

حفاظت از خوردگی

بخش نخست

نویسنده: مهندس مهدی دریجانی

زیر نظر مهندس محمد مهدی همایون فکری

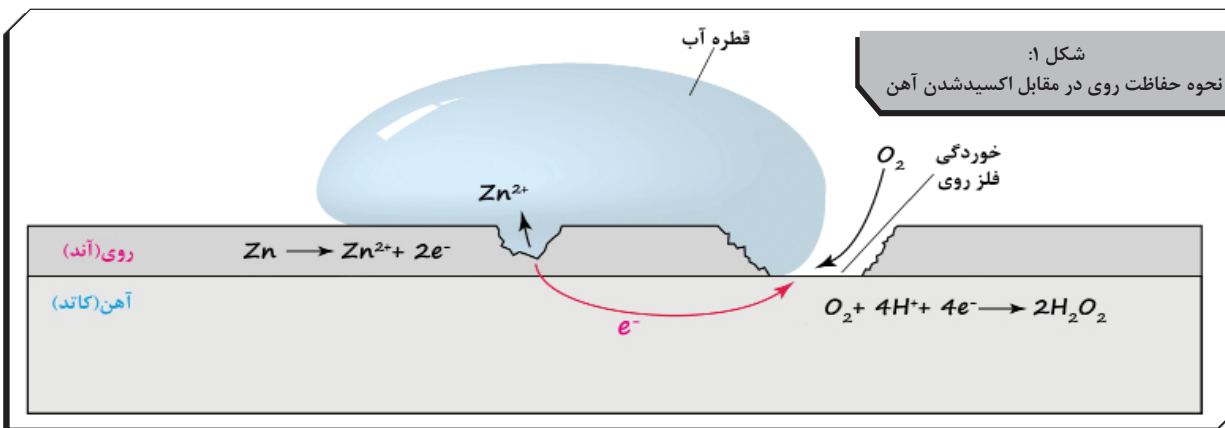


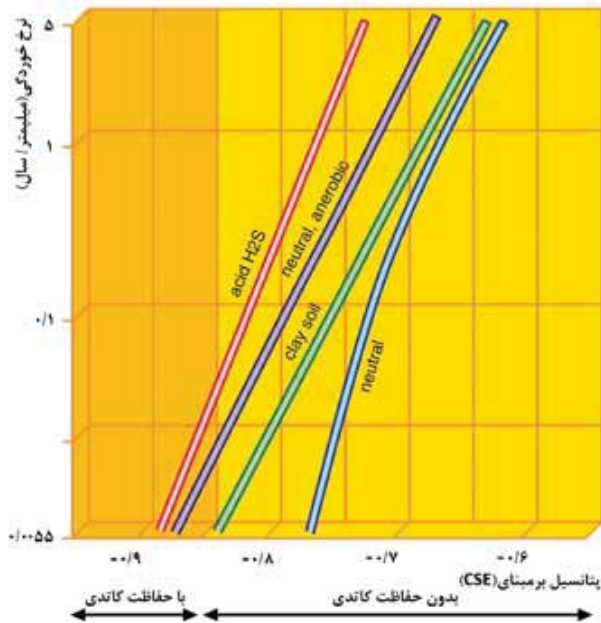
مقدمه

مهندسین طراح با آنالیز و بررسی سیال و محیط پروژه و همچنین کسب اطلاع از متریال و فناوری‌های موجود، در مدارک طراحی به این نکات دقت نمایند و به تناسب نوع خوردگی و داخلی یا بیرونی بودن آن، روش‌های مناسبی برای کنترل این خوردگی‌ها را تعیین و طراحی نمایند. البته باید به این نکته دقت نمود که موضوع بحث ما خوردگی در اثر محیط، موادخورنده همراه سیال و تأثیرات فیزیکی نظیر خراش و تأثیراتی از این دست می‌باشد و برای مقابله با خوردگی در اثر سیال خورنده نظیر انواع اسیدها یا موادخورنده دیگر باید تمهیدات خاصی نظیر استفاده از پلیمرها، سرامیک‌ها و یا پوشش‌های مقاوم دیگر اندیشیده شود. در حال حاضر در صورت بررسی دقیق عوامل و طراحی مناسب، فناوری و دانش کافی برای کنترل کامل این پدیده وجود دارد.

وقوع حوادث تلخ با تلفات جانی و مالی زیاد، اگرچه باعث از بین رفتن جان هزاران نفر و هزینه‌های سنگینی شده‌اند، اما در

خوردگی لوله و اتصالات، مخازن ذخیره، بدنه کشتی‌ها، پایه پل‌ها، اسکلت فلزی و ... سالانه صدها میلیارد دلار به اقتصاد جهان ضرر وارد می‌کند. این درحالی است که کشورهای مختلف سالیانه مبالغ زیادی نیز صرف پیشگیری از خوردگی و توسعه استفاده از سیستم‌های کنترل‌کننده خوردگی می‌کنند. خوردگی یک فرایند ذاتی مشابه کهولت سن می‌باشد. همانگونه که افرادی در سن بالای ۸۰ سال از سلامت مناسب برخوردارند، این امکان وجود دارد که خطوط لوله و تجهیزات نیز دارای عمر طولانی باشند ولی این مهم امکان‌پذیر نمی‌باشد مگر آنکه به مقوله خوردگی به صورت جدی و دقیق توجه شود. در این مبحث قصد داریم ابتدا به عوامل خوردگی اشاره‌ای داشته باشیم و سپس به روش‌های نوین مقابله با خوردگی در صنعت نفت و گاز اشاره کنیم و علیرغم امکان استفاده از برخی از این روش‌ها در بخش سازه‌های فولادی؛ در این مبحث به آن نخواهیم پرداخت. همچنین در این مبحث تأکید ما بر فناوری‌های جدید است اگرچه به روش‌های معمول نیز اشاره‌ای خواهیم داشت. خوردگی در لوله‌های انتقال نفت خام، گاز طبیعی و فرآورده‌های نفت و گاز و همچنین مخازن موقت و مخازن ذخیره از عوامل متعددی ناشی می‌شود. بخش مهمی از خوردگی‌ها بستگی مستقیم به متریال و فناوری ساخت لوله و ورقه‌های فولادی و غیرفولادی دارد. در این بخش شرکت‌های تولیدکننده و موسسات استاندارد، در طول سال‌های گذشته با شناخت کافی از سیال‌ها و محیط استفاده از لوله و مخازن، متریال مناسب برای اغلب کاربردها را بدست آورده و فناوری مناسب را ابداع نموده‌اند. بنابراین لازم است





شکل ۲: مقایسه نرخ خوردگی بر مبنای پتانسیل، نوع محیط و وجود حفاظت کاتدی

نهایت دولتمردان و دست‌اندرکاران صنایع را متقاعد کرده‌اند که برای جلوگیری از حوادث بیشتر، چاره‌اندیشی نمایند. از سوی دیگر مبحث خوردگی مربوط به بخش خاص و محدودی از صنایع نمی‌باشد و تقریباً به همه بخش‌های صنعتی و غیر صنعتی زندگی بشر ارتباط دارد. برای درک بهتر این تنوع به چند نمونه از حوادث مرتبط با خوردگی در بخش‌های مختلف اشاره می‌کنیم:

- ۱- حادثه Bhopal در کشور هند در سال ۱۹۸۴ میلادی که منجر به کشته شدن بیش از ۳۰۰۰ نفر و آسیب دیدن صدها هزار نفر شد. این حادثه در اثر خوردگی و نشت ۵۰۰ لیتر آب به داخل مخزن نگهداری متیل ایزوسیانات روی داد.
- ۲- انفجار در خط لوله انتقال Carlsbed در ایالت نیومکزیکو در سال ۲۰۰۰ میلادی باعث کشته شدن حداقل ۱۲ نفر شد.
- ۳- هواپیمای بوئینگ Elal 747 در سال ۱۹۹۲ میلادی در آمستردام سقوط کرد و باعث کشته شدن ۵۰ نفر شد. این حادثه در اثر خوردگی و شکستن پین فیوز نگهدارنده موتور هواپیما روی داد. در حادثه‌ی مشابه سقوط هواپیمای باری چین در سال ۱۹۹۱ میلادی نیز در اثر خوردگی پین فیوز روی داد.
- ۴- حادثه در راکتور تاسیسات هسته‌ای Davis-besse در سال ۲۰۰۲ میلادی نیز در اثر خوردگی روی داد.
- ۵- غرق شدن کشتی نفت کش Erika در آب‌های فرانسه، سال ۱۹۹۹ میلادی
- ۶- فروپاشی سقف استخر شنا در سوئیس در سال ۱۹۸۵ میلادی

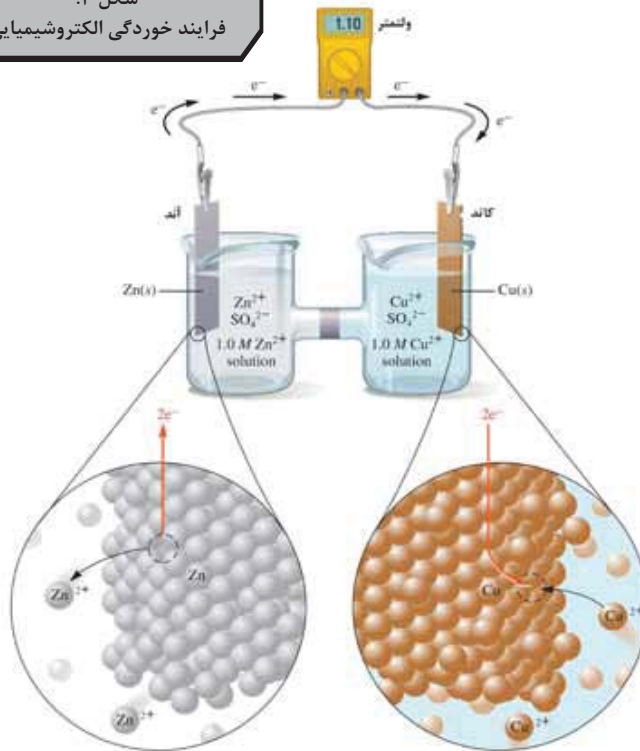
هزینه‌های خوردگی

خوردگی به صورت مستقیم و غیرمستقیم هزینه‌های متعددی تحمیل می‌کند. از طرف دیگر برای جلوگیری از خوردگی نیز باید مبالغ قابل توجهی هزینه کنیم. اما این هزینه‌ها در مقابل هزینه‌های ناشی از عدم حفاظت از لوله و تجهیزات، ناچیز می‌باشند. هزینه‌ها که در صورت عدم کنترل خوردگی باید بپردازیم، را می‌توانیم به شکل زیر دسته‌بندی نماییم:

