورت لایه لایه‌ای ظاهر می‌شود.

## معایب و مزایای آلیاژها

آلیاژهای همگن معمولاً انعطاف‌پذیرتر بوده و دارای استحکام کمتری نسبت به آلیاژهای غیرهمگن هستند. آلیاژهای همگن معمولاً از نظر خوردگی مقاوم‌تر از آلیاژهای غیرهمگن می‌باشند. تفاوت‌های دیگر در فلزات ممکن است ماهیت شیمیائی، متالورژیکی، یا مکانیکی داشته باشند که در زیر نام برده می‌شوند:

ناخالصی‌هایی مثل اکسیدها و آخال‌ها Inclusions و پوسته‌های اکسیدی Mill-scale

جهت فرار گرفتن دانه‌ها

تجمع‌های نابجاییها

غیریکنواختی ترکیب شیمیائی در ساختمان میکروسکوپی

سختی Hardness: مقاومت جسم در برابر نفوذ اجسام دیگر

انعطاف‌پذیری (Ductility): مقاومت جسم در برابر تغییر شکل است یعنی اینکه در برابر نیروهای وارده بدون تسلیم مقاومت نماید.

سفتی Toughness: عبارت است از قابلیت یک جسم به جذب انرژی در هنگام تغییر شکل بر اثر نیروهای برشی و خنثی بدون اینکه بشکند تحمل کند مانند فنر مس.

تنش Stress: نیرو یا باری که بر جسمی وارد می‌شود تنش‌هایی در داخل جسم ایجاد می‌کند که شدت نیروی ایجاد شده در هر نقطه در داخل جسم می‌باشد و از این رابطه

$$G = \frac{F}{A} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

تنش برحسب نوع نیروی وارده به سه دسته زیر تقسیم می‌شود:

تنش فشاری Compressive. St که موجب به هم فشردن جسم می‌شود.

تنش کششی Tensile-St که موجب جدا شدن و کشش جسم می‌شود.

تنش برشی Shear-St که موجب لغزش یا سریدن دو قسمت نسبت به هم شوند.

- نکته دیگر که در مورد متالورژیکی فلزات باید به آن اشاره نمود این است که فلزات خالص از نظر خوردگی مقاوم‌تر از انواع تجاری آن‌ها که درصد خلوص کمتری دارند می‌باشند.

## نقص های شبکه ای

ساختارهای بلوری جامدات که از انجماد مایعات حاصل می شود دچار نقص هایی می شوند که عموماً " در سطح اتمی ظاهر می شوند یعنی ساختار بلور از حالت کامل و بی عیب خارج می شوند که در این مبحث پیرامون این عیوب بحث خواهد شد . عامل بروز این عیوب ممکن است یک اتم یا دسته کوچکی از اتم ها باشند . کلیه نقص ها و عیوب شبکه ای را می توان در سه دسته کلی بررسی نمود که عبارتند از :

Point defects    نقص های نقطه ای

Line defects or Dislocations    نقص های خطی یا نابجایی

Grain boundary    or Area    نقص های صفحه ای یا مرزخانه ای  
defects

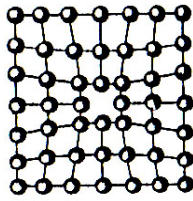
## نقص های نقطه ای

این عیوب به سه صورت کلی مشاهده می شوند :

عیوب جاهای خالی    Vacancies، عیب شوتکی، عیب بین نشینی    Interstitials، عیب  
جانیشینی، عیب فرنکل

## عیوب جاهای خالی

محل های خالی اتمی در شبکه ی کریستالی از مهمترین و ساده ترین عیوب نقطه ای هستند شکل (2-3). چنین عبوری می تواند در مواقع انجماد (بخصوص سرد کردن با سرعت زیاد از درجه حرارت های بالا)، تغییر شکل، اشعه دادن با اشعه ای انرژی زیادی است و یا در درجه حرارت های بالا به وجود آید. محل خالی را در شبکه ی کریستالی معمولاً با علامت □ مشخص می کنند. البته هر کریستال در شرایط تعادلی خود دارای تعدادی جای خالی است که تعداد این جاهای خالی قابل محاسبه است.



شکل ۳-۲ محل خالی در شبکه‌ی کریستالی

برای به دست آوردن یک محل خالی باید یک اتم را به طریقی از محل خود در شبکه خارج سازیم. بدین منظور مقداری انرژی لازم است که انرژی تشکیل محل خالی نامیده می‌شود. محل‌های خالی در حالت تعادل ترمودینامیکی در موقع گرم کردن کریستال‌ها به وجود می‌آید. بدین صورت که می‌تواند در اثر ارتعاشات حرارتی اتم‌ها، در درجه حرارت‌های بالا به وجود آید، زیرا که در اثر این افزایش انرژی حرارتی احتمال خارج شدن بعضی از اتم‌ها از موقعیت پائین‌ترین سطح انرژی خود بیشتر می‌شود. بنابراین ایجاد یک محل خالی نه فقط با افزایش انرژی داخلی سیستم، بلکه همچنین با افزایش آنتروپی همراه است به طوری که یک کریستال معیوب در مقایسه با یک کریستال ایده‌ال، انرژی کمتری دارد. هرگاه کریستالی را با حجم معین، در درجه‌ی حرارت مشخص در نظر بگیریم، طبق قوانین ترمودینامیک این کریستال موقعی در پایدارترین حالت خود است که انرژی آزاد آن به حداقل ممکن برسد. در ترمودینامیک طبق تعریف، انرژی آزاد برابر است با:

$$F = U - TS \quad 1-2$$

در این رابطه:

$F$  = انرژی آزاد کریستال،

$U$  = انرژی کریستال،

$T$  = درجه‌ی حرارت کریستال

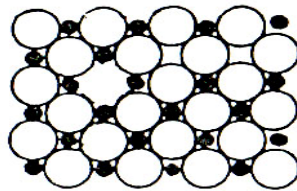
$S$  = آنتروپی



تأثیر تعداد محل‌های خالی بر هر یک از عوامل طرف راست رابطه‌ی فوق را می‌توان به طور کمی محاسبه کرد. مسئله‌ی عمده، یافتن تعداد محل‌های خالی در شرایطی است که کریستال دارای حداقل مقدار انرژی  $F$  و  $T$  ثابت است. زیرا درجه‌ی حرارت کریستال، درجه‌ی حرارت مشخصی در نظر گرفته شده است. مقدار آنتروپی ( $S$ ) به میزان بی‌نظمی کریستال بستگی دارد. هرچه درجه‌ی بی‌نظمی بالاتر باشد، آنتروپی زیادتر است. اما وجود محل‌های خالی در کریستال ایجاد بی‌نظمی می‌کند و افزایش تعداد محل‌های خالی موجب بالا رفتن آنتروپی می‌شود. بنابراین افزایش تعداد محل‌های خالی کمیت  $TS$  را افزایش می‌دهد و افزایش  $S$  چنانچه از رابطه‌ی نتیجه می‌شود موجب کاهش انرژی آزاد ( $F$ ) خواهد شد.

### عیوب شوتکی

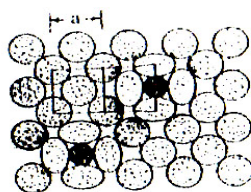
عیوب شوتکی از جمله‌ی عیوب نقطه‌ای بوده که در کریستال‌های با پیوندهای یونی یافت می‌شود. محل خالی می‌تواند یون مثبت و یا یون منفی باشد، شکل (۴-۲). هرگاه یک یا چندین بار الکتریکی موجود نباشد و یا زیادتر موجود باشد در این حالت صحبت از یک محل خالی آنیونی یا کاتیونی می‌شود. چنین عیبی می‌تواند همچنین بدین طریق به وجود آید که یک اتم باردار شبکه به وسیله یک اتم دیگر با بار ظرفیت کمتر یا بیشتر جایگزین شود، برای مثال  $Ca^{2+}$  به جای  $Na^+$  و یا  $Al^{3+}$  در شبکه به سوبله  $Si^{4+}$  جایگزین می‌شود و یا همچنین به واسطه‌ی انحراف از قانون نسبت‌های معین در کریستال‌های یونی که معمولاً در آن‌ها محل خالی موجود مربوط به کمبود یکی از عناصر تشکیل‌دهنده‌ی کریستال نسبت به قانون نسبت‌های معین است (برای مثال موقعی که اکسید آن به صورت  $FeO$  نبوده بلکه به صورت  $Fe_{0.9}O$  باشد). بدین ترتیب در یک موضع در شبکه یک بار مثبت یا منفی زیادتر به وجود می‌آید.



شکل ۴-۲: عیب شوتکی در کریستال NaCl

### عیب بین‌نشینی

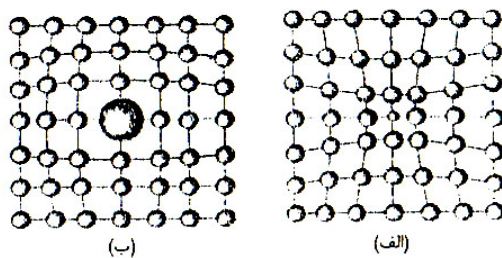
نوع دیگر از عیوب نقطه‌ای، عیب بین‌نشینی است که در اثر قرار گرفتن یک اتم در فضای موجود بین اتم‌های شبکه به وجود می‌آید. شرط اولیه برای قرار گرفتن یک اتم ثالث به صورت بین‌نشینی در بین اتم‌های شبکه‌ی اصلی به اندازه‌ی کافی کوچک‌تر بودن شعاع اتمی آن از اتم‌های اصلی شبکه است. برای مثال می‌توان قرار گرفتن اتم‌های کربن در شبکه‌ی مکعب با وجوه مرکزدار آهن را نام برد. این گونه عیوب می‌تواند باعث کجی یا تغییر شکل موضعی در ساختار شبکه‌ی کریستال شود، شکل (2-5). عیب بین‌نشینی بیشتر در شبکه‌هایی با ضریب تراکم پائین دیده می‌شود.



شکل (2-5): عیب بین‌نشینی به هم ریختن شبکه‌ی آهن در اطراف اتم کربن در بالای  $920^{\circ}C$

### عیب جانیشینی

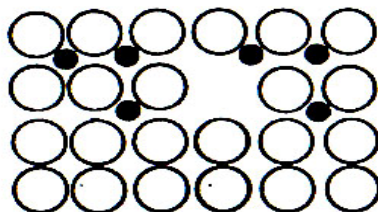
اتم‌های ناخالصی‌های موجود در یک کریستال ممکن است در محل‌های خالی به جای اتم‌های شبکه و یا در فضاهای موجود بین اتم‌های شبکه قرار گیرد که در حالت اول شعاع اتم جانیشینی می‌تواند تقریباً شعاع اتم‌های اصلی شبکه باشد. (شکل 2-6)



شکل (2-6): عیب جانیشینی (الف) اندازه‌ی اتم جانیشینی کوچک، (ب) اندازه‌ی اتم جانیشینی بزرگ

## عیب فرنکل

وجود یک محل خالی با یک عیب بین‌نشینی همراه با هم در یک شبکه‌ی کریستالی عیب فرنکل نامیده می‌شود، شکل (2-7). ساختارهای کریستالی با شبکه‌ی متراکم، عیوب بین‌نشینی و فرنکل کمتری نسبت به عیوب محل خالی و عیوب شوتکی دارد زیرا برای انتقال اتم‌های جدید به درون محل‌های جدید انرژی زیادی لازم است. یکی از روش‌هایی که امروزه برای ایجاد محل خالی استفاده می‌شود، اشعه دادن با ذرات دارای انرژی زیاد از جمله نوترون‌ها و الکترون‌هاست. مکانیزم آن بدین ترتیب است که یک ذره اولیه (نوترون یا الکترون) یا انرژی زیاد به یک اتم برخورد داده می‌شود، در این برخورد مقداری انرژی که بیش از انرژی پیوند بین اتمی در شبکه است از ذره به اتم منتقل می‌شود. در اثر این برخورد و دریافت مقداری انرژی اتم، محل خود در شبکه را ترک کرده و به یک فضای خالی موجود بین اتم‌های دیگر می‌رود و بدین ترتیب عیب فرنکل به وجود می‌آید. چنانچه انرژی منتقل شده توسط ذره به یک اتم بسیار بزرگ‌تر از انرژی اتصال در شبکه باشد اتم برخورد شده به نوبه‌ی خود می‌تواند اتم یا اتم‌های دیگری را از محل خود رد شبکه خارج سازد و بدین ترتیب یک نوترون یا مقداری انرژی در حدود یک مگاولت، می‌تواند تا حدود ۱۰۰۰ عیب فرنکل را به وجود آورد تعداد محل خالی به وجود آمده بستگی به نوع ذره، انرژی و مقدار جریان آن (تعداد بر  $cm^2$  در ثانیه) خواهد داشت.



شکل (2-7): عیب فرنکل

اما شایان ذکر است که وجود عیوب نقطه‌ای یا محل‌های خالی مزایای خواهد داشت و باعث ساده‌تر انجام گرفتن پدیده‌ها و فعل و انفعالاتی می‌شود که در ذیل به چند مورد آن اشاره می‌شود. محل‌های خالی، از عیوبی است که پدیده‌ی نفوذ را آسان‌تر می‌کند. برای مثال در آبکاری

و سخت کردن سطحی فولادها و آلیاژها از آن استفاده صنعتی می‌شود. دیگر اینکه ایجاد عیوب نقطه‌ای سبب بروز تغییراتی در رنگ کریستال می‌شود. بدین منظور هرگاه یک الکترون در یک محل خالی آنیونی قرارگ یرد و توزیع بار الکتریکی را متعادل سازد، می‌تواند یک مرکز رنگ را به وجود آورد، شکل (2-8). برای مثال مقوعی که کریستال NaCl با اشعه‌ی X (رنتگن) اشعه‌ی آده شود رنگ آن زرد و کریستال KCl آبی رنگ می‌شود که این پدیده را می‌توان نتیجه‌ی تشکیل یک عیب نقطه‌ای دانست. (برای مثال رفتار هالوژنیدهای نقره مانند AgCl و AgBr نیز به این علت است). در این ترکیبات به وسیله‌ی اشعه‌ی دادن یا امواج الکترومغناطیسی و همچنین با نور مرئی عیب نقطه‌ای به وجود می‌آید.



شکل (2-8): در یک محل خالی آنیونی ( $Cl^-$ ) در کریستال NaCl یک الکترون قرار گرفته است.

چون یون‌های  $Ag^+$  به عنوان اتم‌های بین‌نشینی بسیار متحرک است به طرف محل جوانه‌ها، که در عمل ظهور به عنوان نقاط شروع برای احیای کریستال‌ها در محلول مایع ظهور عمل می‌کند، حرکت می‌کند، سیاه شدن در نتیجه‌ی تشکیل فلز غیرشفاف فقط در کریستال‌های معیوب ظاهر می‌شود. بنابراین عیوب نقطه‌ای شرط اولیه برای فتوگرافی است. تفاوت کریستال‌های هالوژنیدهای نقره با کریستال‌های یونی دیگر این است که با اشعه‌ی نور مرئی که دارای انرژی نسبتاً پائینی است، در آن‌ها عیوب نقطه‌ای به وجود می‌آید. استفاده‌ی صنعتی دیگری که از وجود عیوب نقطه‌ای یا محیط‌های خالی در کریستال‌ها می‌شود، ساخت بلورهای

نیمه عایق و یا نیمه هادی است. بدین ترتیب که با قرار دادن مقدار کمی ناخالصی در بین لایه‌های یک بلور یونی عایق می‌توان آن را به یک نیمه هادی تبدیل کرد. وجود ناخالصی و در نتیجه نقایصی که در کریستال به وجود می‌آید تأثیر قابل توجهی روی خواص فیزیکی (خواص الکتریکی، مغناطیسی، مکانیکی و نوری) خواهد داشت. همان‌طور که می‌دانیم بعضی از کریستال‌های خالص عایق الکتریسیته هستند ولی در شرایط ویژه‌ای با درجه‌ی کمتری در مقایسه با فلزات، هادی الکتریسیته می‌شوند. این نوع کریستال‌ها را نیمه هادی می‌نامند. برای مثال می‌توان عنصر ژرمانیم و یا سیلیسیم را نام برد که در حالت خالص عایق الکتریسیته هستند. زیرا ساختاری شبیه به ساختار الماس دارند و در آن هر اتم ژرمانیم با پیوندهای کووالانسی به چهار اتم ژرمانیم دیگر متصل است. هرگاه ژرمانیم را ذوب کرده و به آن مقدار بسیار کمی  $As$  (یا  $P$  و  $Sb$  و  $Bi$ ) اضافه کنیم پس از متبلور شدن تعدادی از اتم‌های  $As$  در شبکه‌ی بلور ژرمانیم وارد می‌شود. از پنج الکترون ظرفیتی اتم آرسنیک چهار تای آن در چهار پیوند کووالانس با اتم‌های ژرمانیم شرکت می‌کند و الکترون پنجم آزاد باقی می‌ماند که می‌تواند جابجا شده و هدایت الکتریکی را سبب شود. البته همچنین ممکن است به ژرمانیم و یا سیلیسیم ذوب شده مقدار کمی گالیم (و یا  $B$ ،  $Al$  و  $In$ ) که سه الکترون ظرفیتی دارد اضافه کرد. پس از متبلور شدن محلول تعدادی از اتم‌های گالیم در شبکه‌ی بلور ژرمانیم وارد می‌شود. در اینجا هر اتم گالیم که به جای یک اتم ژرمانیم در بلور جای گرفته است تنها می‌تواند در سه پیوند کووالانسی با سه اتم ژرمانیم مجاور خود شرکت کند. در نتیجه پیوند کووالانسی چارم بین اتم گالیم و اتم ژرمانیم تنها یک الکترون دارد که در نتیجه این پیوند یک الکترون دیگر کم دارد. این کمبود الکترون می‌تواند از پیوند کووالانسی مجاور با حرکت یکی از الکترون‌ها رفع شده و به پیوند کووالانس مجاور انتقال یابد. به عبارت دیگر چنین بلورهایی می‌تواند جریان الکتریسیته را در جهت عکس حرکت کمبود الکترون از خود عبور دهد. این نوع کریستال‌ها نوع دیگری از نیمه هادی‌ها هستند که به علت کم داشتن الکترون ظرفیتی از نیمه هادی‌های نوع مثبت هستند. نیمه هادی‌ها در صنایع الکترونیک و در ساخت ترانزیستورها استفاده می‌شوند.

## عیوب خطی

هرگاه نقصی در طول یک خط ادامه پیدا کند آن را نقص خطی می نامند. این نقص ها نابجایی های هستند که در کریستال جامدات در نتیجه از شکل افتادگی در اطراف یک خط ایجاد می شوند. این نقص ها بر خواص مواد مانند مقاومت اثر می کنند که به سه شکل ذیل مشاهده می شوند:

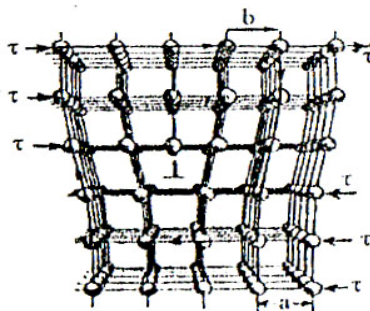
Edge Dislocations نابجایی لبه ای یا گوه ای

Screw Dislocations نابجایی پیچی

نابجایی مختلط

## نابجایی لبه ای یا گوه ای

در شبکه ی کریستالی نابجایی ها عیوبی هستند که در امتداد یک خط در شبکه دیده می شوند، بدین جهت است که جزء عیوب خطی به شمار می آیند. شکل (۴-۹) یک عیب خطی یا نابجایی لبه ای را نشان می دهد.



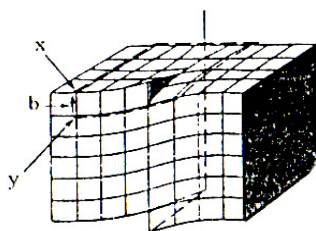
شکل (۲-۹): آرایش اتمی در یک نابجایی لبه ای (خطی)

نابجایی لبه ای را می توان از نظر هندسی انتهای یک نیم صفحه ای اتمی اضافی که بین دو صفحه ای اتمی از یک شبکه قرار گرفته و یا به عبارت دیگر عدم وجود یک قسمت از صفحه ای اتمی در شبکه ی کریستالی فرض کرد. بدین صورت در شبکه نقایصی به نام طوط نابجایی به وجود می آید. یک خط نابجایی را با علامت «<sup>^</sup>» نشان می دهند. در این علامت خط عمود در

جهت نیم صفحه‌ای اضافی است و خط افقی صفحه‌ی اتمی شبکه را (در میحث تغییر شکل صفحه‌ی لغزشی می‌نامیم) که عمود بر آن است نشان داده و خط نابجایی همان فصل مشترک این دو صفحه است. کمیتی که برای تعیین مقدار و جهت این عیب به کار می‌رود یک کمیت برداری است که به نام «بُردار برگز» (b) نامیده می‌شود مقدار و جهت این بُردار به کمک طی مسیری حول خط نابجایی تعیین می‌شود. بدین منظور نقطه‌ای را برای شروع مسیر بر روی شبکه انتخاب کرده و همان‌گونه که در شکل (۲-۹) نشان داده شده فواصل اتمی مساوی را در جهات قائم و افق (به نام دور برگز) طی می‌کنیم. بُرداری که نقطه‌ی پایان مسیر را به شروع وصل می‌کند، بردار برگز را نشان می‌هد. چنانچه شبکه‌ی کریستال فاقد این نقص می‌بود در انتهای مسیر با تعداد فواصل اتمی مساوی در تمام جهات به نقطه‌ی شروع می‌رسیدیم. اندازه‌ی این بُردار مضرب صحیحی از واحد شبکه و جهت آن عمود بر خط نابجایی است. بعداً در فصل خواص مکانیکی خواهیم دید که حرکت این گونه نابجایی موجب لغزش در عملیات تغییر شکل پلاستیکی خواهد شد. نسبت به جهاتی که خطوط نابجایی و بُردار برگز با یکدیگر دارند نابجایی‌ها به نابجایی لبه‌ای. نابجایی پیچی و نابجایی مختلط تقسیم‌بندی می‌شوند. در نابجایی لبه‌ای بُردار برگز عمود بر خط نابجایی است.

### نابجایی پیچی

شکل (۲-۱۰) یک نابجایی پیچی را نشان می‌دهد. این نابجایی بدین جهت پیچی نامیده می‌شود که صفحات اتمی عمود بر خط نابجایی کاملاً جدا از یکدیگر نبوده، بلکه یک سطح پیچ را نشان می‌دهد و یا می‌توان چنین تصور کرد که دو قسمت از یک شبکه‌ی کریستالی در جهت مخالف بر روی یکدیگر لغزیده است به طوری که این لغزش تنها بر روی یک صفحه در جهت موازی خط نابجایی به اندازه‌ی یک فاصله‌ی اتمی انجام گرفته و اتم‌ها مجدداً در دریف هم قرار می‌گیرند و بدین ترتیب نابجایی پیچی به وجود می‌آید.



شکل (۱۰-۲): نابجایی پیچی

پیمودن یک دور برگرز به همان گونه که در نابجایی لبه‌ای گفته شد نشان می‌دهد که در نابجایی پیچی بُردار برگرز موازی خط نابجایی است و مقدار آن برابر گام پیچ است.

### نابجایی مختلط

تمام نابجایی‌های مختلط از پیوستن نابجایی‌های لبه‌ای و پیچی به یکدیگر به وجود می‌آیند. حالات مختلف این نابجایی به زاویه‌ی بین بردار برگرز با خط نابجایی بستگی دارد. یک دور برگرز شامل چندین نابجایی شود بدین ترتیب بُردار برگزی که از آن نتیجه می‌شود برابر حاصل جمع بُردار برگرزهای هر یک از نابجایی‌ها است.

### عیوب صفحه‌ای

نقص‌ها می‌توانند در شبکه کریستالی در دو بعد یعنی در یک صفحه باشند. مهمترین این نقص‌ها در مرز دانه‌های کریستال مشاهده می‌شوند این نقص‌ها به شکل‌های ذیل مشاهده می‌شوند:

عیب لایه‌ای

عیب در مرز دانه‌ها

عیب فضایی

### عیب لایه‌ای

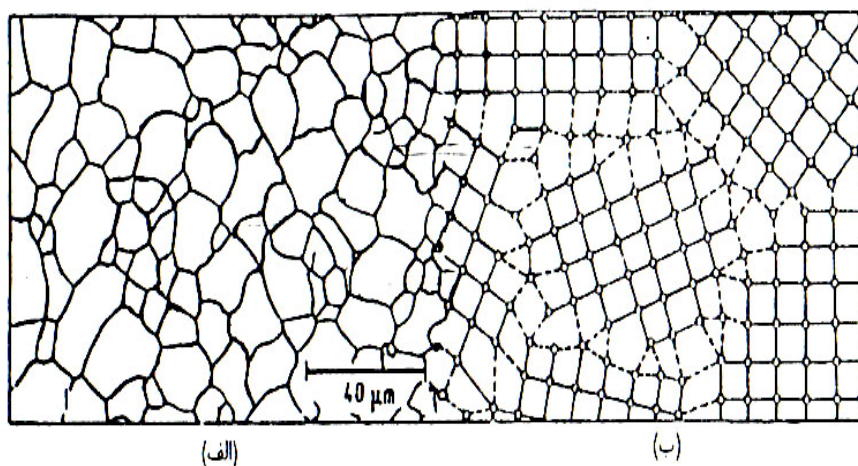
عیب لایه‌ای از قرار گرفتن بدون نظم و ترتیب صفحات اتمی بر روی یکدیگر به وجود



می‌آید. بدین ترتیب که در قسمتی از کریستال یکی از لایه‌ها وجود ندارد. برای مثال در سیستم هگزاگونال متراکم تکرار صفحات به صورت  $ABBABAB\dots$  در می‌آید. در صورتی که تکرار عادی لایه‌ها به صورت  $ABABAB\dots$  است و یا در سیستم مکعب با وجوه مرکزدار با وجود این عیب تکرار صفحات اتمی به صورت  $ABCBCABC\dots$  در می‌آید. در صورتی که تکرار منظم لایه‌های اتمی در این نوع سیستم به صورت  $ABCABCABC\dots$  است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو حالت فوق صفحه‌ی اتمی A در قسمتی از کریستال وجود ندارد.

### مرزدانه‌ها

یکی دیگر از عیوب دو بُعدی که اهمیت زیادی در خواص مکانیکی مواد دارد، مرزدانه‌هاست. چنانچه می‌دانیم تقریباً تمام مواد شامل تعداد زیادی دانه‌های بلورند و یا به عبارتی دیگر چند کریستالی<sup>۱</sup> هستند و جهت‌گیری آرایش اتمی یا شبکه‌ی کریستالی در دانه‌هایی که مجاور یکدیگر قرار گرفته‌اند، متفاوت است. هر یک از دانه‌ها با مرزهایی از دانه‌های مجاورش جدا شود، شکل (۲-۱۱) مرزدانه‌ها را نمایان می‌سازد. چنانچه این شکل نمایان می‌سازد نوع شبکه در هر دانه یکسان است، اما جهت‌گیری شبکه‌ها متفاوت است.



شکل (۲-۱۱): (الف) مرزدانه‌ها در ساختار میکروسکوپ، (ب) تصویر شماتیکی از دانه - مرزدانه‌ها

<sup>۱</sup> . Polycrystal

## عیب فضایی

عیوب فضایی یا سه بُعدی فضاهاى خالی میکروسکوپی و ماکروسکوپی (مانند حفره‌های انقباضی کوچک داخلی، حفره‌های ریز سطحی که در اثر خروج گازها پدید می‌آید، ترک‌های مویی و از این قبیل عیوب) است. برای مثال، در اثر تأثیر متقابل چندین نابجایی مخصوصاً موقعی که تحت تأثیر بارهای خارجی متناوب قرار گیرد، یک شکاف ریز به وجود می‌آید. تنها عیوب ساده جای خالی می‌تواند در حالت تعادل حرارتی به وجود آید در صورتی که بقیه‌ی عیوب شبکه‌ای که از لحاظ ترمودینامیکی در حالت تعادل نیستند تحت تأثیر عوامل خارجی تشکیل می‌شوند. بدین ترتیب مرزخانه‌ها می‌توانند در کریستالیزاسیون یا هنگام انجماد و نابجایی‌ها در موقع تغییر شکل پلاستیکی به وجود آیند.

# فصل سوم

## انواع خوردگی عمومی

### فلزات

## انواع خوردگی

خوردگی را به روش‌های مختلف طبقه‌بندی نموده‌اند ولی عمومی‌ترین آن‌ها طبقه‌بندی بر اساس ظاهر و شکل فلز خورده شده می‌باشد. به این روش با مشاهده فلز خورده شده با چشم غیر مسلح به راحتی می‌توان نوع خوردگی آن را مشخص نمود. در بین انواع خوردگی می‌توان نه نوع منحصر به فرد را پیدا نمود ولی تمام آن‌ها کم و بیش وجه متشابهی دارند که به شرح ذیل می‌باشند:

- ✚ خوردگی یکنواخت Uniform Attack
- ✚ خوردگی گالوانیک یا دو فلزی Galvanic or two Metal. Corr
- ✚ خوردگی شیاری Grevice Corrosion
- ✚ حفره‌دار شدن Pitting
- ✚ خوردگی بین دانه‌ای Inter Granular. Corrosion
- ✚ جدایش انتخابی Selective Leaching
- ✚ خوردگی سایشی Erosion Corrosion
- ✚ خوردگی توأم با تنش Stress Corrosion
- ✚ خسارت هیدروژنی Hydrogen damage

## خوردگی یکنواخت

خوردگی یکنواخت معمول‌ترین و متداول‌ترین نوع خوردگی است معمولاً به وسیله یک واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی به طور یکنواخت در سرتاسر سطحی که در تماس با محلول خورنده قرار دارد، مشخص می‌شود. فلز نازک و نازک‌تر شده و نهایتاً از بین می‌رود یا تجهیزات مورد نظر منهدم می‌شوند مانند خورده شدن یک قطعه فولادی یا روی در داخل یک محلول رقیق که با سرعت یکسانی در تمام نقاط قطعه خورده می‌شود. این نوع خوردگی بالاترین آمار را دارد و عمر تجهیزات خورده شده را با قرار دادن نمونه‌هایی در داخل محلول خورنده می‌توان تخمین زد.

## روش جلوگیری از خوردگی یکنواخت

خوردگی یکنواخت را به سه طریق می‌توان کنترل و یا کم کرد که ممکن است یک نوع و یا دو نوع را با همدیگر انجام داد.

انتخاب مواد و پوشش صحیح

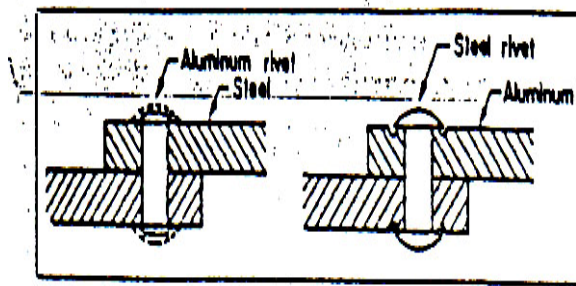
به وسیله ممانعت‌کننده‌ها

استفاده از حفاظت کاتدی

## خوردگی گالوانیکی یا دو فلزی

هنگامی که دو فلز غیر همجنس که در تماس الکتریکی با یکدیگر هستند در معرض یک محلول هادی یا خورنده قرار بگیرند. اختلاف پتانسیل بین آن دو باعث برقراری جریان الکترون بین آن‌ها می‌شود. فلزی که مقاومت خوردگی کمتری دارد آندی شده و خورده می‌شود و فلز مقاومت‌تر از نظر خوردگی کاتدی می‌شود که معمولاً خیلی کم خورده می‌شوند و یا خورده نمی‌شود. به دلیل وجود جریان‌های الکتریکی بین فلزات غیر هم جنس به این نوع خوردگی، خوردگی گالوانیکی یا دو فلزی اطلاق می‌شود.

