



تجزیه و تحلیل فرآیند خوردگی فولادهای دریایی
A36-212(85) و EN10225 طبق استاندارد ASTM

رحیم جعفری خوشه‌مهر

دانشکده فنی

گروه مکانیک

۱۳۸۳ اسفند

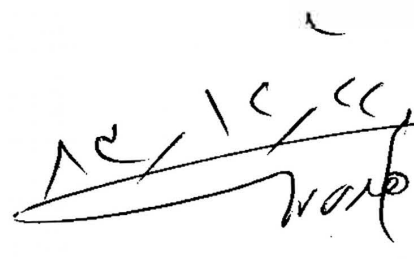
پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

استاد راهنما:

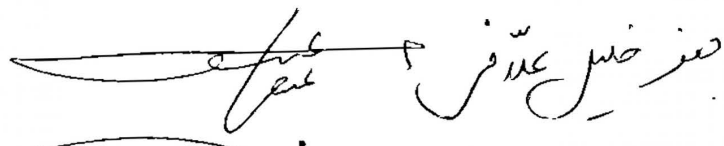
دکتر مهدی ثابت

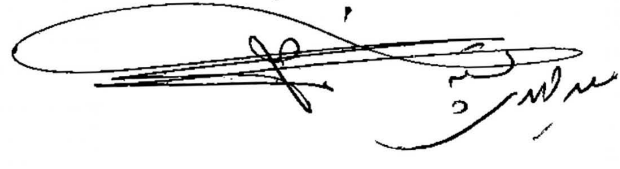
و نمرة ۱۸۷۵ هجری قمری

پایان نامه کارشناسی ارشد رحیم جعفری خوشه مهر با شماره
بارتبه ۱۸۷۵ مورد تایید هیئت داوران قرار گرفت.

استاد راهنما: 

داور داخلی: 

داور خارجی: 

نماینده تحصیلات تکمیلی: 

فهرست مطالب

IV..... فهرست شکلها

VI..... فهرست جدولها

فصل اول: مفاهیم و کلیات

۱-۱-۱- مقدمه ۱

۲-۱-۲- تعریف خوردگی ۲

۳-۱-۳- الکتروشیمی خوردگی ۳

۴-۱-۴- خوردگی آهن ۵

۵-۱-۵- انواع خوردگی ۶

۶-۱-۵-۱- خوردگی یکنواخت ۶

۷-۱-۵-۲- خوردگی گالوانیکی (دو فلزی) ۷

۹-۱-۵-۳- خوردگی شیاری ۹

۱۱-۱-۵-۴- خوردگی حفره ای ۱۱

۱۲-۱-۵-۵- خوردگی موضعی توسط اختلاف دمش هوا (اکسیژن) ۱۲

۱۳-۱-۵-۶- خوردگی بین دانه ای ۱۳

۱۴-۱-۵-۷- خوردگی انتخابی ۱۴

۱۵-۱-۵-۸- خوردگی سایشی ۱۵

۱۶-۱-۵-۹- خوردگی جابجایی ۱۶

۱۶-۱-۵-۱۰- خوردگی توام با تنش ۱۶

۱۸-۱-۵-۱۱- خوردگی در اثر هیدروژن ۱۸

۱۹-۱-۶-۱- روشهای جلوگیری از خوردگی ۱۹

۱۹-۱-۶-۱- انتخاب مواد مناسب ۱۹

۲۱-۱-۶-۲- طراحی صحیح ۲۱

۲۱-۱-۶-۳- حفاظت کاتدی ۲۱

۲۳-۱-۶-۴- حفاظت آندی ۲۳

۲۴-۱-۶-۵- پوششها ۲۴

۲۷-۱-۶-۶- بازدارنده ها ۲۷

فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع

۲۹-۱-۲- خوردگی در آب دریا ۲۹

۲۹-۱-۱-۲- مقدمه ۲۹

۲۹	۲-۱-۲- ویزگیهای آب دریا
۳۰	۳-۱-۲- عوامل موثر بر سرعت خوردگی
۳۴	۲-۲- معرفی کلی دریاچه ارومیه
۳۴	۱-۲-۲- مقدمه
۳۴	۲-۲-۲- حوضه آبریز دریاچه ارومیه
۳۵	۳-۲-۲- خواص فیزیکی و شیمیایی آب دریاچه ارومیه
۳۸	۴-۲-۲- شرایط زیست محیطی دریاچه ارومیه
۳۹	۳-۲-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده
۳۹	۱-۳-۲- مقدمه
۳۹	۲-۳-۲- بررسی خوردگی آب دریاچه ارومیه روی فولادهای St70 و St37
۳۹	۳-۳-۲- بررسی خوردگی آب دریاچه ارومیه روی ستونهای فولادی پل تخریب شده

فصل سوم: آزمایشهای خوردگی

۴۰	۱-۳- مقدمه
۴۰	۲-۳- روشهای سنجش آهنگ خوردگی
۴۰	۱-۲-۳- روش کاهش وزن
۴۱	۱-۱-۲-۳- طبقه بندی کلی آزمایشها
۴۲	۲-۱-۲-۳- اهداف آزمایشها
۴۲	۳-۱-۲-۳- مواد و نمونهها
۴۳	۴-۱-۲-۳- آماده سازی سطوح
۴۴	۵-۱-۲-۳- اندازه گیری و توزین
۴۴	۶-۱-۲-۳- روشهای قرار دادن نمونهها در محیط خورنده
۴۴	۷-۱-۲-۳- زمان آزمایش
۴۴	۸-۱-۲-۳- تمیز کردن نمونهها بعد از آزمایش
۴۵	۲-۲-۳- روش الکتروشیمیایی
۴۵	۱-۲-۲-۳- مقدمه
۴۵	۲-۲-۲-۳- پتانسیل الکتروشیمیایی
۴۵	۳-۲-۲-۳- اندازه گیری پتانسیل
۴۶	۴-۲-۲-۳- اندازه گیری شدت جریان
۴۷	۵-۲-۲-۳- واکنشها در یک سیستم الکتروشیمیایی
۴۸	۶-۲-۲-۳- اندازه گیری پولاریزاسیون

فصل چهارم: آزمایشها

۵۰	۱-۴-۱- مقدمه
۵۱	۲-۴-۲- مراحل انجام آزمایشها
۵۱	۴-۲-۱- روش کاهش وزن
۵۱	۴-۲-۱-۱- آماده سازی نمونهها
۵۴	۴-۲-۱-۲- شماره گذاری نمونهها
۵۴	۴-۲-۱-۳- تمیز کاری سطوح نمونهها
۵۵	۴-۲-۱-۴- توزین نمونهها
۵۵	۴-۲-۱-۵- نصب نمونهها بر روی قلاب
۵۶	۴-۲-۱-۶- استقرار نمونهها در محیط آزمایشگاه
۵۷	۴-۲-۱-۷- استقرار نمونهها در محیط طبیعی آب دریاچه
۵۸	۴-۲-۱-۸- تمیز کردن نمونهها از محصولات خوردگی
۵۸	۴-۲-۱-۹- اندازه گیری و ثبت اطلاعات
۵۹	۴-۲-۱-۱۰- نتایج آزمایش محاسبه آهننگ خوردگی به روش کاهش وزن
۶۲	۴-۲-۲- روش الکتریکی
۶۲	۴-۲-۱- آماده سازی نمونهها
۶۲	۴-۲-۲- استقرار نمونهها در محلول الکترولیت
۶۲	۴-۲-۲-۳- اندازه گیری و ثبت اطلاعات

فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات

۶۸	۱-۵- مقدمه
۶۸	۵-۲- بررسی نتایج روش کاهش وزن
۶۸	۵-۲-۱- شرایط آزمایشگاه
۷۱	۵-۲-۲- شرایط طبیعی دریاچه
۷۲	۵-۳- بررسی نتایج روش الکتروشیمیایی
۷۲	۵-۴- نتیجه گیری
۷۳	۵-۵- پیشنهادات برای پروژههای آتی
۷۴	منابع

فهرست شکلها

فصل اول: مفاهیم و کلیات

- ۱-۱- واکنشهای الکتروشیمیایی که هنگام خوردن فلز روی در اسید کلریدریک عاری از هوا (فاقد اکسیژن حل شده) اتفاق می افتد ۴
- ۲-۱- واکنشهای الکتروشیمیایی که هنگام خوردن فلز روی در اسید کلریدریک هوادار (دارای اکسیژن حل شده) اتفاق می افتد ۶
- ۳-۱- خوردگی یکنواخت ۶
- ۴-۱- خوردگی یکنواخت بر روی ستون مستقر در دریا ۷
- ۵-۱- خوردگی گالوانیکی ۸
- ۶-۱- خوردگی گالوانیکی فولاد توسط مس ۹
- ۷-۱- خوردگی شیاری ۱۰
- ۸-۱- خوردگی حفره ای ۱۱
- ۹-۱- حفره دار شدن در یک سیستم لوله کشی در اثر خوردگی حفره ای ۱۲
- ۱۰-۱- خوردگی موضعی توسط اختلاف دمش اکسیژن ۱۳
- ۱۱-۱- خوردگی بین دانه ای ۱۳
- ۱۲-۱- خوردگی انتخابی ۱۴
- ۱۳-۱- خوردگی سایشی در پروانه پمپ ۱۵
- ۱۴-۱- مهره منهدم شده در اثر خوردگی توام با تنش ۱۷
- ۱۵-۱- حفاظت کاتدی تانک زیر زمینی به روش اعمال جریان الکتریکی ۲۲
- ۱۶-۱- حفاظت کاتدی لوله بوسیله آند فدا شونده ۲۳
- ۱۷-۱- حفاظت آنودیک تانک حاوی اسید سولفوریک ۲۴

فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع

- ۱-۲- نمودار سرعت نسبی خوردگی بر حسب مقدار غلظت NaCl ۳۱
- ۲-۲- نمودار پتانسیل - pH برای Fe-H₂O در ۲۵ درجه سلسیوس ۳۲
- ۳-۲- تاثیر سرعت جریان آب بر خوردگی لوله های از جنس فولاد کربنی آب کمبریج در ۲۱°C ۳۲
- ۴-۲- تاثیر سرعت جریان آب بر خوردگی فولاد کربنی در دریا ۳۳
- ۵-۲- نمایی از محل احداث پل میانگذر دریاچه ارومیه ۳۸

فصل سوم: آزمایشهای خوردگی

- ۱-۳- مدار پتانسیواستات برای اندازه گیری پولاریزاسیون ۴۸

فصل چهارم: آزمایشها

- ۵۱-۴-۱- ستونهای مورد استفاده در پل بزرگراه شهید کلانتری.....
- ۵۳-۴-۲- ساختار میکروسکوپی فولاد EN10225 با بزرگنمایی ۲۰۰x.....
- ۵۴-۴-۳- تعدادی از نمونه‌های تهیه شده.....
- ۵۴-۴-۴- نمونه‌های شماره گذاری شده.....
- ۵۵-۴-۵- قلاب و نمونه‌های نصب شده بر روی آن جهت استقرار در آزمایشگاه.....
- ۵۶-۴-۶- نمونه‌های نصب شده بر روی قلاب.....
- ۵۶-۴-۷- نمونه‌های مستقر در آب مقطر (بشر سمت راست) و آب دریاچه ارومیه (بشر سمت چپ).....
- ۵۷-۴-۸- محل استقرار نمونه‌ها در شرایط طبیعی دریاچه ارومیه در بندر گلخانه.....
- ۵۷-۴-۹- محل استقرار نمونه‌ها در شرایط طبیعی دریاچه ارومیه در نزدیکی محل احداث پل.....
- ۵۸-۴-۱۰- نمونه‌های مستقر در دریاچه.....
- ۶۳-۴-۱۱- نمودار چگالی جریان- ولتاژ برای فولاد EN10225 (بعد از یک ساعت استقرار در آب).....
- ۶۳-۴-۱۲- نمودار چگالی جریان- ولتاژ برای فولاد EN10225 (بعد از دو هفته استقرار در آب).....
- ۶۴-۴-۱۳- نمودار چگالی جریان- ولتاژ برای فولاد EN10225 (بعد از چهار هفته استقرار در آب).....
- ۶۴-۴-۱۴- نمودار چگالی جریان- ولتاژ برای فولاد EN10225 (بعد از شش هفته استقرار در آب).....
- ۶۵-۴-۱۵- نمودار چگالی جریان- ولتاژ برای فولاد A35-212 (بعد از یک ساعت استقرار در آب).....
- ۶۵-۴-۱۶- نمودار چگالی جریان- ولتاژ برای فولاد A35-212 (بعد از دو هفته استقرار در آب).....
- ۶۶-۴-۱۷- نمودار چگالی جریان- ولتاژ برای فولاد A35-212 (بعد از چهار هفته استقرار در آب).....
- ۶۶-۴-۱۸- نمودار چگالی جریان- ولتاژ برای فولاد A35-212 (بعد از شش هفته استقرار در آب).....

فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات

- ۶۹-۵-۱- نمودار تغییرات آهنگ خوردگی با گذشت زمان برای فولاد EN10225.....
- ۶۹-۵-۲- نمودار تغییرات آهنگ خوردگی با گذشت زمان برای فولاد A36-212.....
- ۷۰-۵-۳- پوشش تشکیل شده بر روی نمونه‌ها (بزرگنمایی ۲۰۰x).....
- ۷۰-۵-۴- نمونه مستقر در آب مقطر.....
- ۷۰-۵-۵- نمودارهای تغییرات آهنگ خوردگی با گذشت زمان برای فولاد EN10225 در دریا (نمودار بالایی) و در آزمایشگاه (نمودار پایین).....
- ۷۱-۵-۶- بلوری شدن نمک روی نمونه مستقر در دریاچه (راست) و نمونه‌های مستقر در آزمایشگاه.....