الف « هزینه‌های مستقیم

به صورت مستقیم در اثر خوردگی لوله و تجهیزات در طی یک مدت مشخص گاهی این مدت بسیار کوتاه می‌باشد، بخش قابل توجهی از سرمایه‌گذاری به هدر می‌رود. در ساخت یک کارخانه یا احداث یک خط لوله، هزینه مواد و تجهیزات، هزینه نیروی انسانی و هزینه ماشین‌آلات در کنار وقت صرف شده برای اجرای پروژه، هزینه‌های اصلی می‌باشند. با خوردگی لوله و تجهیزات، علاوه بر لزوم هزینه مجدد به اضافه تورم احتمالی، باید هزینه بسیار زیادی نیز صرف بازکردن تجهیزات یا درآوردن لوله از زیر خاک کنیم. در محاسبات اقتصادی یک پروژه معمولاً مدت زمان مشخصی برای استهلاک هزینه و برگشت سرمایه در نظر گرفته می‌شود. به غیر از پروژه‌های خاص که به دلایل متعدد، بازگشت سرمایه در آنها اهمیت ندارد. غالباً پروژه‌های دیگر دارای یک زمان بازگشت سرمایه چندساله و منطقی می‌باشند. حال اگر در

شکل ۳: فرایند خوردگی الکتروشیمیایی





شکل ۴: جمع آوری لکه نفتی (Oily Spill)

است، در این حالت هم واحد ارسال کننده و هم واحد دریافت کننده دچار توقف می شوند. معمولاً در این حالات شرکت بهره بردار یا خدمات دهنده که دچار مشکل شده باید خسارت واحدهای دیگر را نیز جبران نماید.

۲- آلوده شدن سیال

یکی دیگر از هزینه های غیرمستقیم خوردگی، آلوده شدن (Contamination) سیال در اثر خوردگی داخلی لوله و تجهیزات می باشد. غالباً در خطوط انتقال آب و فرآوردهای نفتی این تاثیر بیشتر از تاثیر آن در خطوط انتقال نفت خام یا گاز طبیعی قبل از پالایش می باشد. به هر حال گاهی آلودگی ایجاد شده تاثیر زیادی در قیمت محصول دارد. به عنوان مثال آلوده شدن بنزین صادراتی یک پالایشگاه می تواند روی قیمت این بنزین تاثیر گذار باشد.

اثر خوردگی، عمرتجهیزات پروژه از مدت زمان بازگشت سرمایه کمتر باشد، سرمایه گذاری بدون سودی انجام شده است. به صورت معمول هر سرمایه گذار به غیر از دولت ها، هدفش رسیدن به سود مناسب، به میزان حداقل بیش از بهره بانکی و به صورت مستمر و پایدار می باشد. بنابراین برای بخش خصوصی بسیار اهمیت دارد که بر روی چه طرحی سرمایه گذاری می کند و بازگشت سرمایه او چگونه است. در این حالت طراح در مرحله مطالعات طرح و توجیه اقتصادی باید به تاثیر خوردگی در آینده طرح دقت نموده و برآورد مشخصی از میزان هزینه اولیه و عملیاتی، مواد مصرفی و تجهیزات حفاظت از خوردگی داشته باشد. البته گاهی دولت ها در موارد خاص با پرداخت یارانه، هزینه های غیر قابل توجه برخی پروژه ها را جبران می کنند.

۳- ازدست دادن محصول

سوراخ شدن لوله در خطوط انتقال یا پالایشگاه با توجه به فشار موجود در این لوله ها می تواند باعث از دست رفتن (Loss of product) سیال شود. گاهی تا زمان پیدا کردن محل خوردگی و ترمیم آن مقدار بسیار زیادی از سیال ازدست می رود و هزینه زیادی نیز دربر خواهد داشت.

۴- ازدست دادن بازده

گاهی این خوردگی در داخل تجهیزات فرایندی رخ می دهد. در این حالت یک هزینه دیگر بنام ازدست دادن بازده (Loss of Efficiency) به سیستم تحمیل خواهد شد. فرض کنید این خوردگی در داخل یک مبدل به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت و غالباً این کاهش بازده به صورت دنباله دار بر روی تجهیزات و بخش های دیگر نیز تاثیر خواهد گذاشت. معمولاً کشف این نوع خوردگی، زمانبر و طولانی می باشد.



شکل ۵: هدیه بشر به موجودات زنده!

ب- هزینه های غیرمستقیم

این هزینه ها محدود به گسترده ای را در بر می گیرد و محاسبه میزان هزینه بسیار مشکل می باشد. در واقع میزان آن بستگی به شرایط خاص هر پروژه دارد و نمی توان به صورت عام درباره آن صحبت کرد، اما می توان ادعا نمود که هزینه های غیرمستقیم چندین برابر هزینه های مستقیم خوردگی در صورت عدم توجه به مقابله با آن می باشد. در اینجا اشاره ای به انواع هزینه های غیرمستقیم داریم:

۱- توقف

فرض نمایم که تولید در یک

بخش از پالایشگاه یا واحدفنی دیگر در اثر خوردگی لوله یا تجهیزات فرایندی برای ساعاتی متوقف شود. در این حالت در ساعات توقف (Shutdown) درآمد واحد نیز متوقف می شود. از سوی دیگر نیروی انسانی و همچنین واحدهای مرتبط نیز دچار توقف شده و مجبور به پرداخت هزینه بدون کسب درآمد می شود. ضمن آنکه در این مدت برای نگهداری یا هدایت سیال به مسیر ایمن باید هزینه ای جداگانه نیز صرف شود. گاهی این توقف ها به صورت دنباله دار به بخش های دیگر نیز ضربه خواهد زد. به عنوان مثال فرض نمایم که یک خط لوله دچار خوردگی و نشست سیال و در نهایت توقف ارسال سیال شده

۵- آسیب زیست محیطی

خورده شدن لوله و تجهیزات به سرعت بر روی محیط زیست تاثیر می گذارد. این تاثیر می تواند به صورت آلوده شدن جو، آلوده شدن آب های زیرزمینی، آلوده شدن محیط زیست حیوانات [نظیر جنگل ها] و محیط زیست آبزیان [نظیر رودخانه ها، برکه ها، تالاب ها، دریاچه ها و دریاها] باشد. باید توجه کرد که گاهی این آلاینده های نظیر نشت مواد سمی دارای خطرات فوری برای حیوانات و انسان ها نیز می باشد. باید توجه کرد که در مورد هیدروکربورها و بسیاری از مواد شیمیایی، سیال قابل انفجار نیز می باشد. در این

بر خوردگی؛ در ادامه این قسمت عناوین اشاره شده را به صورت مختصر بررسی می‌کنیم:

الف « مکانیزم و منشأ خوردگی

خوردگی نیز مانند پدیده‌های دیگر، می‌تواند منشأ فیزیکی یا شیمیایی داشته باشد. غالباً ما خوردگی فیزیکی را تحت عنوان فرسایش می‌شناسیم و مفهوم آن برای ما آشنا تر می‌باشد. به همین دلیل مقابله با آن نیز آسان تر از مقابله با خوردگی های شیمیایی می‌باشد. منشأ شیمیایی خوردگی نیز اگرچه از گذشته دور شناخته شده می‌باشد اما شناخت بهتر آن و دسته‌بندی انواع آن می‌تواند به کنترل و مقابله با آن به ما کمک کند. از سوی دیگر غالباً انواع خوردگی فیزیکی و شیمیایی می‌توانند بر یکدیگر تاثیر متقابل داشته و اثر یکدیگر را تشدید نمایند. در اینجا ابتدا خوردگی فیزیکی و سپس خوردگی شیمیایی را بررسی می‌کنیم:

فرسایش فیزیکی، یکی از عوامل فرساینده و کاهش عمر تجهیزات در صنعت نفت و گاز می‌باشند. این کاهش طول عمر و نابودی فیزیکی اجسام، تحت تاثیر عوامل مختلفی صورت می‌گیرد و اگرچه دارای اهمیت می‌باشند اما ارتباط مستقیم به بحث جاری ما نیز ندارند و ما به بررسی آن نخواهیم پرداخت و فقط اشاره‌ای مختصر به سایش (Erosion) و خراش (Abrasion) خواهیم کرد، این دو عامل مهمترین عوامل فرسایش فیزیکی می‌باشند که شباهت زیادی به خوردگی های شیمیایی دارند. اگرچه سایش و خراش باعث خورده شدن فلزات در صنعت نفت و گاز می‌شوند اما غالباً عنوان خوردگی تداعی کننده پدیده شیمیایی می‌باشد و خوردگی های فیزیکی را غالباً تحت عنوان فرسایش می‌شناسیم. مقابله با عوامل فرساینده فیزیکی از یک طرف مستلزم حذف یا کاهش عامل سایش و خراش می‌باشد و از طرف دیگر باید جنس لوله و تجهیزات به گونه‌ای انتخاب شود که بتوانند در مقابل عوامل فرساینده فیزیکی به خوبی مقاومت کنند. در برخی از کاربردها خوردگی فیزیکی به اندازه خوردگی شیمیایی و شاید بیشتر از آن اهمیت دارد. یکی از این موارد، تاسیسات سرچاهی بهره‌برداری از نفت و گاز می‌باشد. همراه هیدروکربن خارج شده از داخل چاه معمولاً مقداری شن یا مواد لخته‌ای نظیر هیدرات‌ها وجود دارد؛ تحت سرعت بالا، برخورد این مواد

حالت خطرات جانی و مالی مضاعفی به مجموعه هزینه‌های اشاره شده اضافه می‌گردد. علاوه بر خطر جانی، در صورت بروز انفجار، محیط زیست نیز به صورت مضاعف آسیب خواهد دید. نمونه‌های متعددی از این نوع آسیب‌رسانی به طبیعت را سالانه مشاهده می‌کنیم. برخی از این اتفاقات ناشی از خرابی در تجهیزات و برخی دیگر در اثر خوردگی روی می‌دهند. گاهی ممکن است برای یک مدت طولانی نشت سیال در اثر خوردگی باعث آلوده شدن محیط زیست شده باشد. در سال‌های اخیر برای جلوگیری از هزینه ناشی از از هدر رفت سیال و همچنین هزینه آلوده شدن محیط زیست، به مقوله نشت‌یابی توجه ویژه‌ای شده است.