برای مثال خوردگی در یک فلز (آلومینیوم) به شدت اتفاق می‌افتد و در فلز دیگر (فولاد) کاهش یافته یا متوقف می‌گردد. بنابراین اولین چیزی که در این مورد مطرح می‌باشد این است که از دو فلزی که به روی هم اثر می‌کنند کدام فلز در حالت اول و کدام فلز در حالت دوم قرار می‌گیرد. پاسخ این سؤال به وسیله جهت جریان الکتریکی ناشی از اثر گالوانیکی از یک فلز (آند) به فلز دیگر (کاتد) قرار گرفته در یک محلول خورنده داده خواهد شد. با اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل دو فلز در محلول مورد نظر این جهت را در هر مورد می‌توان تعیین نمود. در مورد جفت گالوانیکی آلومینیوم و فولاد مشخص شده است که آلومینیوم به صورت یک آند عمل می‌کند.



شکل ۱-۳ جفت گالوانیکی آلومینیوم و فولاد

### پتانسیل خوردگی و جهت اثرات گالوانیک

پتانسیل فلز در محلول وقتی که خورده می‌شود به انرژی که آزاد می‌شود، بستگی دارد. این پتانسیل تنها در یک مقدار نسبی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. برای مثال با قرار دادن یک فلز خیلی فعال مانند روی و یک فلز با فعالیت کمتر مانند مس در یک محلول کلرید سدیم می‌توان جهت جریانی که توسط اثر گالوانیک آن‌ها تولید می‌گردد، اندازه‌گیری نمود. چنین آزمایشی را می‌توان با تمام فلزات ممکن در هر محلول خورنده تکرار نمود. با توجه به نتایج آزمایشات به دست آمده، امکان مرتب کردن فلزات در یک گروه که سری گالوانیک نامیده می‌شود فراهم می‌شود. اگر آزمایشات در محلول‌های مختلف با غلظت‌های مختلف کلرید سدیم، میزان هوادهی متفاوت، سرعت حرکت و یا دماهای مختلف انجام گیرد، مقادیر گزارش شده می‌تواند با یکدیگر اختلاف داشته باشند و در این حالت محل بعضی فلزات نسبت به هر یک از فلزات دیگر به صورت یک سری گالوانیک جدید تغییر نماید.

### سری گالوانیک

بطور کلی پتانسیل الکتریکی فلزات دارای هیچ مقداری بطور مطلق و مستقل از فاکتورهای مؤثر بر خواص خوردگی محلولی که در آن اندازه‌گیری انجام می‌شود، نمی‌باشد. مقدار پتانسیل می‌تواند از یک محلول به محلول دیگر یا هنگامی که یک محلول به وسیله فاکتورهائی از قبیل دما، هوادهی و سرعت حرکت تأثیر می‌پذیرد، تغییر کند. بنابراین برای پیش‌بینی

پتانسیل فلزات و در نتیجه جهت اثر گالوانیکی آن‌ها در یک محیط، بجز با اندازه‌گیری پتانسیل و در نظر داشتن شرایط دقیق آن محیط هیچ راهی وجود ندارد، به عنوان مثال روی بطور طبیعی نسبت به آهن در دمای محیطی منفی‌تر یا آندیک‌تر می‌باشد. همان‌طور که در جدول گالوانیک نشان داده شده است. با وجود این اختلاف پتانسیل با افزایش دما تغییر کرده و افزایش می‌یابد تا زمانی که اختلاف پتانسیل در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد ممکن است صفر یا دقیقاً برعکس شود. در هر صورت وضعیت شرایط فلزات نسبت به هم آن‌طور که گفته شد در بسیاری مواقع خیلی هم تغییر نمی‌کند و تمایل نسبی فلزات به خوردگی در بسیاری از محیط‌هایی که از آن‌ها استفاده می‌شود تقریباً یکسان باقی می‌ماند. در نتیجه موقعیت‌های نسبی آن‌ها در سری گالوانیک ممکن است در بسیاری محیط‌ها تقریباً یکسان باشد. از آنجائی که بیشتر اندازه‌گیری‌های پتانسیل و رفتار گالوانیکی فلزات در مقایسه با سایر محیط‌ها بیشتر و در آب دریا انجام شده است، در نتیجه بیشتر سری‌های گالوانیک بر اساس این آزمایشات فلزات را تنظیم کرده‌اند و لذا از این جداول می‌توان به منظور احتمالات اولیه در مورد اثرات گالوانیکی در سایر محیط‌ها، زمانی که مستقیماً نتایج قابل اجراتری از آن محیط در دسترس نباشد، استفاده نمود. در یک جفت گالوانیک شامل دو فلز قرار گرفته شده در این جدول، خوردگی طبیعی فلزی که موقعیت بالاتری در جدول دارد، احتمالاً شدیدتر می‌شود. در حالی که خوردگی فلز پائین‌تر جدول احتمالاً کاهش می‌یابد یا کاملاً متوقف می‌شود. فلزات با پتانسیل خوردگی مثبت‌تر، بی‌اثر یا کاتدیک نامیده می‌شوند و فلزات ویا آلیاژهای، با پتانسیل خوردگی منفی‌تر به عنوان فلزات آندیک یا فعال شناخته می‌شوند. توجه کنید که در این جدول چندین فلز در یک گروه قرار گرفته‌اند که احتمالاً اختلاف پتانسیل آن‌ها نسبت به هم زیاد نمی‌باشد بنابراین می‌توان آن‌ها را بدون اثرات گالوانیکی قابل ملاحظه در بسیاری از محیط‌ها در کنار یکدیگر قرار داد.

### مقدار اثر گالوانیک

تا اینجا ما فقط جهت اثر گالوانیک را با تعیین پتانسیل نسبی فلزات در یک جفت گالوانیکی مورد بررسی قرار داده‌ایم. در حالی که در عمل ما بیشتر با شدت اثرات گالوانیکی که رخ می‌دهد مواجه هستیم. این شدت با مقدار جریان یا اصطلاحاً شدت جریان (جریان بر واحد

سطح) تعیین می‌شود. بر طبق قانون اهم، مقدار جریان تولید شده توسط جفت‌های گالوانیکی که اختلاف پتانسیل آن‌ها زیاد است، در یک مقاومت معین مستقیماً با ولتاژ، متناسب می‌باشد. به عنوان مثال، اختلاف پتانسیل دو فلز روی و مس در آب دریا ۷۰۰ میلی‌ولت می‌باشد و این دو جفت گالوانیکی می‌توانند جریان بیشتری (و در نتیجه خوردگی بیشتر) از سایر جفت‌های گالوانیکی که اختلاف پتانسیل کمتر دارند، مثل NAVAL BRASS و مس (با ۴۰ میلی‌ولت پتانسیل در آب دریا) تولید نمایند. پتانسیل‌هایی که گفته می‌شود پتانسیل‌هایی هستند که قبل از برقراری هر گونه جریان بین دو فلز اندازه‌گیری شده‌اند و بعضی وقت‌ها آن را پتانسیل جریان باز می‌گویند.

### عوامل مؤثر در خوردگی گالوانیکی

➤ نیروی الکتروموتوری : که کاملاً" در بالا اشاره شد .

➤ اثرات محیط

هر پدیده محیطی که به برقراری جریان الکتریکی بین دو الکتروود مؤثر باشد در خوردگی گالوانیکی نیز مؤثر است مانند رطوبت هوا و بالا بودن دما و...

➤ فاصله دو الکتروود

خوردگی گالوانیکی با فاصله دو فلز در محل اتصال نسبت دارد یعنی هرچه از فصل مشترک دو فلز دورتر شویم خوردگی و اثرات آن کاهش می‌یابد و در نزدیکی تماس، خوردگی شدیدتر می‌باشد.

➤ اثر سطح

یک فاکتور مهم دیگر در خوردگی گالوانیکی اثر سطح، یا نسبت سطح کاتد به سطح آند می‌باشد.

نسبت سطحی نامناسب، مشتمل بر کاتد بزرگ و آند کوچک است.

۱ >> سطح کاتدی

سطح آندی



برای یک مقدار معین جریان در پیل، دانسیته جریان برای الکتروود کوچک به مراتب بزرگ‌تر است تا دانسیته جریان برای الکتروود بزرگ‌تر. هرچه دانسته جریان در یک منطقه آندی بزرگ‌تر باشد سرعت خوردگی بیشتر است. خوردگی نواحی آندی ممکن است صد تا هزار برابر بیشتر از حالتی باشد که سطح آند یا کاتد برابرند.

### تشخیص خوردگی گالوانیکی

قبل از بحث در مورد راه‌های جلوگیری از خوردگی گالوانیکی، لازم است اول اطمینان حاصل شود که خوردگی گالوانیکی اتفاق افتاده است. برای رخ دادن خوردگی از این نوع، وجود شرایط سه گانه زیر معمولاً ضروری است. (۱) دو فلز غیر هم جنس از نظر الکتروشیمی باید وجود داشته باشند. (۲) این فلزات باید بطور الکتریکی با یکدیگر تماس داشته باشند. (۳) این فلزات باید در معرض یک الکترولیت قرار گرفته باشند. تمام این شرایط برای اینکه خوردگی از نوع گالوانیکی رخ بدهد، باید وجود داشته باشند. به عنوان مثال، ملاحظه می‌شود که فولاد زنگ نزن ۸-۱۸ (نوع 304:S 30400) در تماس الکتریکی با فولاد ضد زنگ 18-8MO (نوع 316: S31600) به سرعت خورده می‌شود. با مراجعه به جدول سری گالوانیکی می‌توان متوجه شد که خوردگی پیش آمده از نوع خوردگی گالوانیکی نمی‌باشد. بنابراین با جداسازی این دو فلز مقاومت خوردگی 18-8SS بهبود نمی‌یابد. همچنین در مثالی دیگر دیده می‌شود که یک قطعه آلومینیوم متصل به چدن که در روغن موتور قرار دارد به شدت مورد حمله قرار می‌گیرد. به دلیل آنکه روغن موتور و بیشتر مایعات ارگانیک الکترولیت نیستند بنابراین مشخص می‌شود که این خوردگی از نوع خوردگی گالوانیکی نمی‌باشد. در این مورد هم با جدا کردن دو فلز، مقاومت خوردگی آلومینیوم بهبود پیدا نمی‌کند. علاوه بر سه شرط گفته شده بالا در مورد شناخت خوردگی گالوانیک، جستجوی خوردگی موضعی نزدیک اتصالات بین دو فلز غیر هم جنس راه دیگری برای تشخیص بروز خوردگی از این نوع می‌باشد. خوردگی گالوانیکی معمولاً در نزدیک فلز کاتدی شده، شدت بیشتری دارد. در شکل مربوط به اتصال ورقه آهن با پرچ مسی دیده می‌شود که خوردگی ورقه آهن نزدیک پرچ‌های مسی، شدیدتر می‌باشد.

## روش جلوگیری از خوردگی گالوانیکی

برای جلوگیری از این خوردگی روش‌های مختلفی وجود دارد که گاهی یکی به تنهایی پاسخگو نمی‌باشد و باید دو یا سه نوع را با هم به کار برد.

✚ حتی‌الامکان سعی شود از دو فلز که در جدول سری الکتروشیمیایی فاصله کمتری نسبت به هم دارند استفاده شود.

✚ از نسبت سطحی نامطلوب، آند کوچک و کاتد بزرگ پرهیز شود. مخصوصاً در اتصالات

✚ از خاصیت عایق‌ها دو فلز غیرهمجنس استفاده شود.

✚ استفاده از پوشش‌ها مخصوصاً روی آند

✚ استفاده از ممانعت‌کننده‌ها

✚ در مورد موادی که در جدول گالوانیکی دور از یکدیگر می‌باشند از اتصالات پیچ و مهره پرهیزید. به دلیل کم شدن ضخامت مؤثر در مرحله پیچ‌سازی سعی شود از اتصال زرد جوش BRAZING استفاده شود.

✚ قسمت‌های آندی را طوری طراحی کنید که به سهولت قابل تعویض باشند یا آن‌ها را ضخیم‌تر انتخاب کنید تا عمر بیشتری داشته باشند.

✚ به اتصالات گالوانیکی، فلز سومی که نسبت به دو فلز قبلی آند باشد متصل نمائید. (آند فداشونده)

## ۳- خوردگی شیاری

اکثراً در شیارها و نواحی دیگری روی سطح فلز که حالت مرده SHELDED AREAS دارند و در معرض محیط خورنده قرار می‌گیرند خوردگی موضعی شدیدی اتفاق می‌افتد. این نوع خوردگی معمولاً همراه با حجم‌های کوچک محلول‌ها یا مایعات که در اثر وجود سوراخ سطوح واشرها، محل روی هم قرار گرفتن دو فلز LAPJOINIS، رسوبات سطحی و شیارهای زیرپیچ، مهره‌ها و میخ پرچ‌ها ساکن شده‌اند (حالت مرده) می‌باشد اتفاق می‌افتد به همین دلیل این نوع خوردگی، خوردگی شیاری یا لکه‌ای یا واشری نیز می‌گویند.

## عوامل مؤثر در خوردگی شیاری

عوامل مؤثر در این نوع خوردگی در جدول زیر خلاصه شده است:

پارامتر	افزایش پارامتر در مقاومت خوردگی
IC	کاهش می‌یابد دانسیتته جریان بحرانی آندی
W	افزایش می‌یابد پهنای شیاری
EP	افزایش می‌یابد پتانسیل غیرفعال شدن
Ea	کاهش می‌یابد پتانسیل فعال

### روش‌های جلوگیری از خوردگی شیاری

✚ برای اتصالات به جای پرچ‌کاری یا پیچ و مهره از جوشکاری با نفوذ کامل مذاب به داخل درزها استفاده شود.

✚ شیارها را در محل روی هم قرار گرفتن دو فلز با جوشکاری مداوم، کالک کردن CAULKING و یا لحیم‌کاری بپوشانید.

✚ از ته‌نشین شدن مواد و تجمع آن‌ها در کف تانک‌ها و مخازن جلوگیری شود.

✚ از ایجاد گوشه‌های تیز و نواحی مرده و ساکن در تجهیزات بپرهیزید.

✚ تجهیزات را مرتب بازرسی و تمیز نمود.

✚ حذف جامدات معلق در فرآیند کارخانه‌ها.

✚ در مرحله خوابیدن کارخانه، مواد جاذب رطوبت WET PACKING MATERIALS را حذف نمائید.

✚ در صورت امکان، محیط یکنواخت به وجود بیاورید.

✚ هر جا که ممکن باشد از واشرهای جامد که جاذب رطوبت نیستند NONABSORBENT مانند تفلون استفاده نمائید.

#### ۴- حفره‌دار شدن

حفره‌دار شدن نوعی خوردگی شدیداً موضعی است که باعث سوراخ شدن فلز می‌شود. این سوراخ‌ها ممکن است قطرهای مختلفی داشته باشند، اما در اکثر موارد قطر آن‌ها کوچک است. حفره‌ها گاهی مجزا بوده و گاهی آنقدر نزدیک هم هستند که سطح زبری به وجود می‌آورند. معمولاً در صورتی که قطر دهانه محل خورده شده تقریباً مساوی یا کمتر از عمق آن باشد شکل حاصل را حفره می‌نامند.

#### خصوصیات حفره‌ها

- ✚ حفره‌ها معمولاً در جهت نیروی جاذبه رشد می‌کنند اکثر حفره‌ها روی سطوح افقی به وجود آمده و به پائین رشد می‌کنند.
- ✚ دوره شروع INITIATION حفره‌دار شدن معمولاً طولانی است و بسته به فلز و محیط این دوره‌ها بین چندین ماه یا سال طول می‌کشد ولی پس از تشکیل به سرعت رشد می‌کنند.
- ✚ حفره‌ها موقع رشد تمایل به خالی کردن زیر سطح فلز UNDERCUT دارند و با سرعت دائماً افزایش‌دهی به داخل نفوذ می‌کنند.
- ✚ حفره‌دار شدن در اثر یک واکنش آندی منحصربفرد است. این نوع خوردگی اتوماتیک است. یعنی واکنش‌های خوردگی در داخل حفره شرایطی را به وجود می‌آورند که محرک ادامه خوردگی هستند.
- ✚ اکثر انهدام‌های ناشی از حفره‌دار شدن، در اثر کلرورها و یون‌های حاوی کلر می‌باشند. بنابراین در محیط‌های آبی و نمک‌دار و هیپوکلریت‌ها (مواد سفیدکننده) BLEACHES این نوع خوردگی زیاد می‌شود.
- ✚ حفره‌دار شدن معمولاً به همراه محیط خورنده در حالت ساکن و مرده مثل مایع درون یک تانک یا مایع جمع شده در یک قسمت غیرفعال سیستم لوله‌کشی اتفاق می‌افتد. افزایش سرعت حرکت محیط خورنده غالباً این نوع خوردگی را کاهش می‌دهد، مثلاً یک پمپ از جنس فولاد زنگ نزن که برای انتقال آب دریا به کار می‌رود. اگر دائماً کار کند، (از نظر خوردگی) عمر بیشتری خواهد داشت تا در حال توقف‌های طولانی مدت.
- ✚ چون حفره‌دار شدن، یک نوع خوردگی موضعی و متمرکز است آزمایشات معمولی

اندازه‌گیری تقلیل وزن را نمی‌توان برای ارزیابی یا حتی مقایسه در مورد آن به کار برد چون تقلیل وزن فلز خیلی کم بوده و عمق نفوذ را نشان نمی‌دهد. گرفتن عمق میانگین نیرو روش ضعیفی می‌باشد زیرا همواره عمیق‌ترین حفره است که باعث انهم می‌گردد. بنابراین مبنای اندازه‌گیری باید عمیق‌ترین حفره موجود باشد.

### مکانیزم خوردگی حفره‌ای

برای توضیح مکانیزم خوردگی حفره‌ای، می‌توان آن را در دو بخش اولیه یعنی شروع تشکیل حفره و بخش دوم که شامل فعالیت‌های اتوکاتالیتیک می‌باشد بررسی نمود.

### بخش اولیه: پیدایش حفره INITIATION

یک قطعه فلز M عاری از هر گونه سوراخ یا حفره را در نظر بگیرید که در داخل محلول کلرورسدیم اکسیژن‌دار فرو برده شده است. اگر به هر دلیلی سرعت انحلال فلز بطور لحظه‌ای در یک نقطه خاص بالاتر باشد یون‌های کلر به این نقطه مهاجرت می‌کنند. چون یوهای کلر انحلال فلز را تسریع می‌کنند، شرایط مساعدی برای خوردگی سریع‌تر فلز در آن نقطه فراهم می‌شود. سرعت انحلال ممکن است در اثر یک خراش سطحی یا یک نابجائی که به سطح رسیده است یا غیر یکنواختی ترکیب شیمیائی محلول یا نواقص دیگر بطور لحظه‌ای در یک نقطه افزایش یابد. واضح است که در مرحله شروع و مراحل اولیه رشد یک حفره، شرایط تا حدودی ناپایدار می‌باشد. غلظت موضعی و بالای یون‌های کلر و هیدروژن ممکن است در اثر نابجائی ناگهانی محلول از بین بروند، زیرا هنوز عمق حفره آنقدر نشده است که محلول موجود در آن ساکن شده و از جریان محلول اصلی در امان بماند.

### بخش دوم: خاصیت خودتکثیر حفره‌ها SELF STIMULATING SELF PROPAGATING

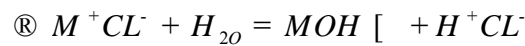
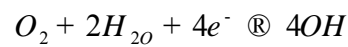
این پدیده پس از تشکیل حفره با عمق مناسب که موجب ساکن بودن سیال در آن شود شروع می‌شود. برای توضیح این بخش شکل ذیل را در نظر بگیرید. فلز M به وسیله محلول نمک طعام اکسیژن‌دار AERATED در معرض حفره‌دار شدن قرار دارد. انحلال سریع فلز در داخل حفره واقع شده در حالی که احیا اکسیژن روی سطح مجاور انجام می‌شود، این واکنش

خوردگی خود محرک و خود تکثیر می‌باشد. انحلال سریع فلز در داخل حفره باعث ایجاد بار مثبت اضافی در این ناحیه می‌شود که در نتیجه برای برقراری تعادل الکتریکی یون‌های کلر به داخل حفره مهاجرت می‌کند. بدین ترتیب در داخل حفره غلظت بالایی از MCL ایجاد می‌شود و در نتیجه هیدرولیز غلظت بالایی از  $H^+$  به وجود می‌آید.

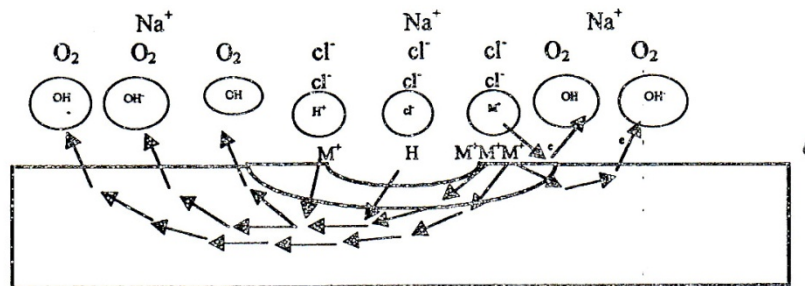


اکسیداسیون

احیاء



یون‌های هیدروژن و کلر باعث تسریع انحلال اکثر فلزات و آلیاژها می‌گردند و شتاب واکنش با گذشت زمان زیادتر می‌شود. چون قابلیت انحلال اکسیژن در محلول‌های غلیظ تقریباً صفر است، هیچ‌گونه واکنش کاتدی احیا اکسیژن در داخل حفره صورت نمی‌گیرد. واکنش کاتدی احیا اکسیژن روی سطح خارجی مجاور حفره باعث محافظت آن سطوح در مقابل خوردگی می‌شود، به عبارتی حفره‌ها بقیه سطح فلز را حفاظت کاتدی می‌کنند و به همین دلیل خوردگی حفره در جهت جاذبه زمین رشد می‌کند.



شکل ۳-۲: فرآیندهای اتومتیک در داخل یک حفره (شکل روی جلد)

## روش‌های جلوگیری از خوردگی حفره‌ای

- کلیه روش‌هایی که برای مبارزه با خوردگی شیاری ذکر گردید در این نوع خوردگی نیز مؤثر می‌باشد.
- استفاده از آلیاژهایی که در برابر حفره‌دار شدن بسیار مقاوم می‌باشند.

### این نوع آلیاژها عبارتند از:

الف: فولاد زنگ نزن نوع ۳۰۴

ب: فولاد زنگ نزن نوع ۳۱۶

ج: هستولی F، نیونل یا دوریمت ۲۰

د: هستولی C، یا کلریمت ۳

ه - تیتانیوم

نکته : افزودن ممانعت‌کننده باید با دقت خاصی صورت گیرد به چرکه اگر خوردگی کاملاً متوقف نگردد، حفره‌دار شدن تشدید می‌شود.

## ۵- خوردگی بین دانه‌ای

در مبحث متالورژیکی در رابطه با دانه‌ها (کریستال‌ها) و مرزدانه‌ها توضیحاتی داده شد. اگر یک فلز در یک شرایط خاص ناپایدار شده و در نتیجه خورده شود، چون مرزدانه‌ها معمولاً کمی فعال‌تر از خود دانه‌ها می‌باشند، بنابراین خوردگی یکنواخت به وجود می‌آید اما تحت بعضی شرایط، مرزدانه‌ها نسبت به دانه‌ها خیلی فعال‌تر می‌شوند و خوردگی بین دانه‌ای به وجود می‌آید. خوردگی موضعی و متمرکز در مرزدانه‌ها یا نواحی نزدیک به آن‌ها در حالی که خود دانه‌ها یا اصلاً خورده نشده‌اند یا کم خورده شده‌اند، خوردگی را بین دانه‌ای می‌نامند، که در این نوع خوردگی آلیاژ پودر می‌شود (دانه‌ها یا کریستال‌ها جدا می‌شوند) و یا استحکام خود را از دست می‌دهند.

## خصوصیات خوردگی بین‌دانه‌ای

- خوردگی بین‌دانه‌ای به وسیله ناخالصی‌های موجود در مرزدانه‌ها، غنی شدن یا فقیر شدن DEPLETION مرزدانه‌ها نسبت به یک عنصر آلیاژی در این نواحی واقع می‌شود. مثلاً فقیر شدن مرزدانه‌ها نسبت به کرم باعث خوردگی بین‌دانه‌ای فولادهای زنگ‌نزن می‌گردد.
- این پدیده در حالت‌های حساس شدن SENSITIZATION فلزات به وجود می‌آیند. مثلاً فولاد زنگ‌نزن ۱۸-۸ در محدوده‌ی  $950^{\circ}\text{F}$  تا  $450^{\circ}\text{F}$  اگر حرارت داده شوند حساس شده و مستعد خوردگی بین‌دانه‌ای می‌باشد.

## روش‌های جلوگیری از خوردگی بین‌دانه‌ای

به دلیل اینکه این خوردگی بیشتر در فولادهای زنگ‌نزن اتفاق می‌افتد، سه روش جلوگیری آن را در این مورد ذکر می‌کنیم:

- در درجه حرارت بالا فلز تحت عملیات حرارتی محلولی قرار داده شود و سپس در آب سریع سرد شود.
- اضافه کردن عناصری که تمایل شدیدی به واکنش و یکنواخت کردن آلیاژ دارند این عناصر را پایدارکننده‌ها STABILIZERS می‌نامند.
- تقلیل کربن فولاد به کمتر از  $0.03\%$  درصد تا کاربرد کافی برای به وجود آمدن خوردگی بین‌دانه‌ای به وجود نیاید. عملیات حرارتی محلولی در صنعت، مشتمل بر حرارت دادن در  $1050^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد تا  $1150^{\circ}\text{C}$  و سپس سرد کردن سریع در آب می‌باشد. در این درجه حرارت‌ها کاربرد کرم حل می‌شود و در نتیجه آلیاژ همگن‌تر و یکنواخت‌تر به دست می‌آید.

## ۶- جدایش انتخابی SELECTIVE LEACHING

جدایش انتخابی، جدا شدن یکی از عناصر آلیاژی از آلیاژ جامد در فرآیند خوردگی می‌باشد. مانند جدا شدن روی از آلیاژهای برنج که به زدایش روی DEZINCIFICATION معروف است. برنج زرد معمولی از تقریباً  $30\%$  درصد روی و  $70\%$  درصد مس تشکیل یافته است. زدایش روی را به سهولت با چشم غیرمسلح می‌توان تشخیص داد، زیرا آلیاژ قرمز رنگ مسی حاصل می‌شود که از رنگ زرد اصلی آلیاژ تمیز می‌باشد. دو نوع زدایش روی وجود دارد که به



سهولت قابل تشخیص هستند. نوع لایه‌ای یا یکنواخت و نوع موضعی PLUG TYPE در نوع لایه‌ای یک سری لایه داخلی که تیره‌تر از سایر نقاط می‌باشد مشخص می‌گردد، این همان قسمتی است که روی خود را از دست داده و لایه خارجی برنج زرد خورده نشده است. در نوع موضعی به صورت ناحیه تیره سوراخ‌هایی هستند که در آن محلول‌ها روی از دست رفته است و در سطح فلز پراکنده و مشخص می‌باشند که به صورت لکه‌لکه ظاهر می‌شوند. نوع لایه‌ای بیشتر در برنج‌هایی که درصد روی آن‌ها بالاتر است و در محیط‌های اسیدی اتفاق می‌افتد و نوع موضعی اغلب در برنج‌هایی که مقدار روی آن‌ها کم است و در شرایط خنثی، قلیائی یا کمی اسیدی قرار دارند اتفاق می‌افتد. در کل مکانیزم زدایش روی را می‌توان مشتعل بر سه مرحله دانست:

✚ انحلال برنج (بر اساس فعال بودن روی و نجیب بودن مس).

✚ باقیماندن روی در محلول

✚ راسب شدن مس روی سطح برنج

### گرافیته شدن

گاهی اوقات چدن خاکستری جدایش انتخابی از خود نشان می‌دهد مخصوصاً در محیط‌هایی که از نظر خوردگی نسبتاً متوسط می‌باشند، به نظر می‌رسد که سطح چدن گرافیته شده، زیرا سطح چدن ظاهر گرافیتی به خود گرفته و به سهولت می‌توان به وسیله قلم تراش آن را تراشید، به همین دلیل این پدیده را گرافیته شدن و گاهی خوردگی گرافیتی گویند که این نام‌گذاری غلط می‌باشد و در واقع جدایش انتخابی کربن از آلیاژ چدن می‌باشد.

### روش‌های جلوگیری از جدایش انتخابی

✚ کم کردن خوردگی محیط مثلاً حذف اکسیژن

✚ حفاظت کاتدی

✚ اضافه کردن فلزی دیگر به آلیاژ. مثلاً اضافه کردن ۱٪ درصد قلع به برنج ۳۰-۷۰

✚ استفاده از ممانعت‌کننده مانند افزودن مقادیر کمی آرسنیک و آنتیموان یا فسفر به آلیاژ

برنج

✚ برای محیط‌هایی بسیار خورنده که زدایش روی در آن‌ها اتفاق می‌افتد یا برای قطعاتی که از

- اهمیت بالائی برخوردارند و نباید به هیچ وجه خورده شوند از کوپرنیکل‌ها استفاده می‌کنند.
  - کوپرنیکل‌ها آلیاژ ۷۰٪ تا ۹۰٪ درصد مس و ۳۰٪ تا ۱۰٪ درصد نیکل می‌باشد.
- CUPRANICEL

## ۷- خوردگی سایشی

خوردگی سایشی عبارت است از سرعت یافتن یا افزایش سرعت خوردگی یا از بین رفتن یک فلز در اثر حرکت نسبی بین یک مایع خورنده و سطح فلز. معمولاً این حرکت خیلی سریع است و اثرات سایش مکانیکی و یا سائیده شدن وجود دارد. یون‌های فلزی حل شده روی سطح فلز در اثر حرکت روی سطح باقی نمی‌ماند، یا محصولات جامد حاصل از خوردگی از سطح فلز به طریق مکانیکی کنده می‌شوند. گاهی اوقات حرکت باعث تقلیل سرعت خوردگی می‌گردد. مخصوصاً موقعی که تحت شرایط ساکن خوردگی موضعی اتفاق بیافتد. اما این خوردگی سایشی نیست زیرا سرعت خوردگی افزایش نیافته است.

## خصوصیات خوردگی سایشی

- ✚ خوردگی سایشی دارای ظاهری شیاردار GULLIES، موجی شکل، سوراخ‌های کروی شکل و ناهموار می‌باشد که در جهت خاصی قرار گرفته‌اند.
- ✚ بیشتر در فلزاتی که سختی پائینی دارند و به سهولت صدمه می‌بینند مانند مس و سرب روی می‌دهد.
- ✚ کلیه تجهیزاتی که در تماس با مایعات متحرک می‌باشند در معرض خوردگی سایشی قرار دارند مانند سیستم‌های لوله‌کشی مخصوصاً زانوها ELBOW، پیچ‌ها BENS، سه راهی‌ها TESE، شیرها VALVES، پمپ‌های دمنده، دستگاه‌های گریز از مرکز، پروانه‌ها IMPELLERS، همزن‌ها AGITATORS، تانک‌های متحرک AGITATED، لوله‌های مبدل حرارتی مانند بویلرها و کندانسورها، پره‌های توربین، افشانه‌ها، دودکش‌ها، گیوتین‌ها GUTTERS، زره‌های آسیاب PLATES WEAR و تجهیزاتی که در معرض پاشیدن (SPRAY) قرار می‌گیرند.

## عوامل مؤثر بر خوردگی سایشی

### ✚ پوست‌های سطحی:

ماهیت و خواص پوسته‌های محافظ سطحی که روی بعضی فلزات و آلیاژها تشکیل

می‌گردد از نظر مقاومت در برابر خوردگی سایشی خیلی اهمیت دارد. برای مثال پوسته سطحی که سخت، متراکم، چسبنده و پیوسته باشد نسبت به موقعی که پوسته به سهولت سائیده و یا کنده شود حفاظت بهتری به وجود خواهد آورد.