فهرست جدولها

فصل اول: مفاهیم و کلیات

۱-۱- جدول نیروی محرکه الکتریکی ۸

فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع

۱-۲- آنالیز آب دریاچه ارومیه در خرداد ماه ۳۶

۲-۲- آنالیز آب دریاچه ارومیه در اسفند ماه ۳۷

فصل سوم: آزمایشهای خوردگی

فصل چهارم: آزمایشها

۱-۴- آنالیز فولاد ستونهای پل میانگذر شهید کلانتری ۵۲

۲-۴- آنالیز فولاد مصرف شده در ورق کشتی ۵۲

۳-۴- آهنگ خوردگی فولاد EN10225 در شرایط آزمایشگاه ۵۹

۴-۴- آهنگ خوردگی فولاد A35-212 در شرایط آزمایشگاه ۶۰

۵-۴- آهنگ خوردگی فولاد EN10225 در شرایط طبیعی آب دریاچه ارومیه ۶۰

۶-۴- آهنگ خوردگی فولاد A36-225 در شرایط طبیعی آب دریاچه ارومیه ۶۱

۷-۴- آهنگ خوردگی فولاد A36-225 در آب مقطر ۶۱

۸-۴- آهنگ خوردگی فولاد EN10225 در آب مقطر ۶۱

۹-۴- آهنگ خوردگی فولاد EN10225 در زمانهای غوطه وری مختلف به روش الکتریکی ۶۷

۱۰-۴- آهنگ خوردگی فولاد A36-225 در زمانهای غوطه وری مختلف به روش الکتریکی ۶۷

چکیده

احداث پل میانگذر بزرگراه شهید کلانتری ارتباط مرکز دو استان آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی را از طریق آبراه دریاچه ارومیه نزدیکتر خواهد نمود. در طرح مزبور، نگهداری پل توسط ستونهای فولادی در نظر گرفته شده است. مشاهده پدیده خوردگی در شناورهای موجود در دریاچه و ستونهای پل تخریب شده قبلی سبب گردید که موضوع خوردگی قطعات فولادی در محیط خورنده آب دریاچه ارومیه دقیق تر مورد مطالعه قرار گیرد. در این پایان نامه نحوه بررسی پدیده خوردگی مذکور و نتیجه آزمایشهای انجام شده طبق استاندارد ASTM توضیح داده شده است. در این آزمایشها خوردگی قطعات فولادی مزبور از طریق محاسبه سرعت خوردگی بکنواخت با روش کاهش وزن و روش الکتریکی (پولاریزاسیون) تحت پوشش قرار گرفته‌اند. همچنین فولادهای مزبور در آب دریاچه ارومیه و آب مقطر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. بر پایه آزمایشهای انجام شده می توان تصور کرد در حالی که مقاومت به خوردگی فولاد مورد آزمایش در شرایط آزمایشگاهی نسبتا بالا بوده، در محیط طبیعی دریاچه ارومیه، شرایط محیطی و عوامل طبیعی فرایند خوردگی را تشدید کرده و تغییرات در آهنگ خوردگی به مراتب (تقریبا پنج برابر) بیشتر از شرایط آزمایشگاه است که این مقدار در محدوده آهنگ خوردگی دریا‌های آزاد قرار دارد.

فصل اول

مفاهیم و کلیات

۱-۱- مقدمه

یکی از مباحث بسیار مهم علمی، فنی و اقتصادی که کمتر از یکصد سال است توجه عده‌ای از دانشمندان و محققان را به خود جلب کرده و مطالعات بسیار زیادی بر روی آن انجام گرفته و می‌گیرد، پدیده خوردگی و بویژه خوردگی فلزات می‌باشد.

به منظور روشن ساختن و توجیه و تفهیم مکانیسم‌های انواع مختلف خوردگی تحقیقات و بررسی‌های وسیع، جدی و مستمر، همگام با پیشرفتهای صنایع گوناگون صورت گرفته است، بطوریکه با استفاده از اصول و مبانی علمی و نتایج حاصل از این پژوهشها، در تدوین مقررات و روشهای خاص کنترل یا جلوگیری از خسارات ناشی از این پدیده اقدامات بسیار سودمندی به عمل آمده و پیشرفتهای قابل ملاحظه‌ای حاصل شده است.

وجود پدیده خوردگی و اثرات زیانبخش آن تقریباً در همه جا مشاهده می‌شود؛ از جمله در ساختمان‌ها، لوازم خانگی، پلها، کشتی‌ها و تاسیسات بندری، واحدهای صنعتی و بسیاری موارد دیگر. بنابراین کلیه محیط‌ها تا حدودی (کم و بیش) خورنده می‌باشند. مثل هوا و رطوبت، آبها، دریاها، محیط‌های آلوده و صنعتی، بخار آب، گازها، اسیدها، قلیاها، خاک و که برخی از این محیط‌ها و در شرایط خاص خورنده تر از دیگری می‌باشد [۱].

اگر خوردگی وجود نداشت اقتصاد جامعه به شدت تغییر می‌کرد. مثلاً اتومبیل‌ها، کشتی‌ها، خطوط لوله و وسایل خانگی احتیاج به پوشش نداشتند. صنایع فولاد زنگ نزن از بین می‌رفت و مس فقط برای مقاصد الکتریکی بکار می‌رفت [۲]. خسارات مالی ناشی از این پدیده ۴ الی ۵ درصد درآمد ناخالص ملی کشورهای صنعتی را در برمی‌گیرد که سالیانه بالغ بر صدها میلیارد دلار می‌باشد بطوریکه زیانهای مالی خوردگی در امریکا و در سال ۱۹۹۴ بالغ بر ۳۰۰ میلیارد دلار می‌باشد [۳].

خوردگی پلها با گذشت زمان یک مشکل اساسی است و تعویض آنها هزینه‌های بسیار بالایی را در بردارد. سقوط پل Silver Bridge بر روی رودخانه Ohayo به دلیل خوردگی توام با تنش به قیمت جان

چهل انسان و میلیونها دلار تمام شد [۲]. فروریختن سقف یک سالن استخر سرپوشیده در سوئیس که در اثر خوردگی در میله‌های ساخته شده از فولاد ضدزنگ به علت وجود یون کلر در فضای سالن بود، منجر به مرگ دوازده نفر شد که دلیلی دیگر بر ابعاد خسارات جبران ناپذیر خوردگی می‌باشد [۳].

بنابراین توجه به پدیده خوردگی، لزوم شناخت انواع خوردگی، مکانیزم‌های ایجاد خوردگی، محاسبه آهنگ پیشرفت آنها و ارایه روشهای مناسب در جهت مقابله با آنها ضروری به نظر می‌رسد. در این میان تکنولوژی‌های جدید که با کاربرد مواد و مصالح صنعتی گوناگون از جمله فلزات، آلیاژها، پلاستیک‌ها، سرامیک‌ها و مواد مرکب همراه بوده است لزوم بررسی و تولید آلیاژها و دیگر موادی که در برابر خوردگی مقاومت لازم و قابل پیش‌بینی را داشته باشند و نیز تدوین مقررات و روشهایی که با اعمال آنها بتوان آهنگ خوردگی را بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد ایجاد کرده است [۱].

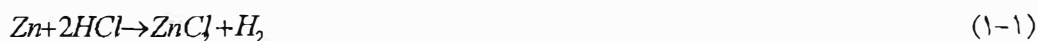
۱-۲- تعریف خوردگی^۱

تخریب یا فاسد شدن یک ماده در اثر واکنش با محیطی که در آن قرار دارد، خوردگی نامیده می‌شود. گاهی این تعریف محدود به فلزات تلقی می‌شود، ولی اغلب بایستی برای حل یک مساله هم فلزات و هم غیر فلزات را در نظر گرفت. مثلاً تخریب رنگ و لاستیک بوسیله نور خورشید و یا مواد شیمیایی، خورده شدن جداره کوره فولاد سازی و خورده شدن یک فلز جامد بوسیله مذاب یک فلز دیگر همگی خوردگی نامیده می‌شوند [۲].

ذکر این نکته ضروری است که انهدام‌های ناشی از عوامل صرفاً فیزیکی یا مکانیکی خوردگی نامیده نمی‌شود. مثل: سائیدگی^۲، فرسودگی^۳، خستگی^۴، خراشیدگی^۵ و غیره. لیکن در برخی حالت ممکن است پروسه‌های خوردگی همراه با این قبیل تخریها باشد که در این صورت با عناوینی نظیر خوردگی سائیدگی، خوردگی خستگی، خوردگی خراشیدگی، خوردگی تنشی و غیره تشریح می‌شوند [۳].

۱-۳- الکتروشیمی خوردگی

طبیعت الکتروشیمی خوردگی را می‌توان با خورده شدن فلز روی در اسید کلریدریک نشان داد. موقعی که یک قطعه روی را داخل اسید کلریدریک وارد می‌کنیم، واکنش سریع و مداومی اتفاق می‌افتد که گاز هیدروژن آزاد شده و روی وارد محلول می‌شود و تشکیل محلول کلرور روی می‌دهد. واکنش انجام شده به شکل زیر است:



با توجه به اینکه یون کلر در واکنش دخالتی ندارد، این معادله را بصورت زیر می‌توان نوشت:



بدین ترتیب روی با یونهای هیدروژن اسید ترکیب شده و تشکیل یونهای روی و گاز هیدروژن می‌دهد. در طی این واکنش روی اکسید شده و تبدیل به یونهای روی می‌شود و یونهای هیدروژن با گرفتن الکترونهای آزاد شده توسط روی احیا شده و تبدیل به هیدروژن شده‌اند.

بدین ترتیب معادله (۱-۲) را می‌توان به سادگی به دو واکنش، اکسیداسیون روی و احیای یونهای

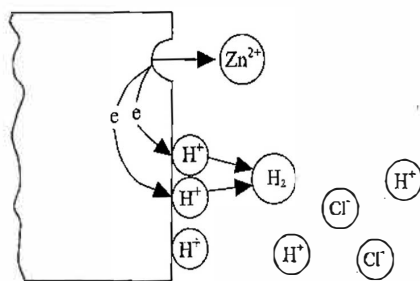
هیدروژن تقسیم نمود.



-
- 1- Corrosion
 - 2 - Erosion
 - 3 - Wearing
 - 4 - Fatigue
 - 5 - Fretting

در واکنش اکسیداسیون ظرفیت افزایش می‌یابد یا به عبارت دیگر الکترون تولید می‌شود. در صورتی که در واکنش احیا ظرفیت کم می‌شود یا الکترون مصرف می‌شود. واکنش اکسیداسیون را آندی و واکنش احیا را کاتدی نیز می‌نامند. معادلات (۱-۳) و (۱-۴) واکنشهای جزئی بوده و هر دو بایستی در یک زمان و با سرعت یکسان روی سطح فلز اتفاق بیافتند. در غیر این صورت، فلز بطور ناگهانی دارای بار الکتریکی خواهد شد، که غیر ممکن است. این یکی از مهمترین اصول خوردگی است. در مرحله خوردگی فلزات، سرعت اکسیداسیون مساوی سرعت احیا است (از نظر تولید و مصرف الکترون).

مساله فوق در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ واکنشهای الکتروشیمیایی که هنگام خوردگی فلز روی در اسید کلریدریک عاری از هوا (فاقد اکسیژن حل شده) اتفاق می‌افتد.

در اینجا یک اتم روی تبدیل به یون روی و دو الکترون شده است. این الکترونها که در فلز باقی می‌مانند، در واکنش احیای یونهای هیدروژن به سرعت مصرف می‌شوند. این مساله که آنها در عمل در یک نقطه اتفاق می‌افتند یا نه، اصل بقای انرژی الکتریکی را نقض نمی‌کند. در بعضی از حالات، واکنش اکسیداسیون بطور یکنواخت روی سطح فلز واقع می‌شود، در حالیکه در برخی موارد دیگر موضعی بوده و در نواحی خاص اتفاق می‌افتد.

خوردگی روی در اسید کلریدریک یک فرایند الکتروشیمیایی است. هر واکنش را که بتوان به دو یا چند واکنش جزئی اکسیداسیون و احیا تقسیم نمود، واکنش الکتروشیمیایی می‌نامند. تقسیم واکنشهای الکتروشیمیایی خوردگی به واکنشهای جزئی، مطالعه آنها را آسانتر می‌کند. آهن نیز به سرعت بوسیله اسید کلریدریک خوردگی می‌شود:

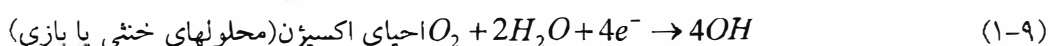
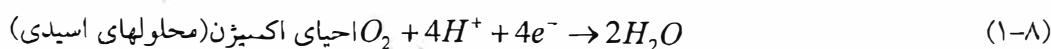


مقایسه واکنشهای اکسیداسیون و احیا نشان می‌دهد که واکنشهای (۱-۱) و (۱-۵) کاملاً مشابه یکدیگرند. تمام این واکنشها مشتمل بر احیای یون هیدروژن بوده و تنها واکنشهای آندی یا اکسیداسیون آنها با یکدیگر فرق دارد.

هنگامی که از دیدگاه واکنشهای جزئی اکسیداسیون و احیا مساله را در نظر بگیریم، کلیه انواع خوردگی را می توان در تعداد معدودی از واکنشهای عمومی خلاصه نمود. واکنش آندی در هر فرایند خوردگی، اکسیداسیون فلز به یونهای آن می باشد. این مطلب را بصورت کلی زیر می توان نوشت:



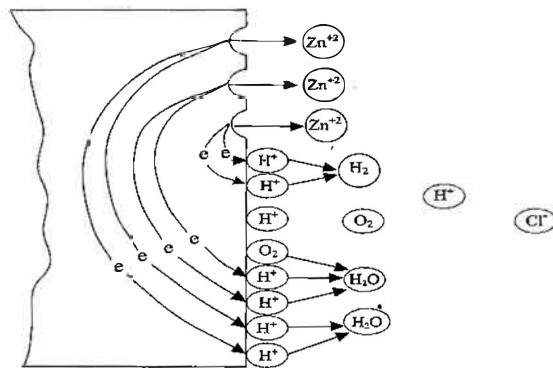
در هر مورد تعداد الکترونهای تولید شده مساوی با ظرفیت یون می باشد. در خوردگی فلزات چند نوع واکنش کاتدی مختلف وجود دارد که غالباً بصورت یک یا چند تا از واکنشهای زیر می تواند اتفاق بیافتد.