۶- طراحی اضافه

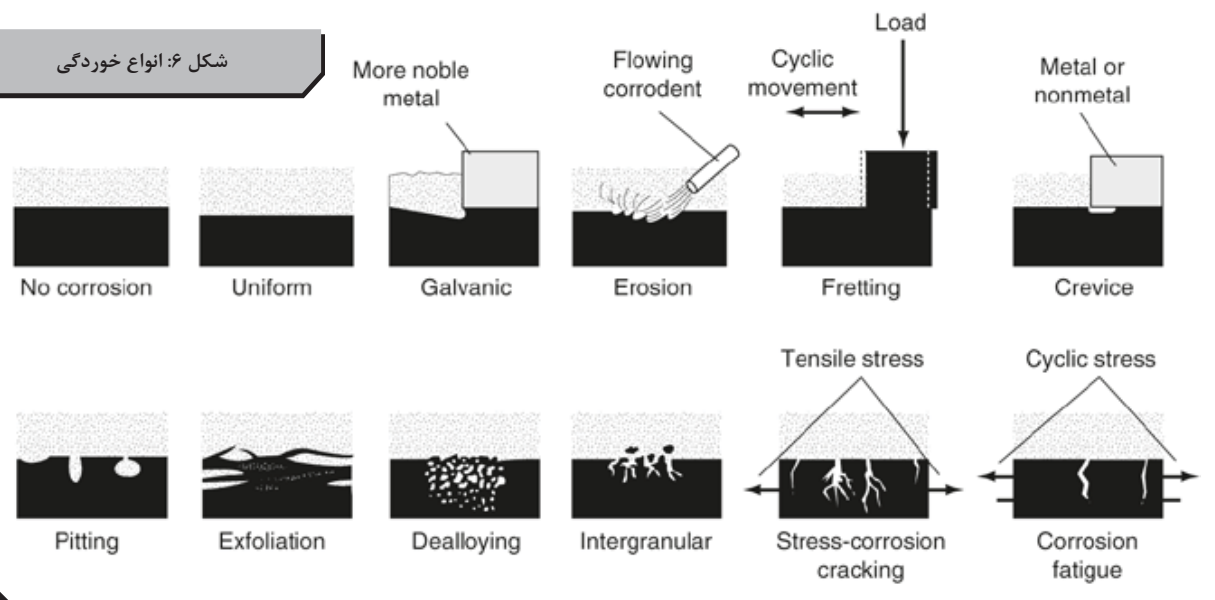
یکی از راه‌های مقابله با مشکلات و هزینه‌های اشاره شده، افزایش ضخامت لوله و تجهیزات در راستای لحاظ کردن خوردگی مجاز (Corrosion allowance) در محاسبات و طراحی می‌باشد. اگرچه اضافه نمودن این ضخامت باعث افزایش هزینه‌های پروژه می‌شود. اما این هزینه در مقابل هزینه‌های اشاره شده ناچیز می‌باشد. اما عدم شناخت کافی از محیط و شرایط سیال و همچنین مطالعه و محاسبات ناکافی یا نگرانی و بی‌تجربگی طراح می‌تواند به Overdesign تجهیزات منتهی شود. این طراحی اضافه، باعث تحمیل هزینه اضافی به پروژه می‌شود بدون آنکه این هزینه تاثیر مثبتی در ایمنی یا کارکرد سیستم داشته باشد.

شناخت خوردگی

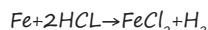
برای شناخت خوردگی، منشأ خوردگی، اندازه‌گیری میزان خوردگی، روش‌های کنترل یا مقابله با خوردگی و نظارت بر خوردگی؛ لازم است به صورت علمی و تجربی مفاهیم مربوط به خوردگی و حفاظت در مقابل خوردگی بررسی و تمهیدات مورد نیاز بررسی و مطالعه شوند. قطعاً برای مقابله و کنترل خوردگی باید به تمام موارد اشاره شده دقت شود. این توجه شامل موارد متعدد و مطالب طولانی می‌باشد که خارج از حوصله این مقاله می‌باشد. از سوی دیگر هدف برای ارائه این مقاله لیست نمودن مفاهیم مرتبط با خوردگی و همچنین معرفی روش‌های نوین می‌باشد. بنابراین در ادامه سعی خواهیم کرد در همین چارچوب باقی بمانیم و در انتهای مقاله منابع مفیدی که علاقه‌مندان بتوانند موضوع را به صورت کاربردی دنبال نمایند معرفی خواهیم کرد.

به صورت کلی مفاهیم و موضوعات مرتبط و تاثیر گذار در مبحث خوردگی را می‌توانیم به این صورت دسته‌بندی کنیم: مکانیزم و منشأ خوردگی، انواع خوردگی فلزی، خوردگی غیرفلزی، مواد مقاوم در مقابل خوردگی، روش‌های ساخت و نصب صحیح و مناسب، روش‌های محافظت یا کنترل خوردگی، روش‌های آزمایش خوردگی و روش‌های نظارت

شکل ۶: انواع خوردگی



صنایع نیز با استفاده از فلزات مقاوم نظیر لوله‌های PSL2 یا پوشش‌های پلیمری مقاوم در مقابل خوردگی، به عمر تجهیزات و لوله‌ها کمک می‌کنند. علاوه بر موارد اشاره شده، برخی از مواقع به موادی برخورد می‌کنیم که خورنده به نظر نمی‌رسند اما در حضور آب یا شرایط خاص دمایی به موادی خورنده بدل می‌شوند. پودرهایی که برای جلوگیری از اکسید شدن جوش و افزایش کیفیت آن به کار می‌روند، از این دسته مواد محسوب می‌شوند. بنابراین پس از عملیات جوشکاری باید با دقت این مواد را از سطح فلز جدا نمود. این نوع مواد منحصر به پودرهایی اشاره شده نمی‌باشند و طیف گسترده‌ای از مواد مورد استفاده در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی را شامل می‌شوند. رابطه زیر خوردگی آهن در تماس با کلرید هیدروژن را نشان می‌دهد.



خوردگی الکتروشیمیایی، نوع دیگر خوردگی شیمیایی می‌باشد. در این حالت یک الکترولیت به همراه دو فلز با سطح پتانسیل متفاوت تشکیل یک پیل الکتریکی می‌دهند و طی آن از فلز آند، یون‌های مثبت جدا شده و وارد الکترولیت می‌شوند. با توجه به فلزی بودن اغلب لوله و تجهیزات در صنعت نفت، وجود همیشگی الکترولیت [محلول آب و نمک‌ها] در اطراف این فلزات و در نهایت وجود منبعی با پتانسیل متفاوت؛ همواره امکان تشکیل پیل الکتریکی وجود دارد. به همین دلیل خوردگی الکتروشیمیایی، یکی از عوامل اصلی خوردگی در صنعت نفت و گاز محسوب می‌شود. هر چه تفاوت پتانسیل میان آند و کاتد بیشتر باشد، سرعت خوردگی نیز به همان نسبت بیشتر می‌باشد و مقدار بیشتری ماده از آند جدا می‌شود. راه مقابله با این خوردگی تبدیل آند به کاتد با ایجاد یک سطح پتانسیل بالاتر می‌باشد. جدول ۱ اختلاف پتانسیل فلزات مختلف را نسبت به پیل مینا از جنس مس / سولفات مس (CSE) نشان می‌دهد. در کل سه نوع پیل الکتریکی با توجه به الکترودها و الکترولیت قابل تشکیل می‌باشد. شرایط تشکیل این پیل‌ها عبارتند از:

Material	پتانسیل (CSE)
Carbon, Graphite, Coke	+۰/۳
Platinum	۰ to -۰/۱
Mill Scale on Steel	-۰/۲
High Silicon Cast Iron	-۰/۲
Copper, Brass, Bronze	-۰/۲
Mild Steel in Concrete	-۰/۲
Lead	-۰/۵
Cast Iron (Not Graphitized)	-۰/۵
Mild Steel (Rusted)	-۰/۲ to -۰/۵
Mild Steel (Clean and Shiny)	-۰/۵ to -۰/۸
Commercially Pure Aluminum	-۰/۸
Aluminum Alloy (5% Zinc)	-۱/۰۵
Zinc	-۱/۱
Magnesium Alloy (6% Al, 3% Zn, 0.15% Mn)	-۱/۶
Commercially Pure Magnesium	-۱/۷۵

جدول ۱

جامد به بخش داخل لوله و اتصالات باعث فرسایش سریع این تجهیزات می‌شود. به همین جهت تاسیسات سرچاهی غالباً از آلیاژهای بسیار مقاوم در مقابل سایش نظیر کاربید تنگستن ساخته می‌شوند. برای حذف یا کاهش این فرسایش، در اولین مرحله فرایند پالایش، این عوامل از سیال جدا می‌شوند. باید به این نکته دقت نماییم که مهمترین و اولین مرحله از مقابله با فرسایش فیزیکی، حذف عامل فرساینده می‌باشد. در مورد تجهیزات سرچاهی در اولین مرحله عوامل فرساینده جداسازی می‌شوند. یکی دیگر از کاربردهایی که خوردگی فیزیکی در آن تأثیر زیادی دارد، پره‌های توربین کمپرسور و پمپ‌هایی هستند. برای حفاظت از پره‌های توربین که سیال با سرعت و دمای زیاد به آن برخورد می‌کند. حذف ذرات جامد اهمیت حیاتی دارد و همیشه باید هوا و سوخت مصرفی به خوبی فیلتر شوند. البته استفاده از آلیاژهای مقاوم و سرامیک‌ها نیز مقاومت در مقابل فرسایش را افزایش داده‌اند.