اگر پوسته ترد باشد و تحت تنش ترک بخورد و خرد بشود دیگر محافظ نخواهد بود و محل مناسبی جهت خوردگی حفره‌ای می‌شود.

### سرعت حرکت:

سرعت حرکت در خوردگی سایشی نقش مهمی دارد. افزایش سرعت حرکت معمولاً باعث افزایش خوردگی می‌گردد. اثر سرعت ممکن است تا رسیدن به یک سرعت بحرانی، صفر یا کم باشد و به مجرد رسیدن به سرعت بحرانی به شدت افزایش یابد. معمولاً افزایش سرعت از یک تا چهار فوت بر ثانیه تأثیر کمی بر سرعت خوردگی دارد اما سرعت  $27\text{ FT/SEC}$  خوردگی شدیدی به وجود می‌آید که سرعت  $4\text{ FT/SEC}$  را سرعت بحرانی می‌نامند. برای مثال: برنز سیلیسیم در آب دریا با سرعت  $1\text{ FT/SEC}$  سرعت خوردگی آن  $1\text{ mdd}$  میلی‌گرم بر دسی مترمربع به روز می‌باشد و در سرعت  $4\text{ FT/SEC}$  به  $2\text{ mdd}$  و در سرعت  $27\text{ FT/SEC}$  به  $254\text{ mdd}$  می‌رسد. بنابراین سرعت  $4\text{ FT/SEC}$  سرعت بحرانی می‌باشد که در آن سرعت خوردگی کم است و پس از آن به شدت سرعت خوردگی زیاد می‌شود. لازم به ذکر است ذرات معلق در سیال نقش افزایش دهنده دارند. Miligram Per Square Decimeter/ Day

### تلاطم یا آشفتگی: TURBULANCE

آشفتگی جریان سیال در تماس با سطح فلزات، مخصوصاً در مدخل ورودی لوله‌ها، لبه‌های تیز، شیارها، رسوبات، تغییر سریع سطح مقطع به دلیل به هم زدن و تلاطم بیشتر مایع، نسبت به جریان آرام باعث افزایش خوردگی سایشی می‌شود.

### برخورد: IMPINGMENT

این پدیده اثر خود را در مواقعی بروز می‌دهد که تجهیزات بخواهند جهت حرکت سیال را تغییر بدهند برای مثال یک زانو که می‌خواهد سیال را از حالت عمودی به افقی و یا بالعکس

تغییر جهت دهد برخورد شدیدی در آن ناحیه ایجاد شده و باعث خوردگی در قسمت مزبور می‌شود.

مثال‌های دیگر پره‌های توربین بخار، جداکننده‌های تله‌ای اتصالات T در لوله‌کشی‌ها، اجزای خارجی هواپیماها و غیره...

### 🚩 کاربرد پوشش‌ها:

پوشش‌های سخت یا زره‌ها یا روکش‌های قابل تعویض، مشروط به اینکه از جنس مقاومی از نظر خوردگی ساخته شده باشند کاربرد مفیدی در خوردگی سایشی دارد.

## ۸- خوردگی توأم با تنش

در نتیجه اعمال همزمان تنش‌های کششی و محیط خورنده روی فلز که ایجاد ترک‌های پراکنده می‌کند و در نهایت باعث خوردگی آن‌ها می‌گردد توأم با تنش یا SCC ایجاد می‌شود. بنابراین ترک‌ها و شکل ترک‌ها CRACK MORPHOLOGY نقش اساسی را در این نوع خوردگی دارند.

### انواع ترک در خوردگی توأم با تنش

در SCC دو نوع ترک کلی دیده می‌شود:

#### 🚩 ترک‌های بین‌دانه‌ای INTERGRANULAR

که این نوع ترک‌ها در طور مرزدانه‌ها حرکت می‌کنند مانند SCC بین دانه‌ای برنج.

#### 🚩 ترک‌های میان دانه‌ای TRANSGRANULAR

این نوع ترک‌ها از داخل دانه‌ها عبور می‌کنند مانند: SCC میان دانه‌ای در فولاد زنگ نزن. غالباً در یک آلیاژ، هر دو نوع ترک ممکن است به وجود بیایند. نوع ترک بستگی به محیط خورنده و ساختمان فلز دارد. ترک خوردن معمولاً در جهت عمود بر تنش اعمال شده اتفاق می‌افتد و بسته به ساختمان فلز و ترکیب شیمیایی محیط خورنده شکل ترک‌ها می‌تواند به صورت چند شاخه‌ای و یا شاخه شاخه باشند.

## عوامل مؤثر در SCC

### ۱- اثرات تنش

افزایش تنش، زمان شکست را کاهش می‌دهد و برای هر آلیاژ تنشی وجود دارد که در کمتر از آن شکست اتفاق نخواهد افتاد. حد تنش مجاز برای مصونیت از نظر SCC بستگی به درجه حرارت، ترکیب شیمیایی فلز و ترکیب شیمیایی محیط دارد. بطور کلی حد تنش مجاز بین ۱۰٪ تا ۷۰٪ درصد تنش تسلیم است.

### ۲- زمان شکست

زمان در SCC پارامتر مهمی است، زیرا خسارت فیزیکی مهمی که در SCC اتفاق می‌افتد در مراحل نهایی صورت می‌گیرد. با نفوذ ترک‌ها به داخل فلز، سطح مقطع مؤثر فلز کم می‌شود و در نتیجه تنش افزایش می‌یابد و نهایتاً شکست نهایی، مکانیکی خواهد بود.

### ۳- فاکتورهای محیطی

در حال حاضر الگوی کلی برای محیط‌هایی که در آلیاژهای مختلف باعث ایجاد SCC می‌شوند وجود ندارد.

در SCC در بعضی محیط‌های آبی، نمک‌های مذاب، فلزات مذاب و مایعات معدنی فاقد آب اتفاق می‌افتد. وجود اکسیدکننده‌ها غالباً تاثیر زیادی بر تمایل به ترک خوردن دارد.

### ۴- فاکتورهای متالورژیکی

فاکتورهای مؤثر در SCC عبارتند از:

ترکیب شیمیایی متوسط، طرز قرار گرفتن کریستال‌ها (دانه‌ها)، ترکیب و توزیع رسوبات در داخل فلز، واکنش نابجائی‌ها با یکدیگر و میزان پیشروی حالت‌های فازی در آلیاژها. این فاکتورها به علاوه ترکیب شیمیایی محیط و تنش اعمال شده، زمان شکست را تعیین می‌کنند.

## روش‌های جلوگیری از SCC

- ✚ کم کردن تنش تا زیر حد مجاز، مثلاً با کم کردن بار روی فلز یا ضخیم‌تر کردن قطعه
- ✚ حذف اجزا و ناخالصی‌های مضر محیط، مانند دگازه کردن، دهنبراله کردن یا تقطیر نمودن.
- ✚ استفاده از آلیاژ مناسب، مثلاً استفاده از اینکونل که دارای مقدار نیکل بیشتر می‌باشد به جای فولاد زنگ نزن
- ✚ کاربرد حفاظت کاتدی، این مورد باید مواقعی به کار برده شود که مطمئن باشیم خوردگی در اثر SCC بوده است نه در اثر تردی هیدروژنی، زیرا در غیر این صورت حالت عکس دارد.
- ✚ اضافه کردن ممانعت‌کننده‌ها به سیستم در صورت امکان، در محیط‌های خورنده متوسط، فسفات‌ها و ممانعت‌کننده‌های آلی و معدنی دیگر بطور موفقیت‌آمیزی SCC را کاهش می‌دهند.
- ✚ ساچمه‌زنی (شات بلاست کردن) مثلاً فولاد زنگ نزن ۴۱۰ در معرض محلول ۳٪ نمک طعام در دمای محیط با نوع ۳۰۴ در معرض محلول ۴۲٪ کلرور منیزیم در  $150^{\circ}C$  و آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 در محلول  $K_2CR_4O_6 - CRO_3 - NAACL$  در دمای محیط
- ساچمه‌زنی یا شات بلاست کردن عبارت است از ایجاد یک لایه پوسته مناسب در شرایط خاص بر روی فلزات و آلیاژها و اینکونل (یکی از آلیاژهای نیکل) INCONEL است

## ۹- خسارت هیدروژنی

خسارت هیدروژنی یک اصطلاح کلی است که دلالت بر خسارت مکانیکی وارد شده به فلز در اثر واکنش با هیدروژن دارد.

خسارت هیدروژنی را به چهار گروه زیر تقسیم‌بندی می‌کنند:

### ✚ تاول زدن هیدروژنی HYDROGEN BLISTERING

ناشی از نفوذ هیدروژن به داخل فلز که در نتیجه تغییر شکل موضعی به صورت تاول روی فلز را منجر می‌شود تاول زدن هیدروژنی گویند که در موارد خاص باعث انهدام کلی فلز می‌شود.

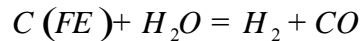
### ✚ تردی هیدروژنی HYDROGEN EMBRITTLE MENT

تردی هیدروژنی نیز در اثر نفوذ هیدروژن به داخل فلز است ولی نتیجه آن از دست دادن انعطاف‌پذیری فلز و استحکام آن می‌باشد. هیدروژن اتمی تنها عنصری است که

می تواند به درون فولاد یا فلز نفوذ کند.

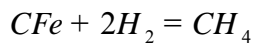
### DECARBURIZATION کردن دکربوره

دکربوره کردن یا از بین رفتن کربن فولاد، غالباً در اثر تماس هیدروژن مرطوب با فلز در درجه حرارت بالا می باشد در اثر دکربوره شدن استحکام کششی فولاد کم می شود.



### HYDROGEN ATTACK خوردگی هیدروژنی







منظور، واکنش بین هیدروژن و یکی از عناصر آلیاژی یا اجزا تشکیل دهنده فلز در درجه حرارت های بالایی باشد. مثال کلی درباره خوردگی هیدروژنی، تجزیه شدن و پوسیدن مس اکسیژن دار در حضور هیدروژن می باشد و یا خوردگی فولاد در اثر گاز متان ایجاد شده:



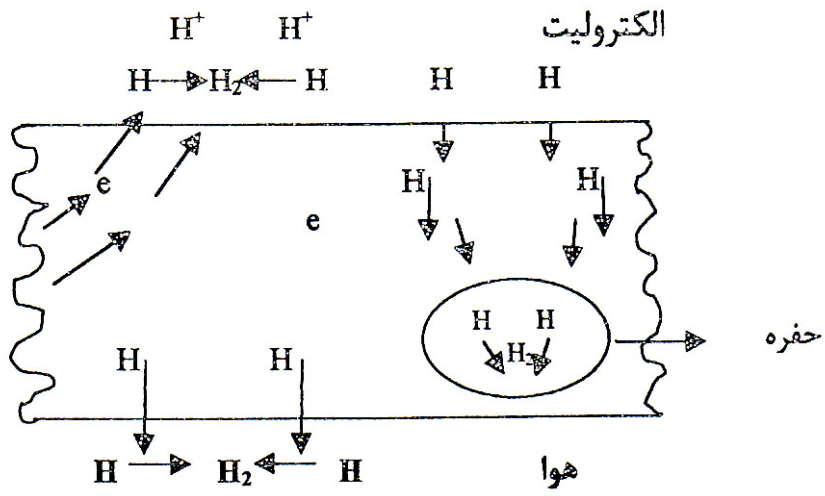
### مکانیزم تاول زدن هیدروژنی

به دلیل اینکه تاول زدن هیدروژنی بیشتر در صنایع نفت روی می دهد و خسارات زیادی به بار می آورد مکانیزم این پدیده و روش جلوگیری از آن را شرح می دهیم. در ذیل مقطع دیواره یک تانک که در داخل آن یک الکترولیت اسیدی و بیرون آن در معرض اتمسفر قرار دارد رسم گردیده است.

به ترتیب مراحل پیدایش تاول هیدروژنی را با توجه به شکل شرح می دهیم:

-  آزاد شدن هیدروژن روی سطح داخلی در اثر واکنش خوردگی یا حفاظت کاتدی.
-  عبور اتم های هیدروژن از دیواره تانک به بیرون و تشکیل ملکول هیدروژن در سطح خارجی.
-  نفوذ DIFFUSION اتم هیدروژن به درون دیواره تانک و به تله افتادن در حفره ها (نقص متداول در فولادهای قابی RIMMED STEEL)
-  تشکیل ملکول هیدروژن درون حفره ها
-  افزایش فشار درون حفره ها به دلیل خارج نشدن ملکول های هیدروژن و تجمع آن ها در حفره.
-  به دلیل اینکه فشار تعادلی هیدروژن ملکولی در تماس با هیدروژن اتمی چند صد هزار

اتسفر است باعث انهدام فلزات مهندسی می شود.



شکل ۳-۳: نمایش مکانیزم تاول زدن هیدروژنی



فصل چهارم  
روش‌های عمومی  
جلوگیری از خوردگی  
فلزات

## روش‌های جلوگیری از خوردگی فلزات

روش‌های کلی جلوگیری از خوردگی را می‌توان به هفت بخش مجزا بیان نمود:

- انتخاب مواد MATERIALS SELECTION
- تغییر محیط خورنده
- طراحی مناسب تجهیزات و ادوات DESIGN
- کاربرد ممانعت کننده‌ها INHIBITORS
- پوشش‌ها COATING
- حفاظت کاتدی CATHODIC PROTECTION
- حفاظت آنودی ANODIC PRETECTION

### انتخاب مواد

متداول‌ترین روش جلوگیری از خوردگی، انتخاب فلز یا آلیاژ مناسب برای کاربرد مورد نظر است که در این مورد ابتدای مبحث اصول خوردگی توضیحات لازم داده شده و خصوصیات فلزات دیگر ذکر گردید. در اینجا فقط این نکته را اشاره می‌کنیم که محیط تأثیر بسزایی در انتخاب مواد دارد و هر چند که تنوع مواد زیاد می‌باشد، اما باید با توجه به شرایط محیطی که ادوات و تجهیزات در آن قرار دارند فلز مناسب انتخاب شود. در ضمن قابل ذکر است که منظور از فولاد زنگ نزن که در مباحث گذشته به آن اشاره شد به معنای واقعی زنگ نزن نبوده، همچنین مقاوم‌ترین فلز در برابر خوردگی نیز نبوده و یک آلیاژ مشخص هم نیست. فولاد زنگ نزن یک اسم کلی است که به یک گروه بیش از سی نوع آلیاژ مختلف شامل ۱۱/۵ تا ۳۰ درصد کرم و صفر تا ۲۲ درصد نیکل به همراه عناصر آلیاژی دیگر اطلاق می‌شود. به عنوان مثال در محیط‌های حاوی کلرور و وجود تنش در فلز، فولادهای زنگ نزن از فولاد معمولی هم ضعیف‌تر هستند.

### تغییر محیط خورنده

تغییر محیط خورنده یک روش عمومی برای تقلیل خوردگی است. نمونه تغییراتی که غالباً به کار برده می‌شود عبارتند از:

کاهش درجه حرارت

تقلیل سرعت

خارج ساختن اکسیژن یا اکسید کننده‌ها

کم کردن غلظت

در بسیاری موارد این تغییرات به نحو مؤثری می‌تواند خوردگی را کم نماید، اما باید به احتیاط عمل شود، زیرا تأثیر این تغییرات بستگی به سیستم فلز - محیط خورنده دارد و چنانچه با احتیاط عمل نشود ممکن است اثر عکس داشته باشد.

## طراحی

طراحی یک سیستم غالباً به اندازه انتخاب مواد و مبارزه با خوردگی اهمیت دارد. در طراحی باید نیازهای مکانیکی و استحکام را به همراه سهم خوردگی در این رابطه در نظر گرفت. برای مثال نقش طراحی را در ضخامت دیواره تانک‌ها ذکر می‌کنیم، چون خوردگی باعث نازک شدن فلز می‌شود، لذا باید این مقدار نازک شدن را در طراحی لوله‌ها، تانک‌ها و قطعات دیگر در نظر گرفت. بطور کلی ضخامت دیواره را دو برابر ضخامت حداقل لازم می‌گیرند. مثلاً اگر برای یک تانک ۱۰ سال عمر در نظر گرفته می‌شود و سرعت خوردگی تانک در آن محیط حدود ۱۲MPY باشد، بنابراین تخمین عمق خوردگی در ۱۰ سال  $\frac{1}{8}$  اینچ است و در نتیجه ضخامت تانک را  $\frac{1}{4}$  اینچ می‌گیرند.

## قوانین طراحی

با توجه به شعار پیشگیری بهتر از درمان است، چنانچه قوانین طراحی را قبل از انجام پروژه‌ها رعایت نمائیم و ارتباط نزدیک بین طراحان و مهندسين خوردگی وجود داشته باشد و یا به عبارت دیگر به جای اینکه صبر کنیم تا تجهیزات موقع بهره‌برداری در اثر خوردگی از کار بیافتند خوردگی را در مرحله طراحی حذف کنیم. جهت آشنایی با قوانین طراحی در ذیل چند مورد بیان می‌شود:

به جای پرچکاری از جوشکاری استفاده کنید. اتصالات پرچی نقاطی برای خوردگی شیاری

هستند.

تاکها و محفظه‌های دیگر را طوری طراحی کنید که به سهولت قابل تخلیه و تمیز کردن باشند.

سیستم‌ها را طوری طراحی کنید که اجزائی که به سرعت خورده می‌شوند به سهولت قابل تعویض باشند.

از تنش‌های مکانیکی بالا و مراکز تنش در قطعاتی که در معرض محیط خورنده قرار دارند بپرهیزید.

حتی‌الامکان از تماس الکتریکی فلزات غیرهمجنس جلوگیری کنید تا خوردگی گالوانیکی به وجود نیاید.

در سیستم‌های لوله‌کشی از زانوها یا زاویه‌های تند بپرهیزید. پیچ‌های تند و جاهای دیگری که در آنها جهت سیال به سرعت عوض می‌شود باعث خوردگی سایشی می‌گردد.

برای شرایطی که سیال با فلز برخورد می‌کند ضخامت بیشتری از فلز در نظر بگیرید. دستورالعمل‌های بهره‌برداری و نگهداری را تعیین کنید. (مثلاً خواباندن‌های برنامه‌ریزی شده)

در صورت امکان موقعیت کارخانه یا تجهیزات را طوری انتخاب کنید که در مسیر حرکت باد ناشی از کارخانه یا اتمسفرهای آلوده قرار نداشته باشند.

در عملیات انتقال حرارت از نقاط گرم HOT SPOTS جلوگیری کنید.

موقع طراحی حذف هوا را در نظر داشته باشید، احیا اکسیژن یکی از مهمترین واکنش‌های کاتدی در خوردگی است و اگر اکسیژن حذف گردد غالباً خوردگی نیز کم می‌شود یا متوقف می‌گردد.

تاریخ تحویل تجهیزات را بطور واقع‌بینانه و به صورت برنامه‌ریزی شده تنظیم کنید.

در ارتباط با انتخاب مواد اطمینان حاصل کنید.

اطمینان حاصل کنید که تمام کدها و استانداردهای مربوطه رعایت شده‌اند.

## کاربرد ممانعت‌کننده‌ها

ممانعت‌کننده‌ها موادی هستند که وقتی به مقادیر کم به یک محیط خورنده اضافه شوند سرعت خوردگی را کم می‌کنند. در واقع ممانعت‌کننده را می‌توان یک کاتالیزور بازدارنده فرض کرد. ممانعت‌کننده‌های بسیار زیادی و با ترکیبات مختلف موجود می‌باشند. اکثر این مواد

با آزمایشات تجربی پیدا شده‌اند و بسیاری از آنها با نام‌های تجاری عرضه می‌گردند و ترکیب شیمیائی آنها مخفی نگاه داشته می‌شود. ممانعت‌کننده‌ها را برحسب مکانیزم به شرح ذیل تقسیم می‌کنند:

- ✚ ممانعت‌کننده‌های جذبی ADSORPTION
- ✚ سموم تصعید هیدروژن POISONS
- ✚ مواد حذف‌کننده عوامل مضر SCAVENGER
- ✚ مواد اکسیدکننده OXIDIZER
- ✚ ممانعت‌کننده‌های فاز بخار VAPOR PHASE INHIBITORS

### ممانعت‌کننده‌های جذبی

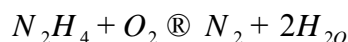
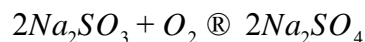
این مواد بزرگ‌ترین گروه ممانعت‌کننده‌ها هستند. بطور کلی این نوع ممانعت‌کننده‌ها ترکیبات آلی هستند که جذب سطح فلز شده و واکنش‌های انحلال فلز و احیا را کند می‌کنند. در اکثر موارد ممانعت‌کننده‌های جذبی بر هر دو فرآیند آندی و کاتدی تأثیر می‌گذارند، هر چند که در بعضی موارد این تأثیر یکسان نیست. آمین‌های آلی نمونه‌ای از این گروه می‌باشند.

### سموم تصعید هیدروژن

این مواد مثل یون‌های آرسنیک و آنتیموان، مانع از واکنش آزاد شدن هیدروژن می‌گردند. در نتیجه این گونه مواد در محلول‌های اسیدی خیلی مؤثر هستند ولی در محیط‌هایی که واکنش‌های کاتدی دیگری مثل احیا اکسیژن کنترل‌کننده است بی‌اثر می‌باشند.

### مواد حذف‌کننده عوامل مضر

این مواد عوامل خورنده را از محیط حذف می‌نمایند. مثال‌هایی از این نوع ممانعت‌کننده عبارتند از سولفیت سدیم و هیدرازین که طبق روابط زیر با اکسیژن حل شده در محیط ترکیب می‌شوند.



واضح است که این نوع ممانعت‌کننده‌ها در محلول‌هایی که احیا اکسیژن کنترل کننده است خیلی خوب عمل خواهند نمود و در محلول‌های اسیدی قوی مؤثر نخواهند بود.

### مواد اکسیدکننده

موادی مثل کرومات، نیترات و نمک‌های فریک نیز در بسیاری موارد به عنوان یک ممانعت کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند. بطور کلی این مواد برای جلوگیری از خوردگی فلزات و آلیاژهایی که انتقال فعال - غیرفعال از خود نشان می‌دهند، به کار برده می‌شود. مثل فولاد و آلیاژهای آن و فولادهای زنگ نزن.

### ممانعت کننده‌های فاز بخار

این ترکیبات خیلی شبیه ممانعت‌کننده‌های جذبی بوده و دارای فشار بخار خیلی بالایی می‌باشند در نتیجه از این مواد می‌توان بدون تماس مستقیم برای جلوگیری از خوردگی اتسمفیری فلزات استفاده نمود.

### غلظت ممانعت کننده‌ها

غلظت و نوع ممانعت‌کننده‌ای که در یک محیط خورنده مورد نظر باید استفاده شود، با آزمایش و به تجربه تعیین می‌گردد و این گونه اطلاعات را معمولاً از تولیدکنندگان آن مواد می‌توان دریافت نمود. در صورتی که غلظت ممانعت‌کننده‌ها کمتر از اندازه کافی باشد ممکن است خوردگی تسریع شود، مخصوصاً خوردگی‌های موضعی مثل حفره‌دار شدن. بنابراین در صورتی که غلظت ممانعت‌کننده کمتر از اندازه کافی باشد، خسارت بیش از موقعی خواهد بود که ممانعت‌کننده اصلاً به کار برده نشود. برای پرهیز از این خطر باید غلظت ممانعت‌کننده همواره بیش از مقدار مورد نیاز باشد و غلظت آن بطور متناوب تعیین گردد.

### اساس عملکرد ممانعت کننده

ممانعت‌کننده بر دو اصل کلی عمل می‌کند. گرچه نحوه واکنش و ترکیبات آن‌ها همان‌طور که قبلاً گفته شد آشکار نمی‌باشد.

- به وسیله جذب سطحی: مانند مانع از حفره‌دار شدن فولادهای زنگ نزن به وسیله جذب سطحی یون‌های غیرفعال کننده به سطح فلز و جایگزین شدن آن‌ها به جای CL.
- تشکیل یک فیلم محافظ روی سطح فلز و جدا کردن آن از محیط خورنده مانند حفاظت فولادی در برابر خوردگی به وسیله سولفید هیدروژن به خاطر ظهور فیلم‌های فازی شامل آهن و گوگرد.

### پوشش‌ها

بطور کلی موادی هستند که جهت ایجاد مانع بین محیط‌های خورنده و جسم مورد نظر به کار برده می‌شوند. پوشش‌ها با توجه به مکانیسم‌هایی که دارا می‌باشند چهار وظیفه اساسی را به عهده دارند.

- ✚ جلوگیری از تماس بین محیط و جسم مورد نظر، مانند آبکاری
- ✚ محدودیت تماس بین محیط و جسم مورد نظر مانند پوشش‌های آلی
- ✚ انتشار مواد و ایجاد شرایط حفاظتی یا کندکنندگی حملات بر روی جسم مورد نظر
- ✚ آسترهای کروماته
- ✚ تولید جریان الکتریکی حفاظت کننده مانند گالوانیزه کردن

پوشش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی نمود

- ✚ پوشش‌های معدنی
- ✚ پوشش‌های آلی

### پوشش‌های معدنی یا غیرآلی و فلزی

پوشش‌های نسبتاً نازک فلزی و یا مواد غیرآلی می‌تواند سد یا مانع مناسب بین فلز و محیط آن باشد. کار اصلی اینگونه پوشش‌ها (به جز پوشش‌های قربانی شونده ZN) به وجود آوردن سدی مؤثر بین فلز و محیط آن می‌باشد و باید مانع بطور کامل روی سطح فلز به وجود آید. تخلخل پوشش یا نواقص دیگر می‌تواند باعث خوردگی موضعی فلز زمینه، در اثر خوردگی گالوانیکی گردد. مثال‌هایی از اشیاء پوشش‌دار، سپرهای اتومبیل، زه‌های اتومبیل، وسایل خانگی، ظروف نقره‌ای، فولاد گالوانیزه و قوطی‌های مواد غذایی می‌باشند. وان‌های حمام و تانک‌های فولادی با

پوشش شیشه‌ای GLASSED مثال‌هایی از پوشش‌های سرامیکی می‌باشند.

### روش‌های پوشش فلزی و غیرآلی

- آبکاری الکتریکی ELECTRODEPOSITION
- پاشیدن مشعلی FLAMES PRAYING
- روکش کردن CLADDING
- غوطه‌وری گرم HOT DIPPING
- روش گازی VAPOR DEPOSITION
- روش نفوذی DIFFUSION
- تبدیل شیمیایی CHEMICAL CONVERSION

### آبکاری الکتریکی:

این روش مشتمل بر فرو بردن قطعه در داخل محلولی از فلز که باید پوشش داده شود و عبور جریان (DC) بین قطعه و یک الکتروود دیگر می‌باشد. عوامل مؤثر در آبکاری درجه حرارت، دانسیته جریان، زمان و ترکیب شیمیایی محلول می‌باشند که به وسیله تنظیم این متغیرها می‌توان ضخامت، تیره یا درخشان، نرم یا سخت، انعطاف‌پذیر و ترد بودن پوشش را کنترل نمود. آبکاری ممکن است چند لایه نیز باشد برای مثال: سپر اتومبیل دارای یک لایه داخلی مس (برای چسبندگی خوب)، یک لایه داخلی نیکل (برای حفاظت از خوردگی) و یک لایه نازک از کروم صرفاً به خاطر ظاهر می‌باشد. متداول‌ترین پوشش‌های آبکاری عبارتند از: روی نیکل، قلع، کادمیم، طلا، نقره و پلاتین.

### پاشیدن مشعلی

این فرآیند که متالیزه کردن نیز نامیده می‌شود مشتمل است بر هدایت سیم فلزی یا پودر فلزی از طریق یک مشعل که باعث ذوب آن می‌شود و به صورت ذرات ریز مذاب به سطح فلزی که باید پوشش داده شده پاشیده می‌شود. اکسیژن و استیلن یا پروپان به عنوان ایجاد شعله، و روی، قلع و سرب به عنوان پوشش استفاده می‌شوند. کاربردهای این روش عبارتند از: انواع تانک‌ها و مخازن، پل‌ها، بدنه کشتی‌ها و اسکلت داخلی آن‌ها (SUPER STRUCTUR) و



بسیاری از محصولات فولادی مانند فولاد زنگ نزن ۸-۱۸ توسط آلومینیوم در  $1580^{\circ}F$  درجه فارنهایت می‌باشد.

### روکش کردن

این روش مشتمل است بر پوشش دادن سطح فلز به وسیله نورد گرم دو ورق فلزی به یکدیگر. مثلاً با نورد گرم یک ورق فولادی و ورق نیکلی می‌توان یک ورق دوبله با ضخامت  $\frac{1}{8}$  اینچ نیکل و یک اینچ فولاد به وجود آورد. فلز روکش (نیکل) معمولاً نازک‌تر از فلز زمینه (فولاد) می‌باشد.

### روش غوطه‌وری گرم

با فرو بردن فلزات به داخل حمام مذاب فلز با نقطه ذوب پائین، عمدتاً روی، قلع، سرب و آلومینیوم که باید پوشش داده شود انجام می‌شود. این فرآیند یکی از روش‌های قدیمی پوشش دادن فلزات است. مانند فولاد گالوانیزه. در ضمن ضخامت پوشش خیلی بیشتر از حالت آبکاری الکتریکی است.

### روش گازی

این کار در یک محفظه با خلأ نسبتاً بالا انجام می‌شود. فلزی که باید پوشش باشد به وسیله جریان الکتریکی حرارت داده می‌شود و بخار حاصل از آن روی سطح قطعه‌ای که باید پوشش داده شود می‌نشیند. این روش گران‌تر و کاربرد آن محدود به قطعات بحرانی و خاصی نظیر قطعات راکت‌ها و موشک‌ها می‌باشد.

### روش نفوذی

این روش مشتمل است بر عملیات حرارتی برای به وجود آوردن آلیاژهای سطح در اثر نفوذ یک فلز به داخل فلز دیگر. به خاطر همین مورد این روش را آلیاژسازی سطحی SURFACE ALLOGING نیز می‌گویند. قطعاتی که باید پوشش داده شوند در مواد جامد مناسب با محیط گازی مناسب قرار می‌گیرند. گالوانیزه خشک SHERARDIZING (پوشش

روی)، "کرمایز کردن" CHROMIZING (پوشش کرم)، و آلونایز کردن ALONIZING (پوشش آلومینیوم) مثال‌هایی در این مورد می‌باشند. مثلاً با ایجاد یک لایه  $AL_2O_3$  روی فولاد زنگ نزن می‌توان آن را آلونایز کرد تا در برابر هوا و گازهای گوگردار در دماهای بالا (حدود  $1650^{\circ}F$ ) مقاوم باشند.

### تبدیل شیمیائی

در این روش با خورده شدن سطح فلز یک لایه‌ای از محصول خوردگی که محافظ باشد به وجود می‌آوردند مانند آندیزه کردن ANODIZING. آندیزه کردن مشتمل بر اکسیداسیون آندی در یک حمام اسیدی برای به وجود آوردن لایه اکسیدی. مانند آندیزه کردن آلومینیوم که روی آن پوسته محافظ  $AL_2O_3$  به وجود می‌آید. در ضمن چنانچه سطح آندیزه شده در معرض آب جوش قرار بگیرد به اصطلاح آب‌بندی می‌شود. مثال‌های دیگر باندریزه کردن BONDERIZING و پارکریزه کردن PARKERIZING (فسفات‌ه کردن در حمام اسید فسفریک)، کروماتیزه کردن CHROMATIZING (در معرض اسید کرومیک و دی کرومات‌ها قرار دادن) و پوشش‌های اکسیدی یا حرارتی روی فولادها می‌باشد. بدنه‌های اتومبیل بهترین مثال برای فسفات‌ه کردن PHOSPHATIZING می‌باشد.