آزاد شدن هیدروژن یک واکنش کاتدی متداول است زیرا محلولهای اسید یا اسیدی در عمل فراوانند. احیای اکسیژن نیز خیلی معمول است زیرا هر محلول آبی که در تماس با هوا باشد قادر خواهد بود این واکنش را انجام دهد. احیای یون فلزی یا رسوب کردن فلز، واکنشهای نادرتری بوده و بیشتر در مسیرهای فرآیندهای شیمیایی اتفاق می افتند. در کل، تمام این واکنشها کاملاً مشابه هستند و تمام آنها الکترون مصرف می کنند.

۱-۴- خوردگی آهن

هنگام خوردگی ممکن است بیشتر از یک واکنش اکسیداسیون و احیا صورت بگیرد. هنگام خوردگی یک آلیاژ، فلزات تشکیل دهنده آن بصورت یونهای خود به داخل محلول می روند. زمانی موضوع اهمیت بیشتر پیدا می کند که بیش از یک واکنش احیا انجام می پذیرد. مثلاً وضعیتی که در آن آهن در اسید کلریدریک هوا دار خورده می شود را در نظر بگیرید. در این حالت دو واکنش کاتدی امکان پذیر است. آزاد شدن هیدروژن و احیا اکسیژن. این مساله در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. روی سطح فلز آهن دو واکنش مصرف کننده الکترون وجود دارد. چون سرعتهای اکسیداسیون و احیا بایستی مساوی باشند، افزایش کل سرعت احیا باعث افزایش سرعت حل شدن روی در محلول می گردد. بنابراین محلولهای اسیدی حاوی اکسیژن حل شده، خورنده تر از اسیدهای عاری از اکسیژن می باشد. احیا اکسیژن یک وسیله دیگر مصرف الکترون را آماده می سازد. اگر عوامل اکسید کننده دیگری نیز در محلولهای اسیدی وجود داشته باشد حالت مشابهی بوجود می آید. یک ناخالصی که در اسید کلریدریک صنعتی تقریباً همیشه وجود دارد، یون فریک بصورت کلورفریک می باشد. در چنین اسید صنعتی، فلزات خیلی سریعتر خورده می شوند زیرا در این حالت نیز دو واکنش کاتدی وجود دارد، آزاد شدن هیدروژن و احیای یون فریک.



شکل ۱-۲ واکنشهای الکتروشیمیایی که هنگام خوردن فلز روی در اسید کلریدریک هوادار (دارای اکسیژن حل شده) اتفاق می افتد.

به دلیل وابسته بودن واکنش های آندی و کاتدی به یکدیگر، می توان با تقلیل سرعت هر یک از این واکنش ها، سرعت خوردگی را کاهش داد. در مورد فوق، که اسید ناخالص وجود دارد اگر یونهای فریک آن را حذف کنیم، مقدار واکنش های کاتدی کم می شود. با قطع ارتباط هوا با محلول های آبی یا حذف هوایی که در آن حل شده، واکنش احیا اکسیژن نیز حذف می گردد. وضعیت بالا را می توان برای آلیاژهای آهن نظیر فولاد کربنی و چدن نیز در نظر گرفت. بطوریکه اگر آب یا آب دریا بدون اکسیژن داشته باشیم، آهن در آن خورده نخواهد شد زیرا در این حالت واکنش کاتدی وجود نخواهد داشت [۵].

۱-۵-۰- انواع خوردگی

مشاهده و تحلیل بسیاری از موارد انهدام در اثر خوردگی نشان می دهد که، این انهدام ها، اغلب از خود الگوی خاصی را نشان داده که براساس آن می توان انواع خوردگی را تعریف کرد. آشنایی و شناخت انواع خوردگی و علل آنها، می تواند در بهبود طراحی و ساخت و جلوگیری از خوردگی مفید باشد.

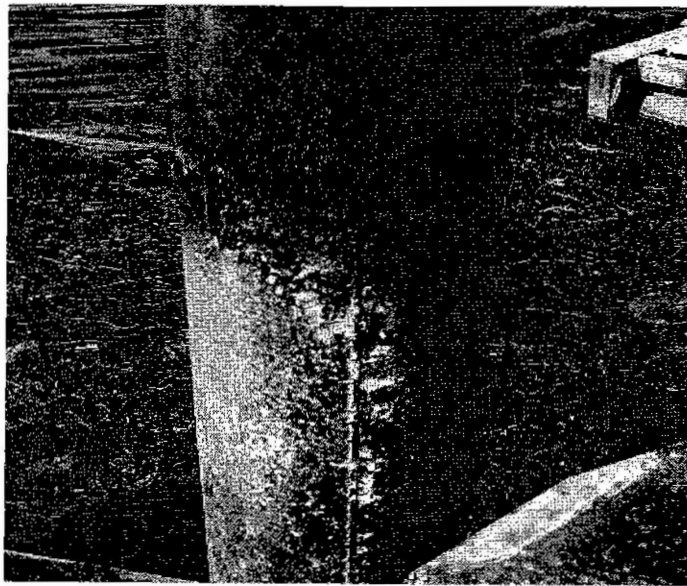
۱-۵-۱- خوردگی یکنواخت^۱

خوردگی یکنواخت معمولترین و متداولترین نوع خوردگی است. معمولاً بوسیله یک واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بطور یکنواخت در سرتاسر سطحی که در تماس با محلول خورنده قرار دارد، مشخص می شود (شکل ۱-۳). فلز نازک و نازکتر شده و در نهایت از بین می رود یا تجهیزات مورد نظر منهدم می شوند. در شکل ۱-۴ ستون فولادی مستقر در آب دریا که تحت خوردگی یکنواخت قرار گرفته، نشان داده شده است. این خوردگی از نظر تناژ مقدار فلز خورده شده بالاترین رقم را دارد [۲].

Thickness is reduced uniformly



شکل ۱-۳ خوردگی یکنواخت



شکل ۴-۱ خوردگی یکنواخت بر روی ستون مستقر در دریا

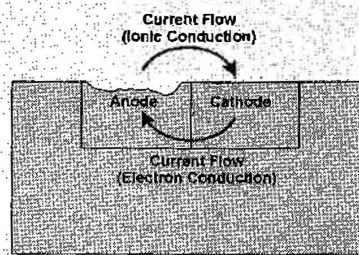
مؤثرترین روش‌های توقف یا کاهش خوردگی یکنواخت عبارتند از:

- انتخاب مواد و پوشش مناسب.
- حفاظت کاتدی
- حفاظت آنودی
- بازدارنده‌ها

آگاهی از ویژگی‌های خوردگی و آهنگ خوردگی فلزات و آلیاژها که توسط اندازه‌گیری به روشهای کاهش وزن و یا الکتروشیمیایی قابل محاسبه است امکان انتخاب گزینه‌های بالا را فراهم می‌کند [۲].

۱-۵-۲- خوردگی گالوانیکی (دو فلزی)^۱

هنگامی که دو فلز غیر همجنس در داخل یک محلول هادی (الکترولیت) خورنده قرار گیرند بین آنها اختلاف پتانسیلی بوجود می‌آید. اگر این فلزات در تماس با هم بوده و یا از نظر الکتریکی به هم مربوط باشند به علت اختلاف پتانسیل حاصل الکترونها شروع به حرکت کرده و جریان الکتریکی را به وجود می‌آورند. در این حالت خوردگی در فلز با مقاومت کمتر افزایش یافته و برعکس حملات خوردگی به فلز مقاومتر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر فلز با مقاومت کمتر آند شده و فلز مقاومتر کاتد می‌گردد (شکل ۵-۱). خوردگی این قبیل سیستم‌ها را که همراه با تولید جریان الکتریکی است خوردگی گالوانیکی یا دو فلزی می‌نامند، که در واقع یک پدیده الکتروشیمیایی می‌باشد.



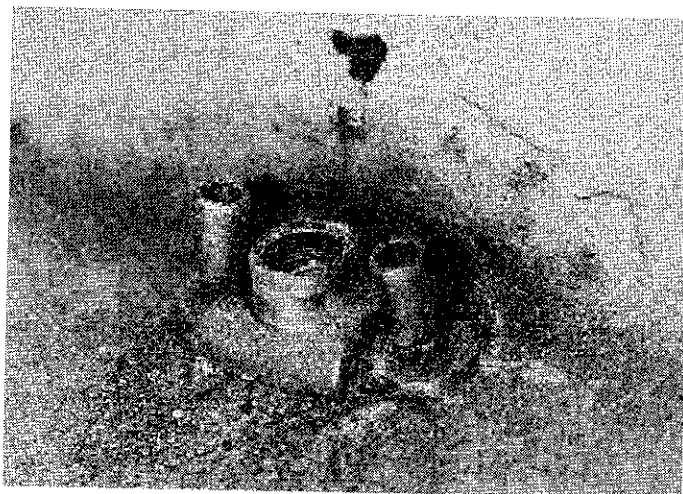
شکل ۱-۵ خوردگی گالوانیکی

در این نوع خوردگی نیروی محرکه برای ایجاد جریان و شروع عملیات خوردگی اختلاف پتانسیلی است که بین دو فلز بوجود می‌آید. پتانسیل فلزات در محلول‌های حاوی یک اتم گرم وزنی از یونهای مربوطه در دمای 25°C اندازه‌گیری شده‌اند که جدول نیروی محرکه الکتریکی نامیده می‌شود (جدول ۱-۱).

جدول ۱-۱ جدول نیروی محرکه الکتریکی

تبادل فلز - یون فلز	پتانسیل الکترود نسبت به الکترود هیدروژن
Au-Au ³⁺	+۱.۴۹۸
Pt-Pt ²⁺	+۱.۲
Pd-Pd ²⁺	+۰.۹۸۷
Ag-Ag ⁺	+۰.۷۹۹
Hg-Hg ²⁺	+۰.۷۸۸
Cu-Cu ²⁺	+۰.۳۳۷
H ₂ -H ⁺	۰.۰۰۰
Pb-Pb ²⁺	-۰.۱۲۶
Sn-Sn ²⁺	-۰.۱۳۶
Ni-Ni ²⁺	-۰.۲۵۰
Co-Co ²⁺	-۰.۲۷۷
Cd-Cd ²⁺	-۰.۴۰۳
Fe-Fe ²⁺	-۰.۴۴۰
Cr-Cr ³⁺	-۰.۷۴۴
Zn-Zn ²⁺	-۰.۷۶۳
Al-Al ³⁺	-۱.۶۶۲
Mg-Mg ²⁺	-۲.۳۶۳
Na-Na ⁺	-۲.۷۱۴
K-K ⁺	-۲.۹۲۵

پتانسیل‌ها با الکتروود هیدروژن ($H_2 - H^+$) که به عنوان مبنا پتانسیل آن را صفر فرض می‌کنند مقایسه شده‌اند. پتانسیل‌های بین فلزات با محاسبه اختلاف بین پتانسیل‌های استاندارد آنها تعیین می‌گردد [۵]. شکل ۱-۶ یک اتصال آلیاژ مسی بر روی ورق فولادی را نشان می‌دهد که اتصال مسی به عنوان کاتد عمل کرده و فولاد خورده شده است.



شکل ۱-۶ خوردگی گالوانیکی فولاد توسط مس

- به منظور کاهش میزان خوردگی گالوانیکی از روش‌های تجربی گوناگون استفاده می‌شود ولی بعضی مواقع ممکن است یک یا چند تا از این روش‌ها لازم باشد. این روش‌ها عبارتند از:
- در صورت نیاز به کاربرد فلزات غیرهمجنس در صورت امکان سعی شود که موقعیت آنها در جدول نیروی محرکه الکتریکی به یکدیگر نزدیکتر باشد.
 - از نسبت سطحی نامطلوب، آند کوچک و کاتد بزرگ اجتناب شود.
 - فلزات غیرهمجنس در صورت امکان از یکدیگر عایق شوند.
 - انجام پوشش مناسب بویژه روی قسمت آندی.
 - کاربرد مواد شیمیایی کند کننده^۱ در صورت امکان
 - اجتناب از اتصالات پیچی در مورد فلزاتی که در سری گالوانیکی از همدیگر خیلی دور باشند.
 - طراحی قطعات بصورتی که بتوان قسمت‌های آندی را به راحتی تعویض کرد.
 - تعبیه یک فلز سوم در تماس با آنها بطوری که نسبت به هر دو فلز قبلی آندی‌تر باشد [۲].

۱-۵-۳- خوردگی شیاری^۲

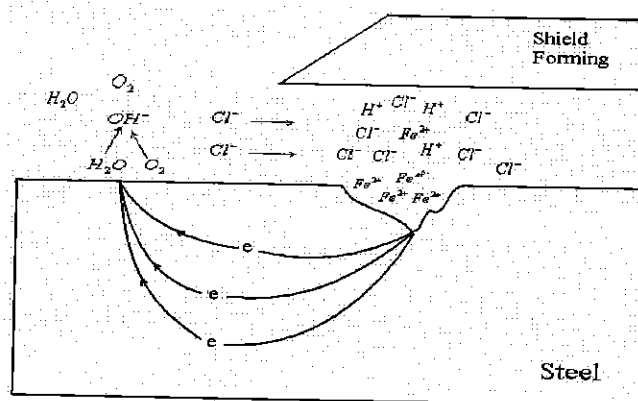
خوردگی شیاری یک نوع خوردگی موضعی است که در داخل یک شیار باریک با سرعت بالا پیش می‌رود. شیارهایی که در این نوع خوردگی تشکیل می‌شوند، ممکن است در محل تماس دو فلز و یا یک فلز

1-Inhibitor

2-Crevice Corrosion

و یک غیرفلز بوجود آیند. همچنین، ممکن است این شیارها از ترکهای موجود روی سطح فلزات حاصل شوند [۲].