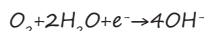
خسارت حبابی (Cavitation) شکل دیگری از خوردگی فیزیکی می‌باشد. در این فرایند اگر فشار جریان مایع به پایین‌تر از فشار بخار آن، افت کند و سپس فشار افزایش یابد در داخل مایع حباب‌هایی تشکیل می‌گردد که با ترکیدن آنها به دلیل افزایش فشار) به بدنه شیر یا تجهیزات دیگر ضرباتی وارد می‌گردد. در صورت ادامه این وضعیت بدنه داخلی شیر و لوله کثی پایین دست دچار خوردگی شده و آسیب خواهد دید. برای جلوگیری از این نوع خوردگی، باید با توجه به نوع سیال و شرایط کاری، تجهیزات را طراحی نمود. به عنوان مثال در مورد شیرهای کنترلی با انتخاب Cv مناسب و انتخاب بدنه و تجهیزات داخلی با آلیاژ مناسب مقاوم در مقابل خوردگی، می‌توان بر این مشکل فائق آمد. برخی سازندگان شیرهای کنترل Cage-guided را تولید و برای مصرف توصیه می‌کنند. این نوع شیر در قسمت گذرگاه دارای یک محفظه قفس شکل می‌باشند که با طرح خاص خود از تشکیل حباب و همچنین تولید نویز جلوگیری می‌کند.

خوردگی شیمیایی، دومین عامل و اصلی‌ترین عامل کاهش عمر و خوردگی تجهیزات در صنعت نفت و گاز می‌باشد. خوردگی شیمیایی در واقع ترکیب فلز یا غیرفلز با یک مایع یا یک گاز (Caustic liquid or Gaseous agent) می‌باشد. ترکیب تولید شده غالباً اکسید (Oxide)، هیدروکسید (Hydroxide)، سولفات (Sulfate) یا سایر نمک‌ها می‌باشد. این خوردگی را می‌توانیم به دو دسته اصلی، خوردگی مستقیم شیمیایی (Direct chemical attack) و خوردگی الکتروشیمیایی (Electrochemical attack) تقسیم کنیم.

خوردگی مستقیم شیمیایی در کارخانه‌های تولید اسید و موادقلیایی و در برخی از واحدهای یوتیلیتی پالایشگاه‌های نفت و گاز کاملاً معمول است و برای جلوگیری از آن باید چاره‌اندیشی شود. غالباً نفت خام و گاز طبیعی قبل از شیرین‌سازی (Sweetening) در اثر وجود H_2S به شدت خورنده می‌باشد. خوردگی مستقیم شیمیایی را در بخش‌هایی نظیر اتاق باتری سیستم برق اضطراری نیز مشاهده می‌کنیم. در کارخانه‌های تولید اسید یا واحدهای مشابه برای مقابله با خوردگی، تجهیزات را از مواد فلزی یا پلیمری مقاوم در مقابل اسید می‌سازند. توجه به این نکته اهمیت دارد که برای مقابله با هراسید یا ماده قلیایی باید به دنبال راه حل خاص باشیم. به عنوان نمونه در حالیکه شیشه ماده‌ای مناسب برای نگهداری انواع اسید می‌باشد، اسید هیدروفلوئوریک (Hydrofluoric acid) شیشه را در خود حل (dissolve) می‌کند. تیزاب سلطانی (Royal water or Aqua regis) که از مخلوط ۱ به ۳، اسید نیتریک (HNO_3) و اسید هیدروکلریک (HCl in water) بدست می‌آید، می‌تواند طلا و پلاتین را که در مقابل خوردگی بسیار مقاوم می‌باشند، در خود حل نماید. این در حالی است که تیتانیوم، ایریدیوم، اسمیوم، تانتالیوم و برخی فلزات دیگر در مقابل آن مقاوم می‌باشند. این مخلوط را برای اولین بار جابر بن حیان تولید و به کار گرفت. این ترکیب را با نام اسید نیترو-هیدروکلریک نیز می‌شناسند. در مورد نفت خام و گاز طبیعی جداسازی عوامل خورنده و اصطلاحاً شیرین‌سازی منطقی‌تر و کاربردی‌تر می‌باشد. ضمن آنکه در این

علیرغم یکسان بودن الکترودها شود، دما می‌باشد. به عنوان مثال با دو الکترود مسی و الکترولیت سولفات مس، الکترودی که دمای اطراف آن بیشتر است به کاتد پیل الکتریکی تبدیل می‌شود. این وضعیت در مورد الکترودهایی از جنس سرب برعکس می‌باشد. در بسیار از تجهیزات فرایندی نظیر مبدل‌های حرارتی، بویلرها، هیترها و تجهیزات دیگر این موضوع می‌تواند باعث ایجاد پیل الکتریکی و در نتیجه خوردگی الکترود شیمیایی شود.

علاوه بر عوامل اشاره شده، وجود غلظت‌های متفاوت از یون فلزی در اطراف الکترودها نیز می‌تواند در نهایت به خوردگی منجر شود. فرض کنید در یک محیط میزان بیشتری یون فلزی در اطراف یک الکترود وجود داشته باشد. سیستم برای برقراری تعادل، تمایل خواهد داشت در اطراف الکترود دیگر نیز یون‌های بیشتری ایجاد شود. این موضوع در نهایت به جدا شدن یون از فلز دوم و در نتیجه خوردگی خواهد شد. همچنین حضور اکسیژن اضافی در الکترولیت اطراف الکترودها مشابه رابطه زیر می‌تواند باعث تولید عامل قلبایی (OH) شود. این عامل نیز تمایل زیادی به ترکیب با عناصر مختلف و در نهایت بروز خوردگی دارد.



با نگاه از زاویه دیگر می‌بینیم که خوردگی چه از نوع فیزیکی و چه از نوع شیمیایی می‌تواند از داخل یا بیرون لوله و تجهیزات حادث شود. مکانیزم و منشاء این دو نوع خوردگی با هم تفاوت دارد و شامل موارد زیر می‌باشند:

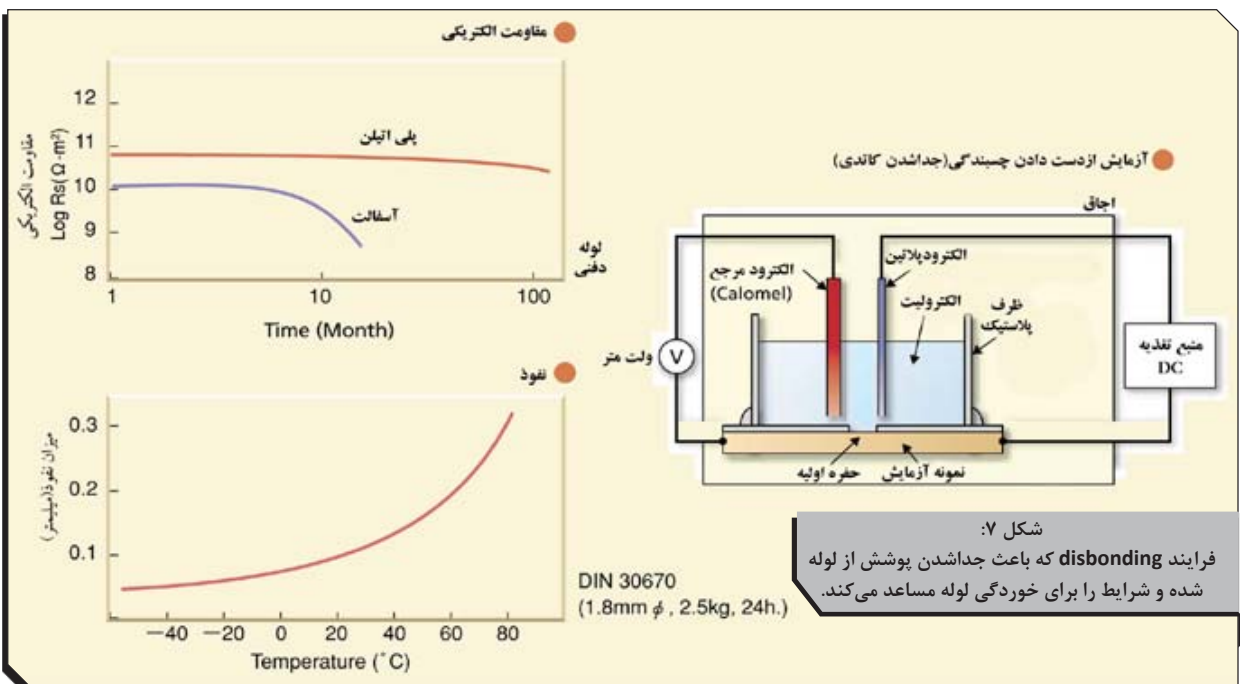
خوردگی‌های داخلی؛ خوردگی داخلی لوله و تجهیزات غالباً ناشی از وجود موادی است که مستقیماً با فلز ترکیب می‌شوند یا پس از ترکیب با آب و تولید اسید باعث خوردگی فلز می‌شوند. باید دقت کرد که منابع هیدروکربنی در مناطق مختلف از نظر میزان مواد همراه با هم تفاوت‌های زیادی دارند. درحالی‌که برخی از منابع گاز طبیعی شیرین می‌باشند و مقدار H_2S در آنها بسیار کم می‌باشد، برخی دیگر از منابع به شدت ترش و اسیدی می‌باشند. از دیگر عوامل خورنده داخلی می‌توانیم به وجود فلز غیرهمجنس در داخل مخزن یا تجهیزات و در نتیجه خوردگی گالوانیک اشاره کنیم. برخی از عوامل خورنده داخلی عبارتند از:

۱- وجود H_2O , CO_2 , CO , H_2S و اکسیژن در داخل سیال

۱- وجود الکترودهای غیرهمجنس؛ ساده‌ترین و معمول‌ترین شرایط برای تشکیل پیل الکتریکی وجود دو فلز غیرهمجنس در نزدیکی هم می‌باشد. فرض نمایید که یک لوله از جنس فولاد در نزدیکی یک مخزن گالوانیزه قرار دارد. پتانسیل الکتریکی فولاد با روی [روکش صفحات فولادی مخزن] متفاوت می‌باشد. خاک مرطوب میان این دو فلز، لوله و مخزن؛ تشکیل یک پیل الکتریکی می‌دهند که بسته به سطح پتانسیل، یکی آند و دیگری کاتد خواهد بود. باید توجه کنیم که تفاوت میان سطح پتانسیل حتی میان دو فلز همسان با مشخصات متالورژیکی مختلف نیز وجود دارد، این تفاوت را می‌توانیم به راحتی میان کف یک مخزن بازسازی شده، مشاهده کنیم. میان کف فولادی کهنه و کف فولادی جدید؛ پیل الکتریکی تشکیل می‌شود. از این خاصیت علیرغم آنکه عامل اصلی خوردگی است، می‌توان برای حفاظت از خوردگی نیز استفاده نماییم. این پتانسیل را می‌توان با تزریق جریان یا با قراردادن عنصری با پتانسیل بالاتر به عنوان قربانی در نزدیکی تجهیز تحت حفاظت ایجاد نمود. با این عمل دیگر یون‌های مثبت از فلز لوله یا تجهیز جدا نمی‌شوند و در عمل فلز حفاظت می‌شود. به این نوع مقابله با خوردگی، حفاظت کاتدی گفته می‌شود. طراحی یک سیستم حفاظت کاتدی نیازمند، مطالعه و محاسبات دقیقی می‌باشد که در انتهای این مبحث به صورت مختصر به معرفی این روش می‌پردازیم.

۲- تفاوت در غلظت الکترولیت اطراف الکترودها؛ غلظت و رقیق بودن الکترولیت در نزدیکی الکترودها نیز می‌تواند عامل تشکیل پیل الکتریکی باشد. به عنوان مثال مجموعه دو فلز مس و سولفات مس به صورتی که سولفات مس در نزدیکی یکی از دو فلز غلیظ‌تر باشد، می‌تواند موجب تشکیل پیل الکتریکی شود. در این حالت الکترود مسی قرار گرفته در محلول غلیظ‌تر سولفات مس نقش کاتد را ایفا خواهد نمود. علاوه بر حالت اشاره شده، اگر به الکترولیت اطراف یکی از الکترودها هوادیده شود، در این حالت نیز علیرغم یکسان بودن جنس دو الکترود می‌تواند پیل الکتریکی تشکیل شود. اگر الکترود از جنس آهن را در داخل الکترولیت آب نمک قرار دهیم و اطراف یکی از الکترودها اکسیژن بدمیم، آن الکترود نقش کاتد را ایفا خواهد نمود.

۳- تفاوت دما؛ یکی دیگر از عواملی که می‌تواند موجب تشکیل پیل الکتریکی،



باشند و باعث خوردگی لوله یا تجهیزات شود. این شرایط تقریباً همیشه در اطراف لوله و تجهیزات صنعتی وجود دارد. از طرف دیگر با ایجاد شرایط دیگری نظیر غیریکنواختی توزیع مواد تشکیل دهنده خاک، خوردگی تشدید می‌گردد. در صورت وجود موادی که به صورت مستقیم با فلز واکنش انجام دهند یا موادی نظیر H_2S که بتوانند به اسید تبدیل شوند، خوردگی به میزان زیادی تشدید می‌شود. برخی از این عوامل تشدیدکننده خوردگی عبارتند:

- ۱- عدم یکنواختی خاک اطراف لوله یا تجهیزات
- ۲- عدم یکنواختی رطوبت
- ۳- اتصال لوله‌های غیرهمجنس که باعث ایجاد پیل الکتریکی و خورده شدن لوله می‌شوند.
- ۴- اتصال لوله‌های نو و کهنه که باعث ایجاد پیل الکتریکی و خورده شدن لوله می‌شوند.
- ۵- خوردگی میکروارگانیزم‌ها، باکتری‌های بی‌هوازی و هوازی که با مصرف سولفات، سولفید هیدروژن تولید می‌کنند و باعث خوردگی لوله می‌شوند.

۶- جریان‌های سرگردان (Stray Currents)، این جریان ناشی وجود ریل آهن، کابل برق، ایستگاه‌های برق می‌باشد. جریان میان عوامل یادشده و لوله، باعث تشکیل پیل الکتریکی می‌شود.

۷- اتم‌های هیدروژن پس از تشکیل در سطح فلز در ناحیه کاتدی به داخل فلز نفوذ کرده و باعث تخریب هیدروژنی فلز می‌شوند. این تخریب ممکن است ناشی از اشکال در جوشکاری یا در اثر Disbonding یا عوامل دیگر ایجاد شود.

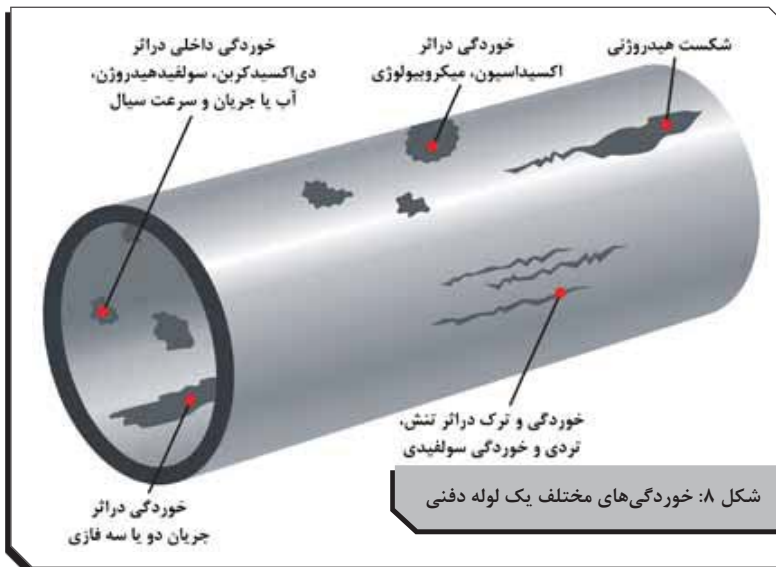
۸- در اثر سوختن H_2S در پالایشگاه‌ها، اسیدپلی‌تیانیک (Polythionic acid) تشکیل می‌شود. این اسید، موجب خوردگی مرزانه‌ای شدید در فولادهای زنگ‌نزن و آلیاژهای پرنیکل می‌شود. این خوردگی می‌تواند منشاء خوردگی داخلی نیز باشد.

ب «انواع خوردگی فلزی»

در قسمت قبل مکانیزم خوردگی را بررسی کردیم. خوردگی تحت مکانیزم‌ها و شرایط مختلف به شکل‌های متفاوتی بروز می‌کند. خوردگی می‌تواند به صورت یکنواخت کل سطح فلز را تحت تاثیر قرار دهد، در برخی نقاط حفره ایجاد نماید یا به صورت ترک به فلز آسیب برساند. شناخت شکل خوردگی می‌تواند به ما در طراحی روش محافظت کمک کند. به همین دلیل در این قسمت به صورت مختصر انواع خوردگی فلزی را معرفی می‌کنیم. باید توجه کرد که مشاهده شکل خوردگی ممکن است به وسیله پرتوهای مرئی و مشاهده چشمی مستقیم یا با استفاده از ابزار کمکی نظیر borescope یا به کمک پرتوهای غیر مرئی نظیر رادیوگرافی صورت گیرد. آسیب ممکن است به صورت خوردگی در سطح فلز بروز کند یا به صورت ترک در عمق فلز روی دهد که در این حالت تنها به وسیله روش‌های پرتوسنجی قابل مشاهده خواهد بود. همچنین باید به نوع رشد خوردگی نیز توجه کرد به عنوان مثال آسیب هیدروژنی ناشی از جوشکاری معمولاً پس از حداقل ۷۲ ساعت بروز می‌کند. اگر بلافاصله بعد از عملیات جوشکاری، تست رادیوگرافی انجام شود، قطعاً نمی‌توان راجع به ترک‌های هیدروژنی اظهار نظر کرد.

۱- خوردگی یکنواخت (Uniform corrosion)

در این نوع خوردگی که متداول‌ترین نوع خوردگی محسوب می‌شود، عامل خورنده به صورت یکنواخت به سطح فلز حمله می‌کند و فلز به صورت یکنواخت خورده می‌شود. به این ترتیب نرخ آن از طریق آزمایش قابل پیش‌بینی است. این نوع خوردگی در سطح برخی فلزات با تشکیل لایه محافظ (Passive layer) متوقف می‌شود. برخی از فلزات نظیر آلومینیوم، کرم، تیتانیوم یا نیکل مستعد تشکیل لایه‌ای از اکسید به صورت Al_2O_3 ، Cr_2O_3 ، TiO_2 می‌باشند. این لایه‌ها باعث می‌شوند که عامل اکسیدکننده نتواند به داخل فلز نفوذ کند. شرط اینکه لایه اکسید بتواند از فلز محافظت کند این است که لایه محافظ سریع تشکیل شده، شکننده نباشد و همچنین به خوبی به فلز پایه بچسبد. به دلیل تشکیل این لایه در فلزات اشاره شده و برخی فلزات دیگر در محیط‌های مرطوب و در هوای آزاد خورده نمی‌شوند. از این خاصیت می‌توان در مقاوم سازی فلزات دیگر نیز استفاده نمود. می‌دانیم اکسید آهن شکننده و متخلخل است و اجازه می‌دهد که عامل اکسیدکننده به لایه‌های زیرین نفوذ کرده و باعث خوردگی آهن شود. برای



شکل ۸: خوردگی‌های مختلف یک لوله دفنی

۲- وجود نمک‌های $CaCl_2$ ، $MgCl_2$ ، $NaCl$ در داخل سیال

۳- نفت خام و گاز طبیعی در برخی از مناطق ممکن است حاوی مقدار قابل توجهی نیتروژن باشند. در نتیجه وجود نیتروژن امکان تشکیل آمونیاک (NH_3) یا سیانید هیدروژن (HCN) می‌باشد. آمونیاک به تجهیزاتی که از آلیاژهای مسی استفاده می‌کنند، نظیر برخی مبدل‌های حرارتی، آسیب وارد می‌نماید.