### پوشش‌های آلی

پوشش‌های آلی مشتمل بر مانع نسبتاً نازکی بین فلز و محیط آن می‌باشند. رنگ‌ها PAINTS، حلال‌ها VARNISHES و لاک‌ها LACQUERS پوشش‌های آلی هستند که معمولاً برای سطوح خارجی فلزات به کار برده می‌شوند. این پوشش‌ها در محیط‌هایی که به سرعت فلز زمینه را می‌خورند نباید به کار برده شوند. مثلاً رنگ برای حفاظت فولاد در برابر اسید کلریدریک به کار نخواهد رفت. زیرا نواقص کوچک رنگ باعث سوراخ شدن سریع فلز می‌گردد. جدا از کاربرد صحیح، سه عامل اصلی برای پوشش‌های آلی، باید در نظر گرفت تا پوشش بطور مفید استفاده شود که عبارتند از:

➤ آماده کردن سطح فلز

- انتخاب آستر PRIMERS
- انتخاب صحیح لایه یا لایه‌های روی TOP-COAT

### آماده کردن سطح

اگر پوسته فلز به طور صحیح آماده نگردد، در اثر اتصال ضعیف ممکن است رنگ پوسته پوسته شود. آماده کردن سطح عبارت است از زبر کردن سطح برای به دست آوردن اتصال مکانیکی و همچنین تمیز کردن کثافات، زنگ پوسته اکسیدی، روغن، گریس، فلاکس‌های جوشکاری، علائم رنگی و نوشته‌های روی سطح فلز و ناخالصی‌های دیگر.

### روش‌های آماده کردن سطح

- ماسه پاشی SANDBLAST
- اسیدشوئی PICKLING
- کاردک زدن SCRAPING
- تراشیدن با اسکنه CHISELING OR CHIPPING
- برس زدن
- تمیز کردن به روش مشعله‌ای

### انتخاب آستر

آسترها شامل مواد رنگی ضد رنگ مثل کرومات روی و پودر روی می‌باشند که علاوه بر ایجاد یک مانع، شیارها و نواقص سطحی دیگر به وسیله آستر پر می‌شوند. قابلیت تر کردن WETTABILITY نیز باید وجود داشته باشد، زمان خشک شدن باید کوتاه باشد تا از آلوده شدن سطح قبل از اعمال لایه روی جلوگیری شود.

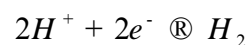
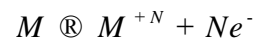
### انتخاب صحیح لایه‌روئی

انتخاب لایه‌روئی بسیار مهم است. باید قبل از رنگ‌کاری هدف مشخص باشد که رنگ‌کاری جهت حفظ ظاهر و زیبایی و یا محیط خورنده و یا هر دو می‌باشد و با توجه به آن رنگ را انتخاب نمود. ضخامت پوشش باید به اندازه‌ای باشد که تمام سطح فلز را بپوشاند. سعی شود که از

چند لایه روی هم استفاده شود و بهترین روش برای رنگ‌کاری روش پاشیدن به صورت گرم H<sub>2</sub>O-SPRAY می‌باشد تا به ضخامت یکسان و مناسب روی سطح فلز را بپوشاند.

### حفاظت کاتدی

اساس حفاظت کاتدی را می‌توان با در نظر گرفتن خوردگی فلز M در یک محیط اسیدی توضیح داد، همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد واکنش‌های الکتروشیمیایی انحلال فلز و آزاد شدن گاز هیدروژن است.



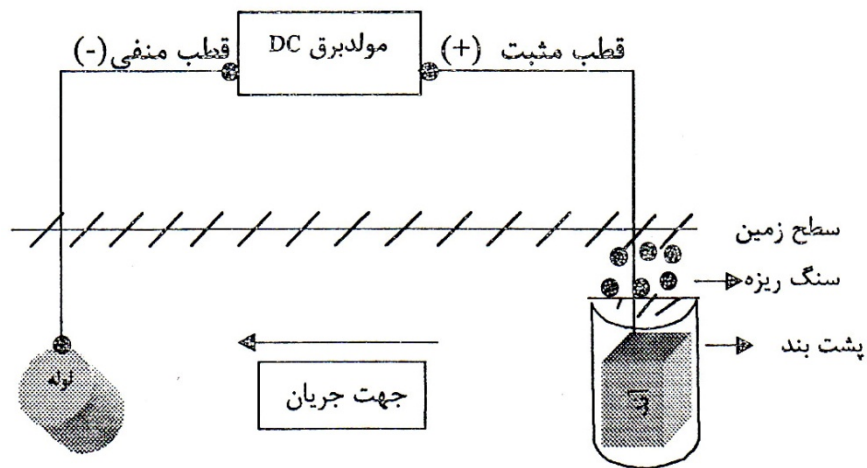
بنابراین با فراهم نمودن الکترون برای فلزی که باید محافظت شود حفاظت کاتدی انجام می‌شود. معادلات فوق نشان می‌دهد که با دادن الکترون به فلز، انحلال آن کاهش می‌یابد و تصعید هیدروژن انجام می‌شود. اگر فرض کنیم جریان از قطب مثبت به قطب منفی می‌رود، مطابق قرار دادن در قوانین الکتروسیسته اگر جریان از الکترولیت وارد سطح فلز گردد، باعث محافظت آن می‌شود. بر عکس اگر جریان از سطح فلز وارد الکترولیت گردد خوردگی شدید واقع می‌گردد. در تکنولوژی حفاظت کاتدی قرار دارد. جهت جریان از قطب مثبت به قطب منفی مفروض می‌باشد. بنابراین با فراهم نمودن الکترون برای فلزی که باید محافظت شود حفاظت کاتدی انجام می‌شود. معادلات فوق نشان می‌دهد که با دادن الکترون به فلز، انحلال آن کاهش می‌یابد و تصعید هیدروژن انجام می‌شود. اگر فرض کنیم جریان از قطب مثبت به قطب منفی می‌رود، مطابق قرارداد در قوانین الکتروسیسته اگر جریان از الکترولیت وارد سطح فلز گردد باعث محافظت آن می‌شود. برعکس اگر جریان از سطح فلز وارد الکترولیت گردد خوردگی شدید واقع می‌گردد. در تکنولوژی که حفاظت کاتدی قرار دارد، جهت جریان از قطب مثبت به قطب منفی مفروض می‌باشد.

## روش‌های حفاظت کاتدی

- به وسیله یک مولد برق مستقیم (DC)
- به وسیله ایجاد یک زوج گالوانیکی مناسب

### حفاظت کاتدی به روش مولد برق DC

این روش بیشتر برای ادوات زیرزمین مانند خطوط لوله گاز به کار برده می‌شود. مطابق شکل زیر قطب منفی مولد به لوله زیرزمین، که قرار است محافظت شود، وصل می‌گردد و قطب مثبت به یک آند خنثی مانند گرافیت، یادورآیرون DURIRON متصل می‌شود. محل اتصال کابل به تانک و الکتروود خنثی به دقت عایق می‌شود تا از نشت جریان جلوگیری شود. آند به وسیله پشت بند BACKFILL شامل پودر کک، گچ یا بنتونیت محصور شده است تا اتصال الکتریکی بین آند و زمین مجاور را بهبود بخشد. جریان از زمین (الکتروولیت) وارد سطح لوله می‌شود و بدین ترتیب باعث کاهش خوردگی خط لوله می‌شود.



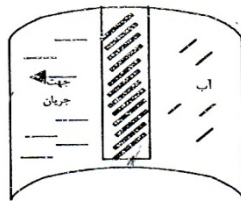
شکل ۴-۱ حفاظت کاتدی به وسیله یک مولد برق مستقیم (DC)

## حفاظت کاتدی به وسیله زوج گالوانیکی

این روش را با توجه به شکل زیر برای حفاظت تانک فولادی محتوی آب توضیح

می‌دهیم:

به دلیل اینکه منیزیم نسبت به فولاد آندی می‌باشد زوج گالوانیکی فولاد را منیزیم اختیار می‌کنیم. آند در این حالت نقش آند قربانی شونده SACRIFICIAL ANODE را دارد و به جای اینکه بدنه فولادی تانک خورده شود، منیزیم خورده می‌شود. از این روش در حفاظت لوله‌های زیرزمینی نیز می‌توان استفاده نمود. در این مورد آندهای فدا شونده با فواصل یکسان در طول خط لوله کار گذاشته می‌شوند و به وسیله یک سیم مسی پوشش‌دار به یکدیگر متصل می‌گردند تا توزیع جریان الکتریکی به سطح لوله برسد و از خوردگی آن جلوگیری می‌نماید.

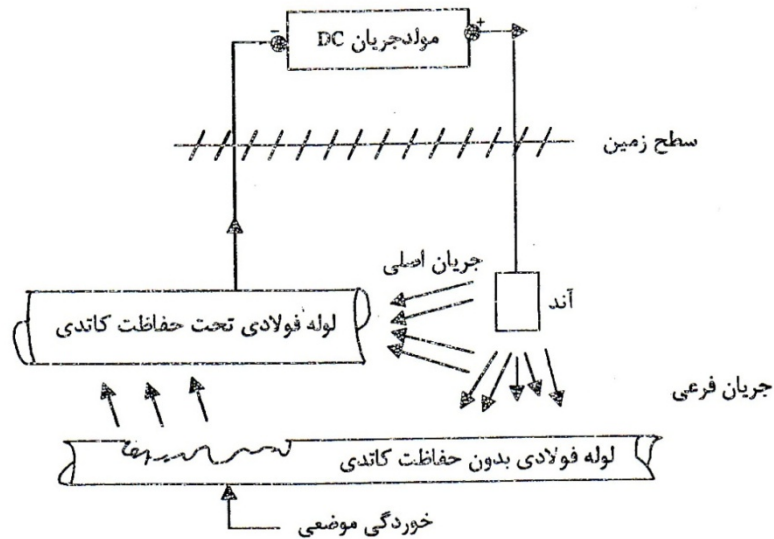


شکل ۴-۲ «حفاظت کاتدی تانک آب گرم خانگی به روش آند قربانی شونده»

## جریان‌های سرگردان STRAY - CURRENT در حفاظت کاتدی

اصطلاح جریان‌های سرگردان به جریان‌های مستقیم موجود در منطقه مورد نظر گفته می‌شود. چنانچه یک شیء فلزی در یک میدان جریان الکتریکی قرار بگیرد، اختلاف پتانسیل روی آن به وجود آمده و در نقاطی که جریان از سطح شیء وارد خاک می‌گردد خوردگی شدیدی ملاحظه می‌گردد. این مسئله مخصوصاً در حوزه‌های نفتی شلوغ و کمپلکس‌های صنعتی که دارای لوله‌های زیرزمینی بسیاری می‌باشند وجود دارد. برای درک بهتر جریان‌های سرگردان به شکل زیر توجه شود که در ارتباط با دو خط لوله متفاوت در زیرزمین می‌باشد و یکی از خطوط تحت حفاظت کاتدی قرار دارد و جریان‌های سرگردان ناشی از آن باعث خوردگی خط لوله مجاور

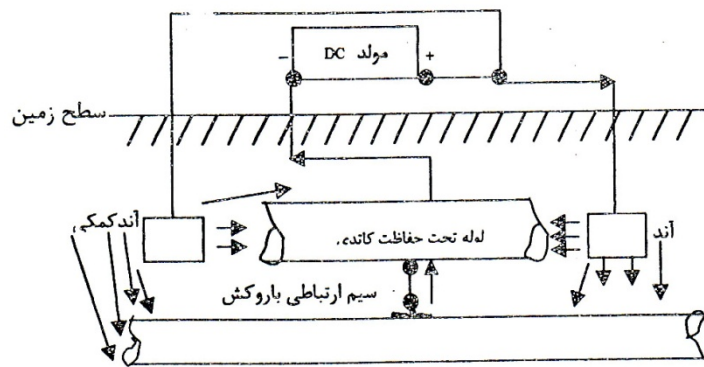
شده است. به دلیل اینکه خط لوله خورده شده جزء الکتروولیت و با مقاومتر کمتر از آن در نظر گرفته می‌شود و این اصل که همواره جریان از مسیر کم مقاومتر عبور می‌کند باعث خوردگی آن گردیده است.



شکل ۳-۴ جریان های سرگردان در حفاظت کاتدی

### کنترل جریان های سرگردان

جهت جلوگیری از خوردگی های ناشی از این جریانات می‌توان با متصل کردن کلیه خطوط مجاور به یکدیگر و استفاده از آندهای کمکی مطابق شکل زیر این خوردگی را کنترل نمود.



شکل ۴-۴ کنترل جریان های سرگردان خط لوله مجاور با یک سیم روکش دار مناسب با لوله حفاظت شد

### حفاظت آندی

این روش بر اساس اصول سینتیک (جنبشی) الکتروود و نظریه‌های مدرن تئوری الکتروشیمی می‌باشد به طور خلاصه حفاظت آندی بر اساس تشکیل یک پوسته سطحی محافظ روی فلزات با اعمال جریان‌های آندی می‌باشد. در حقیقت با اعمال جریان آندی به یک فلز باید سرعت انحلال بیشتر و سرعت آزاد شدن هیدروژن کاهش یابد ولی چنانچه بتوان فلزات چون نیکل، آهن، کرم، تیتانیوم و آلیاژهای آن‌ها را از حالت فعال به غیرفعال تبدیل کنیم (به وسیله جریان آندی) سرعت انحلال آن‌ها کاهش خواهد یافت. برای توضیح بیشتر شکل زیر را که حفاظت آندی یک تانک فولادی حاوی اسید سولفوریک را نشان می‌دهد، در نظر بگیرید. برای حفاظت آندی، دستگاهی به نام پتانسیواستات لازم است که یک دستگاه الکترونیکی است و وظیفه آن ثابت نگه داشتن پتانسیل فلزی که قرار است محافظت شود، نسبت به یک الکتروود مرجع، می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنید دستگاه پتانسیواستات سه ترمینال دارد یکی به تانک و دیگری به یک الکتروود کمکی به عنوان کاتد (پلاتین یا پوشش آن) و سومی به یک الکتروود مقایسه (کالومل) که همان الکتروود مرجع می‌باشد وصل می‌شود. در عمل پتانسیواستات، همواره پتانسیل ثابتی بین تانک و الکتروود مرجع برقرار می‌سازد که این پتانسیل قبلاً با اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی معین شده است.



## مکانیزم حفاظت آندی

برای توضیح حفاظت آندی شکل ۴-۵ را در نظر بگیرید:

فلز فعال - غیرفعال M در حالت فعال با سرعت ( $I_{CORR}$  (ACTIVE) در حال خورده شدن می‌باشد. در این مثال خاص تنها حالت فعال پایدار است و فلز نمی‌تواند غیرفعال شود مگر اینکه جریان سرعت خوردگی آن به غیرفعال ( $I_{CORR}$  (PASSIVE) تقلیل پیدا کند. محدوده پتانسیلی که در آن حفاظت آندی عملی است محدوده حفاظت نامیده می‌شود و مربوط است به منطقه غیرفعال که به وسیله دستگاه پتانسیواستات می‌توان این محدوده را ثابت نگه داشت. حال مراحلی را که در یک سیستم حفاظت آندی اتفاق می‌افتد بررسی می‌کنیم. شکل زیر را در نظر بگیرید. طبق تئوری پتانسیل مختلط، اصل خنثی بودن از نظر بار الکتریکی باید برقرار باشد. دانسیته جریان آندی اعمال شده باید مساوی اختلاف بین سرعت اکسیداسیون و احیا سیستم باشد، یعنی جریان آندی اعمال شده برابر خواهد بود با:

$$I (ANODIC) = I_{OXID} - I_{REDUCTION}$$

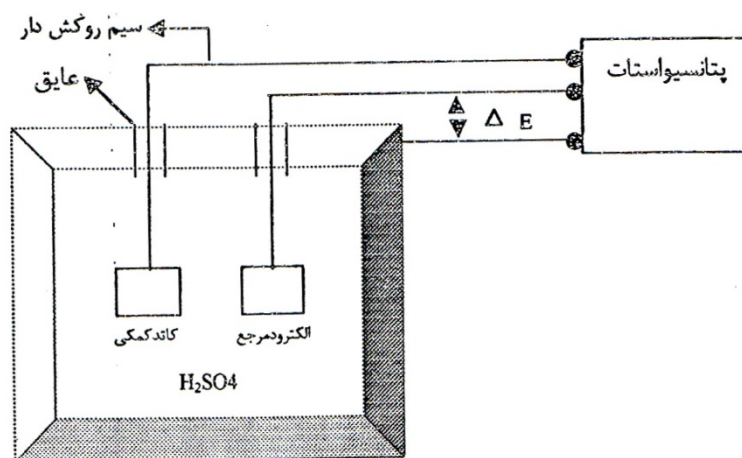
در شکل 4-5 دانسیته جریان اعمال شده با تغییر پتانسیل سیستم از  $E_{CORR}$  به  $E_4$  نشان داده شده است. در پتانسیل خوردگی، دانسیته جریان اعمال شده صفر است، چون  $I_{OXID} = I_{RED}$  و سرعت خوردگی ۱۰۰ میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. اگر پتانسیل را با پتانسیواستات به  $E_1$  افزایش دهیم، دانسیته جریان  $10^{-9}$  تا  $10^{-10}$  میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع باید اعمال شود و در  $E_2$  جریان اعمال شده باید  $10^{-10}$  میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع باشد، تا سیستم بتواند در این پتانسیل قرار گیرد. در حالی که در  $E_3$  مقدار جریان اعمال شده  $10^{-9}$  میکروآمپر به سانتی‌متر مربع است که برابر است با سرعت خوردگی در این پتانسیل. سیستم نشان داده شده در شکل را با اعمال جریان می‌توان به طریق کاتدی حفاظت نمود. دانسیته جریان کاتدی برابر است با اختلاف سرعت احیا و اکسیداسیون.

$$I_{APP} (CATHODIC) = I_{RED} - I_{OXID}$$

در رابطه فوق  $I_{APP}$ ، دانسیته جریان کاتدی اعمال شده می‌باشد و ناشی از اصل بقا بار

الکتریکی است.

حال با توجه به شکل اگر بخواهیم پتانسیل را به  $E_C$  برسانیم دانسیته جریان کاتدی اعمال شده باید  $10000$  « $1-10000$  میکرو بر سانتی متر مربع باشد. بنابراین دانسیته جریان کاتدی  $1000$  و دانسیته جریان آندی یک میکروآمپر بر سانتی متر مربع نتیجه یکسانی به بار خواهند آورد. این مقایسه نشان می‌دهد که در محلول‌های اسیدی حفاظت آندی خیلی مؤثرتر از حفاظت کاتدی است.



«شکل ۴-۵: حفاظت آندی تانک فولادی در برابر  $H_2SO_4$ »

### مقایسه حفاظت کاتدی با آندی

- ✚ قابلیت کاربرد حفاظت آندی بیشتر برای فلزاتی می‌باشد که خاصیت فعال به غیرفعال داشتن را دار باشند ولی حفاظت کاتدی برای تمام فلزات کاربرد دارد.
- ✚ حفاظت آندی برای کلیه محیط‌های خوردنده ضعیف تا قوی کاربرد دارد، ولی حفاظت کاتدی برای ضعیف تا متوسط کاربرد دارد.

- هزینه مالی نصب حفاظت آندی خیلی بالاتر از حفاظت کاتدی می‌باشد.
- قدرت پرتاب THROWING POWER در حفاظت آندی خیلی بالا ولی در حفاظت کاتدی پائین می‌باشد. یعنی در حفاظت کاتدی برای برقراری جریان یکنواخت احتیاج به الکترودهای متعدد در فواصل نزدیک به یکدیگر می‌باشد، در صورتی که در حفاظت آندی یک الکتروود کمکی به تنهائی می‌تواند یک خط لوله طویل را محافظت نماید.
- در حفاظت آندی جریان کم در حد میکروآمپر نیاز می‌باشد.
- در حفاظت آندی علاوه بر حفاظت، این روش به عنوان یک روش اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای خوردگی نیز کاربرد دارد.
- حفاظت آندی باعث می‌شود سرعت خوردگی به سرعت کاهش یابد و در بعضی از سیستم‌ها ۱۰۰/۰۰۰ برابر سرعت خوردگی را کاهش می‌دهد.

## فصل پنجم

خوردگی در صنایع نفت و گاز

و

روش‌های رایج پایش آن

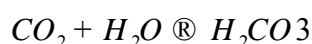
## خوردگی در تأسیسات نفت و گاز

تا اینجا خوردگی را بطور کلی بیان نمودیم و با اصول و انواع و روش‌های جلوگیری از آن آشنایی پیدا کردیم. خوردگی در کلیه محیط‌ها بسته به شرایط وجود دارد و کلیه صنایع با این مشکل روبرو می‌باشند. یکی از صنایع که دارای محیط‌های خورنده فراوان می‌باشد صنعت نفت است، که دارای ویژگی‌های خاصی می‌باشد که مهمترین آن‌ها شرح داده می‌شود:

### ویژگی‌های محیط‌های خورنده در صنعت نفت و گاز

#### ۱- خوردگی توسط گاز خورنده دی‌اکسید کربن $CO_2$

خوردگی شیرین در حضور  $CO_2$  و آب در جایی که  $H_2S$  وجود نداشته باشد اتفاق می‌افتد. این نوع خوردگی می‌تواند در خطوط لوله نفت یا گاز رخ بدهد و معمولاً حفره‌های عمیقی ایجاد می‌نماید. بدون آب  $CO_2$  خورنده نمی‌باشد. این گاز در آب حل شده و اسید کربنیک ایجاد می‌نماید که موجب کاهش PH آب که کاملاً بر فولاد اثر خوردگی دارد، می‌گردد. مقدار پ - هاش به دست آمده از محلول  $CO_2$  در آب مقایسه با مقادیر پ - هاش حاصل از محلول‌های اسیدی بسیار خورنده‌تر می‌باشد، این امر به آن علت است که در مورد اسیدهای قوی مقدار PH فقط غلظت یون هیدروژن واقعی که با مقدار کل اسید مطابقت می‌کند نشان می‌دهد، اما در اسید کربنیک ضعیف، فقط بخشی از یک مقدار به مراتب بزرگ‌تر تجزیه می‌شود. واکنش اساسی محتمل در این رابطه به صورت زیر می‌باشد:



همان‌طور که گفته شد اسید کربنیک تشکیل شده به مقدار ناچیز در آب تجزیه‌پذیر است و وقتی بر آهن اثر می‌گذارد، محصول، خوردگی تشکیل می‌دهد. بی‌کربنات (در آب محلول) و کربنات (در آب بسیار کم محلول)، در مواردی به همان اندازه که فشار دی‌اکسید کربن در جریان

گاز بالا می‌رود، مقدار خوردگی افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل کاهش PH محیط، تسهیل فرآیند کاتدی از الکتروشیمی خوردگی اسید کربنیک، پیشرفت دی پلاریزاسیون ئیدروژن و نهایتاً افزایش حلالیت فیلم محافظ و به همان نسبت کاهش رسوب فیلم کربنات از آب می‌باشد. خوردگی معمولی سطح به وسیله  $CO_2$  معمولاً به صورت حملات موضعی شدید (PIII ING) و با حملات بر قسمتی از سطح (PARTIAL SURFACE ATTACK) رخ می‌دهد. حملات خوردگی اغلب به شکلی است که به آن MCSA TYPIC گفته می‌شود. در این حالت قسمتی از سطح، که به دلیل اثرات سائیدگی ماسه و یا تلاطم جریان محافظت نشده باشد، دائماً در معرض محیط خورنده قرار می‌گیرد. نواحی خورده شده در بعضی از مواقع ظاهر متالیک (METALIC APPERARNCE) دارد در حالی که سطح باقیمانده می‌تواند توسط یک لایه محافظ از کربنات آهن پوشیده شده باشد در حقیقت این حالت، اغلب در جایی که توربولنی زیادی وجود داشته باشد آشکار می‌گردد. در سیستم‌های گازی شدت خوردگی ناشی از  $CO_2$  به چند فاکتور بستگی دارد، مهمترین آن‌ها درصد  $CO_2$ ، فشار، دما، سرعت گاز و ترکیبات آب می‌باشد، با افزایش دما تا ۵۵۳ درجه کلوین فعالیت خوردگی در سیستم شیرین افزایش می‌یابد. در دمای بیشتر از آن به دلیل کاهش حلالیت  $CO_2$  در فاز آب خوردگی نیز کاهش می‌یابد. با افزایش فشار، بیشترین مقدار خوردگی در دمای بالاتر به دست می‌آید. در سیستم‌های نفتی به نظر می‌رسد، نسبت آب به نفت یک عامل مؤثر اولیه و از جمله شرایط مساعد برای بروز این نوع خوردگی می‌باشد. نسبت نفت - آب را که خوردگی ممکن است در آن شروع شود دقیقاً نمی‌توان تعریف نمود ولی تجربیات عملیاتی نشان داده است که وقتی آب بیش از ۵۰ درصد یا بیشتر باشد ممکن است خوردگی یک مشکل اساسی بشود بطوری که در این حالت نفت تولیدی نمی‌تواند یک فیلم محافظ روی سطح فلز ایجاد نماید. از طرف دیگر مواردی وجود داشته که به رغم مشاهده آب آزاد ناچیز در جداکننده‌ها و وجود امولسیون فشرده با تقریباً یک درصد آب، مقدار خوردگی اندازه‌گیری شده در آسیب‌های پیش آمده بیش از ۴۰۰ هزارم اینچ در سال بوده است.

## ۲- خوردگی توسط مایعات خورنده مخازن نفتی

خوردگی می‌تواند همچنین بدون فشار جزئی قابل توجه  $CO_2$  به وسیله تولید مایعات

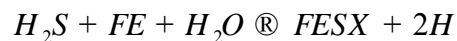
خورنده مخزن رخ بدهد. آب مخزن می‌تواند با انحلال مقادیر زیادی  $CaCl_2, MgCl_2$  در دمای مخزن به ۲PH یا کمتر برسد همچنین اسیدهای ارگانیک از مواد خارجی مخزن و  $H_2S$  تولید شده توسط میکروارگانیزم‌های موجود در آب مخزن می‌تواند موجب حمله به سطح فولاد گردند.

### ۳- خوردگی توسط گاز خورنده سولفید هیدروژن $H_2S$

این نوع خوردگی فقط در حضور آب و سولفید هیدروژن رخ می‌دهد و بدون حضور آب شروع نخواهد شد. بیشتر در تجهیزات چاه‌ها، خطوط لوله جمع‌آوری و تجهیزات فرآیندی کارخانجات با آن مواجه می‌شویم و در خطوط اصلی انتقال گاز و تجهیزات مربوط به آن که حضور بخار آب و سولفید هیدروژن شدیداً کنترل می‌شود این نوع خوردگی دیده نمی‌شود. ضایعات ناشی از این نوع خوردگی غالباً به صورت خوردگی عمومی، خوردگی حفره‌ای، SCC, HSC, دیده می‌شود که در زیر دو نوع از این ضایعات که می‌تواند با ضایعات اخیر خوردگی خطوط لوله جریانی چاه‌ها مورد مقایسه قرار گیرد تشریح شده است.

#### ➤ خوردگی عمومی

به صورت خلاصه مکانیزم این نوع خوردگی را در واکنش زیر می‌توان نشان داد، اگر چه به طور کامل توسط این واکنش توضیح داده نمی‌شود.



این نوع خوردگی بطور یکسان در سراسر سطح فلز در معرض محیط خورنده رخ می‌دهد. در مواقعی که تولید آب کم باشد خوردگی عمومی کاملاً ملایم بوده و به آسانی توسط مواد کند کننده خوردگی کنترل می‌شود. گفته می‌شود که سولفید آهن که به صورت یک پودر سیاه یا رسوب تشکیل می‌شود از حملات بیشتر فلز را محافظت می‌نماید. به شرط اینکه فیلم سولفید تشکیل شده تداوم داشته باشد.

#### ➤ خوردگی از نوع حفره‌ایی

در صورتی که فیلم سولفید آهن تشکیل شده بر روی سطح فلز ناشی از واکنش بالا، ترک بخورد یا قسمتی از آن برداشته شود، قسمت بدون حفاظت فلز به صورت ناحیه آندیک

نسبت به سایر قسمت‌های دارای پوشش خواهد شد. این شرایط آندیک سطح فلز لخت را برای خوردگی شدیدی از نوع حفره‌ای مساعد می‌نماید. به این نوع خوردگی موضعی که ناشی از  $H_2S$  (BARNACI,E-TYPE) گفته می‌شود که برخلاف نوع خوردگی حفره‌ای ناشی از  $CO_2$  (MESA-TYPE) و سایر اشکال خوردگی‌های موضعی می‌باشد.

**بطور کلی خوردگی در صنعت نفت را می‌توان به سه بخش کلی تقسیم نمود:**

تولید

حمل و نقل و نگهداری

عملیات پالایش

**تولید**

میادین نفتی و گازی مقادیر عظیمی لوله، جداره فلزی داخلی چاه CASINGS پمپ، شیرها، میله‌های مکنده فولادی و چدنی الکتروموتورها و ادوات دیگر مصرف می‌نمایند. وجود نشت باعث از بین رفتن نفت و گاز و آلودگی محیط‌زیست می‌شود. یکی از مهمترین بخش تولید در صنعت نفت انواع چاه‌های نفتی، گازی و تزریقی می‌باشند که به دلیل موارد ذیل مستعد خوردگی می‌باشند.

عمق بیشتر از ۵۰۰۰ فوت

درجه حرارت مدخل پائینی بالای  $160^{\circ}F$  درجه فارنهایت

فشار بالا حدود  $1500^{PSI}$  پوند بر اینچ مربع

فشار جزئی دی‌اکسید کربن بالای ۱۵ پوند بر اینچ مربع

PH اسیدی قسمت بالای چاه (کمتر از ۵/۴)

وجود درصد زیادی هیدروژن سولفور  $H_2S$ ، آب و منواکسید کربن CO مخصوصاً

در چاه‌های نفتی و گازی ترش SOUR OLL WELLS

وجود ذرات جامد معلق مانده‌شده و ماسه SAND در نفت و یا گازه چاه‌ها



## مشخص نمودن نوع و میزان خوردگی در چاه‌ها (WELLS)

- ✚ بازرسی و کیفیت خوردگی تجهیزات زمینی
- ✚ آنالیز دی‌اکسید کربن، اسیدهای آلی و آهن
- ✚ نمونه‌های آزمایشی قرار داده شده در محیط
- ✚ نازک شدن و تغییر قطر لوله‌ها و تعیین آهن خورده شده که این مورد در مشخص نمودن درجه مؤثر بودن ممانعت کننده‌هانیز کاربرد دارد.

## جلوگیری از خوردگی چاه‌ها

- ✚ استفاده از ادواتی که به راحتی قابل تعویض باشند مانند TUBING در درون لوله‌های جداری
  - ✚ تزریق ممانعت کننده‌های آلی
  - ✚ استفاده از فولادهای آلیاژ به جای فولادهای منگنزدار با کربن متوسط
  - ✚ پوشش دادن لوله‌ها به وسیله فنولیک‌های پخته شده و رزین‌های اپوکسی
- یکی دیگر از مهم‌ترین محیط‌های خورنده در بخش تولید صنعت نفت سکوه‌های حفاری در دریا OFF SHORE DRILLING می‌باشند. حفاری در دریا، مسائل خوردگی قابل توجهی به بار می‌آورد. سکوه‌های حفاری به وسیله ستون‌های فلزی که در کف اقیانوس فرو برده شده‌اند نگهداری می‌شوند. هر ستون به وسیله یک جداره لوله برای حفاظت در بر گرفته می‌شود. آب دریا حدود  $\frac{3}{4}$  درصد نمک دارد و  $PH=8$  یعنی محیط اندکی قلیائی، بنابراین الکترولیت خوبی بوده و باعث خوردگی گالوانیکی و شیاری می‌گردد.