برای عمل کردن به عنوان یک محل خوردگی، شیاز بایستی به اندازه کافی باز باشد تا مایع بتواند داخل آن شود، ولی بایستی آنقدر باریک باشد تا یک منطقه ساکن محلول بوجود آید. بدین دلیل است که خوردگی شیاری معمولاً در شیارهایی با دهانه‌های به عرض چند هزارم اینچ یا کمتر اتفاق می‌افتد. برای نشان دادن مکانیزم خوردگی شیاری، یک اتصال پرچ شده از فلز M (مثل آهن یا فولاد) را که در آب دریا قرار دارد، مطابق شکل ۱-۷ در نظر بگیرید (PH= 7). واکنش کلی مشتمل بر انحلال فلز M طبق معادله ۱-۶ و احیای اکسیژن به یون هیدروکسیل طبق معادله ۱-۹ می‌باشند.



شکل ۱-۷ خوردگی شیاری

ابتدا این واکنشها بطور یکنواخت روی تمام سطح واقع می‌شوند، از جمله داخل شیار. اصل بقای بار الکتریکی در فلز و در داخل محلول برقرار است. هر الکترونی که در اثر تشکیل یون فلز بوجود می‌آید، به سرعت بوسیله واکنش احیای اکسیژن مصرف می‌شود. همچنین در ازای هر یون فلز در محلول، یک یون هیدروکسیل بوجود می‌آید. بعد از یک زمان کوتاه، اکسیژن داخل شیار تمام می‌شود، لذا در این ناحیه دیگر احیای اکسیژن صورت نمی‌گیرد. تخلیه یا تمام شدن اکسیژن داخل شیار دارای یک تاثیر غیرمستقیم مهم می‌باشد که با ادامه خوردگی مهمتر می‌شود. بعد از تمام شدن اکسیژن در داخل شیار احیا اکسیژن صورت نمی‌گیرد، در حالیکه حل شدن فلز M در داخل آن همچنان ادامه می‌یابد، بنابراین تجمعی از بارهای مثبت (M^+) در محلول داخل شیار بوجود می‌آید که لزوماً با مهاجرت یونهای منفی کلر محلول به داخل شیار بایستی خنثی گردد. در نتیجه غلظت کلر در فلز داخل شیار افزایش می‌یابد.



معادله بالا نشان می‌دهد که محلول آبی کلرورهای فلزات در آب تجزیه شده، هیدروکسیل نامحلول و اسید آزاد بوجود می‌آید. به دلایل نامشخص هم یون کلر و هم یون هیدروژن سرعت خوردگی اکثر فلزات و آلیاژها را افزایش می‌دهند. این یونها به دلیل مهاجرت و هیدرولیز در شکافها وجود دارند و بنابراین باعث افزایش سرعت حل شدن فلز M خواهند شد. نشان داده شده است که محلول داخل شیارهایی که در معرض محلولهای رقیق نمک طعام با PH خنثی قرار گرفته‌اند پس از آزمایش دارای غلظت یون کلر ۳ تا ۱۰ برابر

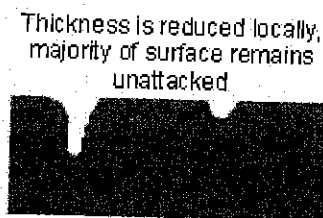
غلظت محلول اصلی و دارای PH برابر با ۲ تا ۳ بوده‌اند. با افزایش خوردگی در شیار، سرعت احیای اکسیژن در سطوح مجاور نیز افزایش می‌یابد. بدین ترتیب سطوح مجاور شیار به طریق کاتدی حفاظت می‌شود. بنابراین در مرحله خوردگی شیاری، خوردگی در شیار متمرکز است در حالی که سطوح اطراف شیار یا اصلاً خورده نمی‌شوند یا خیلی کم خورده می‌شوند.

روش‌های مبارزه با خوردگی شیاری یا حداقل کردن آن به شرح زیر می‌باشد:

- در تجهیزات جدید به جای پرچکاری یا استفاده از پیچ و مهره از جوشکاری استفاده می‌شود. لازم است نفوذ کامل مذاب به داخل درز جوش صورت گیرد تا از بوجود آمدن حفره و شیار در طرف دیگر خط جوش جلوگیری گردد.
- از گوشه‌های تیز و نواحی بسته و کور پرهیز شود.
- تجهیزات را به طور منظم بازرسی کرده و رسوبات تمیز شود.
- در صورت امکان جامدات معلق در پروسه‌های اولیه حذف شود.
- در مرحله خوابیدن کارخانه مواد جاذب رطوبت حذف گردد.

۱-۵-۴- خوردگی حفره‌ای^۱

خوردگی حفره‌ای نوعی خوردگی موضعی است که بصورت نقاط کوچک تا عمق زیادی از فلز به سرعت نفوذ می‌کند (شکل ۸-۱). وقتی که این نوع خوردگی شروع شود تا مرحله سوراخ شدن فلز ادامه می‌یابد.



شکل ۸-۱ خوردگی حفره‌ای

حفره‌ها معمولاً کوچک‌اند ولی اندازه و توزیع آنها در سطح فلز بسیار متفاوت است. ردیابی و پی بردن به حفره‌ها، بویژه در مرحله شروع، معمولاً بسیار مشکل است. در نتیجه، خسارت‌های ناشی از حفره‌دار شدن و انهدام زودرس بسیار زیاد است. به علاوه برای پیش‌بینی مقاومت یک فلز نسبت به این نوع خوردگی و تعیین عمر آن، روش‌های کاهش وزن و الکتروشیمیایی کاربرد چندانی ندارند.

اکثر فولادهای زنگ نزن در محلول‌های حاوی یون کلرید، در معرض خطر حفره‌دار شدن و انهدام قرار دارند. یون‌های کلرید لایه اکسیدی را در بعضی از نقاط تخریب می‌کنند. در این نقاط، فلز عاری از پوشش اکسیدی تشکیل آند را داده که در نتیجه یک حفره کوچک شروع می‌شود. هنگامی که حفره تشکیل شد، با

تشکیل پیل اختلاف دمش هوا، حفره دار شدن شبیه به خوردگی شیاری ادامه می یابد. در این حالت انتهای حفره آند و سطح فلز کاتد است. حاصل این امر ممکن است سوراخ شدن زودرس فلز باشد [۱].

حفره دار شدن معمولاً به همراه محیط خورنده در حالت ساکن مثل مایع درون یک تانک یا مایع جمع شده در یک قسمت غیر فعال سیستم لوله کشی اتفاق می افتد (شکل ۹-۱). افزایش سرعت حرکت محیط خورنده این نوع خوردگی را کاهش می دهد.



شکل ۹-۱ حفره دار شدن در یک سیستم لوله کشی در اثر خوردگی حفره ای

روشهایی که برای مبارزه با خوردگی شیاری بکار می رود برای حفره دار شدن نیز صادق است. فلزاتی که در مراحل آزمایشگاهی حفره دار شوند، یا تمایل به حفره دار شدن داشته باشند را نبایستی به عنوان فلز ساختمان برای ساخت کارخانه یا تجهیزات آن بکار برد. بعضی آلیاژها در برابر حفره دار شدن مقاومتر از بعضی دیگر هستند. افزودن ممانعت کننده ها گاهی اوقات مفید است. در صورتی که خوردگی کاملاً متوقف نگردد می تواند روش خطرناکی باشد، زیرا در صورتی که خوردگی حفره ای کاملاً متوقف نشود، حفره دار شدن تشدید می شود [۲].

۱-۵-۵- خوردگی موضعی توسط اختلاف دمش هوا (اکسیژن)

غلظت اکسیژن حل شده در آب و یا خاک اغلب از یک قسمت به قسمت دیگری تغییر می کند. این اختلاف غلظت اکسیژن بین دو نقطه سبب می شود که بر طبق معادله نرنست برای واکنش

$$0.5O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$$

پتانسیل های تعادلی مختلفی بصورت زیر بوجود آید:

$$E_{O_2} = E^0 + \frac{0.06}{2} \log \frac{(O_2)^{0.5} (H^+)^2}{(H_2O)} \quad (1-13)$$

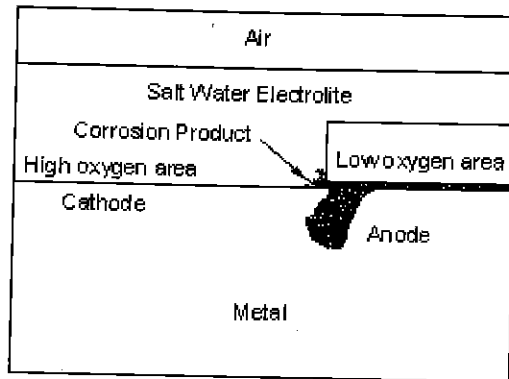
که در این معادله:

(O_2) غلظت اکسیژن حل شده در سطح فلز

(H_2) غلظت یونهای H^+ در نزدیکی فلز

(H_2O) اکتیویته آب، که در محلولهای آبی معمولاً برابر با یک در نظر گرفته می شود.

معادله بالا به روشنی نشان می‌دهد که غلظت بیشتر اکسیژن، پتانسیل تعادلی نجیب تر را بوجود می‌آورد (شکل ۱-۱۰).

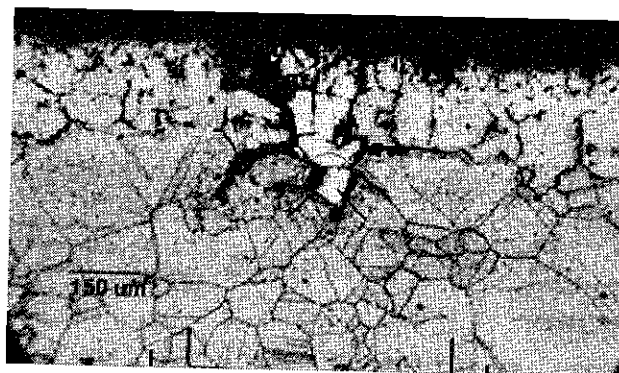


شکل ۱-۱۰ خوردگی موضعی توسط اختلاف دمش اکسیژن

غلظت اکسیژن ممکن است بستگی به سهولت نفوذ و انتقال اکسیژن برای رسیدن به قسمتی از فلز داشته باشد. به عنوان مثال، برای بسیاری از لوله‌های زیرزمینی، سیلان اکسیژن در قسمت بالای لوله بیشتر از قسمت پایین است. در نتیجه غلظت اکسیژن در قسمت بالای لوله بیشتر خواهد بود. بنابراین یک پیل گالوانیکی از نوع غلظتی تشکیل می‌شود، به نحوی که قسمت پایین لوله با پتانسیل فعالتر آند و قسمت بالای لوله با پتانسیل نجیب‌تر، کاتد خواهد شد. بدین ترتیب قسمت پایین که آند شده است سریعتر خورده می‌شود [۵].

۱-۵-۶- خوردگی بین دانه‌ای

اگر یک فلز در یک شرایط خاص ناپایدار باشد و در نتیجه خورده شود، چون مرز دانه‌ها معمولاً کمی فعالتر از خود دانه‌ها می‌باشد، بنابراین خوردگی یکنواخت بوجود می‌آید. ولی تحت بعضی شرایط، مرز دانه‌ها نسبت به دانه‌ها خیلی فعالتر می‌شوند و خوردگی بین دانه‌ای بوجود می‌آید (شکل ۱-۱۱). خوردگی موضعی و تمرکز در مرز دانه‌ها یا نواحی نزدیک به آنها در حالیکه خود دانه‌ها یا اصلاً خورده نشده‌اند یا کم خورده شده‌اند، را خوردگی بین دانه‌ای می‌نامند. آلیاژ پودر می‌شود (دانه‌ها یا کریستال‌ها جدا می‌شوند) و یا استحکام خود را از دست می‌دهند.



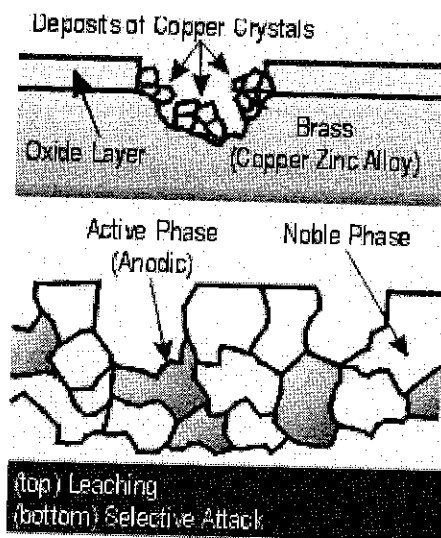
شکل ۱-۱۱ خوردگی بین دانه ای

خوردگی بین دانه‌ای بوسیله ناخالصی‌های موجود در مرز دانه‌ها، غنی شدن یا فقیر شدن مرز دانه‌ها نسبت به یک عنصر آلیاژی در این نواحی، واقع می‌شود. مقادیر جزئی آهن در آلومینیوم که قابلیت انحلال کمی برای آهن دارد به مرز دانه‌ها رفته و باعث خوردگی بین دانه‌ای می‌شوند. فقیر شدن مرز دانه‌ها نسبت به کرم باعث خوردگی بین دانه‌ای فولادهای زنگ نزن می‌گردد [۳].

تحت شرایطی که مقاومت زیاد در برابر خوردگی نیاز باشد، همواره توصیه می‌شود که استفاده از آلیاژهای حاوی عناصر مخرب نظیر آهن و مس در آلومینیوم اجتناب شود. اگر چنین عناصر مخربی وجود داشته باشد، بهتر است از عملیات حرارتی نامناسبی که موجب رسوب عناصر مقاوم به خوردگی در مرز دانه‌ها می‌شود اجتناب شود.