۴- مشابه نیتروژن برخی از منابع هیدروکربنی حاوی مقادیری جیوه می‌باشند. جیوه با ایجاد ملغمه به تجهیزات آلومینیومی [نظیر برخی از مبدل‌های حرارتی] آسیب وارد می‌کند. وجود غلظت بالایی از جیوه در محیط اطراف این تجهیزات می‌تواند موجب خوردگی از بیرون نیز شود.

۵- در برخی از منابع هیدروکربنی مقدار قابل توجهی اسید نفتانیک (Naphthenic acid) وجود دارد. این اسید دردهماهای بالا می‌تواند باعث خوردگی شود.

۶- کلریدهای آلی موجود در منابع هیدروکربنی، باعث تشکیل کلرید هیدروژن می‌شوند. علاوه بر این از کلریدهای آلی برای پاک کردن رسوبات در لوله‌ها و مخازن یا عملیات گریس زدایی استفاده می‌شود.

۷- خوردگی سایشی (Erosion) در اثر وجود ذرات جامد یا عبور سیال ۲ یا ۳ فازی از داخل لوله

۸- خوردگی ناشی از وجود فلزات ناهمجنس در داخل مخزن یا تجهیزات

۹- در فرایندهای پتروشیمی و برخی فرایندهای پالایش و فرآوری نفت خام، اسید استیک (CH_3COOH)، کلرید آلومینیوم ($AlCl_3$)، فلوئورید هیدروژن (HF)، اسید سولفوریک (H_2SO_4)، هیدرواکسید سدیم ($NaOH$)، فنول [اسید کربولیک] (C_6H_5OH)،

خوردگی‌های بیرونی، وجود مواد مختلف و آب در خاک، ضمن ایجاد واکنش‌های شیمیایی خورنده، می‌تواند الکترولیت مناسبی برای تشکیل پیل الکتریکی

جلوگیری از این مشکل می‌توانیم از فلزات یاد شده برای تولید آلیاژهای اکتیو-پسیو (Active-Passive) استفاده نماییم. این آلیاژها از یک سو مستعد خوردگی بوده و از سوی دیگر می‌توانند رویین [پسیو] شوند. البته باید توجه داشت که لایه‌های پسیو تشکیل شده زیاد ضخیم نشوند، زیرا لایه ضخیم در نهایت تورقی شده یا تحت تاثیر خوردگی تنشی قرار می‌گیرد. همچنین در برخی از تجهیزات نظیر مبدل‌های حرارتی این لایه به صورت یک عایق عمل کرده و موجب می‌شود تا راندمان تجهیز کاهش یابد.

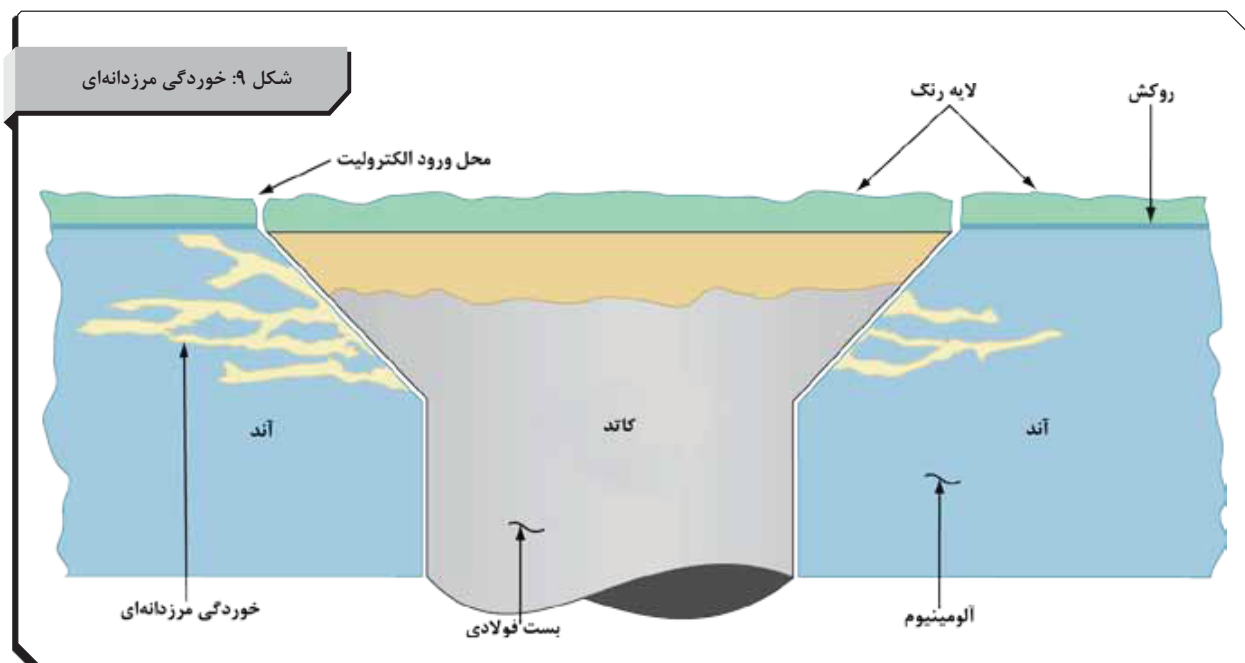
خوردگی مجاز **Corrosion Allowance**، خطوط انتقال و بسیاری از تجهیزات غالباً تحت تاثیر خوردگی یکنواخت می‌باشند. برای طراحی این تجهیزات بر اساس مقادیر تجربی و توصیه‌های استاندارد، میزان خوردگی بررسی و مطالعه می‌شود. غالباً خوردگی کمتر از 2 mpy کاملاً طبیعی و قابل قبول تلقی می‌شود. مقادیر بین 2 mpy تا 20 mpy را با انتخاب متریال مناسب جبران می‌نمایند. میزان خوردگی بین 20 mpy تا 50 mpy باید از نظر توجیه اقتصادی بررسی شده و راه‌های حفاظت و کنترل خوردگی مطالعه و بکار گرفته شود. برای محیط‌هایی که باعث خوردگی بیش از 50 mpy می‌شود لازم است پس از بررسی و مطالعه دقیق راه کارهای ویژه‌ای اندیشیده و به کار گرفته شود. در حالت نرمال میزان خوردگی را به ضخامت لوله یا تجهیزات اضافه می‌نمایند. به این ضخامت، میزان مجاز خوردگی اطلاق می‌شود. این عدد غالباً بر اساس مطالعه و بررسی داده‌های آماری از خوردگی در یک دوره مشخص در محیط مورد نظر بدست می‌آید. گاهی عدد بدست آمده به عنوان خوردگی مجاز بر اساس نظر سازنده لوله و تجهیزات با توجه به مشخصات مواد استفاده شده ممکن است تغییر نماید. باید به این نکته توجه کنیم که در سالیان اخیر علاوه بر افزایش استحکام مواد مورد استفاده در ساخت لوله و تجهیزات، این مواد در مقابل خوردگی نیز مقاوم‌تر شده‌اند. همچنین روش‌های حفاظتی کمکی نظیر استفاده از پوشش‌ها و حفاظت کاتدی نیز باعث شده است تا بتوان با ضخامت‌های کمتر، عملکرد و حفاظتی مشابه با ضخامت‌های بالاتر گذشته را انتظار داشت.

۳- خوردگی گالوانیکی Galvanic corrosion

این خوردگی وقتی رخ می‌دهد که دو فلز یا آلیاژ متفاوت [یا دو ماده متفاوت دیگر همانند گرافیت و یک فلز] در الکترولیت [آب دریا، خاک مرطوب یا هوای مرطوب] قرار گیرند. در این حالت متناسب با پتانسیل دو فلز، فلز فعال‌تر نقش آند و دیگری نقش کاتد را خواهد داشت و به تدریج آند خورده خواهد شد. برای وقوع این نوع خوردگی باید مدارالکتریکی به گونه‌ای کامل شود. با اتصال دو لوله از جنس متفاوت یا اتصال دو فلز نو و کهنه مقدمات خوردگی گالوانیکی آماده می‌شود. در این نوع

۲- خوردگی مرزدانه‌ای Intergranular corrosion

این نوع خوردگی وقتی رخ می‌دهد که مرز دانه‌ها در یک فلز پلی کریستال به صورت ترجیحی مورد حمله قرار گیرند. برای درک بهتر این نوع خوردگی فولادزنگ‌زن آستنیتی (Austenitic Stainless Steel) به عنوان آلیاژی از آهن، کربن، کروم، نیکل و/یا منگنز را در نظر بگیرید. یکی از اتفاقات ممکنه این است که در مرز دانه‌ها، کروم و کربن با هم واکنش دهند و یک ترکیب غیرفلزی به نام کاربید کروم (Chromium Carbide) تشکیل شود. این اتفاق عموماً در هنگام گرم کردن یا سرد کردن فولاد در محدوده دمائی 427°C تا 899°C رخ می‌دهد. به این فرایند **Sensitization**، **Carbid precipitation** یا حساس شدن می‌گویند. در پی این اتفاق نقاطی از فولاد از کروم تهی می‌شود. در فولادها، کروم عامل اصلی مقاوم‌سازی در مقابل خوردگی محسوب می‌شود. این اتفاق عامل شروع خوردگی در مرزدانه‌های آلیاژ می‌باشد. در ادامه با ایجاد یک فضای خالی [حفره] فولاد به عنوان آند و کروم به عنوان کاتد عمل خواهد کرد و خوردگی



می‌شود و به ویژه برای فولاد زنگ‌نزن بسیار مخرب است زیرا که در این خوردگی، ضخامت سازه کاهش می‌یابد و سازه می‌تواند به راحتی دچار شکست شود. معمولاً عمق این حفرات برابر یا بیشتر از قطر آنهاست و با رشد حفرها، سازه یا لوله سوراخ می‌شود.