## روش‌های جلوگیری از خوردگی سکوه‌های حفاری دریا

- ✚ افزودن ممانعت کننده‌ها به آب دریا ساکن بین ستون‌ها و جداره لوله‌ها
- ✚ حفاظت کاتدی، با آندهای قربانی شونده یا با جریان خارجی اسکلتهای فلزی زیر آب.
- ✚ رنگ‌ها و پوشش‌های دیگر برای حفاظت آن قسمت از اسلکت فلزی که در منطقه متلاطم SPLASH ZONE آب قرار دارد.
- ✚ کاربرد روکش مونل در منطقه سطح آب برای جداره خارجی چاه (این قسمت مستعدترین محل برای خوردگی است).

مونل: MONEL از آلیاژهای نیکل می‌باشد.

### منطقه متلاطم SPLASH ZONE

بیشترین خوردگی در سطح آب، یا منطقه متلاطم اتفاق می‌افتد. زیرا در این منطقه، تر و خشک کردن مکرر صورت می‌گیرد و همچنین تماس با هوا وجود دارد. در مناطقی که آب محبوس شده و ساکن می‌ماند سرعت خوردگی و حفره‌دار شدن فلزات و آلیاژها بیشتر می‌باشد.

### حمل و نقل و نگهداری

مواد نفتی به وسیله تانکرها، خطوط لوله، تانکرهای قطار و کشتی حمل و نقل می‌شوند. قسمت‌های بیرونی تانک‌ها یا لوله‌های زیرزمینی به وسیله پوشش مناسب و حفاظت کاتدی محافظت می‌گردند. حفاظت کاتدی همچنین برای قسمت‌های داخلی تانک‌ها استفاده می‌گردد. تانکرهای حمل بنزین نسبت به تانکرهای نفتی مسائل خوردگی بیشتری دارند، زیرا بنزین سطح فلز را خیلی تمیز نگه می‌دارد. نفت یک پوسته نازک روی سطح فلز باقی می‌گذارد که تا حدودی آن را محافظت می‌کند. قسمت‌های بیرونی تانکرها و کشتی حمل و نقل برای جلوگیری از خوردگی اتمسفری پوشش داده می‌شوند.

خوردگی تانکرهای نگهداری و ذخیره، در اثر آبی است که ته‌نشین می‌گردد. لذا برای محافظت تانک از پوشش و حفاظت کاتدی استفاده می‌شود. کرومات سدیم قلیائی (یا نیترات سدیم) ممانعت‌کننده مؤثری برای مخازن نفتی خانگی است. خوردگی داخلی خطوط لوله را با پوشش و ممانعت‌کننده‌ها کنترل می‌کنند.

### عملیات پالایش (تصفیه)

اکثر مسائل خوردگی در پالایشگاه‌ها در اثر مواد معدنی مثل آب  $H_2S$ ،  $CO_2$ ، اسید سولفوریک و کلرور سدیم به وجود می‌آید. مواد خورنده در عملیات تصفیه را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم نمود:

➤ آن‌هائی که در نفت خام وجود دارند.

➤ آن‌هائی که به همراه فرآیند یا کنترل وجود دارند.

**مواد خورنده‌ای که در نفت خام وجود دارند:**

### دی‌اکسید کربن $CO_2$

این ماده مخصوصاً در چاه‌های گازی موجود می‌باشد و اثر خوردگی قابل ملاحظه‌ای تولید می‌کند.

### آب نمک‌دار

آب نمک‌دار در اکثر چاه‌ها وجود دارد. این نمک‌ها عبارتند از:

کلرور کلسیم، کلرور منیزیم و کلرور سدیم، که به وسیله عملیات نمکزدائی از قبیل شستشو و ته‌نشین کردن، افزودن مواد شیمیائی مثل سولفانات‌ها برای ته‌نشین کردن، سانتریفوژ کردن در مراحل اولیه از نفت جدا می‌شوند ولی کامل نبوده و همواره مقداری به پالایشگاه‌ها همراه نفت ارسال می‌شود که تولید اسید نموده و مسائل خوردگی را پیش می‌آورند.

### سولفور – هیدروژن، مرکاپتان‌ها MERCAPTANS

در نفت خام و گاز سولفور هیدروژن، مرکاپتان‌ها و ترکیبات سولفیدی دیگر وجود دارد که طی فرآیند پالایش به وسیله هیدروکسید سدیم، آب آهک، اکسید آهن یا کربنات سدیم آن‌ها را خارج می‌کنند، اما غالباً به دلایل مختلف این کار را در مراحل نهائی انجام می‌دهند که منجر به مسائل خوردگی در هنگام عملیات پالایش می‌شوند.

**مواد خورنده‌ای که همراه فرآیند وارد می‌شوند:**

### نیتروژن $N_2$

در بعضی نفت‌های خام نیتروژن وجود دارد اما منبع مهم نیتروژن هوا است. مقادیر زیادی هوا در بعضی عملیات برای سوخت استفاده می‌گردد در بعضی شرایط حضور نیتروژن، آمونیاک و سیانیدها را تشکیل می‌دهند. آمونیاک باعث صدمه زدن به لوله‌های مبدل‌های

حرارتی که از آلیاژهای مسی هستند می‌شود و سیانیدها فاکتور مهمی در نفوذ هیدروژن به داخل فولاد می‌باشند.

### اکسیژن $O_2$

در هنگام خالی بودن تانکر و خطوط لوله و دیگر تجهیزات و همچنین از طریق پمپ‌ها و یا در نتیجه واکنش بین ترکیبات دیگر مثل آب و دی‌اکسید کربن اکسیژن وارد سیستم می‌شود و به واسطه خاصیت اکسیدکنندگی مسائل خوردگی را پیش می‌آورد.

### اسید سولفوریک $H_2SO_4$

در عملیات پالایشگاه‌ها مانند الکیلاسیون ALKYLATION و پلیمریزاسیون مقدار زیادی اسید سولفوریک مصرف می‌شود. ویژگی‌های خوردگی اسید آلوده شده ممکن است تغییر کند. استفاده از این اسید و بازیابی و تغلیظ آن، مشکلات خوردگی مهمی به وجود می‌آورد که برای پالایشگاه‌ها بسیار مهم می‌باشند. مثلاً لجن‌ها SILT غالباً دارای مقادیر زیادی مواد کربنی یا کربناتی هستند که باعث می‌شوند اسید سولفوریک، احیاکننده گردد، این حالت باعث خوردگی فولادهای زنگ نزن می‌گردد.

### آمونیاک

آمونیاک برای کنترل PH آب و کاهش اسیدیته ناشی از کلر در جریان تصفیه می‌باشد. اگر PH برابر ۷ باشد این روش خیلی خوب عمل می‌کند، اما اگر PH=8 یا بیشتر باشد باعث وارد آوردن خساراتی به آلیاژهای مسی می‌گردد.

### اسید کلریدریک

در اثر هیدرولیز به وجود می‌آید. گاهی اوقات به طور عمدی به پروسه اضافه می‌گردد. این اسید نسبتاً فرار بوده به طوری که غالباً در برج‌های تقطیر و همچنین اجزا نفتی تقطیر شده پیدا می‌شود.

## مواد قلیائی (هیدروکسید سدیم) و آهک

گاهی اوقات برای زدودن سولفور هیدروژن و خنثی ساختن آن اضافه می‌گردد. افزودن آهک و مواد قلیائی به نفت خام باعث تقلیل HCL در بخارها می‌گردد. مواد قلیائی بعضی وقتها باعث رسوبات و گرفتگی می‌شود که زدودن آنها مشکل است. همچنین باعث خوردگی توام با تنش (SCC) می‌شوند.

## اسید نفتانیک NAPHTHENIC ACID

حضور این اسید در نفت می‌تواند باعث خوردگی قابل ملاحظه‌ای در  $750^{\circ}F$  درجه فارنهایت و بالاتر گردد.

برای مقابله با خوردگی ناشی از اسیدنفتانیک از آلیاژ ۳۱۶ و یا فولاد CR۵٪ درصد کرم و چنانچه درجه حرارت زیر  $500^{\circ}F$  درجه فارنهایت باشد از مونل استفاده می‌شود.

## تقسیم‌بندی خوردگی برحسب درجه حرارت در پالایشگاه‌ها

غالباً برای اینکه نوع فلز و آلیاژ مناسب در تأسیسات استفاده شود یک تقسیم‌بندی کلی بر اساس درجه حرارت انجام می‌دهند و در آن محدوده آلیاژ مناسب را به کار می‌برند.

➤ خوردگی در درجه حرارت زیر  $500^{\circ}F$

➤ خوردگی در درجه حرارت بالای  $500^{\circ}F$

کمتر از  $500^{\circ}F$  آب می‌تواند وجود داشته باشد و مکانیزم خوردگی در محیط‌های آبی قابل کاربرد است. در بالاتر از  $500^{\circ}F$  مکانیزم‌های درجه حرارت بالا وارد عمل می‌شوند.

مثال: خوردگی در نفت خام ترش با افزایش درجه حرارت افزایش می‌یابد (در حدود  $800^{\circ}F$  به شدت افزایش می‌یابد)، همچنین با افزایش گوگرد نیز خوردگی افزایش می‌یابد.

کرم بهترین عنصر آلیاژی برای فولاد در افزایش مقاومت در برابر ترکیبات گوگردی و افزایش دما می‌باشد. بنابراین مقدار کرم فولاد را در درجه حرارت بالا افزایش می‌دهند و از یک

درصد شروع می‌شود.

## روش های پایش خوردگی در صنایع نفت و گاز

در اینجا روش های رایج پایش خوردگی در صنعت نفت و گاز بطور خلاصه تشریح می شوند:

### ۱- اندازه‌گیری کاهش وزن کوپن

اندازه‌گیری آسیب‌دیدگی ناشی از خوردگی با کاهش وزن، کوپن سال‌هاست که به کار برده می‌شود و متدی است که تمام مهندسين خوردگی با آن آشنایی دارند. این روش شامل یک کوپن وزن شده‌ای می‌باشد که در داخل سیستم مورد نظر نصب می‌شود و بعد از یک پریود زمانی مشخص از سیستم خارج و کاهش وزن آن اندازه‌گیری می‌شود. متوسط میزان خوردگی به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$M.PY = 143700 \frac{W}{D A T}$$

W= (گرم) کاهش وزن

D= (گرم بر سانتی‌متر مکعب) دانسیته فلز

A= (سانتی‌متر مربع) سطح کوپن

T= (روز) مدت زمانی که در معرض خوردگی بوده

ابزار یا وسایل به کار گرفته شده در این نوع سیستم دارای اجزاء ساده‌ای می‌باشد و کار با آن‌ها مستلزم پیچیدگی خاصی نیست، به همین خاطر در بسیاری از موارد به عنوان یک استاندارد ابتدایی برای کالیبره کردن دیگر متدهای اندازه‌گیری، میزان خوردگی به کار برده می‌شود. علی‌رغم سادگی این وسیله، کاهش وزن کوپن، دارای بعضی محدودیت‌های جدی در اندازه‌گیری میزان خوردگی سیستم می‌باشد و بعضی ملاحظات باید در تفسیر نتایج به دست

آمده اعمال شود. نتایج حاصل از این روش، اطلاع از وضعیت خوردگی در یک متوسط زمانی از نقاط نسبتاً کمی در سیستم مورد نظر می‌باشد. همچنین این متد از دوره‌های کوتاهی که دگرگونی در روند عادی خوردگی سیستم رخ می‌دهد، اطلاعات کمی داده یا بطور کلی آن را مشخص نمی‌سازد و در بیشتر مواقع به منظور تشخیص و حل مشکلات خوردگی سیستم و یا ارزیابی عملکرد مواد شیمیائی تزریقی، متدهای مانیتورینگ مکمل آن مورد نیاز می‌باشد. محل کوپن یکی دیگر از فاکتورهایی است که باید به دقت در نظر گرفته شود، در یک سیال هموزن، کوپن‌هایی که در مرکز خط لوله جا داده شده‌اند، بطور کلی نسبت به کوپن‌هایی که در دیواره های لوله قرار دارند نرخ خوردگی بالاتری را نشان می‌دهد. اگر آسیب ناشی از خوردگی در خط لوله رخ داده است در این خط نصب کوپن هم سطح با دیواره لوله (Flush Coupon) نتایج مفید و مناسب‌تری را خواهد داد و همان حال کوپنی که در تماس با مرکز لوله می‌باشد (Mounted Coupon) در مقابل تغییرات خوردگی سیال دارای حساسیت بیشتری می‌باشد. در این حالت به دست آوردن اطلاعات جامع‌تر از (Multi-Coupon Holder) امکان‌پذیر می‌باشد. مشکل انتخاب محل نصب بیشتر در یک سیال غیر هموزن (Wetgas) به وجود می‌آید و همان‌طوری که قبلاً توضیح داده شده نتایج اپتیمم و قابل قبول فقط در محل‌هایی که کوپن نصب شده بیشترین تماس را با آب دارد، به دست خواهد آمد. محدودیت دیگری که در بکارگیری این متد با آن مواجه هستیم، این است که اندازه‌گیری مقدار خوردگی سیستم فقط به دنبال خارج نمودن کوپن از محل، بررسی و تجزیه و تحلیل کوپن نصب شده امکان‌پذیر است. بالا بودن هزینه استفاده از این متد، به دلیل نیاز به نیروی ماهر و متخصص می‌باشد. در مجموع به دلیل طبیعت مستقل در اندازه مقدار خوردگی در این روش، کوپن‌ها همیشه تنها برای کالیبره کردن دیگر به کار رفته، در مانیتورینگ سیستم گنجانده می‌شود و در تفسیر نتایج حاصل از کوپن‌ها، باید به محل نصب آن‌ها و عدم حساسیت زیاد آن‌ها در مواقعی که دگرگونی در روند عادی خوردگی سیستم رخ می‌دهد، توجه شود. همچنین تعداد محل‌های نصب کوپن در سیستم باید محدود شود تا نیروی ماهر و متخصص کمتری مورد نیاز باشد.

## ۲- پروب مقاومتی

بیش از سایر متدها بطور وسیعی در بسیاری موارد به کار برده می‌شود، در این نوع پروب، از یک حلقه سیم که داخل سیستم نصب شده و در معرض خوردگی می‌باشد استفاده شده است، مقاومت الکتریکی سیم یک نسبت عکس با سطح مقطع آن دارد.

$$R = P \frac{L}{A}$$

R= مقاومت سیم

P= مقاومت ویژه سیم

L= طول سیم

A= سطح مقطع سیم

بنابراین چنانچه سیم خورده شود، سطح مقطع آن کاهش یافته و مقاومتش افزایش می‌یابد. دستگاهی که به پروب متصل می‌شود نسبت مقاومت سیمی را که در معرض خوردگی قرار دارد به مقاومت یک سیم رفرنس داخلی که در مقابل خوردگی حفاظت می‌شود اندازه‌گیری می‌کند. مقاومت سیم اولی با دما و تغییر قطر سیم تغییر می‌کند. در ضمن اندازه‌گیری، نسبت تغییرات دما که به مقاومت دو سیم بطور مساوی اثر می‌کند، حذف می‌شود و اندازه‌گیری انجام شده مستقیماً متناسب با قطر سیم اول می‌باشد. مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل زمان رسم می‌شود و شیب خطوط راست حاصل از منحنی فوق به مقدار خوردگی معینی قابل تبدیل می‌باشد. این مقدار مانند روش اندازه‌گیری پلاریزاسیون خطی، نتایج لحظه‌ایی از میزان خوردگی سیستم را فراهم نمی‌سازد. همچنین المان‌های این نوع پروب به جز سیم‌های آن قابل دسترس می‌باشد. نوع باریک و کوچک این المان‌ها می‌تواند به سطح دیواره لوله متصل شود و نوع لوله‌ای مسدود شده باریک آن زمانی استفاده می‌شود که حساسیت زیادی برای اندازه‌گیری خوردگی‌هایی با مقادیر کم نیاز باشد. مزیت اصلی پروب‌های مقاومتی در این است که به یک محیط الکترولیتی هادی محدود نمی‌شود و به همین دلیل استفاده وسیعی در گازهای خشک و

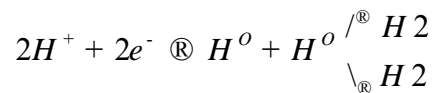


سیستم‌های نفتی پیدا می‌کند. از آنجایی که این تکنیک اندازه‌گیری مقدار خوردگی را با روش انتگرالی انجام می‌دهد. نهایتاً حاصل کل خوردگی را در یک زمان متوسط نشان می‌دهد. مشکل دیگری که همراه با این نوع روش وجود دارد، غیرحساس بودن آن و کند بودن در دادن پاسخ می‌باشد برای مثال یک تغییر در میزان خوردگی از 50 MPY به 60 MPY تنها یک تغییر کوچک در شیب نتایج حاصل که به صورت منحنی رسم شده ایجاد می‌شود و این تغییر گاهی بعد از گذشت (۱ تا ۱۰) روز (بستگی به حساسیت المان دارد) مشاهده می‌گردد. طبیعت غیرحساس در این گونه پروب و مقایسه با پروب‌های پلاریزاسیون خطی در شکل نشان داده شده است. از مسائل اساسی دیگری که در مورد این نوع پروب وجود دارد اشکال در کارایی نتیجه بخش در محیط ترش می‌باشد. لایه‌های سولفید آهن هادی الکتریسیته بر روی پروب تشکیل شده و نتیجتاً میزان خوردگی کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌گردد میزان این کاهش با زمان و مقدار سولفید تغییر می‌کند و در نهایت در محلولی با (5-10 ppm) یون سولفید این مشکل جدی می‌شود. این خطا به صورت نامشخصی ایجاد گردیده و به جز از روی نتایج نادرستی که در نهایت تأثیر آن به وجود می‌آید (میزان خوردگی منفی می‌باشد) آشکار نمی‌شود. در مجموع، پروب‌های مقاومتی نسبت به روش اندازه‌گیری کاهش وزن (کوپن) اطلاعات خیلی بیشتری همراه با پاسخ‌گویی سریع‌تر از وضعیت خوردگی سیستم در اختیار ما قرار می‌دهد. در نتیجه بطور قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با کوپن صرفه‌جویی در کار خواهیم داشت ولی در بسیاری موارد چنان کند و غیرحساس عمل می‌کند که نمی‌تواند یک وسیله مؤثر در ارزیابی عملکرد مواد شیمیائی یا تشخیص دگرگونی‌های ناشی از خوردگی در سیستم باشد. در جایی که از پروب‌های پلاریزاسیون به دلیل نبودن الکترولیت هادی نمی‌توان استفاده نمود (گازهای خشک - خطوط انتقال نفت - Overhead پالایشگاه‌ها - و در دیگر سیستم‌هایی که عوامل خورنده یک گاز، بخار یا غیر الکترولیت می‌باشد) این نوع پروب بهترین نوع انتخاب (به شرط اینکه مشکل سولفید وجود نداشته باشد) می‌باشد در غیر این صورت پروب پلاریزاسیون باید انتخاب گردد.

### ۳- پروب‌های فشار هیدروژنی

دو نمونه از این نوع پروب که معمولاً بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد در شکل مشخص شده

است. در این متد هیدروژن در حال نفوذ از دیوار مخزن (Patch-type) یا از داخل دیواره پروب متالوژیکی آلیاژ به کار رفته نقش مهمی در نفوذ هیدروژن بازی می‌کند. از آنجایی پروب‌های از نوع (Insert) نمی‌تواند کاملاً شبیه به متالوژی دیوار مخزن عمل کند نوع Patch از این پروب معمولاً ترجیح داده می‌شود. در یک سیستم با دمای پائین، جایی که عامل اولیه خوردگی یک سیال آبی (Aqueous Fluid) می‌باشد هیدروژنی که از دیوار مخزن نفوذ می‌کند یک قسمت از هیدروژنی است که در بخش کاتودیک واکنش خوردگی تولید می‌شود.



در تعادل، فشار هیدروژن داخل پروب یک تابع مستقیم از مقدار خوردگی می‌باشد. عملاً کالیبره کردن این قبیل پروب‌ها به صورتی که مقدار خوردگی مستقیماً به MPY نمایش داده شود غیر ممکن می‌باشد. این حقیقت کاملاً مشخص شده که بخشی از پارامترهای اساسی کنترل کننده نفوذ هیدروژن، به متالوژی مخزن مربوط می‌شود (به عنوان مثال مقاومت کششی - مقدار - کربن - منیزیم - و ساختمان مولکولی) در نتیجه این متد می‌تواند تنها به منظور اندازه‌گیری نسبی فعالیت خوردگی داخل یک سیستم به کار برده شود. همچنین این روش برای نشان دادن دگرگونی در روند عادی خوردگی و مقایسه عملکرد میزان تزریق مواد شیمیائی کند کننده استفاده می‌شود (بخصوص در مواقعی که مواد شیمیائی برای کاهش تردی هیدروژنی با ترک و تاول هیدروژنی طراحی شده باشد). اندازه‌گیری خوردگی با روش انتگرالی که تا کنون گفته شده، دارای خطا می‌باشد، بنابراین پاسخ آن تدریجی است و با مخلوط شدن فازها در سیستم، فقط با نصب در نقاطی که بیشترین تماس با سیال خورنده را دارا باشد، نتایج واقعی خواهد بود. در تکمیل این مطالب می‌توان گفت این سیستم از حساسیت خیلی کمی برخوردار می‌باشد. این موضوع در مثال زیر روشن شده است. در مقدار خوردگی معادل (1MPY) مقدار فلزی که از هر  $cm^2$  سطح پروب کاهش می‌یابد معادل  $0.0025 \frac{cm}{yr}$  می‌باشد. بنابراین برای سطحی معادل  $10cm^2$  از پروب مقدار مولکول گرمی که در یک روز از فلز کم می‌شود معادل:

$$\frac{(0.0025' 10' 7.8)}{56' 365} = 0.0000095 \text{ g.mole / day}$$

از آنجا که: ۱ گرم مول  $H_2$  ؛ ۱ گرم مول آهن

حجم هیدروژن تولید شده در یک روز در مقدار خوردگی معادل 1MPY به صورت:

$$0.0000095' 22.4 = 0.2128^{cc}$$

فرض کنیم ۱۰ درصد هیدروژن تولید شده از داخل فولاد به داخل پروب نفوذ کند. بنابراین حجم هیدروژن تولید شده در داخل محفظه فشارسنج در یک روز برای یک MPY برابر  $0.02128^{cc}$  می‌باشد. اگر فشاری که به طور معمول پروب می‌تواند قرائت کند 1PSI باشد تغییر فشاری برابر 0.02128PSI (در حجم ثابت) در روز خواهیم داشت. از آنجا که 0.25PSI مینیمم فشاری است که با یک فشارسنج می‌توان اندازه گرفت. پس 1MPY خوردگی بعد از گذشت ۱۲ روز خوانده می‌شود. از دیگر مشکلات موجود در این سیستم نیاز به نگهداری و تعمیرات زیاد آن می‌باشد، از آنجا که در فشارسنج‌های این قبیل پروب‌ها، احتمال نشت وجود دارد، این مسئله می‌تواند یک نقص خیلی جدی علاوه بر غیرحساس بودن آن‌ها باشد. در مجموع این پروب‌ها به دلیل حساسیت کم، عکس‌العمل کند در مقابل تغییرات خوردگی سیستم، نیاز به تعمیرات فراوان و اندازه‌گیری نسبی میزان خوردگی سیستم، به کار بردن آن‌ها در موارد کمی پیشنهاد می‌شود. و شاید فقط در مواقعی نسبت به دیگر روش‌ها ترجیح داده می‌شود که تردی ناشی از نفوذ هیدروژن یا ترک یا تاول هیدروژنی بیشتر جلب توجه کند و حتی در این مواقع مانیتور از طریق نفوذ هیدروژنی از روش‌هایی است که بیشتر از آن می‌تواند مفید واقع شود.

#### ۴- پروب‌های پلاریزاسیون خطی

##### ۴-۱ تئوری و قوانین اندازه‌گیری

مطالعه و تحقیق بر روی خواص فلزات در روند خوردگی نشان می‌دهد که هرگاه یک فلز داخل یک الکترولیت قرار داده شود یک جریان الکتریکی که جریان خوردگی نامیده می‌شود در فلز

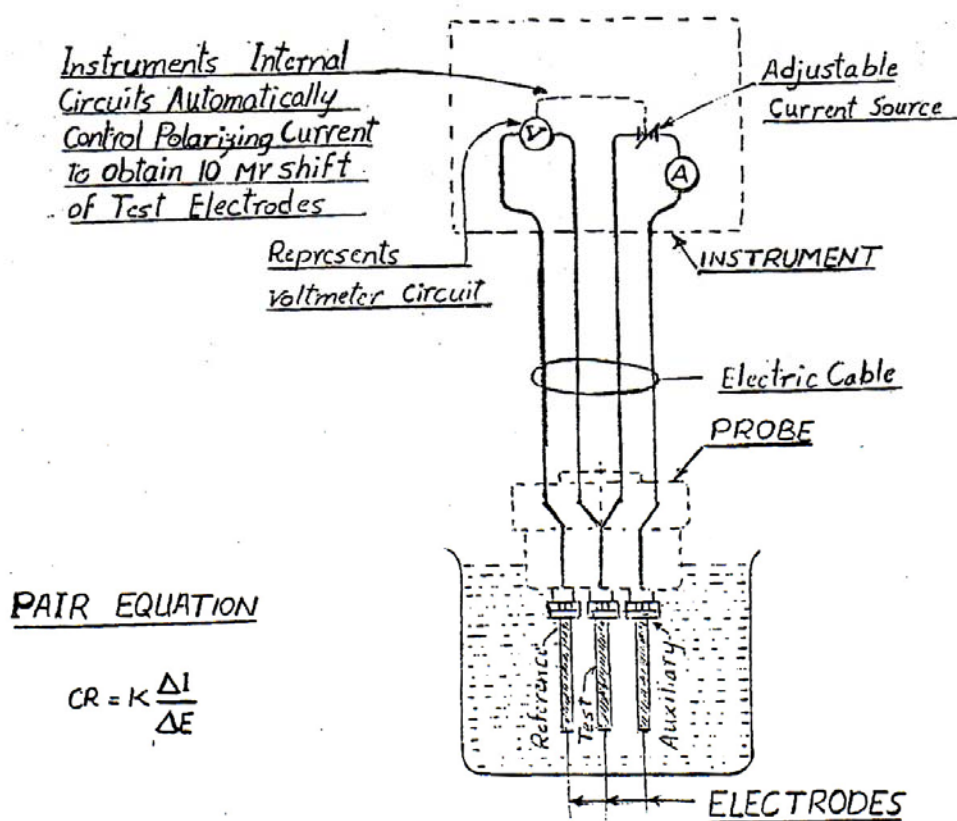
تولید می‌شود. به دنبال انجام سری واکنش‌های پیچیده الکتروشیمی دیده می‌شود که یون‌های مثبت از قبیل یون  $(Fe^{++})$  به طرف محلول آزاد می‌شوند و یون‌های مثبتی مانند  $(H^+)$  اغلب با انجام واکنش و تولید مولکول  $H_2$  کاهش می‌یابد. لزوم مبادله الکترون و ثبات این واکنش‌ها باعث مبادله جریان الکتروسیته در سطح فلز می‌شود. از آنجائی که جا دادن یک دستگاه اندازه‌گیری در داخل ترکیبات فلز به کار رفته در سیستم غیر عملی است و به دلیل اینکه هیچ جریان خالصی که بطور طبیعی در حال وقوع باشد وجود ندارد، اندازه‌گیری جریان خوردگی بطور مستقیم ممکن نمی‌باشد. با این وجود، فراهم نمودن غیر مستقیم قرائت جریان خوردگی یا اندازه‌گیری میزان خوردگی امکان‌پذیر می‌باشد. با بهره گرفتن از این واقعیت که یک ارتباط قابل اندازه‌گیری بین جهت جریان خوردگی و اثر یک جریان اعمال شده خارجی بر روی سطح فلز وجود دارد، این قابلیت اندازه‌گیری غیرمستقیم اساس تکنیک پروب‌های پلاریزاسیون را تشکیل می‌دهد. برای اندازه‌گیری میزان خوردگی با استفاده از این روش، نیاز به نصب ۳ الکتروود بر روی یک پروب در یک سیال خورنده می‌باشد. ترکیبات متالوژیکی، بافت سطحی و بقیه خصوصیات الکتروودها تا آنجا که ممکن است باید نزدیک به فلز به کار رفته در سیستم باشد. با یکسان بودن این خواص، خوردگی ترکیبات الکتروودها به خوردگی ترکیبات فلزی سیستم نزدیک می‌شود. هر کدام از الکتروودها یک وظیفه معین در عملیات اندازه‌گیری میزان خوردگی انجام می‌دهد به همین دلیل، الکتروودها با رفرنس الکتروود، تست الکتروود و الکتروود کمکی مشخص شده‌اند.

**رفرنس الکتروود:** از آنجائی که این الکتروود به هیچ وجه توسط اندازه‌گیری میزان خوردگی تغییر نمی‌کند می‌توان گفت این نامگذاری کاملاً مناسب انتخاب شده است. این الکتروود مستقل از اجزایی است که در ضمن اندازه‌گیری میزان خوردگی خورده می‌شوند و در نتیجه یک مقدار واقعی خوردگی (چون یک جریان خوردگی و افزایش پتانسیل طبیعی الکتروودها ضمن خوردگی فرض شده) را انعکاس می‌دهد.

**تست الکتروود:** الکتروودی است که مقدار خوردگی آن اندازه گرفته می‌شود و از الکتروود کمکی به منظور آشفتن و نمونه قرار دادن تست الکتروود در مدت اندازه‌گیری خوردگی استفاده می‌شود.

این ۲ الکتروود همچنین در حال خورده شدن هستند و در نتیجه برای هر کدام یک جریان الکتریسیته و یک افزایش پتانسیل فرض می‌شود.

معهدا این جریان‌ها غیرقابل اندازه‌گیری هستند، ولی با بکارگیری مهارت‌های الکتریکی، دانسیته جریان و پتانسیل‌های الکتروود تست و کمکی، این الکتروودها قابل مقایسه با الکتروود رفرنس توسط مدار و دستگاه طراحی شده هستند و در نتیجه این ۳ الکتروود می‌تواند اندازه‌گیری مستقیم میزان خوردگی را تحقق ببخشد. یک سیستم ساده شده اندازه‌گیری خوردگی با استفاده از این روش در شکل نشان داده شده است.



شکل ۵-۱: شماتیک پایش خوردگی به روش پروب‌های پلاریزاسیون خطی

سه الکترودی که در شکل نشان داده شده‌اند به ۲ میتر (ولت‌متر و آمپر‌متر) و یک منبع جریان قابل تنظیم متصل هستند. از آن جهت که در این تکنیک اندکی آشفتگی در خواص خوردگی تست الکتروود وارد می‌شود یک رفرنس الکتروود با شرایط یکسان خوردگی الزامی می‌باشد. در شروع عملیات اندازه‌گیری ولتاژ پتانسیل تست الکتروود در مقابل رفرنس الکتروود اندازه‌گیری شده، و هر اختلاف ولتاژی که ممکن است بین آن‌ها بطور طبیعی وجود داشته باشد، برطرف می‌گردد (صفر می‌شود). تا این مرحله از اندازه‌گیری، پتانسیل الکتروود تغییر داده شده است. یک منبع جریان اکنون شروع به برقرار نمودن جریان بین تست الکتروود کمکی می‌نماید تا زمانی که تست الکتروود به یک اختلاف پتانسیل ۱۰ میلی‌ولت از پتانسیل طبیعی که در شروع عملیات صفر شده بود، برسد. این جریان، جریان پلاریزاسیون و تغییر ولتاژ القا شده توسط این جریان به ولتاژ پلاریزاسیون نامیده می‌شود. وقتی مقدار کافی از جریان بین تست الکتروود و الکتروود کمکی جاری می‌شود، اختلاف پتانسیل تست الکتروود ۱۰ میلی‌ولت بالاتر از رفرنس الکتروود یا پتانسیل طبیعی ذخیره شده، تغییر داده و نگه داشته می‌شود. در این حالت، تست الکتروود به صورت پلاریزه شده در نظر گرفته می‌شود. جریان برقرار شده بین الکتروود کمکی و تست الکتروود، اکنون میزان خوردگی تست الکتروود را نشان می‌دهد. (به دلیل آنکه مقدار جریان مورد لزوم پلاریزاسیون برای پلاریزه کردن الکتروودها توسط ۱۰ میلی‌ولت مستقیماً به دانسیته جریان خوردگی متناسب می‌باشد). با اندازه‌گیری این جریان توسط مدار ویژه‌ایی و ثبت بر روی دستگاه ثبت کننده (Recorder) یک اندازه‌گیری دقیق از میزان خوردگی در سیستم انجام می‌شود. با بکارگیری این قانون، این حقیقت روشن می‌شود که یک سیال بسیار خورنده جریان خوردگی زیادی تولید می‌کند و در نتیجه جریان الکتروسیسته زیادی باید بین تست الکتروود و الکتروود کمکی جریان یابد تا پتانسیل تست الکتروود به ۱۰ میلی‌ولت بالاتر، که پتانسیل در یک محیط بسیار خورنده می‌باشد تغییر کند. جریان الکتروسیسته کم بین این دو الکتروود در یک سیال با خوردگی متوسط برای تغییر دادن پتانسیل تست الکتروود به ۱۰ میلی‌ولت بالاتر از پتانسیل غیر پلاریزه لازم می‌باشد.