۱-۵-۷- خوردگی انتخابی^۱

خوردگی انتخابی نوعی خوردگی است که در آن عناصر خاص از آلیاژ ترجیحاً حل شده و از آن جدا می‌شود. این نوع خوردگی نتیجه عملکرد محیط‌های خاص است که، فعالترین عنصر جسم را در خود حل کرده و لذا یک جسم متخلخل که عمدتاً از نجیب‌ترین عنصر تشکیل شده است را به جای می‌گذارد. ماده باقیمانده، قسمت عمده‌ای از استحکام خود را از دست می‌دهد. این نوع خوردگی ممکن است در آلیاژهای تک فاز دو عنصری و نیز در آلیاژهای دو فاز رخ دهد. در حالت دوم، ترجیحاً فلز فعالتر حل می‌شود. این موضوع در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۲ خوردگی انتخابی

خوردگی انتخابی همچنین به زدایش آلیاژی^۲ یا جدایش^۳ نیز مرسوم است. معمولترین عناصر که به این طریق از آلیاژ جدا می‌شوند، عبارت‌اند از: روی، آلومینیوم، کوبالت، نیکل و کرم. بویژه وقتی که مس با این

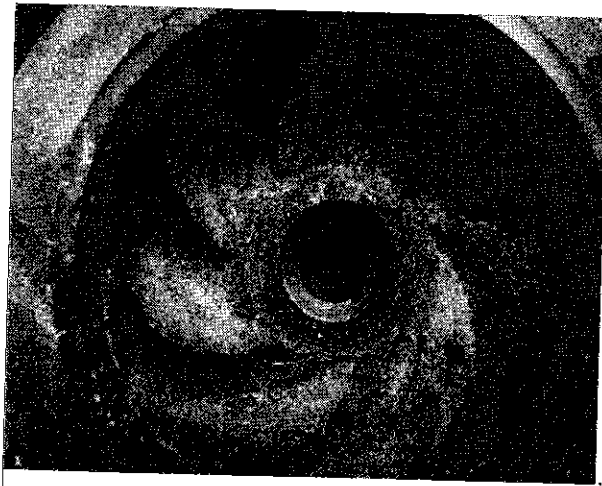
1- Selective Corrosion
2- Dealloying
3- Parting

عناصر آلیاژ شود، یک گروه از آلیاژها را تشکیل می‌دهد که به زدایش انتخابی حساس‌اند. اغلب این نوع خوردگی را براساس عنصری که حل می‌شود نامگذاری می‌کنند. زدایش روی و گرافیتی شدن متداول‌ترین مثالها از نوع خوردگی انتخابی‌اند [۳].

۱-۵-۸- خوردگی سایشی^۱

خوردگی سایشی عبارت است از سرعت یافتن یا افزایش سرعت خوردگی یا از بین رفتن یک فلز در اثر حرکت نسبی بین مایع خورنده و سطح فلز. معمولاً این حرکت خیلی سریع است و اثرات سایش مکانیکی و یا ساییده شدن وجود دارد. یونهای فلزی حل شده روی سطح فلز در اثر حرکت روی سطح باقی نمی‌مانند، یا محصولات جامد حاصل از خوردگی از سطح فلز به طریق مکانیکی کنده می‌شوند. گاهی اوقات حرکت باعث تقلیل سرعت خوردگی می‌گردد. بویژه موقعی که تحت شرایط ساکن خوردگی موضعی اتفاق بیافتد، ولی این خوردگی سایشی نیست، زیرا سرعت خوردگی افزایش نیافته است [۲].

خوردگی سایشی دارای ظاهری شیار دار، موجی شکل، سوراخهای کروی شکل و ناهموار می‌باشد و معمولاً این اشکال در جهت خاص قرار گرفته‌اند. شکل ۱-۱۳ پروانه پمپی را که دچار خوردگی سایشی شده است نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۳ خوردگی سایشی در پروانه پمپ

اکثر فلزات و آلیاژها مستعد به خوردگی سایشی هستند. در بسیاری از آنها مقاومت در برابر خوردگی بستگی به نوع پوسته سطحی (غیر فعال شدن) دارد. مثالهایی در این مورد عبارتند از آلومینیوم، سرب و فولاد زنگ نزن. کلیه تجهیزاتی که در تماس با مایعات متحرک می‌باشند در معرض خوردگی سایشی قرار دارند.

روشهای مبارزه با خوردگی سایشی به ترتیب اهمیت عبارتند از:

- کاربرد موادی با مقاومت بهتر از نظر خوردگی سایشی
- طراحی

- تغییرات در محیط خورنده
- کاربرد پوششها
- حفاظت کاتدی

۱-۵-۹- خوردگی حبابی^۱

خوردگی حبابی نوعی از خوردگی سایشی موضعی بوده که نتیجه مجموع اثرات تخریب موضعی سطح در اثر ترکیدن مکرر حبابهای بخار و به دنبال آن خسارت الکتروشیمیایی است که ترجیحاً در منطقه صدمه دیده متمرکز می‌شود.

خوردگی حبابی در مواردی نظیر محللهایی که جریان آشفته مایع وجود دارد، برای مثال در نزدیکی پروانه کشتی‌ها، و در پره‌های پمپ‌های آب رخ می‌دهد. تشکیل مکرر حبابهای بخار و ترکیدن انفجاری آنها می‌تواند در اثر نوسانات موضعی فشار باشد که تا حد کمتر و بیشتر از فشار بخار تغییر می‌کند. تشکیل و انفجار سریع و مرتب این حبابها، ضربات شدیدی را روی سطح فلز ایجاد می‌کند که می‌تواند سطح فلز را بطور موضعی تخریب نماید. مشابه با فلز کار سرد شده، این عمل نیز می‌تواند موجب پیدایش ناحیه‌ای شود که از نظر الکتروشیمیایی نسبت به بقیه فلز فعالتر است [۵].

اگر سطح فلز توسط لایه نازکی از اکسید پوشیده شده باشد ضربات یاد شده می‌توانند لایه محافظ را در بعضی از نقاط شکسته و یا از سطح جدا کند. در چنین محللهایی فلز عاری از اکسید که فعالتر از خود اکسید محافظ است با الکتروولیت تماس مستقیم پیدا می‌کند. در هر دو مورد، ناحیه فعالتر به عنوان آند حل شونده‌ای عمل می‌کند که ممکن است دوباره مقداری اکسید در سطح آن تشکیل شود. با کاهش مجدد فشار به طور موضعی، حبابهای بخار جدیدی تشکیل می‌شوند که تمایل دارند در محل خسارت دیده متمرکز شده و در همین نواحی منفجر شوند. خوردگی حبابی ترجیحاً در نواحی خاص رخ می‌دهد و از خوردگی، ظاهر سطح اسفنجی و یا حفره‌دار شده به نظر می‌رسد.

یکی از راههای جلوگیری از خوردگی حبابی، استفاده از آلیاژهایی با حساسیت کمتر است. ثابت شده است که بعضی از آلیاژها مثل فولاد زنگ نزن ۳۰۴، مقاومت بیشتری در برابر خوردگی حبابی دارند. مشاهده شده است که روشهای حفاظتی نظیر حفاظت کاتدی و یا استفاده از پوششهای لاستیکی و پلاستیکی نیز مفید هستند.

۱-۵-۱۰- خوردگی توام با تنش^۲

خوردگی توام با تنش عبارت است از انهدام فلزات توسط ترک خوردن ناشی از مجموع اثرات محیط خورنده و تنش کششی.

1- Cavitations Corrosion
2- Stress Corrosion

تنش کششی می‌تواند در اثر تنش اعمال شده و یا تنش باقیمانده داخلی باشد. در برخی از موارد، تنش یاد شده می‌تواند در اثر تجمع محصولات خوردگی باشد، نظیر خوردگی پیچ و مهره. با فرار گرفتن پیچ و مهره در یک محیط خورنده، محصولات خوردگی بین آنها جمع می‌شوند. لیکن، حجم محصولات خوردگی بسیار بیشتر از فلز اولیه است. بنابراین سبب ایجاد تنش کششی در مهره شده، که سرانجام منجر به ترک خوردن و انهدام می‌شود. مهره مزبور در شکل ۱-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۴ مهره منهدم شده در اثر خوردگی توام با تنش

پارامترهای اصلی موثر در خوردگی تنشی

• ترکیب شیمیایی آلیاژ

تعداد زیادی از فلزات و آلیاژها نسبت به خوردگی تنشی حساس‌اند. برای مثال، می‌توان به فولاد معمولی در محلولهای نیترات و یا آلومینیوم و فولاد زنگ نزن در محیط کلریدی اشاره کرد. فلزات خالص، اغلب نسبت به خوردگی تنشی مصون هستند. لیکن، استثنائاتی نیز وجود دارد. در بعضی از محیطهای خاص، آلیاژهای خاصی ممکن است نسبت به خوردگی تنشی حساسیت و یا مقاومت نشان دهند.

• پارامترهای متالورژیکی

در رابطه با خوردگی تنشی، شرایط فیزیکی و ساختارهای فلز نیز اهمیت زیادی دارند. گرما دادن فولادهای معمولی (کم کربن ساده) برای مدت زمان طولانی در یک محدوده دمایی مشخص، موجب جدایش کربن در مرز دانه‌ها می‌شود. این امر، یک مسیر مستعد برای رشد ترجیحی ترک را بوجود می‌آورد. کار سرد، مقاومت به خوردگی تنشی بین دانه‌ای را در جهت عمود بر امتداد مرز دانه‌ها افزایش می‌دهد. لیکن، این امر می‌تواند رشد ترک را در جهت عمود بر امتداد مرز دانه‌ها تسهیل کند. بنابراین جهت اعمال تنش، نسبت به جهت گیری دانه‌ها (و مرز دانه‌ها) در فرایند خوردگی تنشی بسیار مهم است.

• تنش کششی

در این پدیده، مجموع تنشهای کششی منظور می‌شود. این تنشها، از مجموع تنشهای باقیمانده داخلی، تنش اعمال شده و تنش حاصل از تجمع محصولات خوردگی تشکیل می‌شود.

با افزایش تنش کششی، زمان ترک خوردن کاهش می‌یابد. اختلاف نظرهای زیادی درباره تخمین حداقل تنش مورد نیاز برای وقوع ترک خوردگی تنشی وجود دارد. مقدار آن می‌تواند بستگی به آلیاژ، دما و همچنین محیط خورنده داشته باشد. بعضی از محققان معتقدند که شروع ترک خوردگی تنشی در تنشهایی در حد تنش تسلیم انجام می‌شود، ولی ممکن است در تنشهای پایین‌تر پیشروی کند. لازم به ذکر است که تحت تنشهای فشاری، هیچ ترک خوردگی تنشی گزارش نشده است.

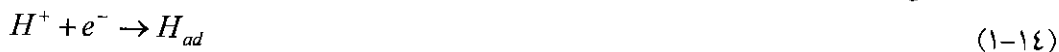
• محیط

از آنجایی که هر آلیاژ نسبت به یک آنیون (نظیر Cl^-) با ترکیب شیمیایی خاص حساس است، طبیعت محیط خورنده بسیار مهم است. قابل توجه است که، مشخص شده است تیتانیوم و آلومینیوم در یک محیط غیر الکترولیتی مانند تتراکلرید کربن، نسبت به خوردگی تنشی حساس هستند. روشهای مختلفی می‌توان برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی تنشی استفاده کرد. مانند: کار سرد شدید، عملیات گرمایی، حفاظت کاتدی و در صورت امکان استفاده از تنشهای فشاری. بعضی از فولادهای مخصوص که حاوی عناصر آلیاژی نظیر آلومینیوم، تیتانیوم، نیوبیوم و تانتالیوم هستند نیز مقاومت خوبی در برابر خوردگی تنشی از خود نشان می‌دهند [۲].

۱-۱-۵-۱۱- خوردگی در اثر هیدروژن^۱

هیدروژنی که در اثر خوردگی، حفاظت کاتدی و یا به نحو دیگری تولید می‌شود می‌تواند به شکل هیدروژن اتمی در فلز نفوذ کرده و موجب خساراتی نظیر تاول زدن هیدروژنی و یا تردی هیدروژنی شود. در فرآیند خوردگی آهن، اکسایش آهن الکترون آزاد می‌کند. الکترونهای آزاد شده موجب احیای یونهای H^+ می‌شود. این واکنش یک مکانیزم دو مرحله‌ای دارد.

مرحله اول، شامل انتقال بار است که موجب جذب سطحی اتم (H_{ad}) می‌شود.



در مرحله دوم، H_{ad} با H_{ad} دیگر و یا با یک یون هیدروژن و یک الکترون واکنش داده و مولکول هیدروژن (H_2) را تشکیل می‌دهد. همچنین H_{ad} می‌تواند به داخل فلز نفوذ کند.

هنگامی که در مقایسه با مرحله اول، مرحله دوم مشکل بوده و یا آهسته انجام شود، تجمع قابل توجهی از H_{ad} روی سطح بوجود آمده و لذا سطح توسط این اتمها پوشیده می‌شود. تحت چنین شرایطی نفوذ هیدروژن اتمی به داخل فلز تسهیل می‌شود. حضور بعضی از مواد شیمیایی خاص، نظیر H_2S که از مرحله دوم جلوگیری می‌کند، نفوذ هیدروژن را در فلز افزایش می‌دهد.



نفوذ اتمهای هیدروژن به داخل فلز، موجب می‌شود که انعطاف‌پذیری فلز بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. تحت چنین شرایطی گفته می‌شود که فلز ترد شده است. هیدروژن اتمی می‌تواند در زیرکونیوم، تیتانیم و فلزات دیگر نفوذ کرده و با تشکیل هیدریدها، موجب ترد شدن و در نتیجه انهدام مکانیکی آنها شود. علاوه بر این، اغلب هیدروژن در نزدیکی نایجایی‌ها، حفره‌ها، ترکها و یا ناخالصها تجمع می‌کند.