۶- خوردگی فرسایشی Erosion corrosion

این نوع خوردگی وقتی رخ می‌دهد که محیط یا اجسامی نسبت به یک جسم ثابتی حرکت کنند. محیط می‌تواند اتمسفر یا یک محیط گازی در بیرون سطح لوله یا تجهیز باشد. ساده‌ترین مثال این خوردگی فرسایش باد می‌باشد. حالت دیگری از این خوردگی مربوط به حرکت سیال یک یا چندفازی می‌باشد. این عامل عمدتاً باعث خوردگی از داخل لوله یا تجهیزات می‌شود. البته غالباً سیال چندفازی باعث خوردگی بیشتری می‌شود. یک پدیده مرتبط با این گونه خوردگی، سایش (Fretting or Abrasion) است که هنگام تماس دو ماده با یکدیگر و حرکت نسبی آنها از جمله ارتعاش به وجود می‌آید. این عمل علاوه بر تخریب مستقیم لوله و تجهیزات، می‌تواند پوشش‌های ضد خوردگی را از بین برده و باعث آغاز خوردگی گسترده‌تری شود.

۷- خوردگی تنش‌ی SCC (Stress Corrosion Cracking)

ترک خوردن در اثر خوردگی همزمان با تنش‌های کششی را خوردگی تنش‌ی می‌نامند. معمولاً فولادهای ضد زنگ در محیط‌های حاوی یون کلرید و برنج‌ها در محیط‌های آمونیاکی، دچار این نوع خوردگی می‌شوند. یکی از ویژگی‌های این نوع خوردگی، عمودبودن تنش اعمالی بر راستای رشد خوردگی می‌باشد. برای ایجاد این نوع خوردگی به محیط مناسب، فلز مستعد، تنش کششی و با اندازه کافی، دما و pH مناسب مورد نیاز می‌باشد. تنش‌های مکانیکی یا پسماند، هر کدام می‌توانند منجر به این نوع خوردگی شوند. مقدار تنش مورد نیاز برای این خوردگی را تنش آستانه (Threshold stress) می‌گویند و مقدار آن در حدود ۱۰ درصد تنش تسلیم می‌باشد. در پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی، انواع SCC در محیط‌های حاوی کلریدها، بازها، آمونیاک، آمین و اسیدپلی‌تانیک روی می‌دهد. آمونیاک باعث ترک در فولادهای کربنی و آلیاژهای مس می‌شود. سایر محیط‌های اشاره شده باعث بروز ترک در فولادهای زنگ‌نزن می‌شوند.

کاهش تنش کششی، استفاده از فلزات مقاوم در محیط، حفاظت کاتدی، استفاده از مواد بازدارنده، استفاده از پوشش‌ها و استفاده از تنش‌های پسماند فشاری، می‌تواند این نوع خوردگی را محدود و کنترل نماید.

۸- خوردگی بیولوژیکی Biological corrosion

از بین رفتن یا انهدام یک فلز بوسیله فرایندهای خوردگی که به طور مستقیم یا غیر مستقیم، نتیجه

از خوردگی پتانسیل دوفلز، میزان رطوبت، نوع مواد تشکیل دهنده خاک، دما، زمان و نسبت سطح آند و کاتد پارامترهای اصلی تشدید کننده خوردگی می‌باشند. به عنوان مثال اگر فولاد کربنی به فولاد زنگ‌نزن متصل شود، خورده خواهد شد. اما اگر سطح فولاد کربنی بسیار بیشتر از فولاد زنگ‌نزن باشد، خوردگی شدید نخواهد بود. برعکس اگر مساحت فولاد کربنی بسیار کوچکتر از فولاد زنگ‌نزن باشد، خوردگی شدید خواهد بود. علاوه بر خوردگی گالوانیکی دوفلز همجنس، تفاوت مواد تشکیل دهنده یا غلظت خاک [الکتروولت] می‌تواند باعث ایجاد مدارالکتریکی میان دو نقطه از یک لوله یا تجهیز شوند. نفوذ غیرمساوی اکسیژن [هوا] در نقاط مختلف لوله یا تجهیزات نیز می‌تواند به عامل تشکیل پیل الکتریکی میان دوفلز همنام یا تشدید خوردگی در میان دوفلز غیرهمنام شود. برای مقابله با این نوع خوردگی می‌توان تمهیدات زیر را به کار برد:

- استفاده از عایق الکتریکی در موقع اتصال دو لوله یا لوله و فلنج غیرهم جنس یا با پتانسیل متفاوت
- اجتناب از آندهای کوچک در مقابل کاتد بزرگ، بست‌های تجهیزات باید کاتد باشند.
- لوله یا تجهیزات کاتدی را با پوشش محافظت کنیم. لوله یا تجهیزات آندی نباید پوشش داشته باشند.
- استفاده از لوله یا تجهیزات آندی با ضخامت بیشتر
- استفاده از حفاظت کاتدی با آند فداشونده یا تزریق جریان

۴- خوردگی شکافی Crevice corrosion

این نوع خوردگی در نتیجه وجود یک شکاف باریک یا یک سوراخ در محل اتصال دو فلز یا یک فلز و غیرفلز به وجود می‌آید. غلظت متفاوت اکسیژن و وجود مقدار اندکی مایع [اکسیژن حل شده در مایع] در نقاط مختلف سطح فلز، سطح گسکت‌ها، فلنج‌ها یا زیر پیچ و میخ پرچ‌ها، فلز را آماده خوردگی می‌کند. آلومینیوم و فولاد زنگ‌نزن که به وسیله یک لایه اکسید محافظ از خوردگی محافظت شده‌اند، کاملاً مستعد این نوع خوردگی می‌باشند، به ویژه اگر در داخل آب دریای حاوی یون‌های کلر قرار گیرند.

در این خوردگی، در ابتدا اکسیژن حل شده در مایع با فلز واکنش می‌دهد و در ادامه سطح بیرون شکاف به کاتد و سطح داخل شکاف به آند تبدیل می‌شود و خوردگی تشدید می‌شود. با حل شدن فلز در مایع از یک سو واکنش کاتدی تشدید شده و از سوی دیگر با تغییر pH محیط، خوردگی مستقیم اسیدی نیز آغاز می‌شود و فلز با سرعت بیشتری خورده می‌شود. همچنین محصولات خوردگی راه رقیق شدن اسید را سد می‌کنند. تجمع بار مثبت در شکاف باعث جذب یون‌های منفی داخل لوله یا تجهیز شده و خوردگی از داخل را نیز تشدید می‌کند. باید دقت کرد که این نوع خوردگی مختص لوله و تجهیزات فلزی نمی‌باشد و می‌تواند باعث خوردگی لوله و تجهیزات غیرفلزی نیز بشود. برای جلوگیری از این نوع خوردگی باید:

- به وسیله جوشکاری یا استفاده از کمپوندها، از ایجاد شکاف جلوگیری کرد.
- از گسکت‌ها دارای خلل و فرج نباید استفاده کرد.
- در مدت توقف باید بخش‌های مرطوب را خشک یا از سیستم جدا نمود.
- مقاومت فولاد در مقابل ترک برداشتن را با افزایش درصد کروم، نیکل و مولیبدن افزایش داد.
- در صورت امکان عوامل بروز شکاف‌های ریز را با کاهش دما، کاهش یون کلراید یا اسید، کاهش داد.
- بخش‌های مستعد خوردگی را با قیر یا کمپوندهای مناسب پوشش دهیم و از نفوذ آب باران به نقاط مستعد جلوگیری کنیم. همچنین برای مخازن و تجهیزات مشابه بخش تخلیه مناسب طراحی نماییم. کف مخازن نباید به صورت مستقیم بر روی خاک قرار گیرند.
- با بازرسی منظم، از لوله و تجهیزات رسوب زدایی کنیم.

۵- خوردگی حفره‌ای Pitting corrosion

این خوردگی با ایجاد یک خراش بر روی سطح لوله یا سازه یا در اثر ناهمگنی در سطح فلز شروع می‌شود و به تدریج خراش عمیق پیدا می‌کند و به حفره تبدیل می‌شود. این خوردگی غالباً به وسیله یون‌های کلر تشدید



شکل ۱۰: تورقی شدن

شکل ۱۱: Filiform corrosion

Underfilm نیز گفته می‌شود. برای جلوگیری از وقوع این نوع خوردگی، باید از پوشش‌هایی استفاده نمود که چسبندگی عالی داشته و درمقابل نفوذ آب نیز کاملاً مقاوم باشند. مناسب است که از یک لایه Zinc-rich بر روی فولادهای کربنی استفاده شود. تمیزبودن سطح، وجود پوشش انعطاف‌پذیر و دارای ضخامت مناسب و دارای چسبندگی عالی و همچنین عدم وجود حفره خالی به جلوگیری از بروز این نوع خوردگی کمک می‌کند.

۱۰- خوردگی انتخابی Selective leaching

این نوع خوردگی وقتی رخ می‌دهد که عنصری از یک آلیاژ جامد از طریق یک فرآیند خوردگی ترجیحی و عموماً با قرار گرفتن آلیاژ در معرض اسیدهای آبی خورده می‌شود. متداول‌ترین مثال این نوع خوردگی، جدا شدن روی از آلیاژ برنج است. همچنین آلومینیوم، آهن، کبالت و زیرکونیم نیز این قابلیت را دارند.