#### ۲-۴ اساس کار دستگاه پلاریزاسیون

مشاهدات تجربی، اختلاف پتانسیل‌های جزئی (Small Overpotentials) اندازه‌گیری شده یک الکتروود مستقل در یک محیط خورنده، نسبت به حالت تعادل آن، نشان می‌دهد. جریان پلاریزه به کار برده شده بطور خطی با جریان خوردگی رابطه داشته، که اثبات تئوری آن توسط Stem و Geary انتشار یافته است. آن‌ها با زیر کنترل قرار دادن فعالیت‌های یک الکتروود در یک محیط خورنده معادله زیر را به دست آورده‌اند.

$$I_c = I_A / 2.3 E \frac{B_c B_a}{B_c + B_a}$$

$I_c$  = جریان خوردگی

$I_a$  = جریان پلاریزاسیون

$E$  = اختلاف پتانسیل پلاریزاسیون

$B_c$  = ثابت کاتدیک تافل

$B_a$  = ثابت آندیک تافل

این واکنش اساس دستگاه‌های تجاری را تشکیل می‌دهد که مقدار خوردگی را با اندازه‌گیری جریان پلاریزه ایجاد شده روی یک الکتروود نمونه از فلز مورد نظر مستقیماً به MPY قرائت می‌نماید. تبدیل و کالیبره کردن نتایج حاصل از قرائت جریان پلاریزه مستقیماً به MPY، به صورت تجربی به کمک مقایسه با نتایج حاصل از کاهش وزن کوپن برای سیستم‌هایی با صدها فلز در محیط‌های گوناگون به دست آمده است. می‌توان انتظار داشت اختلاف در ثابت تناسبی که بدین طریق حاصل می‌شود، نظر به اختلاف مقادیر ثابت‌های تافل، از سیستمی به سیستم دیگر،

برای اکثریت زیادی از دادها. در حدود  $15 \pm$  درصد باشد. یک فاکتوری که نمی‌توان در کالبره نمودن دستگاه جا داد اکی والان وزن فلزات ویژه می‌باشد. مقدار به صورت ارتباط غیرمستقیم مساحت سطحی الکتروود نمونه نسبت به اکی والان وزن‌ها منظور شده است. تعیین یک اکی والان وزن مناسب به عنوان مبنایی برای سنجش خیلی از آلیاژها، مشکل می‌باشد. به ویژه آلیاژهایی که از بیش از ۲ جزء (فلز) تشکیل شده‌اند. اخیراً با بکارگیری یک متوسط وزن شده از اکی والان وزن‌های ترکیبات ویژه بر این مشکل غلبه شده است. یک دستگاه در عمل با دقت قابل قبولی این مقدار را پیدا می‌کند. با وجود تقریبی که در کالبره کردن دستگاه وارد شده است معلوم شده که در بسیاری موارد به جز در بعضی سیستم‌ها موارد اشتباه به ندرت بیشتر از  $25 \pm$  درصد می‌باشد. تفاوت دستگاه‌های موجود که به صورت تجاری در آمده به شماره الکتروودهای استفاده شده در اندازه‌گیری منحصر می‌باشد که ممکن است به صورت ۲ یا ۳ الکتروودی باشد. اندازه‌گیری در یک سیستم ۳ الکتروودی بعد از مراحل زیر انجام می‌شود:

- (a) کمترین افت پتانسیل باقیمانده بین رفرنس الکتروود و تست الکتروود صفر شده باشد.
- (b) افزایش جریان عبور داده شده بین الکتروود کمکی و تست الکتروود، تا زمانی که تست الکتروود 10mv در مقایسه با رفرنس الکتروود پلاریزه شود.
- مقدار جریان به دست آمده بر روی دستگاه مستقیماً به MPY قرائت می‌شود (این سنجش به واسطه انتخاب ثابت تناسب و فاکتور مساحت مناسبی از الکتروودها انجام می‌شود) مزیت اصلی سیستم ۳ الکتروودی این است که مقدار جریان در مدار اندازه‌گیری پتانسیل واقعاً صفر می‌باشد. در نتیجه هیچ خطایی ناشی از افت IR در پتانسیل پلاریزاسیون برقرار شده ، وجود ندارد.

### سیستم‌های ۲ الکتروودی

سیستم‌های ۲ الکتروودی صرفاً با 20mv افت پتانسیل بین ۲ الکتروود به کار برده می‌شود و جریان ایجاد شده با تعیین یک ثابت مناسب مستقیماً به M.P.Y داده می‌شود. صحت اندازه‌گیری در سیستم ۲ الکتروودی با توجه به فرض‌های زیر می‌باشد.

۱. هر دو الکتروود قبل از اندازه‌گیری در یک پتانسیل باشند.



ii. افت 20mv پتانسیل اعمال شده بر روی هر دو الکتروود و سطح مشترک آن‌ها با محلول یکسان باشد.

iii. افت IR در محلول نسبت به 20mv ناچیز باشد.

فرض اول و آخر در بیشتر موارد بطور فاحشی در خطا می‌باشد. دو الکتروود هر قدر هم یک جور و یکنواخت پرداخت شده باشند نمی‌توانند پتانسیل غیر پلاریزه یکسانی ارائه بدهند. مشاهده پتانسیل 40-50mv بین دو الکتروود مسئله غیرعادی نمی‌باشد، این پتانسیل باقیمانده اضافه شده بر 20mv باعث می‌شود که اندازه‌گیری مقاومت پلاریزاسیون هر الکتروود تقریباً خیلی بیشتر از  $0.045/IA$  شود در صورتی که مقدار واقعی آن  $0.02/IA$  می‌باشد. در این حالت مقدار خطا بیشتر از ۱۰۰ درصد خواهد شد. عدم جبران افت IR در محلول، از موارد مهم ایجاد خطا در سیستم‌های دو الکتروودی می‌باشد. اگر باقیمانده پتانسیل حالت غیریکنواخت الکتروودها صفر شده باشد، نتیجه اینکه

به جزء در محلول‌هایی با هدایت الکتریکی خیلی زیاد، اندازه‌گیری با سیستم‌های ۲ الکتریکی، حتی با استفاده از یک کالیبراسیون دقیق که می‌تواند اندازه‌گیری قابل اطمینانی انجام دهد خیلی بعید به نظر می‌رسد.

### سیستم‌های ۳ الکتروودی

قبلاً توضیح داده شد که در سیستم‌های ۳ الکتروودی مشکل افت IR وجود ندارد. با این حال، یک حد بالایی از مقاومت الکتروولیت در این تکنیک وجود دارد. به دو دلیل برای بکارگیری این تکنیک محدودیت وجود دارد. مورد اول به گسترش میدان الکتریکی با افزایش مقاومت محلول مربوط می‌شود. در بعضی موارد گسترش میدان الکتریکی جریان بین تست الکتروود، و الکتروود کمکی به ناحیه رفرنس الکتروود برخورد پیدا می‌کند و در نتیجه رفرنس الکتروود پلاریزه می‌شود. در این حالت به دست آوردن یک اندازه‌گیری یکنواخت غیرممکن می‌شود. بطور طبیعی وضعیت و موقعیت الکتروود بر این پدیده تأثیر خواهد داشت، برای مثال، حد بالایی از مقاومت که در پروب‌های از نوع Pin type ممکن است عمل شود دقیقاً  $10^6 \text{ohm cm}^{-1}$  می‌باشد، در صورتی که الکتروودهایی که در یک حلقه هم مرکز قرار گرفتند بطور کاملاً مؤثری در ۲ برابر این

مقدار عمل خواهند نمود. دومین مورد در محدودیت بکارگیری از سیستم ۳ الکترودی که در مورد سیستم‌های ۲ الکترودی هم وجود دارد، این است که آن‌ها فقط در خوردگی‌های از نوع الکتروشیمیایی عمل می‌کند و در محیط‌های بدون الکترولیت پاسخ نمی‌دهند. در مجموع تکنیک پلاریزاسیون خطی به دلیل سرعت و فوریت آن در دادن پاسخ ونیز حساسیت بالایی که دارد (جریان دستگاه اجازه می‌دهد مقدار خوردگی‌هایی تا زیر 0.02MPY اندازه‌گیری شود)، از مزیت فوق‌العاده‌ایی برخوردار می‌باشد. همچنین تکنیک با عمل نکردن در محیط‌هایی با مقاومت زیاد محدود می‌شود، بطوری که سیستم‌های ۲ الکترودی فقط در محلول‌هایی با هدایت الکتریکی زیاد واقعاً دقیق عمل می‌نماید (آب دریا - آب Formation) در مواردی که مقدار خوردگی پائین باشد پروب ۳ الکترودی یک حد مقاومت ماکزیمم معادل  $2 \times 10^6 \text{ ohm cm}^{-1}$  دارد به این طریق حتی، پروب‌های ۳ الکترودی در شرایط امولسیون و آب غیر یونیزه، نقص خواهند داشت. اما با این همه، این روش، اطلاعاتی مشخص، قطعی و روشن از محلول‌های الکترولیتی نسبت به سایر روش‌ها در اختیار ما قرار خواهد داد.

## ۵- مشاهده و کنترل خوردگی (Monitoring) در سیستم‌های گاز ترش

### ۵-۱ توزیع آب در سیستم و توجه به مشکلات آن

مانیتورینگ سیستم‌های گاز در بیشتر مواقع بسیار مشکل است. این امر به دلیل حرکت و توزیع نامنظم محیط خورنده (آب) در سراسر سیستم می‌باشد. آب ممکن است گاه گاهی به صورت لخته‌ایی (slug) با جاری شدن در طول کف لوله یا سرعت‌های زیاد گاز به صورت یک لایه حلقه مانند در اطراف محیط لوله جابجا شود. زمان اقامت آب در نقاط ویژه‌ای از خط لوله بسیار متغیر خواهد بود. برای مثال در نقاط پائین (low spots) و محل‌های تغییر خط، در بیشتر از ۹۵ درصد مواقع ممکن است لوله در تماس با آب باشد. در حالی که در قسمت‌های سرازیری و بلند، این حالت ممکن است در ۵ درصد کل زمان وجود داشته باشد. بدیهی است که توزیع و نوع رژیم جریان هر کدام دستخوش تغییرات مداوم دینامیکی می‌باشد. بررسی تأسیساتی که بیشتر خطوط لوله آن مدفون یا به صورت دیگری غیرقابل دسترس می‌باشد، نشان داده که این حالت

از توزیع نامنظم جریان آب، مواقعی که یک مانیتورینگ خوردگی از نوع انتگرالی (به عنوان مثال: پروب‌های مقاومتی، کوپن کاهش وزن، پروب هیدروژنی) در سیستم به کار رفته باشد باعث نقطه ضعف حتمی در آن‌ها خواهد شد. بدین صورت که در مانیتورینگ محل‌های انتخاب شده در این گونه سیستم‌ها مانند قسمت بلند آن، پروب‌های نصب شده ممکن است فقط در ۱۰ درصد مواقع در تماس با آب باشد. اگر خوردگی آب برای مثال 10mpy باشد، اندازه‌گیری با پروب‌های انتگرالی مقدار 1mpy را نشان خواهد داد. در حالی که در محل‌های پایین سیستم، ممکن است خوردگی با مقدار 8-9mpy اتفاق بیافتد. همچنین هر تغییری در میزان قرائت پروب، بیشتر نشان‌دهنده تغییر در زمان مرطوب بودن آن می‌باشد تا تغییر در میزان خوردگی سیال (بعضی تغییرات بیشتر متناسب با زمان مرطوب بودن می‌باشد تا خوردگی سیال). نتیجتاً اگر، از پروب‌های با روش اندازه‌گیری انتگرالی استفاده می‌شود، ضروری است که در ناحیه‌ایی از سیستم که ماکزیمم زمان تماس با آب وجود دارد نصب شود، در غیر این صورت به خاطر وضعیت ویژه‌ایی که شرح داده شد، نتایج حاصله نادرست و خوش‌بینانه‌تر از واقعیت‌های سیستم خواهد بود. در این سیستم‌ها از یک پروب پلاریزاسیون خطی می‌توان برای از میان برداشتن این مشکل استفاده نمود. بطوری که اندازه‌گیری میزان خوردگی با کل خوردگی سیستم برابری خواهد کرد. به عنوان مثال: یک قرائت 10mpy صرف‌نظر از محل پروب، بدین معنی است که بیشتر محل‌هایی که در سیستم در معرض خوردگی هستند کمتر از 10mpy دارند. اشکال این گونه پروب‌ها در این است که فقط زمانی جواب خواهد داد، که سیال با یک هدایت الکتریکی پوشیده شده باشد. بنابراین در خط لوله‌ایی که همه آب به حالت امولسیون محدود می‌شود و یا جایی که عبور آب آزاد به قدری کم می‌باشد که نتایج به دست آمده برای نتیجه‌گیری‌های عملی کافی نباشد، بکار برده نمی‌شود. در عمل بسیار مشخص است که برای کارآیی مفید از این نوع پروب، لااقل ۳-۴ درصد آب آزاد مورد نیاز می‌باشد. در بعضی موارد ممکن است با جا دادن تله‌های آبگیر در زیر خط لوله و انجام مانیتورینگ در این گونه تله‌ها به مشکل جابجا شدن و توزیع نامنظم آب غلبه کرد. ولی به دنبال

نصب هر سیستم مانیتورینگ بیشترین مقدار خوردگی نشان داده می‌شود. البته همیشه احتمال زیاد شدن مشکلات ناشی از رسوب و سولفید آهن وجود دارد، همچنین ممکن است شرایط داخل تله انعکاس درستی از وضعیت خط لوله اصلی نباشد. با تراکم مواد شیمیائی کندکننده خوردگی در تله آبگیر و این که حجم آب در تله ممکن است CO<sub>2</sub> کمتری نسبت به فیلم نازک آب تشکیل یافته در سیستم در خود حل کند، در هر دو حالت اندازه‌گیری خوردگی مقداری کمتر از آنچه در خط لوله اصلی سیستم اتفاق می‌افتد را نشان می‌دهد. شرایط راکد آب همچنین ممکن است سبب تجمع محصولات خوردگی یا تجزیه بیش از اندازه آن‌ها به وسیله آب شود (همراه با تولید اسید). زیادتر یا کمتر بشود در مجموع، تله‌های آبگیر ممکن است در ابتدا یک پیشنهاد جالب توجه به نظر آید، اما باید توجه داشت که اگر آن‌ها در سیستمی به کار برده شود، ثابت شده است که شرایط این تله‌ها، حاکی از وضعیت کلی خط لوله نمی‌باشد.

## ۵-۲ رسوب سولفید آهن

یکی از محدودیت‌های مانیتورینگ که در سیستم‌های گاز ترش ممکن است واقع شود، رسوب سولفید آهن می‌باشد، بطوری که با تشکیل این رسوب هر دو روش معمول مانیتورینگ (پروب مقاومتی، پروب پلاریزاسیون) در معرض خطا قرار می‌گیرند. اثر افزایش سولفید آهن روی پروب مقاومتی، نشأت یک فیلم الکتریکی هادی می‌باشد که به تدریج باعث افزایش مقاومت در مقابل خوردگی شده و در نتیجه پروب مقدار خوردگی را کمتر از اندازه واقعی نشان می‌دهد. یک اثر پنهانی که خاص این نوع خطا می‌باشد آن است که بطور آشکار در همان موقع قابل تشخیص نمی‌باشد. نتایج نادرست ناشی از این خطا فقط زمانی که اثر آن به اندازه کافی به نهایت برسد به دست می‌آید که سبب می‌شود پروب میزان خوردگی منفی را نشان بدهد. در مورد مشکل تشخیص چنین انحرافی به نظر می‌رسد هیچ وسیله کاهش دهنده برای مقابله با اثر آن وجود نداشته باشد ولی در سوپر پروب‌های جدید به واسطه برخورداری از یک سطح بزرگ، ادعایی مبنی بر مینیم کردن این خطا وجود دارد اما هنوز هیچ مدرک واقعی برای اثبات این ادعا وجود ندارد. عدم صحت نتایج حاصل از پروب‌های پلاریزاسیون خطی، در محیط‌های سولفیدی، زمانی

رخ می‌دهد که یک پل با مقاومت کم بین الکتروود تست و دیگر قسمت‌های فلزی و مرطوب پروب برقرار شود. به محض برقرار شدن این اتصال وجود این نقص خیلی سریع آشکار می‌شود. به دلیل آنکه اندازه‌گیری با پروب مقدار خوردگی چند صد MPY را نشان می‌دهد، در مورد این نوع پروب حتی قبل از اینکه مشکلات ناشی از تشکیل رسوب به نهایت خود برسد امکان تشخیص آن از همان لحظه شروع وجود دارد و به جز شرایط حاد، در بقیه موارد پروب به همان حالت اولیه احیا می‌شود. در این مواقع شروع یک مشکل جدی در پروب‌های پلاریزاسیون در محیط‌های ترش تابعی از زمان و مقدار سولفید موجود می‌باشد. در طول مدت عمر طبیعی الکتروود و در محیطی با مقدار 10ppm یا کمتر یون سولفید اتصال پل الکتریکی احتمالاً رخ نخواهد داد در مقادیر 200ppm ممکن است بعد از ۳۰-۲۰ روز انجام شود و در 1200-1500ppm مشکل بعد از یک یا دو روز رخ می‌دهد. در بسیاری از سیستم‌های ترش، پدیده اتصال الکتریکی در این نوع پروب به ندرت اتفاق می‌افتد و به آسانی قابل تشخیص است و می‌توان پروب را به سرعت به حالت اولیه اصلاح کرد. در عین حال باید توجه نمود حتی اگر یک رسوب کوچک ناشی از یون سولفید در ابتدا پل الکتریکی در پروب ایجاد کند به هیچ طریقی نمی‌توان سعی در بکارگیری آن داشت. (به دلیل نتایج لحظه‌ای متصل و پیوسته‌ای که از اندازه‌گیری مستقیم مقدار خوردگی که به کمک بقیه متدها نمی‌توان به دست آورد از این نوع پروب به دست آورده می‌شود).

جمع‌بندی:

در شرایط فعلی صنعت، مانیتورینگ در سیستم‌های گاز ترش در کل به معنی بکارگیری متدهایی است که کمترین اشکالات ممکن در سیستم را داشته باشد. رهنمودهای کلی زیر برای انتخاب این متدها پیشنهاد شده است.

الف) اگر مقدار آب آزاد در خط لوله بیشتر از ۰.۴٪ و مقدار یون سولفید کمتر از تقریباً 500ppm باشد. در این حالت پروب‌های پلاریزاسیون از نوع Flush Mounted باید با مانیتورینگ پیوسته به خوبی کار بدهد. این نوع پروب باید، بین ساعت ۸-۴ بر روی خط لوله متصل شود. در این وضعیت پروب بیشتر اوقات مقدار صفر (Zero) را نشان خواهد داد، و فقط

هنگام عبور آب جواب می دهد. این باعث می شود میزان خوردگی با یک عدد مثبت مستقل برحسب MPY بیان گردد. اندازه گیری که میزان خوردگی ایجاد شده را در قسمت هایی از خط لوله که بیشتر از همه آسیب می بیند، نشان می دهد، با این متد کنترل خوبی از به کار بردن مواد شیمیائی در سیستم ممکن می باشد. اگر مقدار سولفید نزدیک به حد بالاتر از 200ppm باشد، شاید نیازمند به اجرای دستورالعملی برای تمیز کردن پروبها باشیم.

ب) اگر مقداری آب کمتر از ۰.۴٪ و مقدار سولفید کمتر از 200ppm باشد، پروب هایی از انواع مقاومتی، کارآیی صحیحی خواهد داشت، این پروبها یک مقدار از آسیب دیدگی یا صدمات خوردگی سیستم را نشان می دهد که می تواند برای محاسبه یک عدد متوسط برحسب MPY به کار برود. در نتیجه بسیار مهم است پروب در محلی که بیشترین تماس با آب را دارد نصب گردد تا بدترین شرایط خوردگی به صورت صحیح بدست آید.

پ) در شرایطی که پروب از نوع مقاومتی و پلاریزاسیون را نمی توان بکار برد.

کمتر از ۰.۴٪ آب و بیشتر از 200ppm سولفید

در این حالت از مانیتور کردن نفوذ هیدروژنی نتیجه بهتری نسبت به سایر روشها به دست آورده می شود. این روش یک اندازه نسبی از فعالیت خوردگی مقایسه رفتار انواع رژیم های جریان و دگرگونی های ناشی از خوردگی در یک حالت نرمال سیستم را نشان می دهد.

ت) برای هر محیطی، صرف نظر از دیگر روش های مانیتورینگ، نتایج حاصل از نصب کوپن همیشه به دست آورده می شود، نهایت کوشش باید انجام گیرد تا کوپن ها در نواحی که بیشترین زمان تماس را با محیط مرطوب را دارند نصب شود در این حالت می توان انتظار داشت یک تشخیص صحیح از بدترین حالت سیستم به دست آید.

## فصل ششم

# هزینه‌های خوردگی

## اهمیت اقتصادی

متأسفانه بسیاری از مردم، چه افرادی که در داخل صنایع مشغول به کار هستند و چه سایر افراد، اغلب خوردگی را مشاهده می‌کنند با این حال به سادگی می‌پذیرند که این پدیده، یک مشکل اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. با وجود این طرز تلقی، بعضی اقدامات واقعاً موثر می‌بایست به منظور طول عمر بسیاری از فلزات که در معرض محیط‌های خوردنده هستند انجام شود. ملاحظه انهدام تدریجی مواد توسط خوردگی و هزینه‌های مالی تعویض و تعمیر متعاقب آن، تنها از یک احساس مشترک نزدیک بین افراد نشأت گرفته و علی‌رغم آن کنترل خوردگی یک فاکتور اساسی در محدوده بسیار مهم از مسائل اقتصادی به شمار می‌رود. مطالعات علمی فرآیندهای خوردگی بر اساس موضوعات بسیار جالب که غالباً در زمینه‌ی واکنش‌های شیمیایی و به ویژه الکتروشیمیایی است، شکل می‌گیرد. همزمان با این شکل‌گیری‌ها و بررسی‌های علمی، توجه فراتری وجود دارد و آن این است که چگونه می‌توان از این فرآیندهای خوردگی جلوگیری نمود. برآوردهای گوناگونی سالیانه در مورد زیان‌های اقتصادی ناشی از خوردگی انجام می‌گیرد ولی هیچ توافق کلی در این رابطه که دقیقاً چه چیز می‌بایست در محاسبات این زیان‌ها به حساب آید وجود ندارد. به همان اندازه که محصولات و فرآیندهای تولیدی پیچیده‌تر می‌شوند، جریمه‌های حاصله نیز مشخص‌تر می‌شود، در این حالت توجه به اهمیت کنترل و جلوگیری از خوردگی نیز افزایش می‌یابد.

## هزینه‌های خوردگی

تخمین‌های هزینه‌های سالانه‌ی خوردگی در ایالات متحده بین ۸ بلیون دلار تا ۱۲۶ بلیون دلار می‌باشد. اما ۳۰ بلیون دلار واقعی‌ترین رقم می‌باشد. به هر ترتیب، خوردگی زیان اقتصادی عظیمی است و برای کاهش دادن آن کارهای زیادی می‌توان انجام داد. اگر این نکته را در نظر بگیریم که هر جا فلز و مواد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد خوردگی با درجه و شدت‌های متفاوتی واقع می‌گردد، این رقم‌های بزرگ دلاری چندان غیرمنتظره نخواهند بود. به مثال‌های زیر توجه کنید: بر طبق آمارهای وال استریت جورنال (۱۱ سپتامبر ۱۹۸۱) هزینه‌ی خوردگی در صنعت نفت و گاز حدود ۲ بلیون دلار است. این هزینه‌ها در حال افزایش هستند



زیرا چاه‌ها عمیق‌تر و محیط‌ها خورنده‌تر می‌شوند (دماهای بالا و گازهای سولفوری خورنده مثلاً ۵۰۰ درجه‌ی فارنهایت و سولفید هیدروژن). خوردگی پل‌ها با گذشت زمان یک مشکل اساسی است و تعویض آن‌ها بلیون‌ها دلار هزینه در بر دارد. سقوط پل سیلور بریج (به خاطر خوردگی توأم با تنش) در رودخانه‌ی اوهایو به قیمت جان ۴۰ انسان و میلیون‌ها دلار تمام شد. خوردگی پل‌ها حدود ۵۰۰ میلیون دلار هزینه در بر دارد. طراحی صحیح و استفاده از حفاظت کاتدی هزینه‌ها را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. یک کمپانی بزرگ مواد شیمیائی سالیانه بالغ بر ۴۰۰۰۰۰ دلار صرف تعمیرات و نگهداری در رابطه با خوردگی در واحدهای اسید سولفوریک می‌کند، در حالی که شرایط خوردگی چندان حاد نیست. در یک کارخانه‌ی دیگر هزینه‌ی رنگ‌آمیزی برای جلوگیری از زنگ زدن در اتمسفر دریایی ۲ میلیون دلار در سال است. در یک پالایشگاه که فرآیند جدیدی را شروع کرده بود بعد از فقط ۱۶ هفته مشکل حادی به وجود آمد؛ بعضی قطعات به میزان تا  $\frac{1}{8}$  اینچ خورده شده بودند. صنعت نفت برای حفاظت خطوط لوله‌ی زیرزمینی روزانه یک میلیون دلار خرج می‌کند. در صنعت کاغذ پیش‌بینی می‌شود که خوردگی باعث افزایش قیمت کاغذ به میزان ۶ تا ۷ دلار در هر تن می‌شود. تبدیل ذغال سنگ به گاز و نفت مشتمل است بر دماهای بالا، ذرات ساینده، گازهای خورنده و لذا مشکلات خوردگی حادی در بر دارد که بایستی راه‌حل‌های آن‌ها پیدا شود. هزینه‌های خوردگی در اتومبیل‌ها - سیستم سوخت، رادیاتور، اگزوز، و بدنه - در حد بلیون‌ها دلار است. تقریباً ۳ میلیون آبگرمکن خانگی سالانه به علت خوردگی بایستی تعویض گردند. خوردگی در همه جا وجود دارد - در داخل و خارج منزل، در جاده، در دریا، در کارخانه، و در وسائل هوا - فضائی. کل هزینه‌ی سالانه‌ی سیل‌ها، گرداب‌ها، آتش‌سوزی‌ها، رعد و برق‌ها و زمین‌لرزه‌ها کمتر از هزینه‌ی خوردگی می‌باشند. هزینه‌های خوردگی در دهه‌ی آینده به دلیل کمبود جهانی مواد ساختمانی، هزینه‌ی بالاتر انرژی، محیط‌های خورنده‌تر و در فرآیندهای تبدیل ذغال سنگ، افزایش وسیع در تعداد و محدوده‌های کاری کارخانجات و فاکتورهای دیگر به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت. ملاحظات سیاسی نیز یک عامل مهم هستند. ما در مورد بعضی فلزات عمدتاً وابسته به کشورهای خارجی هستیم: ۹۰ درصد کرم (عنصر آلیاژی اصلی برای فولادهای زنگ نزن) و ۱۰۰ درصد

کلومبیم (نیوبیم) که در آلیاژهای مورد استفاده در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد وارداتی می‌باشند. این منابع ممکن است قطع شوند یا قیمت‌ها را افزایش یابد. مثلاً در یک بحران اخیر، قیمت کلومبیم از ۵ دلار به ۵۰ دلار بازاری در هر پوند افزایش یافت. تولید فلزاتی که برای مقابله با خوردگی یا برای جایگزینی قطعات خورده شده به کار می‌روند، مقادیر انرژی بالایی لازم دارند، و در نتیجه مشکل انرژی مملکت را حادتر می‌کند. جامع‌ترین بررسی هزینه‌ی سالانه‌ی خوردگی فلزات در ایالات متحده به وسیله‌ی اداره‌ی ملی استاندارد<sup>1</sup> NBS و انستیتو بتل<sup>2</sup> در پاسخ به کنگره انجام شد. نتایج در یک سری هفت قسمتی به چاپ رسیده است. اولین قسمت این گزارش تحت عنوان بررسی هزینه‌های خوردگی به وسیله‌ی اداره‌ی ملی استاندارد - انستیتو بتل (۷۰ بیلیون دلار) قسمت اول - مقدمه در متریل پرفورمانس، ماه مه ۱۹۸۰ به چاپ رسیده است. شش قسمت بعدی در شماره‌های بعدی آن مجله به چاپ رسیده‌اند. (ژوئن - نوامبر ۱۹۸۰). رقم ۷۰ بیلیون دلار<sup>3</sup> هزینه‌ی خوردگی فلزات (غیرفلزات شامل نشده‌اند) در سال ۱۹۷۵ می‌باشد. اگر خوردگی وجود نداشته باشد، این مقدار از نظر عملی کاربردی ندارد، ولی اهمیت مسئله را می‌رساند. متأسفانه، در مقالات بعدی، ۷۰ بیلیون دلار را «هزینه خوردگی» بیان نموده‌اند و این گمراه‌کننده است. (این مفهوم را بیان می‌کند که ۷۰ بیلیون دلار می‌تواند صرفه‌جویی گردد) زیرا در مورد کاهش اکثر این هزینه‌ها هیچ راه‌حل اقتصادی وجود ندارد. مثل این است که سؤال شود اگر از خوردن غذا خودداری کنید، در مورد بودجه‌ی مواد غذایی چقدر صرفه‌جویی خواهد شد. لکن، گزارش حاکی از آن است که حدود ۱۰ بیلیون دلار از هزینه‌ی فوق‌الذکر را می‌توان با اعمال بهترین روش‌های موجود مبارزه با خوردگی صرفه‌جویی نمود. صنایع مواد شیمیائی متحمل هزینه‌های بالایی می‌گردند علی‌رغم اینکه این صنعت در زمینه‌ی روش‌های کنترل خوردگی در خط اول قرار دارد. در حقیقت اگر خوردگی وجود نداشت اقتصاد جامعه‌ی ما به شدت تغییر می‌کرد. مثلاً اتومبیل‌ها، کشتی‌ها، خطوط لوله‌های زیرزمینی و وسایل خانگی احتیاج به پوشش نداشتند، صنایع فولاد زنگ نزن از بین می‌رفتند و مس فقط برای

<sup>1</sup> . National Bureau of Standards

<sup>2</sup> . Battelle Memorial Institute

<sup>3</sup> . وزارت اقتصاد ایالات متحده اظهار داشته است «خوردگی در ۱۹۸۲ حدود ۱۲۶ بیلیون دلار برای ایالات متحده هزینه خواهد داشت». (متریال پرفورمانس، فوریه ۱۹۸۳).

مقاصد الکتریکی به کار می‌رفت. اکثر کارخانجات و محصولات که از فلز ساخته می‌شوند از فولاد یا چدن ساخته می‌شدند.