اثر تردی هیدروژن یک پدیده دائمی نیست. به این صورت که، هنگامی که تولید و نفوذ هیدروژن به داخل فلز متوقف شد، هیدروژن به خارج از فلز نفوذ می‌کند. بنابراین، اگر در طول مدت تردی انهدامی رخ ندهد، فلز می‌تواند خواص اولیه خود را بازیابی کند.

وقتی که هیدروژن اتمی به داخل فلز نفوذ می‌کند، ممکن است در نزدیکی یک حفره و یا ترک داخلی تشکیل مولکول هیدروژن گازی را دهد. این گاز نمی‌تواند در داخل شبکه فلزی جا بجا شود، بنابراین، در همان محل تجمع کرده، فشار بسیار زیادی را ایجاد می‌کند که در نتیجه می‌تواند موجب ترک خوردن و انهدام شود. همچنین انبساط گاز در نزدیکی سطح می‌تواند سبب بوجود آمدن تاول شود [۳].

از جمله راههای توصیه شده برای کاهش و یا جلوگیری از خسارت هیدروژنی عبارتند از:

- استفاده از انواع پوشش‌ها و آسترها
- استفاده از بازدارنده‌ها که تولید هیدروژن را کاهش می‌دهند.
- خارج کردن سولفید از محیط (سولفید مرحله دوم واکنش احیای هیدروژن را به تاخیر می‌اندازد).
- استفاده از فولاد نیکل‌دار

۱-۶-۱- روشهای جلوگیری از خوردگی

روشهای جلوگیری از خوردگی در جهت حذف یا کاهش میزان آن به ترتیب زیر می‌باشند [۱]:

- انتخاب مواد مناسب
- طراحی صحیح
- حفاظت کاتدی
- حفاظت آندی
- پوششها
- بازدارنده‌ها

۱-۶-۱-۱- انتخاب مواد مناسب

متداولترین روش جلوگیری از خوردگی انتخاب فلز یا آلیاژ مناسب برای کاربرد مورد نظر است [۲]. در انتخاب آلیاژها، چند زوج موفق فلز - محیط خورنده وجود دارد. این زوجها معمولاً نشان دهنده بیشترین مقاومت خوردگی با حداقل هزینه می‌باشند. بعضی از این زوجها موفق در زیر آمده است:

- فولاد زنگ نزن - اسید نیتریک
- نیکل و آلیاژهای آن - مواد قلیایی

- مونل - اسید فلوریدریک
- هاستولی ها (کلریسیتها) - اسید کلریدریک گرم
- سرب - اسید سولفوریک رقیق
- آلومینوم - اتمسفرهای پاکیزه
- قلع - آب مقطر
- تیتانیم - محلولهای اکسیدان قوی و گرم
- فولاد - اسید سولفوریک غلیظ
- تانتال - بیشترین مقاومت

لیست فوق تنها لیست، از زوجهای موفق نیست. در بسیاری موارد، مواد ارزانتر یا مواد مقاومتر وجود دارند. در اینجا توضیح درباره فولاد زنگ نزن ضروری به نظر می‌رسد. فولاد زنگ نزن یک اسم کلی است که طیف وسیعی از آلیاژها که شامل ۱۱/۵ تا ۳۰ درصد کرم و صفر تا ۲۲ درصد نیکل به همراه عناصر آلیاژی دیگر را شامل می‌شود، اطلاق می‌گردد. فولادهای زنگ نزن در مقابله با خوردگی کاربرد وسیعی دارند، ولی بایستی به خاطر داشت که در تمام محیطها مقاوم نیستند. در حقیقت، در بعضی شرایط مثل محیطهای حاوی کلرور و در صورت وجود تنش در فلز، فولادهای زنگ نزن از فولاد ساختمانی معمولی هم ضعیف‌تر است. فولادهای زنگ نزن نسبت به فولادهای ساختمانی معمولی استعداد بیشتری به خوردگی موضعی مثل خوردگی بین دانه‌ای، ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش و حفره‌دار شدن دارند.

مقاومت خوردگی یک فلز خالص معمولاً بهتر از فلز ناخالص است. لکن فلزات خالص معمولاً گرانتر بوده و نسبتاً نرم و ضعیف هستند. بطور کلی این روش در موارد ضروری که خیلی خاص می‌باشند بکار برده می‌شود. به عنوان مثال زیرکونیوم تولید شده بوسیله قوس الکتریکی از نظر خوردگی دارای مقاومت بیشتری نسبت به زیرکونیوم تولید شده به وسیله کوره القایی است. علت این امر وجود ناخالصی بیشتر در زیرکونیوم تولید شده بوسیله کوره القایی است. این یک کاربرد خاص در نیروگاههای اتمی است که مقادیر بسیار کم خوردگی، خیلی زیاد محسوب می‌شود.

استفاده از غیر فلزات نیز روش دیگری در جهت مقابله با خوردگی می‌باشد. پنج گروه کلی مواد غیر فلزی عبارتند از:

لاستیکها (طبیعی و مصنوعی)، پلاستیکها، سرامیکها، کربن و گرافیت و چوب ولی به دلایل زیر کاربرد آنها محدود می‌باشد.

بطور کلی، لاستیکها و پلاستیکها در مقایسه با فلزات و آلیاژها، ضعیفتر، نرمتر، مقاومتر در برابر یونهای کلر و اسید کلریدریک، ضعیفتر در برابر اسید سولفوریک غلیظ و اسیدهای اکسیدان مثل اسید نیتریک، ضعیفتر در برابر حلالها بوده و دارای محدودیت درجه حرارت هستند.

مواد سرامیکی دارای مقاومت خوردگی عالی و مقاومت در درجه حرارت‌های بالا هستند، ولی ترد بوده و دارای استحکام پایینی می‌باشند. کربن و گرافیت مقاومت خوردگی، هدایت الکتریسیته و هدایت حرارت خوبی داشته ولی شکننده می‌باشند. چوب بوسیله محیط‌های خورنده از بین می‌رود.

۱-۶-۲- طراحی صحیح

طراحی یک سیستم غالباً به اندازه انتخاب مواد در مبارزه با خوردگی اهمیت دارد. در طراحی بایستی نیازهای مکانیکی و استحکام را به همراه سهم خوردگی در این رابطه در نظر گرفت.

بعضی از قواعد طراحی که بایستی در نظر گرفته شوند به ترتیب زیر می‌باشند [۲]:

- خوردگی باعث نازک شدن فلز می‌شود، لذا بایستی این مقدار نازک شدن را در طراحی لوله‌ها، تانکها و قطعات دیگر در نظر گرفت.
- به جای پرچکاری از جوشکاری استفاده شود. اتصالات پرچی نقاطی برای خوردگی شپاری هستند.
- سیستم‌ها طوری طراحی شوند تا اجزایی که به سرعت خورده می‌شوند به سهولت قابل تعویض باشند.
- از تنش‌های مکانیکی بالا و مراکز تنش که در معرض محیط خورنده قرار دارند پرهیز شود. تنش‌های مکانیکی یا داخلی یکی از عوامل ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش می‌باشد.
- در صورت امکان از تماس الکتریکی فلزات غیر همجنس جلوگیری شود تا خوردگی گالوانیکی بوجود نیاید.
- درباره انتخاب صحیح مواد اطمینان حاصل شود.
- کلی‌ترین قانون اجتناب از غیر یکنواختی است. فلزات غیر همجنس، حبابهای هوا، توزیع غیر یکنواخت حرارت و تنش و اختلافات دیگر در نقاط مختلف سیستم باعث خوردگی می‌گردد.

۱-۶-۳- حفاظت کاتدی

حفاظت کاتدی عبارت است از جلوگیری یا کاهش خوردگی فلزات به طوری که توسط اعمال یک جریان الکتریکی خارجی (یکسو) و یا تماس آن با یک آند از بین رونده (فدا شونده)، فلز مورد نظر به صورت کاتد درآید. در حقیقت قبل از اعمال سیستم حفاظت کاتدی، فلزی که خورده می‌شود هم دارای مناطق کاتدی و هم مناطق آندی می‌باشد (که در مناطق آندی خوردگی صورت می‌گیرد)، ولی با اعمال سیستم حفاظت کاتدی، مناطق آندی نیز تبدیل به کاتد شده و در نتیجه دستگاه یا شبکه مورد نظر کلاً کاتدی می‌شود [۱].

حفاظت کاتدی از مهمترین و موثرترین روش‌های کنترل خوردگی می‌باشد، به طوری که با اجرای این روش می‌توان فلزات را بدون اینکه خورده شوند به مدتی طولانی در محیط‌های خورنده نگهداری نمود.

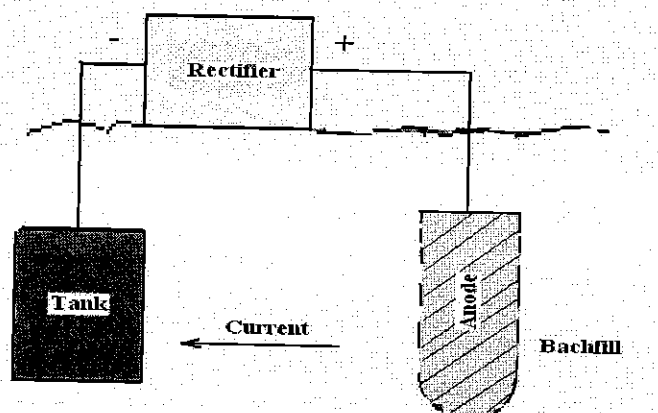
اساس حفاظت کاتدی را می‌توان با در نظر گرفتن خوردگی فلز M در یک محیط اسیدی توضیح داد. واکنش‌های الکتروشیمیایی انحلال فلز و آزاد شدن گاز هیدروژن طبق معادلات (۴-۱) و (۶-۱) می‌باشند.

با فراهم نمودن الکترون برای فلزی که بایستی محافظت شود، حفاظت کاتدی انجام می‌شود، بررسی معادلات مزبور نشان می‌دهد که با دادن الکترون به فلز، انحلال آن تقلیل می‌یابد و تصعید هیدروژن انجام می‌شود. اگر طبق قرارداد در قوانین الکتروسیته فرض شود جریان از قطب مثبت به قطب منفی می‌باشد، بنابراین در صورتی که جریان از الکترولیت وارد سطح فلز شود باعث محافظت آن می‌شود. برعکس اگر جریان از سطح فلز وارد الکترولیت گردد خوردگی شدید واقع می‌شود.

دو روش برای حفاظت کاتدی وجود دارد:

- بوسیله یک مولد برق
- بوسیله ایجاد یک زوج گالوانیکی مناسب

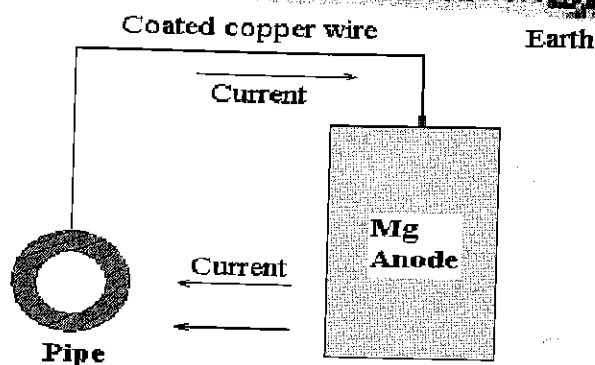
در شکل ۱-۱۵ حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان الکتریکی نشان داده شده است. در این شکل یک مخزن زیرزمینی به قطب منفی مولد جریان مستقیم^۱ وصل شده است و قطب مثبت به یک آند خنثی مثل گرافیت متصل است. محل اتصال کابل به مخزن و الکتروود خنثی به دقت عایق می‌شود تا از نشت جریان جلوگیری شود. آند معمولاً بوسیله پشت بند^۲ شامل پودر کلک، گچ یا بنیونیت محصور شده است تا اتصال الکتریکی بین آند و زمین مجاور را بهبود بخشد. مطابق شکل جریان از زمین (الکترولیت) وارد سطح مخزن می‌شود و باعث کاهش خوردگی آن می‌گردد.



شکل ۱-۱۵ حفاظت کاتدی تانک زیر زمینی به روش اعمال جریان الکتریکی

در شکل ۱-۱۶ حفاظت کاتدی با متصل کردن لوله ای که بایستی مورد حفاظت قرار گیرد به منیزیم نشان داده شده است.

^۱ - Rectifier
^۲ - Backfill



شکل ۱-۱۶ حفاظت کاتدی لوله بوسیله آند فدا شونده

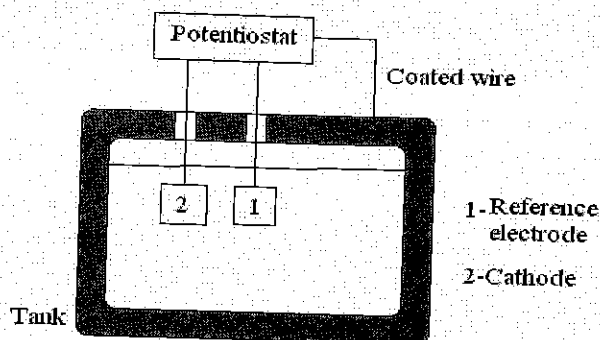
در سری گالوانیکی منیزیم نسبت به فولاد فعالتر بوده و در زوج گالوانیکی با فولاد، منیزیم خورده می‌شود. آند در این حالت آند فدا شونده^۱ نامیده می‌شود زیرا در طی حفاظت فولاد مصرف می‌شود. شدت جریان مورد نیاز جهت محافظت کاتدی بستگی به فلز و محیط اطراف آن دارد و باید از شدت جریانی که معادل با میزان خوردگی در همان محیط است بیشتر باشد. بنابراین هر قدر میزان خوردگی زیادتر باشد، شدت جریان خارجی که باید اعمال شود بیشتر می‌شود. این موضوع را می‌توان چنین توضیح داد که وقتی سطوح کاتدی بوسیله جریان خارجی پلاریزه می‌شوند تمامی سطح فلز هم پتانسیل گشته و جریان موضعی متوقف می‌شود. بنابراین تا زمانی که جریان خارجی برقرار باشد فلز خورده نمی‌شود.