۱۱- خسارت هیدروژنی Hydrogen damage

خسارت هیدروژنی یک اصطلاح کلی است که به خسارت مکانیکی وارد شده به فلز در اثر وجود یا واکنش با هیدروژن اشاره دارد. این نوع خوردگی به چهار گروه: تردی هیدروژنی (Hydrogen Embrittlement)، تاول‌زنی هیدروژنی (Hydrogen Blistering)، ترک‌های ناشی هیدروژنی (HSC[Hydrogen Stress Cracking] و هجوم هیدروژنی (Hydrogen attack) تقسیم‌بندی می‌شود. این طبقه‌بندی بر مبنای شکل ظاهری حمله عوامل خورنده به سطح فلز صورت پذیرفته است. لازم به یادآوری است که تعیین مرز مشخصی بین انواع خوردگی امکان‌پذیر نیست، زیرا تعداد زیادی از انواع خوردگی با هم فصل مشترک دارند.

هیدروژن به صورت اتمی مخرب‌تر از مولکول هیدروژن می‌باشد. هیدروژن از منابع مختلف می‌تواند در اختیار فرایند تخریبی فلز قرار گیرد. این عنصر به وفور در آب، هوا، اسیدها، هیدروکربورها، سولفید هیدروژن و دهه‌ها منبع دیگر یافت می‌شود و در طی فرایندهای مختلف می‌تواند جذب فلز شده و به استحکام فلز ضربه زده یا باعث خوردگی شود. به عنوان مثال در حین جوشکاری بدون گاز محافظ، ممکن است جذب هیدروژن صورت پذیرفته و استحکام جوش مورد هجوم هیدروژن قرار گیرد. اگرچه در تست رادیوگرافی ترک‌های هیدروژنی را می‌توان تشخیص داد اما به دلیل آنکه تخریب هیدروژنی پس از ساعت‌ها اثر خود را بروز می‌دهد،

فعالیت موجودات جاندار باشد را در گروه خوردگی بیولوژیکی دسته‌بندی می‌کنند. این موجودات شامل انواع میکروسکوپی مثل باکتری‌ها و انواع ماکروسکوپی مثل جلبک‌ها و جانوران دریایی دیگر می‌باشند. این موجودات از یک طرف سطح پتانسیل حفاظت کاتدی را تغییر می‌دهند و از سوی دیگر با تولید عوامل خورنده باعث آسیب در تجهیزات و لوله‌های فلزی می‌شوند. در این نوع خوردگی باکتری‌های بی‌هوازی یا SRB[Sulfate Reducing Bacteria] با مصرف سولفات، سولفید هیدروژن تولید می‌کنند و سولفید هیدروژن به شکلهای مختلف فلزات را مورد هجوم قرار می‌دهد. باکتری‌های هوازی یا SOB[Sulfur Oxidizing Bacteria] با مصرف سولفیدها، سولفات [نظیر اسیدسولفوریک] تولید می‌کنند. این نوع باکتری‌ها قادرند سطح اسیدسولفوریک را در حدود ۱۰ درصد افزایش دهند. وجود اسید سولفوریک می‌تواند باعث خوردگی شدید شود.

خوردگی‌های میکروبی نیز به صورت معمول باعث خوردگی موضعی و بروز حفره می‌شوند. برای مقابله با این نوع خوردگی استفاده از لوله و تجهیزات غیر فلزی، استفاده از پوشش‌های مقاوم، افزایش پتانسیل حفاظت کاتدی و استفاده از ذرات دانه‌بندی شده ذغال در اطراف لوله‌ها برای افزایش هدایت الکتریکی در جریان حفاظت کاتدی و جلوگیری از تجمع عامل خوردگی، توصیه می‌شود.

۹- خوردگی Filiform

این نوع خوردگی زیر لایه رنگ یا پوشش فلزی هنگامی واقع می‌شود که رطوبت به زیر پوشش نفوذ کند. پوشش‌های لاک (Lacquers) و رنگ‌های فوری (quick-dry) و رطوبت بالای ۶۵٪ غالباً مستعد ایجاد این نوع خوردگی می‌باشند. این نوع خوردگی در ابعاد میکرومتری شروع می‌شود و به تدریج گسترش می‌یابد. شکل این خوردگی شبیه رشته‌های نخی و به صورت زیگ‌زاگ می‌باشد. به این نوع خوردگی گاهی

شکل ۱۲: Fretting corrosion



که سطوح خارجی لوله‌ها شبیه به برگ می‌شود، به این خوردگی تورفی شدن می‌گویند. آلیاژ کوپرنیکل مستعد به این نوع خوردگی می‌باشد. افزایش درصد نیکل، حساسیت به تورفی شدن را افزایش می‌دهد.

۱۴- خوردگی خستگی Corrosion fatigue

شکست قطعه در اثر اعمال تنش‌های متناوب که دامنه آنها از تنش شکست قطعه کمتر باشد، در یک محیط خورنده به خوردگی خستگی منتهی می‌شود. این شکست در تجهیزات دوار، تیغه‌های اسکرابر (Scraping blade)، شیرآلات و ... دیده می‌شود. خوردگی خستگی در اساس یک خوردگی فیزیکی می‌باشد اما با توجه به اینکه خوردگی‌های شیمیایی می‌توانند تأثیرگذاری این شکست را افزایش دهند، لازم به نظر می‌رسد که در طراحی به ارتباط این خوردگی با خوردگی شیمیایی دقت شود. با انتخاب آلیاژ مناسب، عملیات حرارتی مناسب و ساپورت‌گذاری مناسب جهت مهار لرزش و استفاده از پوشش‌های مناسب یا روش‌های دیگر جهت جلوگیری از ایجاد ترک یا حفره در فلز، می‌توانیم خوردگی خستگی را مهار کنیم.

۱۵- خوردگی تنش Stress Corrosion

این نوع خوردگی وقتی رخ می‌دهد که ماده‌ای تحت تنش کششی در معرض یک محیط خورنده قرار گیرد. ترکیب این عوامل با هم، ترک‌هایی را در جزء تحت تنش آغاز می‌کند.

علاوه بر هزینه‌های پنجگانه اشاره شده، هزینه‌های دیگری نظیر افزایش هزینه نگهداری و همچنین هزینه ناشی از آسیب دیدگی بخش‌های غیر فلزی در پی خوردگی بخش‌های فلزی می‌تواند به مجموعه هزینه‌های پروژه یا بهره‌برداری اضافه شود.

برای مقابله با خوردگی مهمترین و اولین گام، شناخت منشأ خوردگی می‌باشد که به صورت مختصر آن را بررسی کردیم. با شناخت منشأ خوردگی می‌توان روش مناسب برای هر نوع خوردگی را به صورت اختصاصی بکار گرفت. با این رویه در نهایت ما برآیند همه روش‌هایی را خواهیم داشت که تک به تک به مقابله با خوردگی‌های مختلف می‌روند، این روش مشابه تاکتیک‌های جنگی است که با شناخت دشمن و اتخاذ تاکتیک مناسب می‌توان با هزینه و تلفات کمتر بر دشمن پیروز شد. در ادامه این مقاله روش‌های محافظت از خوردگی را بررسی خواهیم کرد. **شیراز**

ادامه دارد

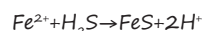
منابع:

- 1: Fundamentals of CORROSION, Mechanisms, Causes, and Preventative Methods, Philip A. Schweitzer, 2010 by Taylor and Francis Group, LLC CRC Press
- 2: www.cathelco.com
- 3: www.cathodic.co.uk
- 4: www.pari.go.jp/en



شکل ۱۲: Filiform corrosion

اگر تست بلافاصله پس از جوشکاری صورت بگیرد غالباً اثر مخرب هیدروژن آشکار نمی‌شود. اسیدشویی، آبکاری و عملیات حرارتی از دیگر فرایندهایی می‌باشند که می‌توانند به جذب هیدروژن در زمان ساخت تجهیزات و لوله کمک کنند. وجود سیالات حاوی هیدروژن، **disbonding** و همچنین حفاظت کاتدی نیز از مواردی می‌باشند که در دوره بهره‌برداری، نفوذ هیدروژن را تسهیل می‌کنند.



چهار نوع خسارت هیدروژنی اشاره شده هر کدام در شرایط مختلف دما، فشار، جنس فلز و شرایط کاری رخ می‌دهند. به عنوان مثال هجوم هیدروژنی در دمای بالاتر از $260^{\circ}C$ و فشار جزئی هیدروژن بالاتر از $689kPa$ در واحدهای هیدروکراکینگ، هیدروتربینگ و رفرمینگ روی می‌دهد. تحت این شرایط مولکول‌های هیدروژن جذب سطحی شده و به اتم هیدروژن تبدیل می‌شوند. در حضور **Fe**، کربن با هیدروژن ترکیب شده و CH_4 تولید می‌شود. بزرگ بودن مولکول CH_4 باعث تاؤل زدن و ترک خوردن فلز شده و در ادامه این میکروتُرک‌ها (Fissure) عریض تر شده و به ترک تبدیل می‌شوند.

۱۲- هجوم فلز مذاب Liquid metal attack

بخش‌های فلزی ممکن است در طول فرایندهای ساخت نظیر لحیم کاری، جوش برنج، گالوانیزه یا فرایندهای مشابه در مجاورت فلزات مذاب قرار گیرند. همچنین در دوره بهره‌برداری نیز در برخی فرایندهای نظیر راکتور نیروگاه‌های هسته‌ای **Fast breeding**، لوله و تجهیزات در مجاورت فلزات مذاب نظیر سدیم، سرب یا پتاسیم قرار می‌گیرند. فلز مذاب ممکن است باعث خوردگی سطحی فلز جامد شده یا به داخل فلز جامد نفوذ کند. یکی از حالت‌های احتمالی، ترد شدن فلز تحت فلز مایع [LME (Liquid metal embrittlement)] می‌باشد. غالباً ترک‌های ایجاد شده از نوع مرزانه‌ای می‌باشند.

جیوه نیز به عنوان یک فلز مایع می‌تواند باعث فرایند خوردگی مشابهی شود. علاوه بر فلزات، این نوع خوردگی می‌تواند در واحدهای بازیافت گوگرد در دماهای بالا و بر روی نیکل و آلیاژهای پایه نیکل نیز روی دهد.

۱۳- تورفی شدن Exfoliation

در این خوردگی، عنصر خورنده به داخل فلز و در سطحی موازی با سطح خارجی لوله، نفوذ می‌کند. از آنجایی



شکل ۱۴: Filiform corrosion