اگرچه خوردگی اجتناب‌ناپذیر است، ولی هزینه‌ی آن را به مقدار زیادی می‌توان کاهش داد. مثلاً یک آند ارزان قیمت منیزیم می‌تواند عمر مخزن آبگرمکن خانگی را دو برابر کند. شستشوی اتومبیل برای زدودن نمک‌هایی که برای یخبندان روی جاده می‌پاشند مفید است. انتخاب صحیح مواد و طراحی خوب، هزینه‌های خوردگی را کاهش می‌دهد. برنامه‌ی صحیح تعمیرات و نگهداری چندین برابر مخارجش را صرفه‌جویی می‌کند. اینجاست که مهندسی خوردگی وارد صحنه می‌شود و می‌تواند مؤثر باشد - مأموریت اصلی او مبارزه با خوردگی است. جدا از مخارج مستقیم دلاری، خوردگی یک مشکل جدی است زیرا بطور روشنی باعث تمام شدن منابع طبیعی ما می‌گردد. مثلاً فولاد از سنگ آهن به دست می‌آید، و میزان تولید داخلی سنگ آهن پر عیار که مستقیماً قابل استفاده باشند به شدت کاهش یافته است. جدول زیر توسعه‌ی صنعتی سریع بسیاری از کشورها نشان می‌دهد که رقابت برای و قیمت منابع فلزی افزایش خواهد یافت. ایالات متحده دیگر مصرف‌کننده‌ی اصلی منابع معدنی نیست.

جدول ۶-۱۱ آمار و ارقام خسارات ناشی از خوردگی

نام کشور	سال	هزینه‌های خوردگی	ناخالصی ملی	منبع
آمریکا	۱۹۷۵	حدود ۷۰ میلیارد دلار	٪۴/۲	کمیته ملی استانداردها
آمریکا	۱۹۸۹	۳۰٪ ± ۲۰۰ میلیارد دلار	-	انستیتو ملی علوم و تکنولوژی
آمریکا	۱۹۹۸	۲۷۹ میلیارد دلار	٪۳/۲	شبکه تحلیل گران تکنولوژی ایران
آمریکا	۱۹۹۸	تا ۸ بیلیون دلار	-	کمیسیون ملی سیاست و برنامه‌ریزی
آلمان غربی	۱۹۶۷	۶ میلیارد دلار	٪۳	شبکه تحلیل گران تکنولوژی ایران
آلمان	۱۹۷۸	۴۵ میلیارد مارک	-	کمیته ملی استانداردها
انگلستان	۱۹۷۰	۱/۳۶۵ میلیارد پوند	٪۳/۵	شبکه تحلیل گران ایران
انگلستان	۱۹۷۸	-	٪۳/۵	شبکه تحلیل گران ایران
هند	۱۹۶۰	۳۲۰ میلیارد دلار	-	شبکه تحلیل گران ایران
زاین	۱۹۷۴	۹/۲ میلیارد دلار	٪۱/۸	شبکه تحلیل گران ایران
کویت	۱۹۹۵	۱ میلیارد دلار	٪۵/۲	کمیته ملی استانداردها
ایران	۱۳۶۶	۱۴۰ میلیارد ریال	۳۵۰۰ میلیارد ریال	کنگره خوردگی - مهندسی رحمانیان سال ۷۸
ایران	۱۳۶۶	۵۰ میلیارد ریال	-	صنعت نفت


فصل هفتم

ضمائم

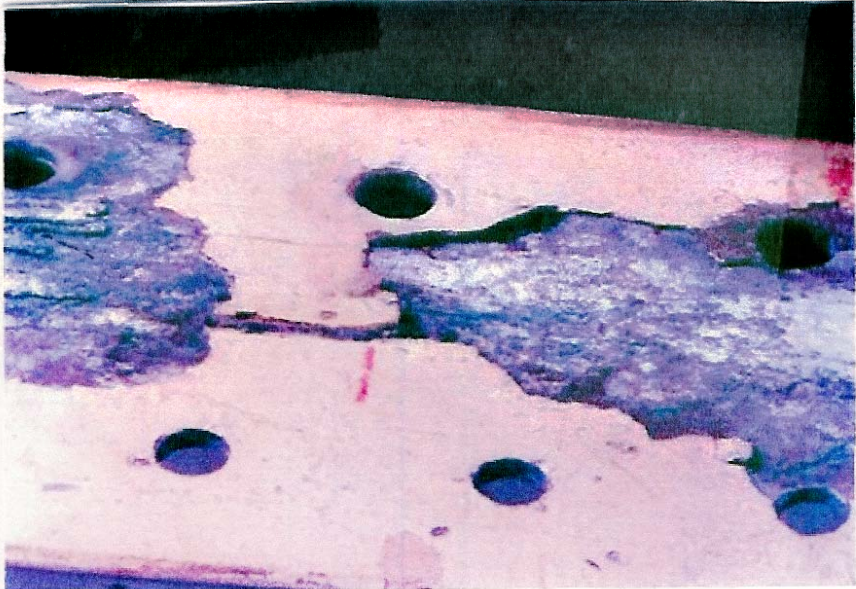
و اصطلاحات



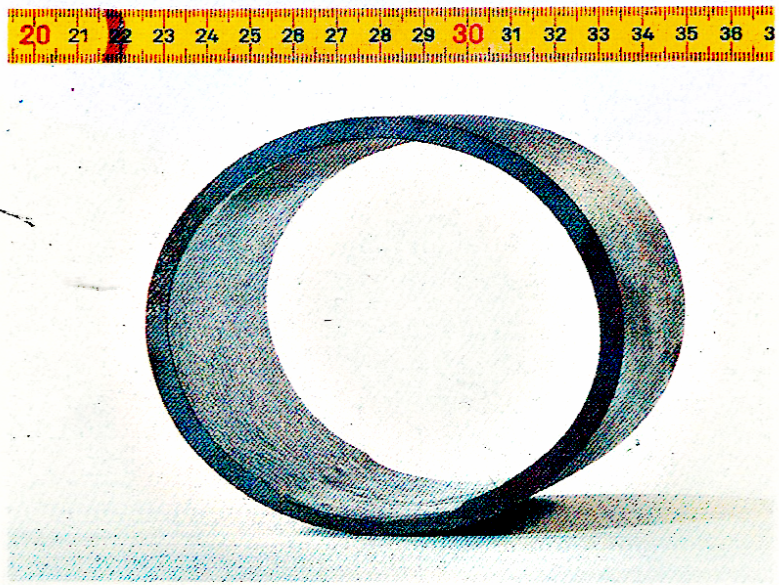
مورد: 190	صنعت: صنایع نفت
جنس نمونه: منیزیم	
سیستم: سیستم آب قنک کن	قسمت: آئر فداشونده
پدیده: فوررگی کالواتیک	مدت کارکرد: ۴ سال
ظاهر نمونه: سمت چپ: آئر کونه سمت راست: آئر سالم	
محیط: آب شور	
<p>علت پدیده: وجود پیچ و مهرعات فولاری تشکیل پیل کالواتیک را می دهند</p>	
<p>روش اصلاح: استفاده از نوار پلاستیکی بین آئر و صفحه</p>	

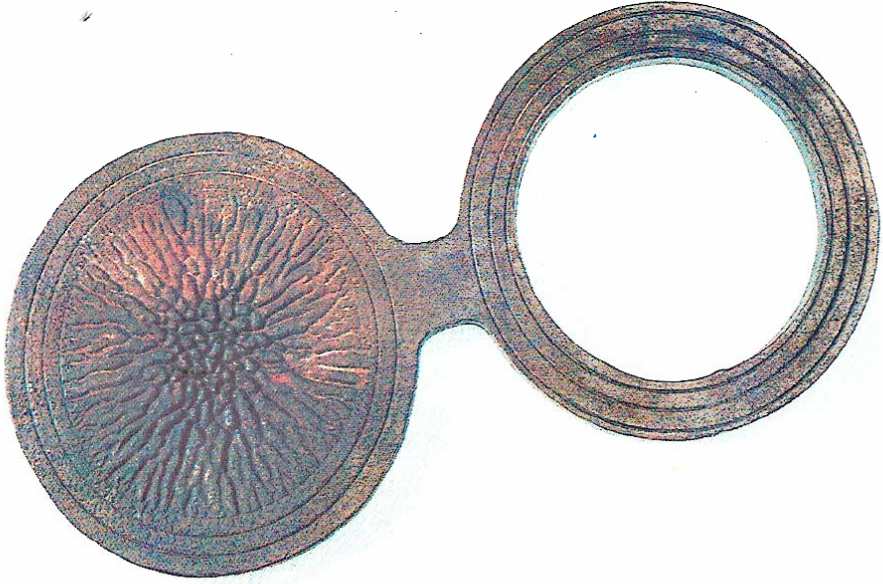
مورد: 118	صنعت: نیروگاه بشاری و صنایع برق
جنس نمونه: چدن	
سیستم: کترانسور بشاری	قسمت: پروانه پمپ
پدیده: فتره دار شدن	مدت کارکرد: 6 ماه
ظاهر نمونه: سایش موضعی روی سطح نمونه	
محیط: آب کترانسه ، دما بین 60-90 قابل تغییر است	
	
<p><b>علت پدیده:</b> این پدیده به علت تزدیک بودن پمپ به مخزن آب کترانسه سرباز و فشار غیر کافی هبابهای آب و بشار در پمپ ایجاد می شود ترکیب این هبابها باعث پدیده فتره زدایی شده است</p>	
<p><b>روش اصلاح:</b> این پدیده با بالا بردن محل مخزن آب کترانسه و یا پایین آوردن محل پمپ اصلاح می شود</p>	

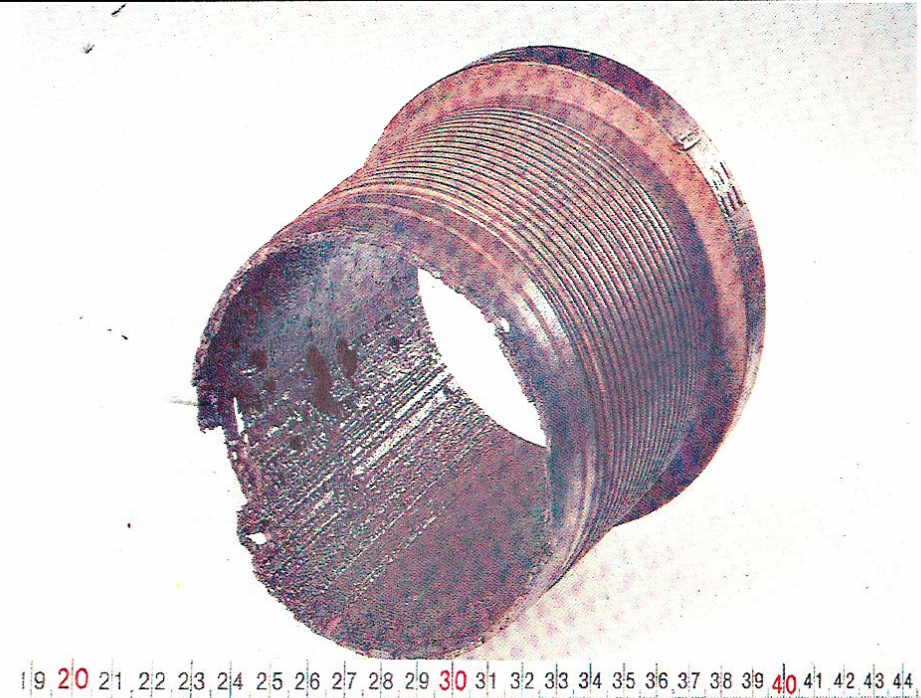


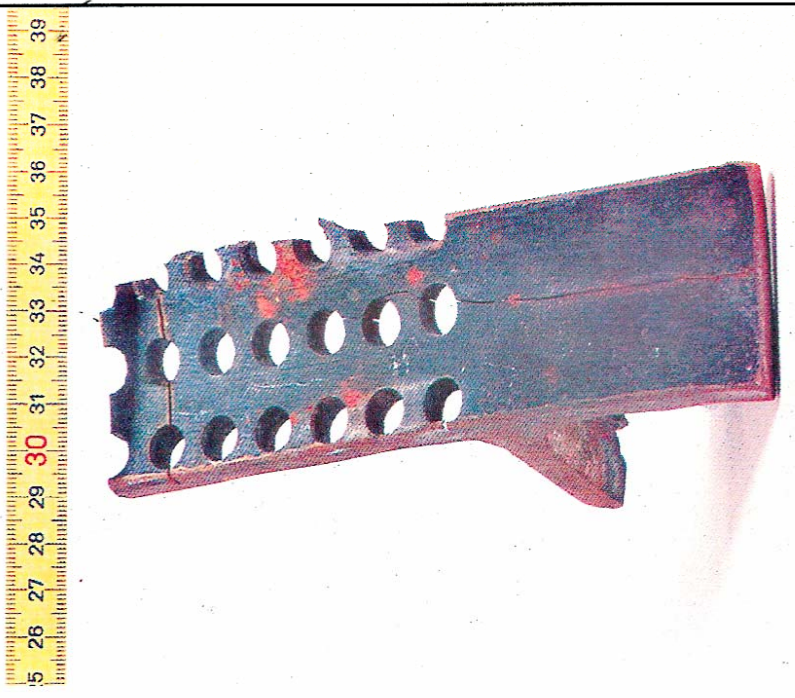
مورد:	137	صنعت:	مقابرات
جنس نمونه:	آلومینیوم ۳ - برنج		
سیستم:	ذکر مقابرات	قسمت:	اتصالات
پدیده:	شوردگی کالواتیکی	مدت کارکرد:	۱۰ سال
ظاهر نمونه:	وجود اکسید آلومینیوم ۳ و کنترکی در سطح آلومینیوم ۳		
محیط:	اتمسفر مرطوب		
			
علت پدیده:	وجود برنج و سفحه آلومینیوم ۳ و برنج و اتصال آنها به یکدیگر		
روش اصلاح:	نصب واشر عایق و انتقال فلز از یک جنس		

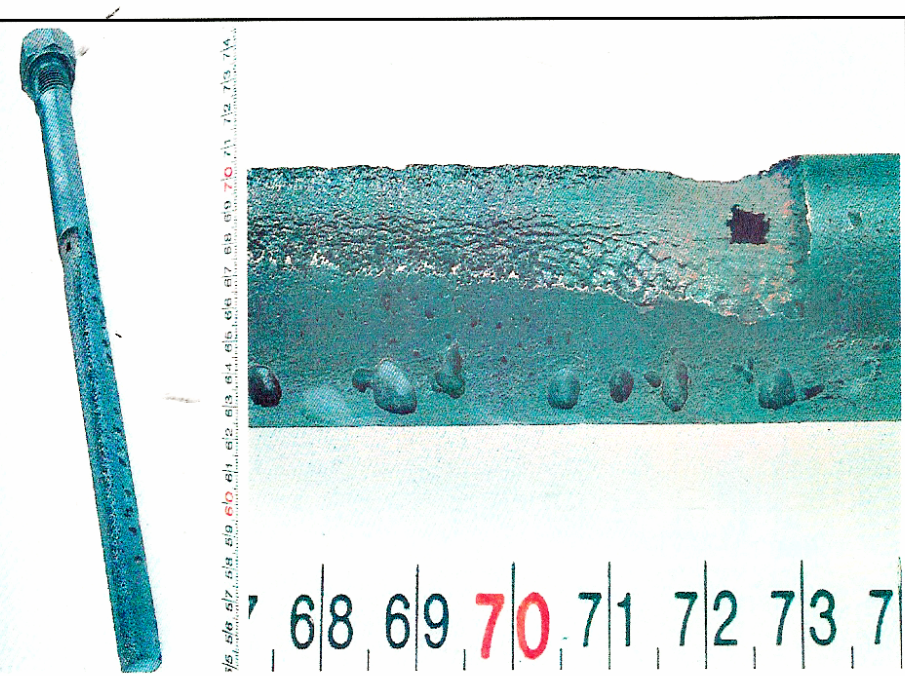
مورد: 134	صنعت: نفت
جنس نمونه: فولاد کربنی با پوشش اپوکسی	
سیستم: پایه نفت	قسمت: لوله پایه
پدیده: خوردگی CO <sub>2</sub>	مدت کارکرد: ۲ تا ۴ سال
ظاهر نمونه: در مناطقی که پوشش دچار آسیب شده فولاد به صورت موضعی دچار خوردگی شدید شده است	
محیط: نفت خام حاوی آب و نمک و CO <sub>2</sub> و دمای حداکثر ۵۰°C	
	
علت پدیده: پوشش در زمان عمل و نقل و یا عدم پوشش دهی با کیفیت خوب در زمان اعمال تخریب می شود و در نقاطی که پوشش دچار آسیب می شود به دلیل دی اکسید کربن زیاد و آب نمک سطح فولاد به شدت خوردگی شده است	
روش اصلاح: استاره از بازدارنده در پایه نفت ، استغاره از فولاد زنگ نزن - ارتقاء بازرسی فنی در زمان اعمال پوشش - دقت در زمان عمل و نقل	

مورد: 114	صنعت: کارخانه های شیمیایی و صنعتی
جنس نمونه: فولاد کربنی	
سیستم: قط انتقال سورا	قسمت: لوله
پدیده: خوردگی قلیایی	مدت کارکرد: ۴ سال
ظاهر نمونه: کاهش موضعی ضخامت دیواره	
محیط: سورا ۵۰٪ / ۰٫۵ دمای دیواره لوله در اکثر ۱۴۰ C	
	
علت پدیده: خوردگی سورا به دلیل افزایش دمای موضعی در هنگام توقف تولید	
روش اصلاح: باید از تمهیزاتی استفاده نمود تا دما را کنترل کند و مانع از بالا رفتن دما شده و از خوردگی جلوگیری کند	

مورد:	314	صنعت:	تیر و گاهها
جنس نمونه:	فولاد کربنی	قسمت:	فلنج
سیستم:	ریگ بشار	مدت کارکرد:	تامشفس
پدیده:	فوردگی سایشی	ظاهر نمونه:	وهور زدگی ستاره شکل
محیط:	بشار اشباع		
علت پدیده:	فشارت پکشی آب		
روش اصلاح:	بدا کردن آب از بشار و بازدید فلنج ها		

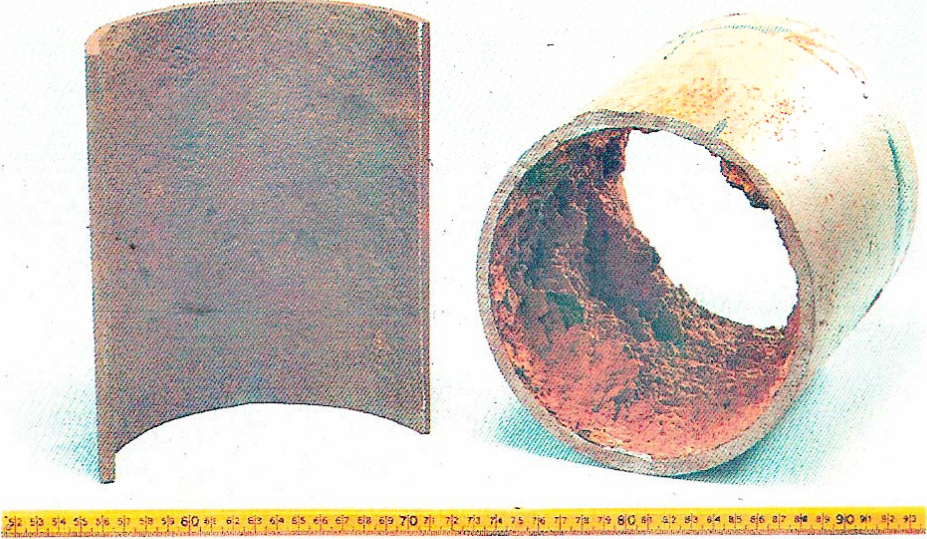
مورد: 307	صنعت: وزارت نفت
جنس نمونه: کربن استیل	
سیستم: پاهوای گاز	قسمت: لوله مغزی پاه
پدیده: خوردگی شیرین	مدت کارکرد: پانزده سال
ظاهر نمونه: وجود فغره و شیار در سطح فلز	
محیط: دی اکسید کربن مرطوب و گاز	
	
علت پدیده: جریان متلاطم	
روش اصلاح: کنترل سرعت و تزریق ممانعت کننده خوردگی	

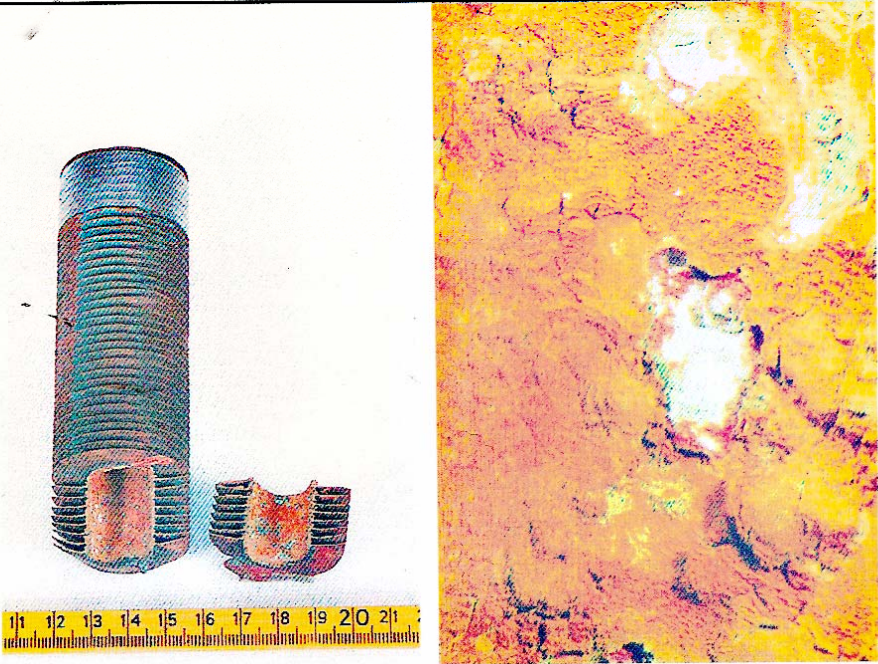
مورد: 312	صنعت: صنعت درگ بشار نیروگاهها
جنس نمونه: فولاد کربنی	
سیستم: سیستم بشار	قسمت: لوله
پدیده: خوردگی بین دانه ای و تنش	مدت کارکرد: ۱۰ سال
ظاهر نمونه: وجود ترک و سوراخ	
محیط: آب- بشار و PH=۱۲ و دمای ۱۴۰ °C	
	
علت پدیده: دما و مطلق قللیایی	
روش اصلاح: نرمالیزه کردن فولاد	


مورد: 317	صنعت: نیروگاه و پالایشگاهها
جنس نمونه:	فولاد کربنی کم آلیاژ
سیستم:	سیستم بخار
قسمت:	ترمو متر
پدیده:	فوررگی سایشی
مدت کارکرد:	۱۵ سال
ظاهر نمونه:	فوررگی یکنواخت و موضعی
محیط:	بخار داغ - $495^{\circ}\text{C}$ - فشار ۱۰۰ بار - سرعت $37\text{ m/s}$
	
علت پدیده:	وجود قطره آب در بخار
روش اصلاح:	تعویض جای ترمومتر

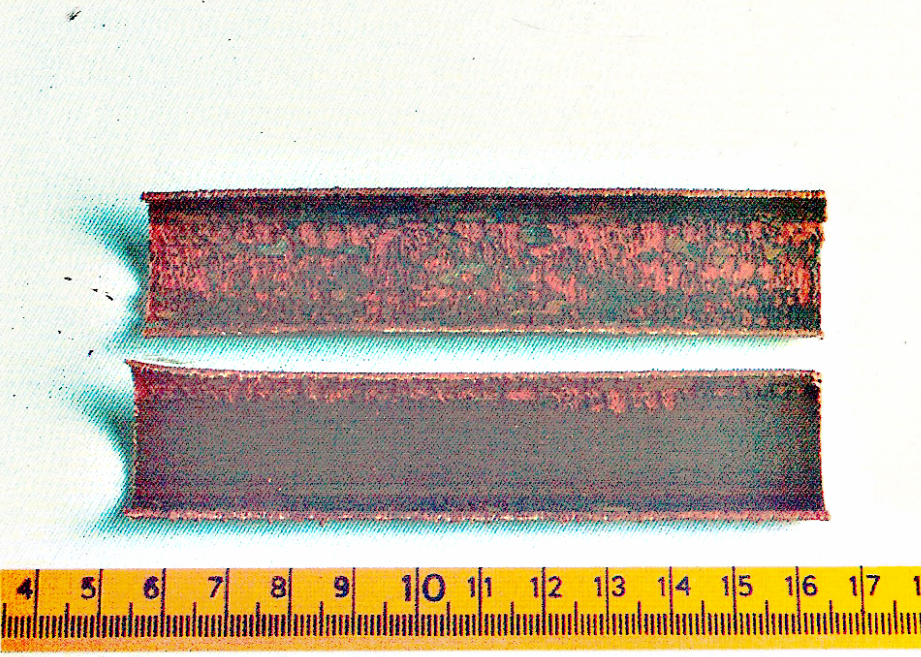
مورد:	316	صنعت:	پتروشیمی
جنس نمونه:	فولاد کربنی	قسمت:	زنپیر
سیستم:	سیستم کوره	مدت کارکرد:	۱ سال
پدیده:	شکنندگی شبکه کریستالی فلز	ظاهر نمونه:	شکست پوسته های سطحی
محیط:	بفاز روی ۹۰۰ درجه - دمای کوره کمتر از ۱۸۰۰ °C		
			
<p>3/3, 3/4, 3/5, 3/6, 3/7, 3/8, 3/9, 4/0, 4</p>			
علت پدیده:	نفوذ بفازات روی در شبکه های کریستالی فولاد		
روش اصلاح:	سافتن زنپیر از جنس برنج و تعویض قطعات فورده شده		



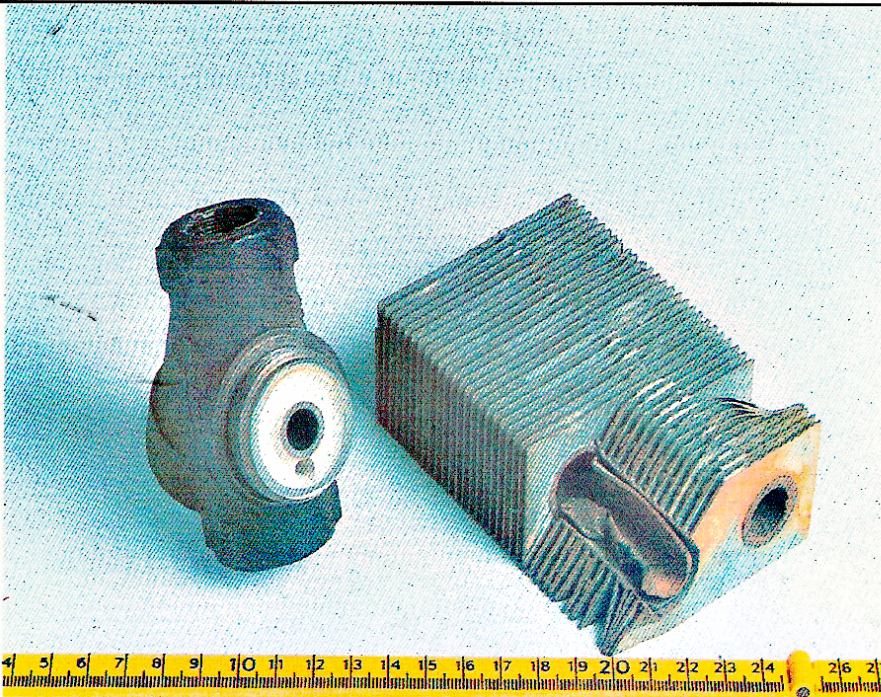
مورد: 308	صنعت: نفت
جنس نمونه: فولاد کربنی	
سیستم: فنک کننده	قسمت: لوله
پدیده: همله آکسیژنی	مدت کارکرد: ۲ سال
ظاهر نمونه: ویور عمیق	
محیط: آب فنک - PH=۷ - دریا - ۳۰ °C	
	
علت پدیده: ویور آکسیژن در آب	
روش اصلاح: استفاده از ممانعت کننده خوردگی و تزریق مواد جهت کاهش رسوبات	

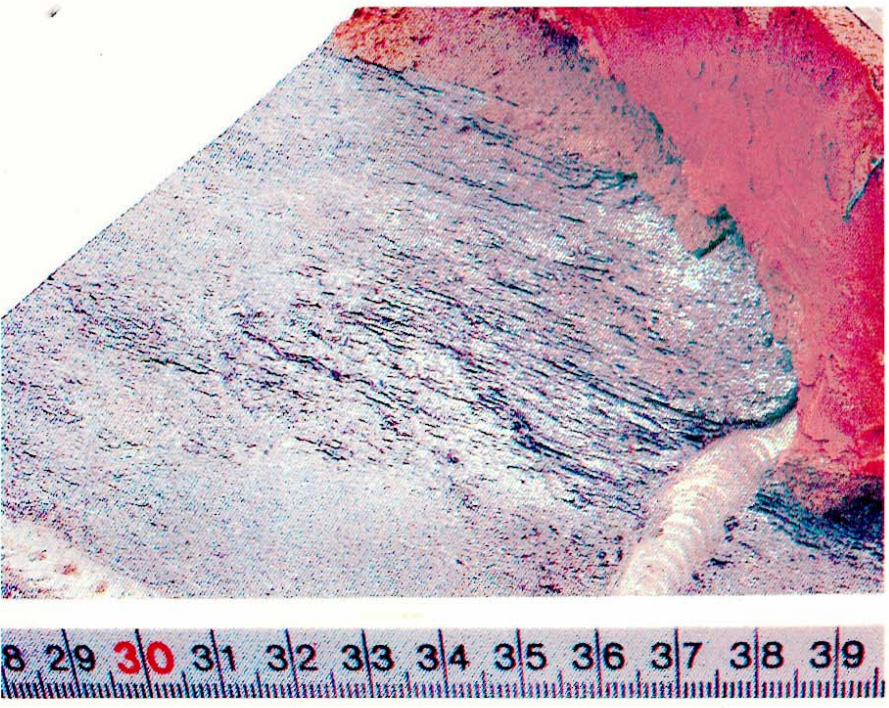
مورد: 170	صنعت: پالایشگاه
جنس نمونه: مس	
سیستم: آب فنک کرن یکبار گذر	قسمت: لوله فنک کننده روغن
پدیده: فوردهی رسوبی	مدت کارکرد: تا مشخص
ظاهر نمونه: وجود فوردهی فغره ای	
محیط: آب حاوی آلومین	
	
<p><b>علت پدیده:</b> فورته بودن آب مذکور و انتقال محصولات فوردهی و رسوب بر روی لوله های مسی و ایجاد پیل غلظتی از عوامل فوردهی است</p>	
<p><b>روش اصلاح:</b> استفاده از لوله های پلاستیکی بجای لوله های فولادی</p>	