اگر جریان محافظت کننده سبب رسوب کردن یک قشر مواد معدنی در سطوح کاتدی شود (مثلاً در آبهای سخت و آب دریا) مقدار جریان کلی لازم با افزایش رسوب کاهش می‌یابد.

۱-۶-۴- حفاظت آندی

برعکس حفاظت کاتدی که در سال ۱۸۲۴ برای اولین بار برای حفاظت کشتی‌های انگلیسی بکار برده شدند، حفاظت آندی نسبتاً جدید بوده و اولین بار در سال ۱۹۵۴ پیشنهاد شده است. بطور خلاصه، حفاظت آندی براساس تشکیل یک پوسته سطحی محافظ روی فلزات با اعمال جریانهای آندی می‌باشد. مطابق معادلات (۱-۴) و (۱-۶) با اعمال جریان آندی به یک فلز سرعت انحلال فلز بایستی افزایش پیدا کند و سرعت آزاد شدن هیدروژن کاهش یابد.

معمولاً در مورد فلزات این حالت اتفاق می‌افتد بجز در مورد فلزات فعال - غیر فعال مثل نیکل، آهن، کرم، تیتانیوم و آلیاژهای آنها. اگر به دقت جریان آندی به این فلزات اعمال گردد، غیر فعال شده و سرعت انحلال کاهش می‌یابد. برای این منظور دستگاه پتانسیواستات لازم می‌باشد. پتانسیواستات یک دستگاه الکترونیکی است که فلز را در یک پتانسیل ثابت نسبت به یک الکتروود مقایسه نگه می‌دارد. در شکل ۱-۱۷-۱ حفاظت آندی یک مخزن فولادی حاوی اسید سولفوریک نشان داده شده است.



شکل ۱۷-۱ حفاظت آنودیک تانک حاوی اسید سولفوریک

پتانسیواستات دارای ۳ ترمینال است، یکی به مخزن متصل می‌شود، دیگری به یک الکتروود کمکی بعنوان کاتد (الکتروود پلاتین یا پوشش داده شده بوسیله پلاتین) و سومی به یک الکتروود مقایسه (مثل الکتروود کالومل). در عمل پتانسیواستات همواره پتانسیل ثابتی بین تانک و الکتروود مقایسه برقرار می‌سازد. پتانسیل لازم را با اندازه‌گیریهای الکتروشیمیایی قبلاً معین می‌کنند [۲].

حفاظت آندی سرعت خوردگی را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین باعث می‌شود سرعت خوردگی در بعضی سیستمها 10^6 برابر کمتر شود. اگر چه حفاظت آندی محدود به فلزات فعال - غیر فعال است ولی باید توجه داشت که اکثر فلزات ساختمانی شامل این فلزات می‌باشند.

۱-۶-۵- پوششها

طبق استاندارد DIN 50900 پوششها به ترتیب زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

- پوشش فلزی
 - روی کاربرد: فولاد و تاسیسات (گالوانیزه)
 - قلع کاربرد: مخازن و قوطی‌های مواد غذایی
 - کرم کاربرد: قطعات خودرو (سپر)
 - نیکل کاربرد: لوازم مصرفی
 - فلزات ناپ (طلا و نقره) کاربرد: لوازم مصرفی گران قیمت
- پوشش مواد معدنی
 - سیلیکات کاربرد: لوازم مصرفی گران قیمت (ظروف لعابی)
- پوشش شیمیایی
 - اکسیدها کاربرد: صیقل کاری فولاد
 - فسفات کاربرد: آماده سازی سطح (برای پذیرش پوشش بعدی)
 - کرمات کاربرد: برای بهبود سطح (پذیرش پوشش بعدی)

• پوشش آلی

- رزینهای مصنوعی کاربرد: اتومبیل و تاسیسات
- پلیمرها کاربرد: لوازم مصرفی
- لاستیک کاربرد: مخازن
- قیر کاربرد: فولاد و تاسیسات زیرزمینی

اساس تمام روشهای پوشش دهی آماده سازی سطح قبل از ایجاد پوشش روی آن می باشد. چون ایجاد پیوند بین سطح قطعه مورد نظر و پوشش در نتیجه میزان چسبندگی میسر می گردد، تمیزی بیشترین امکان را برای چسبندگی فراهم می کند و عدم رعایت آن باعث از بین رفتن و یا تضعیف پوشش فلز در رابطه با عوامل مکانیکی و شیمیایی می شود.

عمده ترین مواد آلوده کننده سطوح عبارتند از:

- روغنها
- کربن
- رسوبات سطحی
- لایه های رویین
- اکسیدهای فلزی

جهت تمیز کردن سطوح از آلودگی های فوق از روشهای مناسب می توان استفاده کرد [۲].

متداولترین روشهای ایجاد پوششهای فلزی عبارتند از:

- آبکاری الکتروشیمیایی (گالوانیزه کردن)
- پوشش با مشعل (Metallizing)
- ورق چسبانی گرم (Cladding)
- غوطه وری در مذاب (Hot dipping)
- رسوبات گازی (Vapor disposition)
- نفوذ اتمی (Diffusion)
- تغییرات سطح با روش شیمیایی
- تغییرات سطح با اشعه لیزر
- پوششهای سرامیکی

• آب کاری الکتروشیمیایی

مواد مورد استفاده در این روش مدار پیل گالوانیکی می باشد که در آن قطعه ای که پوشش داده می شود قطبیت کاتودیک دارد. فلز پوشش دهنده یا از آنند گرفته می شود و یا از محلول الکترولیت که در این صورت محلول نمکی از فلز پوشش دهنده می باشد. مثل سولفات آن که در این صورت آنند باید از فلزی مانند پلاتین و یا گرافیت باشد. لایه پوشش فلزی می تواند خالص، ترکیبی (آلیاژی) و عمدتاً لایه ای از چندین لایه از فلزات مختلف باشد.

• پوشش با مشعل

در این روش فلز ابتدا بصورت مذاب درمی آید و مذاب به سطح قطعه مورد نظر پاشیده می شود. فلز پوشش بصورت پودر و یا اغلب بصورت سیم نازکی می باشد. حرارت توسط گاز پروپان و یا استیلن به همراه اکسیژن ایجاد می شود. پوشش حاصل از پاشش به دلیل داشتن خلل و فرج زیاد، کیفیت پایینی دارد. ولی اگر فلز پوشش دهنده نقطه ذوب پایین تر داشته باشد مانند روی، قلع و سرب سطح ایجاد شده صافتر خواهد بود. برای آماده ساختن سطح، قبل از فلز پاششی، سطح را ماسه پاشی^۱ می کنند.

• ورق چسبانی گرم

این روش برای پوشش دادن ورقهای فولاد توسط لایه نازکی از فلز مقاوم در مقابل خوردگی انجام می گیرد. با این روش می توان مثلاً یک ورق یک اینچی فولادی را با ورق $\frac{1}{8}$ اینچ نیکلی پوشش داد. برای انجام این پوشش هر دو فلز را قبلاً گرم می کنند و در حالت گرم روبروی هم قرار داده، از غلتک عبور می دهند. اتصالی که ایجاد می شود مشابه اتصال در روش نقطه جوش است. امروزه بسیاری از مخازن نگهداری مایعات از ورق فولاد کربنی ساخته می شوند که با لایه ای از فولاد زنگ نزن به این روش چسبانده شده اند. کف مخازن بزرگ نفت با این روش در مقابل آب ته نشین شده حفاظت می گردد.

• غوطه وری در مذاب

در این روش که اغلب برای پوششهای با نقطه ذوب پایین نظیر Al, Pb, Sn, Zn بکار برده می شود، قطعه مورد نظر در محفظه فلز پوشش دهنده مذاب فرو برده می شود. مدت کوتاهی در آن نگه داشته می شود تا لایه نازکی روی آن ایجاد گردد. پیوند ایجاد شده در این روش پیوندی متالورژیکی است.

• رسوبات گازی (بخار فلز)

در این روش مذاب فلزات آنقدر حرارت داده می شود تا به بخار تبدیل شود. منبع حرارت برای تبخیر فلز جریان الکتریسیته است. قطعه مورد نظر در محفظه بسته ای که بخار در آن ایجاد شده قرار داده می شود تا بخار بصورت مولکولی روی سطح بنشیند و با آن پیوند ایجاد کند. به دلیل اینکه لایه پوشش دهنده در این حالت بصورت فوق العاده ریز (اتم یا مولکول) است پوشش خیلی خوبی ایجاد می شود. از این روش در صنایع هواپیما سازی و قطعات سفینه های فضایی استفاده می شود.

• نفوذ اتمی

برای نفوذ دادن اتمهای فلز پوشش دهنده به سطح فلز باید قطعه فلزی حرارت داده شود تا سطح آن کاملاً منبسط شود. عناصر پوشش دهنده بایستی به شکل اتمی درآیند تا در سطح نفوذ کنند. البته نفوذ هم بصورت گازی و هم جامد امکانپذیر است. نفوذ اتمی در سطح خاصیت ماده اصلی را تغییر می‌دهد. مثلاً برای پوشش دادن سطح قطعات فولادی که به دلیل افزایش دما خطر پوسته شدن دارند آلومینیوم به سطح نفوذ داده می‌شود. ممکن است آلومینیوم در این حالت با اکسیژن ترکیب شده و تبدیل به اکسید آلومینیوم شود که یک لایه مقاوم در برابر اکسید شدن می‌باشد که به این فرایند Alonizing گفته می‌شود. قطعات آلونیز شده در صنایع نفت، پتروشیمی و شیمیایی کاربرد فراوان دارند. متداولترین فلزات برای پوشش نفوذی عبارتند از: Zn, Ti, Ta, Mo, Si, B, Cr, Al

۱-۶-۶- بازدارنده‌ها

بازدارنده‌ها یا ممانعت کننده‌ها موادی هستند که وقتی به مقادیر کم به یک محیط خورنده اضافه شوند، سرعت خوردگی را کم می‌کنند. ممانعت کننده‌های بسیار زیادی با ترکیبات مختلف موجود می‌باشند. اکثر این مواد با آزمایشهای تجربی پیدا شده و اصلاح یافته‌اند و بسیاری از آنها با نامهای تجارتي عرضه می‌شوند و ترکیب شیمیایی آنها مخفی نگه داشته می‌شود [۲]. به همین دلیل فرآیند حفاظت به این روش بطور کامل مشخص و روشن نیست. اما بازدارنده‌ها را می‌توان برحسب مکانیزم و ترکیب طبقه‌بندی نمود.

• ممانعت کننده‌های جذبی

این مواد بزرگترین بازدارنده‌ها هستند. بطور کلی، این نوع بازدارنده‌ها ترکیبات آلی هستند که جذب سطح فلز شده و واکنشهای انحلال فلز و احیا را کند می‌نمایند. در اکثر موارد، بازدارنده‌های جذبی بر هر دو فرآیند آندی و کاتدی تاثیر می‌گذارند، هر چند که در بعضی موارد این تاثیر 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 اینگونه مواد در محلولهای اسیدی خیلی موثر هستند ولی در محیطهایی که واکنشهای کاتدی دیگری مثل احیای اکسیژن کنترل کننده است بی‌اثر می‌باشند.

• مواد حذف کننده عوامل مضر

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



واضح است که این نوع بازدارنده‌ها در محلولهایی که احیای اکسیژن کنترل کننده است خیلی خوب عمل خواهند کرد و در محلولهای اسیدی قوی موثر نخواهند بود.

• مواد اکسید کننده

موادی مثل کرومات، نیترات و نمکهای فریک 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 - غیر فعال از خود نشان می‌دهند، بکار برده می‌شوند مثل فولاد و آلیاژهای آن و فولاد زنگ‌نزن.

• بازدارنده‌های فاز بخار

این ترکیبات خیلی شبیه بازدارنده‌های جذبی بوده و دارای فشار بخار خیلی بالایی می‌باشند. در نتیجه، از این مواد می‌توان بدون تماس مستقیم برای جلوگیری از خوردگی اتمسفری فلزات استفاده نمود. در عمل این بازدارنده‌ها را نزدیک فلزی که بایستی محافظت شود قرار می‌دهند، در نتیجه تبخیر و میعان شدن آنها روی سطح فلز باعث حفاظت فلز می‌شود. بازدارنده‌های فاز بخار معمولاً موقعی موثر خواهند بود که در فضای بسته مثل داخل بسته‌بندی قطعات یا داخل ماشین‌آلات در مراحل انبار و حمل و نقل مورد استفاده قرار گیرند.

فصل دوم

مروری بر ادبیات موضوع

۲-۱ خوردگی در آب دریا

۲-۱-۱- مقدمه

یکی از مباحث مهم در زمینه علوم دریایی مساله خوردگی فلزات و آلیاژها در آب دریاها و روشهای مبارزه با آن می باشد. انتخاب و استفاده صحیح از فلزات و آلیاژها و روشهای حفاظت آنها در آب دریا مستلزم آگاهی بر رفتار خوردگی آنها در این محیط می باشد.

۲-۱-۲ ویژگیهای آب دریا

آب دریا یک محلول بیوشیمیایی پیچیده ای است که قسمت اعظم سطح کره زمین را پوشانیده است. به دلیل کلرینیت بالا، باعث خوردگی اکثر فلزات و آلیاژهای مهندسی می گردد. خوردگی آب دریا در نقاط مختلف کره زمین بسیار متغیر بوده و در مطالعات خوردگی فلزات در آب دریا این یکی از مسایلی است که هنوز علت آن کاملا مشخص نشده است. به همین دلیل مطالعه خوردگی فلزات در آب دریا بطور گسترده ای در نقاط مختلف دنیا انجام می شود.

اجزای شیمیایی عمده آب دریاها نظیر: سدیم، کلر، منیزیم و ... در سراسر کره زمین یکسان هستند، اما اجزای فرعی نظیر: اکسیژن، دی اکسید کربن، سولفید هیدروژن و ... از محلی به محل دیگر و نیز با تغییر فصل و یا سیکلهای جزر و مد تغییر می کند. علاوه بر اینها آب دریا حاوی مواد آلی و موجودات جاندار میکروسکوپی نیز می باشد [۱۱].