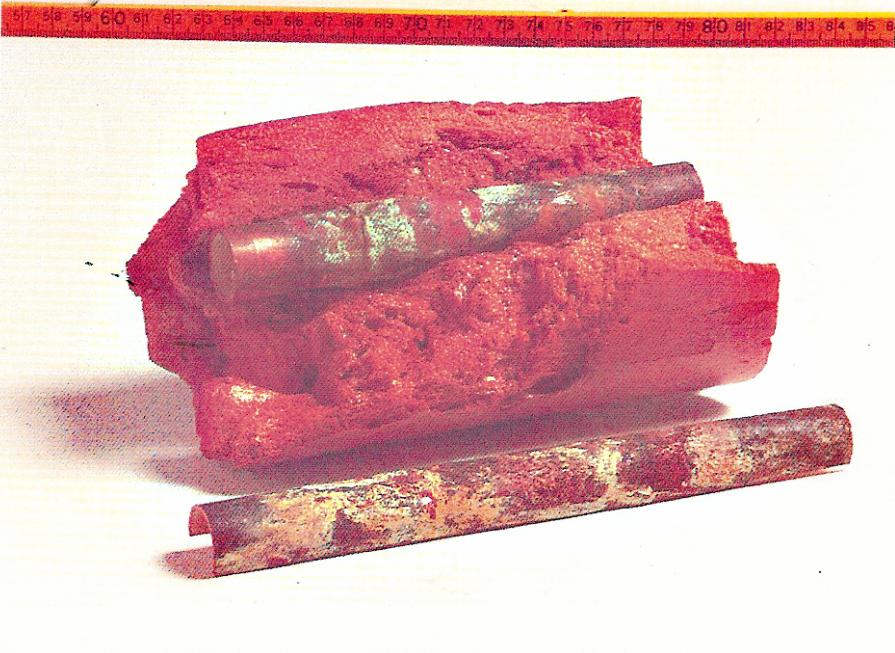
مورد: 186	صنعت: تیر و گاهها
جنس نمونه: برنز	
سیستم: قسمت تمیز کننده	قسمت: پروانه پمپ
پدیده: سایش	مدت کارکرد: 1 سال
ظاهر نمونه: برنز به صورت مشورر فورده شده است	
محیط: آب دریا	
	
علت پدیده: عدم تزریق مواد ضد فورده	
روش اصلاح: استفاده از فلز مقاوم	

مورد: 196	صنعت: صنایع فرمات شوری
جنس نمونه: مس	
سیستم: آب گرم	قسمت: لوله
پدیده: سایش	مدت کارکرد: ۳ ماه
ظاهر نمونه: فرایند و تقریب لوله ورود ۱/۵ متر	
محیط: آب گرم و دمای ۷۰ X	
	
علت پدیده: به علت وجود رسوب و مایعاتی هوا از عوامل خوردگی سایشی است	
روش اصلاح: تعویض لوله معیوب و تمیز کردن رسوبات دیگ بخار و استفاده از آب نرم	


مورد: 116	صنعت: شیمیایی و صنایع پالایش
جنس نمونه:	ماده پایه فولاد آلیاژی است که از پهلوه به فولاد زنگ نزن آلیاژی ۳۴۷ پوش داده شده است.
سیستم:	واحد گوگرد زدایی
پدیده:	فوردگی گوگردی
ظاهر نمونه:	عملیات یکنواخت در فلز پایه
محیط:	شامل هیدروکربنها با H <sub>2</sub> S و H <sub>2</sub> است فشار ممتد هیدروژن ۳۰ بار است دما هرود ۳۸۵-۳۵۰ °C
	
علت پدیده:	فلز پایه در حضور هیدروژن مورد حمله گوگرد در دمای بالا قرار گرفته است
روش اصلاح:	برای برطرف شدن مشکل باید فولاد پایه با فولاد زنگ نزن ۳۴۷ پوش داده شود

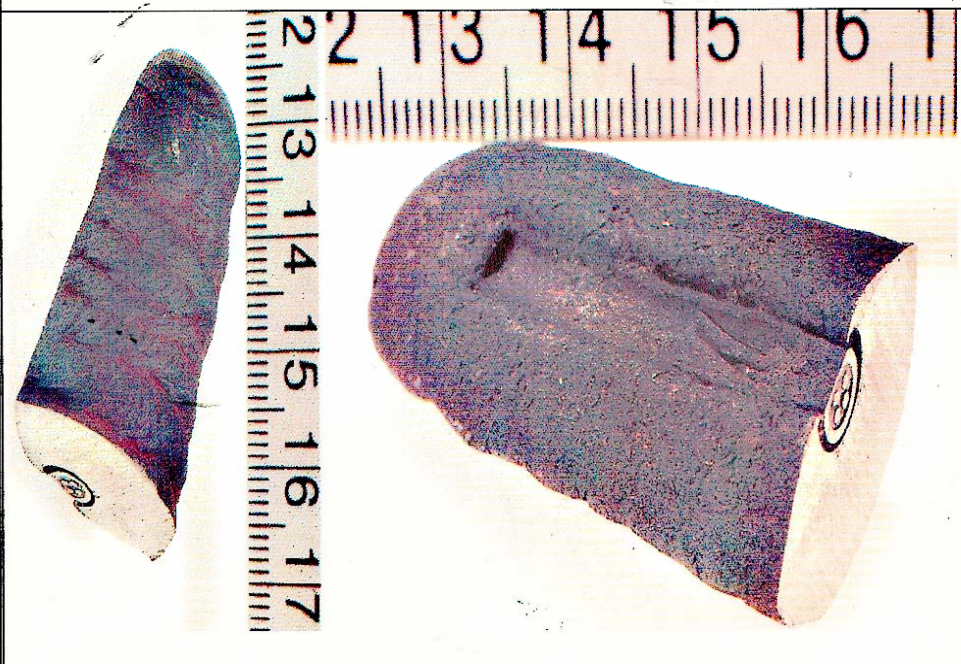
مورد: 128	صنعت: تاسیساتی و نیروگاهها
جنس نمونه: فولاد کربنی گالوانیزه به روشن غوطه وری داغ	
سیستم: دستگاه پکالاش بقار	قسمت: رادراتور
پدیده: فوررکی اسید کربنیک	مدت کارکرد: ۷ ماه
ظاهر نمونه: فوررکی یکنواخت	
محیط: آب مقطر فورتره با دمای 90-100°C	
 <p>The image shows a cylindrical metal component with a white, crystalline deposit on its inner surface, indicating corrosion. Next to it is a rectangular metal component with a similar deposit. A yellow scale bar is placed below the components for size reference, showing markings from 4 to 26 centimeters.</p>	
<p><b>علت پدیده:</b> فلز روی با اکسیژن مخلول در آب، اکسید روی را تولید نموده که بر روی فلز را سبب شده و در نهایت باعث گرفتگی لوله می شود. همچنین آب مقطر سبب فوررکی بر روی و همچنین فولاد می شود.</p>	
<p><b>روش اصلاح:</b> استفاده از آبی که مقدار یی کربنات و <math>CO_2</math> آن کمتر است، و استفاده از آمینهای نوع فیلمی به منظور کاهش فوررکی آب است.</p>	

صنایع پتروشیمی	صنعت :	200	مورد :
		آلومینیوم ۹۹/۰	جنس نمونه :
قسمت قاربی مخزن	قسمت :	تانگ	سیستم :
مدت کارکرد: پندرین سال		فورگی لایه ای	پدیده :
		وجود ورقه های آکسیدی	ظاهر نمونه :
		اتمستف	محیط :
			
<p>علت پدیده: مرطوب شدن عایقها و آکسید شدن آلومینیوم</p>			
<p>روش اصلاح: به کار بردن یک لایه لاستیکی بین آلومینیوم و آزبست</p>			

مورد: 173	صنعت: فرمات شهری
جنسی نمونه: مس	
سیستم: آب گرم شهری	قسمت: لوله زیر زمینی
پدیده: خوردگی زیر عایق	مدت کارکرد: ۱۲ سال
ظاهر نمونه: وجود سوراخ و خوردگی موضعی	
محیط: عایق پلی اورتان مرطوب	
	
<p><b>علت پدیده:</b> دمای زیاد باعث می شود تری کلرید اتیل فسفات موجود در عایق به اسید فسفریک و کلرید تبدیل و باعث خوردگی شدن لوله گردد.</p>	
<p><b>روش اصلاح:</b> به کارگیری عایق مناسب و استغاره از (پور) که در آن کلرید اتیل سولفات نباشد</p>	



مورد: 178	صنعت: پتروشیمی
جنس نمونه: برنز	
سیستم: پمپ شستشو	قسمت: پروانه
پدیده: خوردگی اسیدی	مدت کارکرد: چند ساعت
ظاهر نمونه: خوردگی یکنواخت شدید	
محیط: اسید سولفوریک یک درصد و دمای ۳۰ C	
	
علت پدیده: برنز در مقابل اسید سولفوریک مقاومت ندارد	
روش اصلاح: استفاده از فولاد ضد زنگ AISI ۳۱۶ L	

مورد: 192	صنعت: فولاد
جنس نمونه: اینتگولوی که با استیلیت ۶ به هم جوش داده شده	
سیستم: سیستم گرآکین	قسمت: ترموکوپل
پدیده: سایش	مدت کارکرد: حدود ۶ ماه
ظاهر نمونه: ماده پوشاننده به صورت استوانه بوده که مقداری فورده شده است	
محیط: بکار با چزنی گگ و دمای C ۶۰۰-۵۰۰	
	
علت پدیده: سرعت زیاد ذرات گگ در طول عملیات	
روش اصلاح: به کار بردن ترموکوپل از جنس استیلیت	

### اصطلاحات رایج در خوردگی

Absorber	جذب کننده
Acid picking	تمییز کردن سطح فلزات با اسید
Activation	فعال کردن
Active	حالتی که فلز در آن تمایل به خوردگی دارد .
Active metal	فلزی که آماده خورده شدن می باشد .
Active-Passive metals	فلزاتی که انتقال از حالت فعال به غیر فعال از خود نشان می دهند .
Active potential	محدوده پتانسیل فعال فلز
Aerated	اکسیژن دار
Aeration	هوادهی
Aero space corrosion	خوردگی در صنایع فضایی
Agitation	تلاطم ، به هم زدن
Alkali	قلیایی
Alloy	آلیاژ
Anaerobic	عدم وجود اکسیژن آزاد ، اکسیژن موجود در آب اسید سولفوریک که آزاد نمی باشد

Anion	یون یا رادیکال با بار منفی که به طرف آند جذب می شود.
Anode	الکترودی که در آن واکنش اکسیداسیون با خوردگی اتفاق می افتد .
Anodic protection	حفاظت آندی ، کاهش قابل ملاحظه سرعت خوردگی با آند کردن فلز و نگه داری آن در این حالت پولاریزه شده بوسیله عبور دادن جریان الکتریکی خیلی کم .
Anti-fouling	موادی که مانع از چسبیدن یا رشد جانوران آبی به سطح فلز می شوند.
Aqueous	محلول حاوی آب
Araldite	نوعی پلاستیک از خانواده اپوکسی ها
Armco iron	نوعی آهن خالص تجاری
Austenitic	گروهی از فولادهای زنگ نزن
Avisco	نوعی پلاستیک ترموست از خانواده اوره ها
Babbitt Alloy	بابیت های قلع که در یاتاقان ها بکار می رود .
Back Fill	پشت بند های آند فدا

	شونده
Baffle	صفحه ای که محفظه انتهایی میدل حرارتی را به دو قسمت می کند .
Baking	حرارت دادن
Baking Soda	جوش شیرین
Bimetallic Corrosion	خوردگی ناشی از تماس دو فلز غیر همجنس با یکدیگر
Biocompatible	سازگار از نظر بیولوژیکی
Biological Corrosion	خوردگی بیولوژیکی
	Bleach ماده سفید کننده
Blistering	تاول زدن
Boggy	لجنی
Bonderizing	روشی برای ایجاد پوشش روی سطح فلز ،فسفاته کردن در حمام اسید فسفریک
Braking Water	آب شور
Braze	زرد جوش
Buna Rubber	نوعی پلاستیک مصنوعی
Calorizing	پوشش دادن بوسیله آلومینیوم
Carbon pickup	جذب کربن از محیط کربن

	دار که در مورد فولادهای زنگ نزن کم کربن مثلاً" موقع جوشکاری با ریخته گری در ماسه های رزین دار پیش می آید
Carburization	جذب کربن بوسیله فلز در درجه حرارت بالا
Casing	جداره فلزی لوله ای که در چاه های نفت و گاز استفاده می شود .
Cast Iron	چدن
Catastrophic Oxidation	اکسیداسیون ناگهانی
Cathod	الکترودی که در آن عمل احیاء صورت می گیرد و در نتیجه عملاً" در آن خوردگی صورت نمی گیرد .
Cathodic Polarization	کاهش پتانسیل اولیه در اثر عبور جریان الکتریکی از یک فلز در اثر پولاریزاسیون کاتدی پتانسیل در جهت فعال تر شدن تغییر می کند
Cation	یون با رادیکال مثبت که جذب کاتد می گردد.
Caulking	کالک کردن ، پر کردن درزها و شیارها برای آب بندی
Caustics	مواد قلیایی ، ترکیبات غیر آلی که در آب یون

	OH دارند.
Cavitation	تشکیل حباب در اثر اختلاف فشار و انفجار آن ها روی سطح فلز
Cell	مداری که شامل آند و کاتد در تماس الکتریکی با یکدیگر که در یک الکترولیت قرار دارند .
Cementation coating	پوشش دادن بوسیله نفوذ در درجه حرارت بالا مانند کربوره شدن
Chafing	ساییدگی یا پوسته پوسته شدن
Chalking	سفیدک زدن، از بین رفتن پوششی در اثر نفوذ آب
Chemical conversion	تبدیل شیمیایی، روشی برای ایجاد پوشش روی فلزات
Chlorimet	از آلیاژهای نیکل
Chromatizing	کروماته کردن
Chromium Depletion Theory	تئوری تخلیه کروم
ChromiumStainless Steel	فولاد زنگ نزن کرم دار
Cladding	قرار دادن دو ورقه فلز روی هم و اتصال آن ها توسط نورد گرم روکش کردن

Coating	پوشش
Common Sense	عقل سلیم، شعور
Concentrator	تغلیظ کننده
Condensate Wells	نوعی چاه نفت با فشار بالا
Corrosion	خوردگی، از بین رفتن ماده (معمولاً فلز) یا خواص آن در اثر واکنش با محیط اطراف
Corrosion testings	آزمایش های خوردگی
Couple	پیل حاصل در اثر تماس الکتریکی دو فلز غیر همجنس در یک الکترولیت
Cracking	شکستن به شکل ترد
Crazing	توسعه و گسترش شبکه ای از ترک های ریز در داخل فلز
Cross Weld	جوشکاری متقاطع
Cupronickel	آلیاژهای مس با نیکل
Current Density	جریان در واحد سطح
Dealloying	جدایش انتخابی، جدا شدن یکی از عناصر آلیاژی هنگام خوردگی آلیاژ
Deactivation	فرآیند خارج ساختن اجزاء خورنده از یک محیط



Decarbrization	دکربوره شدن یا از دست دادن کربن
Defect	نقص، عیب
Demieralization	خارج ساختن مینرال های حل شده معمولاً "آب"
Depolarization	حذف یا کاهش پولاریزاسیون توسط عوامل فیزیکی یا شیمیایی که باعث افزایش خوردگی می شود.
Dezineifiation	زدایش روی، جدا شدن روی از برنج موقع خوردگی که باعث بجا ماندن جرم متخلخلی از مس می شود.
Diffusion	نفوذ یک جسم در جسم دیگر
Dispersion Hardening	سخت کردن بوسیله پخش کردن ذرات یا رسوبات در داخل فلز
Dissimilar Metal Corrosion	خوردگی در اثر تماس دو فلز غیر همجنس با یکدیگر
Doping	اضافه کردن مقادیر کمی از یک عنصر به یک فلز
Dutile Iron	چدن نشکن، چدن با گرافیت کروی

Duranickel	یکی از آلیاژهای نیکل
Durichlor	یک نوع چدن مقاوم در برابر خوردگی
Dye	رنگ
Dypole	نوعی پلاستیک ترموست از خانواده پلی استرها
Economics	جنبه های اقتصادی
Electrode	محل وارد شدن یا خارج شدن جریان الکتریکی به الکترولیت با انجام واکنش های آندی و کاتدی
Electronegitive	عناصر یا ترکیباتی که تمایل به گرفتن الکترون دارند . غیر فلزات
Electropositive	عناصر یا ترکیباتی که تمایل به از دست دادن الکترون دارند . فلزات
Embrittlement	کاهش شدید انعطاف پذیری فلز یا آلیاژ
Endurance Limit	ماکزیمم تنش متناوب
Epoxy	خانواده ای از پلاستیک های ترموست
Evaluation	ارزیابی
Everdur	یکی از آلیاژهای مس

Fabricability	قابلیت یا سهولت ساخت و تولید
Failure	انهدام ، از کار افتادن
False brinelling	خوردگی مالشی
Fatigue limit	شکست فلز در اثر تنش های متناوب زیر نقطه تسلیم
Fatty acids	اسیدهای چرب
Ferritic	مربوط به ساختمان مکعبی مرکز دار فولاد
Fixible connection	اتصال قابل تنظیم
Fluxing	کمک ذوب کننده
Fogged Metal	فلزی که برق و جلای آن در اثر تشکیل یک لایه خوردگی از بین رفته است
Fouling	کثیف شدن در اثر چسبیدن موجودات آبی به سطح فلز و رشد آن ها
Frangible	شکننده
Friction Oxidation	اکسیداسیون اصطکاکی
Fused Salts	نمک های مذاب
Fused Silica	اکسید سیلیسیم شیشه ای
Galling	ساییدگی

Galvanized	روی اندود
Graphitization	گرافیت شدن یک نوع خوردگی در چدن های خاکستری
Green rot	نوعی خوردگی آلیاژهای کرم دار در درجه حرارت های بالا که در آن اکسید کرم سبز رنگ تشکیل می شود . ولی بعضی از عناصر آلیاژی دیگر به حالت فلزی باقی می مانند .
Gullies	شیارها
Hardeners	موادی که برای سخت کردن به پلیمرها اضافه می شوند .
Head Affected Zone (HAZ)	ناحیه نزدیک خط جوش که در اثر تغییرات حرارتی ساختمان میکروسکوپی فلز تغییر نموده است .
Heterogenous Alloys	آلیاژهای هتروژن یا دو فازه
High-Temperature Alloys	آلیاژهایی که در دمای بالا کاربرد دارند .
Holiday	غیر یکنواختی در پوشش های محافظ
Homogenous Alloys	آلیاژهای همگن یا تک فاز
Hot Spray	روش پاشیدن یا اسپری

	کردن رنگ بصورت داغ
Haey test	آزمایش هیویی ، یکی از آزمایش های تعیین وضعیت فولادهای زنگ نزن از نظر حساسیت به خوردگی
Human Body Corrosion	خوردگی در بدن انسان
Hydro Forming	فرآیندی برای تهیه بنزین با اکتان بالا در پالایشگاه
Hydrogen Embrittlement	ترد شدن فلز در اثر هیدروژن که از عوارض حفاظت کاتدی ، آبکاری الکتریکی یا اسید شویی مشاهده می شود .
Hydrogen Evolution	آزاد شدن هیدروژن
Hydrogen Disintegration	تشکیل ترک های داخلی در اثر نفوذ هیدروژن به داخل فلز
Hypalon	پلی اتیلن کلروسولفاناته ، یکی از مواد لاستیکی جدید
Impingement	برخورد
Inclusion	فاز ها ، ناخالصی در فلزات
Inco,International Nickel Company	اینکو، شرکت بین المللی نیکل
Inconel	یکی از آلیاژهای نیکل

Inert	عدم وجود میل ترکیبی
Inhibitors	مواد شیمیایی که برای حذف یا کم کردن خوردگی فلزات به مقدار کم به محیط های خورنده اضافه می شوند .
Inlet End Corrosion	خوردگی مدخل ورودی لوله های مبدل حرارتی
Inspection	بازرسی
Inter crystalline	بین کریستالی یا بین دانه ای
Interstitial	فضای خالی بین اتم ها در یک کریستال
Isocorrosion	خوردگی یکسان
Isocorrosion Chart	منحنی های خوردگی یکسان ،منحنی نشاندهنده سرعت خوردگی معین و ثابت با تغییر پارامترهای مختلف برای یک فلز یا آلیاژ
Karbate	اسم تجارتي یک نوع گرافیت
Killed Steel	فولاد کشته یا آرام
Knife-Line Attack	نوعی پوسیدگی به موازات خط جوش که در فولادهای زنگ نزن پایدار شده مشاهده می شود .

KTA Test	آزمایش برای ارزیابی
Kenneth Tator Associates	پوشش ها که بوسیله طراحی انجام شده است
Laminate	لایه ،ورقه
Laminated Plastic	پلاستیک های چند لایه
Lap Joint	محل اتصال دو فلز که با روی هم قرار دادن لبه های آن ها برای متصل کردن به یکدیگر تشکیل می شود
Lead Chamber Process	یکی از روش های تهیه اسید سولفوریک
Linear Polarization	پولاریزاسیون خطی
Local Action	خوردگی در اثر فعالیت پیل های موضعی
Localized Attack	خوردگی موضعی
Low Alloy Steel	فولاد کم آلیاژ
Lucite	نوعی ترموپلاستیک از خانواده آکرلیک ها
Lustrex	نوعی ترموپلاستیک از خانواده پلی استرین
Malleable Iron	چدن چکش خوار
Manhole Door	دریچه های روی تانک ها یا روی زمین

Mass Production	تولید انبوه
Marine Corrosion	خوردگی در محیط های ساحلی و دریایی
Marsh	باتلاق
Mercaptan	ترکیباتی با فرمول کلی RSH که شبیه به الکل ها و فنل ها هستند ولی بجای اکسیژن گوگرد دارند. دارای بوی نامطبوع هستند .
Metal dusting	نوع منحصر بفردی از خوردگی در درجه حرارت های بالا که محصولات خوردگی به صورت پودر هستند .
Metallic Composites	کامپوزیت های فلزی
Metallic Glasses	فلزات شیشه ای یا غیر کریستالی
Metalizing	پوشش دادن سطح بوسیله فلز به روش های مختلف اسپری
Metastable	شبه پایدار ،حالت پایداری که انرژی آن از حالت پایدار واقعی بیشتر است
Microorganisms	جاندار میکروسکوپی
Mil Scale	پوسته های اکسیدی حاصل



	از نورد گرم
Mill Penetration Per Year ,MPY	هزارم اینچ نفوذ در سال
Morphology	شکل
Mortar	ملات
Mullite	یکی از مواد نسوز معروف
Muntz metal	از آلیاژهای مس
Mussel	صدف باریک
National Association of Corrosion Engineers ,NACE	انجمن ملی مهندسين خوردگي
Nimonic Alloys	از آلیاژهای نیکل
Ni-Resist	یک نوع چدن آستینی مقاوم در برابر خوردگی
Nitriding	جذب اتم نیتروژن بوسیله فلز
Noble Potential	پتانسیل در محدوده فلزات نجیب
Nonabsorbent	چیزی که رطوبت را جذب نمی کند .
Nothch Brittleness	تردی در اثر وجود شیارها
Offshore Drilling	حفاری در دریا
Organic Acids	اسیدهای آلی
Overageing	افت سختی در رسوب سخت

Oxidizer	عامل گیرنده الکترون
Partial Reactions	واکنش های جزئی
Parkerizing	روش برای ایجاد پوشش روی سطح فلز با فرو کردن در حمام اسید فسفریک
Passive	حالتی از فلز که رفتار آن چنان است که گوئی فلز نجیبی مثل طلا و پلاتین است
Parting	جدا شدن یکی از عناصر آلیاژی هنگام خوردگی
Passive Tregion	منطقه غیر فعال
Passivity	پدیده غیر فعال شدن
Patina	پوشش سبز رنگی که روی مس و آلیاژهای آن در تماس با اتمسفر به مدت طولانی بوجود می آید.
Pewter	یکی از آلیاژهای قلع
Ph	شاخص تشخیص محیط اسیدی و قلیایی
Phosphatizing	فسفاته کردن
Pig Ments	مواد رنگی
Pilling-Bedworth Ratio	نسبت حجمی اکسید به فلز
Pitting Corrosion	خوردگی حفره ای

Plant Shutdown	از کار افتادن واحد عملیاتی
Plasticizer	موادی که برای نرم کردن پلیمرها اضافه می شود .
Plasm Jet Spraying	پاشیدن فلز مذاب با فشار زیاد به سطح فلز
Pollution Control	حفاظت محیط زیست
Potentiostat	یک وسیله الکترونیکی که الکتروود را در یک پتانسیل ثابت نگه می دارد و در حفاظت آندی بکار می رود .
Potting Compound	خمیر عایق کاری
Precipitation Hardening	سختی رسوبی
Propagation	پیشروی ،انتشار
Protective	حفاظت کننده
Pumice	سنگ پا ،پودر آن برای صاف کردن و پرداخت کردن بکار می رود .
Purity	خلوص
Pyrolytic Graphite	گرافیت حرارتی
Pyrophoric	مشتعل شونده
Quarz	اکسید سیلیسیم
Quench	سریع سرد کردن یا فرو بردن در آب یا روغن

Reduction	گرفتن الکترون ، مخالف اکسیداسیون
Redox Potential	پتانسیل تعادلی اکسیداسیون و احیاء
Reducing Or Throtting Valve	شیر تقلیل فشار
Refinery	پالایشگاه
Refractory Metal	فلزات با نقطه ذوب بالا
Relative Humidity	رطوبت نسبی
Relaxation	هنگامی که فلز به میزان معینی کشیده می شود و در این حالت به مدت کافی نگاه داشته می شود.
Reliability	قابل اعتماد
Retort	محفظه تقطیر
Ring Worm Corrosion	خوردگی زرد زخمی
Rotating Ring	رینگ یا حلقه چرخان برای آب بندی پمپ ها
Rubber	لاستیک
Rust	محصول خوردگی آهن و آلیاژهای آن به رنگ قرمز متمایل به قهوه ای که عموماً اکسید فریک هیدراته می باشد .
Sacrificial Anodes	آندهای قربانی شونده یا فدا

	شونده
Safety	ایمنی
Sandblasting	ماسه پاشی ، روشی برای تمییز کردن سطح فلز
Scaling	پوسته دار شدن
Scanning Electron Microscope	برای مشاهده سطوح معمولی فلزات در بزرگ نمایی های بالاتر از میکروسکوپ نوری
Scavengers	حذف کننده ، مواد شیمیایی که برای حذف عامل خورنده سیستم بکار می روند .
Scrubber	دستگاه تصفیه فیزیکی گاز
Scraping	تمییز کردن با ساییدن یا مالیدن کاردک
Scrubbing	تمییز کردن با مواد ساینده
Season Cracking	ترک خوردن فصلی
Segregation	جدایش تجمع
Seizizing	چسبیدن و متصل شدن دو فلز در اثر فشار و حرارت و....
Selective leaching	جدایش انتخابی ، خورده شدن یکی از اجزاء آلیاژ
Sensitization	حساس شدن

Sheltered corrosion	خوردگی در فضای بسته
Shielded area	نواحی مرده
Sherarchizing	پوشش دادن بوسیله روی با روش نفوذی
Shotpeening	ساجمه پاشی
Silver Plate	روکش نقره ای
Slurries	گل و لای
Slushing Compound	روغن یا گریسی خاص که برای حفاظت موقتی از خوردگی به فلزات زده می شود .
Solder	لحیم
Solution-Quenching	نوعی عملیات حرارتی برای حل کردن فاز دوم و ایجاد ساختمان تک فاز و پس از آن سریع سرد کردن برای بدست آوردن آن ساختمان در درجه حرارت محیط
Spalling	جدا شدن لایه های سطحی در اثر تنش های حرارتی یا مکانیکی
Sour Oil Well	چاه نفتی ترش
Spot Weld	نقطه جوش
Spontaneous Passivation	خود بخود غیر فعال شدن

Stabilizing Element	عناصر پایدار کننده که برای جلوگیری از حساس شدن فولادهای زنگ نزن اضافه می شوند .
Stellite	از آلیاژهای کبالت
Still	دستگاه تقطیر
Strain Gauge	مقاومت های بسیار ظریفی که برای اندازه گیری تغییر طول و تنش بکار می روند.
Stray currents	جریان های سرگردان ناشی از حفاظت کاتدی
Streicher Test	آزمایش برای تعیین وضعیت فولاد زنگ نزن از نظر مقاومت در برابر خوردگی
Stress Intensity Factor	فاکتور تمرکز تنش که با $K$ نشان داده می شود .
Stress Riser	تجمع یا تمرکز تنش
Stress- Rupture Strength	استحکام در درجه حرارت بالا
Sulfidation	اکسیداسیون بوسیله گوگرد
Sulfur Vapor	بخار گوگرد
Surface Alloying	تشکیل لایه سطحی آلیاژها
Synthetic Rubber	لاستیک مصنوعی
Sweet Oil Well	چاه نفتی شیرین

Synergistic Effect	حالتی که تاثیر چند عامل بیش از مجموع تاثیر آن ها به تنهایی است .
Tafel Equation	معادله تافل ،معادله ای که سرعت جریان آندی یا کاتدی را برحسب پتانسیل الکترو دپست می دهد .
Tarnishing	کدر شدن
Teflon	از خانواده ترموپلاستیک ها
Terra – Coat	سفال
Thermogavanic Corrosion	خوردگی گالوانیکی در اثر اختلاف درجه حرارت در دو نقطه
Thermo Plastics	گروهی از پلاستیک ها که با افزایش درجه حرارت نرم می شوند و موقعی که سرد می شوند بشکل اولیه خود بر می گردند .
Threshold Stress	تنش حدی
Throwing Power	قدرت پرتاب
Tile	کاشی
Top – Coat	لایه رویی در رنگ کاری
Toughness	چقرمگی
Tower Sections	مقاطع برج های تفکیک



Trans Passive Region	در پتانسیل های بالا پوسته غیر فعال شروع به از بین رفتن می کند ، این منطقه را منطقه گذرا گویند .
Tube Hanger	پایه های نگه دارنده لوله
Turbulence	تلاطم
Tubercles	خوردگی موضعی که منجر به برآمدگی های روی سطح فلز می گردد.
Tygon	نوعی ترموپلاستیک از خانواده وینیل ها
Type Metal	آلیاژهای چپ ، آلیاژهای سرب
Underfilm (Filiform) Corrosion	خوردگی زیر پوششی (فیلامنتی)
Undermine	زیر چیزی را خالی کردن
Uniform Corrosion	خوردگی یکنواخت
Ureas	اوره ها ، از خانواده های پلاستیک های ترموست
Vacancy	یکی از نواقص کریستالی
Vapor Deposition	راسب کردن سطح فلز از فاز بخار
Valve Stems	تیغه های شیر کشویی
Varnishes	جلا ها

VentureThroat	گلوئی و نتوری
Vessel	محفظه نگه داری مواد
Vibrin	نوعی پلاستیک ترموست از خانواده پلی استرها
Vitallium	از آلیاژهای کبالت
Vitreous Silicat	کوارتز شیشه ای
Volatile	تبخیر شونده
Vulcanization	عمل حرارت دتادن و سخت کردن لاستیک
Wagner Oxidation Law	قوانین اکسیداسیون واگنر در رابطه با تاثیر عناصر آلیاژی بر مقاومت اکسیداسیون
Warren Test	آزمایش واون، برای تعیین وضعیت فولادها
Wear	سایش
Wear plate	زره های ضد سایش و قابل تعویض
Wedging Action	عمل باز کردن بوسیله گوه
Weld Decay	فاسد شدن خط جوش
Wet Packing Materials	مواد جاذب رطوبت
Wettability	قابلیت تر کردن

White cast Iron	چدن سفید
Whisker	رشته بسیار ظریف و نازک
Work Horse	همه فن حریف
Working electrode	الکتروود کار ، نمونه مورد آزمایش
Wroght	کار مکانیکی شده ،نورد
Zircolloys	از آلیاژهای زیرکونیم
zirconia	اکسید زیرکونیم

منابع :

- ۱- واکنش های الکتروشیمیایی اثر ولکانیچ
- ۲- خوردگی عمومی فلزات اثر پرفسور مارس فونتانا
- ۳- کنترل خوردگی لوله اثر پی بادی
- ۴- خوردگی به زبان تصویر اثر عزیزاله بلبلیان
- ۵- مدیریت و اقتصاد خوردگی در خطوط لوله نفت و گاز ترجمه محمد حسین کارگر
- ۶- مهندسی خوردگی و حفاظت از فلزات اثر دکتر منصور فرزام
- ۷- بازدارنده های خوردگی اسیدی ترجمه هادی چهره عالم
- ۸- نقش رنگ و پوشش در خوردگی و توسعه صنعت  
CHARLES.G.MUNGER ترجمه عبدالرضا شهریور
- ۹- سایت های اینترنتی مرتبط داخلی و خارجی

<http://faridbensaeed.blogspot.com>