عوامل کنترل کننده سرعت خوردگی مواد ساختمانی و آلیاژها، اغلب اجزای شیمیایی فرعی آب دریا همراه با مواد آلی و موجودات جاندار می باشد. به خاطر این تغییرات به راحتی نمی توان آب دریا را برای آزمایشات خوردگی در آزمایشگاه به کار برد. آب دریایی که در خارج از دریا ذخیره شده باشد رفتار خوردگی متفاوتی از محیطی که از آن برداشته شده است، نشان می دهد. دلیل آن عمدتا به اجزای فرعی مربوط می شود.

تغییرات شیمیایی آب دریا در فاصله های بزرگ و در جهات افقی و عمودی اتفاق می افتند. از طرف دیگر در دوره های چند ساعت یا روز، و یا در فواصل چند سانتیمتر یا چند متر نیز تغییراتی رخ می دهد که در اثر ورود مواد آلوده کننده در نقاط مختلف، و یا چسبیدن موجودات دریایی به سطح ساختمانهای دریایی می باشد.

۲-۱-۳- عوامل موثر بر سرعت خوردگی

با توجه به مطالب ذکر شده، تغییر غلظت اجزای تشکیل دهنده آب دریا و همچنین عواملی از قبیل دما، تلاطم، موجودات جاندار و ... می تواند به شدت بر سرعت خوردگی فلزات و آلیاژها در این محیط تاثیر بگذارد. به این خاطر نحوه تغییرات این عوامل و تاثیر آنها بر خوردگی فلزات و آلیاژها به اختصار توضیح داده می شود.

• اکسیژن حل شده

مقدار اکسیژن حل شده تا حد زیادی تحت تاثیر تبادل هوا- دریا می باشد. از طرفی حلالیت اکسیژن در آب دریا با دما و میزان شوری نسبت عکس دارد، بطوریکه با افزایش دما و مواد محلول در آب دریا میزان حلالیت اکسیژن کم می شود.

معمولا در یک دمای ثابت دو عامل سبب می شود که آب دریا بطور قابل ملاحظه ای از اکسیژن فوق اشباع شود. اول فتوسنتز گیاهان میکروسکوپی دریایی که غلظت اکسیژن را تا ۲۰۰ درصد حد اشباع افزایش میدهد. دوم محبوس شدن حبابهای هوا در اثر موج و تلاطم که تا ۱۰ درصد فوق اشباع را سبب می شود.

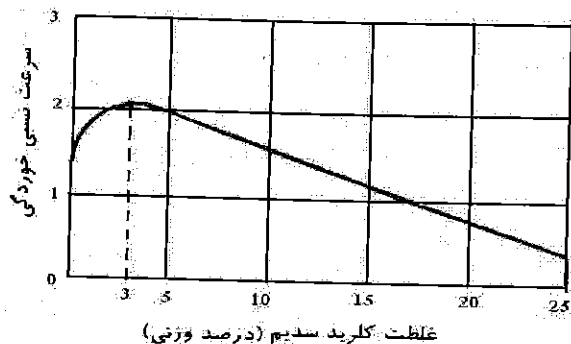
سرعت خوردگی فلزات فعال (مثل فولاد کربنی) در آب دریا، تابع مستقیم خطی از غلظت اکسیژن حل شده است. اثر اکسیژن بر خوردگی آلیاژهای مس بستگی به سرعت جریان آب دارد و در سرعتهای کم، تاثیر آن ناچیز است. در مورد فلزات فعال- غیر فعال نظیر آلومینیوم، تاثیر غلظت اکسیژن می تواند کاملا متغیر باشد. در بسیاری موارد غلظتهای بالای اکسیژن تمایل به تسریع در التیام لایه غیر فعال را دارد. بنابراین شروع خوردگی حفره ای را به تعویق می اندازد. از طرف دیگر تمایل به افزایش سرعت رشد حفره و شیار، بعد از تشکیل آنها دارد [۱۲].

• میزان شوری آب

نقش میزان شوری آب دریا در خوردگی فلزات از تاثیر آن بر هدایت الکتریکی آب و همینطور اثر آن بر تخریب پوسته های محافظ ناشی می شود. ضریب هدایت الکتریکی آب دریا با افزایش دما و کلرینیت، افزایش نسبتا شدیدی از خود نشان می دهد.

میزان شوری آب دریا در مناطقی با عمقها و زمانهای مختلف تغییر می کند. در شکل ۱-۲ تاثیر میزان شوری آب بر خوردگی آهن نشان داده شده است. حداکثر سرعت خوردگی در نزدیکی ۳،۵ درصد کلرید سدیم اتفاق می افتد که غلظت تقریبی نمک در آب دریاست. برای آلیاژهایی که تحت خوردگی یکنواخت

قرار می گیرند (در بیشتر موارد مثل فولاد ساده کربنی)، تغییرات سرعت خوردگی در اثر تغییرات شوری آب در مقایسه با تغییرات غلظت اکسیژن و دما کوچک است [۱۲].



شکل ۱-۲ نمودار سرعت نسبی خوردگی بر حسب مقدار غلظت NaCl

• دما

با ثابت بودن فاکتورهای دیگر، افزایش دما باعث افزایش خوردگی در آب دریا می شود. اگر غلظت اکسیژن حل شده در آب دریا ثابت نگه داشته شود، با افزایش دما به اندازه ۳۰ درجه سلسیوس، سرعت خوردگی فولاد کم کربن تقریباً دو برابر می شود. اما در عمل با کاهش دما میزان اکسیژن در حالت اشباع افزایش می یابد که اغلب اثر اکسیژن حل شده در سرعت خوردگی بیشتر از دما می باشد [۱۷].

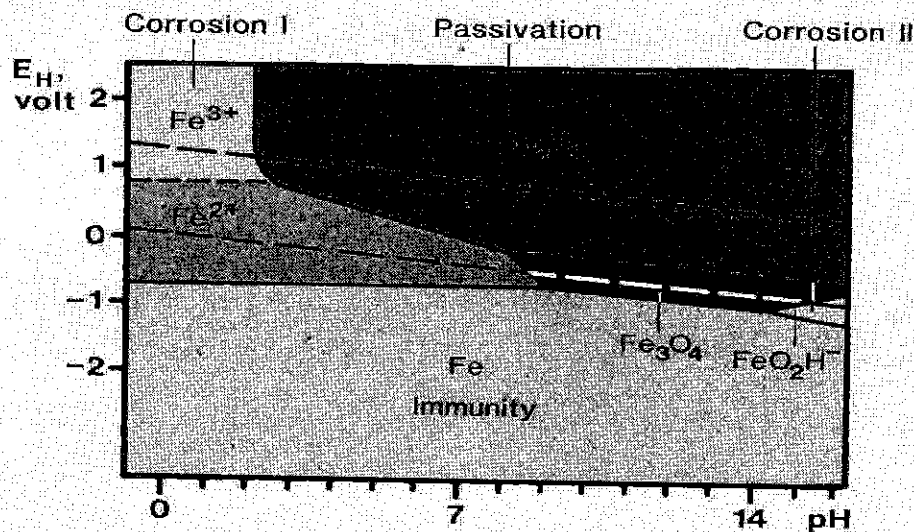
• pH

نمودار پتانسیل - pH شکل ۲-۲ برای سیستم Fe-H₂O یک نگاه کلی برای نحوه خوردگی فولاد و چدن در محیطهای مختلف را نشان می دهد [۱۶]. می توان مشاهده کرد که فلز در محیطهای آبی مصنوعی از خوردگی نیست. نواحی ثبات Fe₃O₄ و Fe₂O₃ امکان عدم مقاومت را در ارتباط با pH بالا (۸ الی ۱۱) نشان می دهد. به عبارت دیگر pH بالا یک ریسک برای خوردگی می باشد [۱۵]. در طی فرایندهای فتوسنتز و اکسیداسیون بیوشیمیایی، pH آب دریا بستگی به غلظتهای دی اکسید کربن و اکسیژن که با یکدیگر کوپل شده اند دارد. همچنین pH آب دریا با افزایش عمق آب کاهش می یابد. به علاوه آبهای سطحی دریاها نیز تغییراتی از خود نشان می دهند. معمولاً pH آب دریا بین ۷٫۵ تا ۸٫۶ تغییر می کند و تغییرات در این محدوده اغلب تاثیر مستقیمی بر خوردگی بسیاری از فلزات و آلیاژها ندارد [۱۲].

• مواد آلوده کننده

مواد آلوده کننده نظیر سولفیدها، فلزات سنگین و ... نیز می توانند سبب به هم خوردن توازن اجزای تشکیل دهنده آب دریا شده و در خوردگی آن تاثیر بگذارند. مثلاً آلوده کننده های حاوی مواد آلی سبب کاهش غلظت اکسیژن و افزایش دی اکسید کربن شده و pH آب را اسیدی تر می کند و موجب کاهش خوردگی آب دریا برای فولادهای کربنی و کم آلیاژی می شود. اما در مورد آلومینیوم می توانند سبب افزایش سرعت خوردگی شوند. سولفید هیدروژن نیز که ممکن است غلظت آن در آبهای آلوده به ۵۰ قسمت در

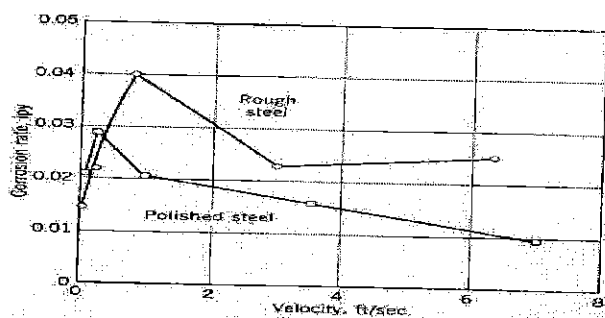
میلیون (۵۰ ppm) هم برسد، موجب افزایش سرعت خوردگی در فولاد کم کربن و آلیاژهای مس میشود [۱۲].



شکل ۲-۲ نمودار پتانسیل - pH برای Fe-H₂O در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

• سرعت جریان آب

در آبهای طبیعی، مقدار pH معمولاً خیلی بیشتر از آن است که هیدروژن بتواند نقش مهمی در فرآیند خوردگی ایفا کند. اما از طرف دیگر حرکت و جابجایی آب در لحظات شروع خوردگی نرخ خوردگی را از طریق رساندن اکسیژن بیشتر به سطح فلز افزایش می دهد. در جریانهایی که به حد کافی زیاد می باشند، ممکن است اکسیژن کافی به سطح فلز برسد که باعث روپین شدن^۱ جزیی آن شود. در این صورت آهنگ خوردگی پس از افزایش اولیه دوباره کاهش خواهد یافت (شکل ۲-۳).

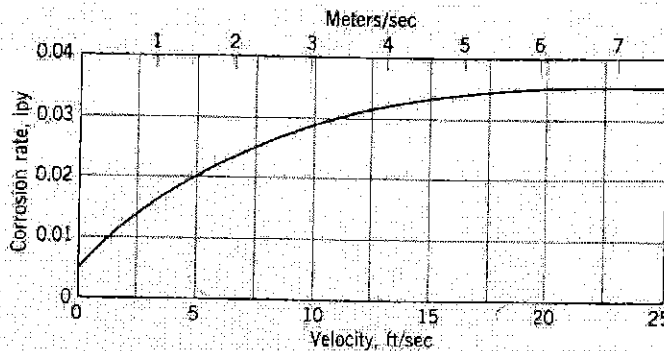


۲-۳ تاثیر سرعت جریان آب بر خوردگی لوله های از جنس فولاد کربنی آب کمربریج در ۲۱°C [۲۲]

1-passivity

با افزایش بیشتر سرعت آب، در اثر ساییدگی مکانیکی و نیز برداشته شدن لایه روپین ایجاد شده و محصولات خوردگی آهنگ خوردگی دوباره افزایش می یابد [۱۸].

در آب دریا که غلظت بالایی از یون کلر (Cl⁻) وجود دارد، روپین شدن در هیچ سرعتی اتفاق نمی افتد و نرخ خوردگی افزایش می یابد [۱۸].



۲-۴ تاثیر سرعت جریان آب بر خوردگی فولاد کربنی در دریا [۲۳]

• ترکیب فلز

اگرچه مقدار کربن موجود در فولاد تاثیری در نرخ خوردگی در آب شیرین ندارد، ولی اگر مقدار کربن از ۰٫۱ به ۰٫۸ درصد افزایش یابد نرخ خوردگی افزایش جزیبی (حداکثر ۲۰٪) در آب دریا خواهد داشت [۱۹].

مقدار ۵٪ کرم در فولاد C ۰٫۰۸٪، مقدار وزن کاسته شده را در آب کانال پاناما پس از یک سال استقرار کاهش داده است. اما پس از سپری شدن ۱۶ سال مقدار وزن کاسته شده ۲۲ الی ۴۵٪ بیشتر از فولادی با ۰٫۲۴٪ کربن بوده است [۲۰]. عمق حفره ها پس از یک سال در مقایسه با فولاد کربنی مذکور پس از ۱۶ سال غوطه وری کمتر بوده است. از اینرو برای شرایطی که استقرار طولانی در دریا مورد نظر باشد فولادهای با کرم کم (< ۰٫۵Ct) هیچ برتری نسبت به فولادهای کربنی ندارند.

مقدار ۵٪ نیکل در فولاد با ۰٫۱C در مقدار وزن کاسته شده ناشی از خوردگی در فولادهایی که در معرض آب دریا در کانال پاناما در طی ۱۶ سال قرار داده شده بودند، تغیر محسوسی نداشت [۲۰].

• باکتریها و موجودات زنده

اتصال موجودات زنده دریایی با سطح فلزات تاثیر قابل ملاحظه ای بر خوردگی آنها و کارایی تجهیزات دریایی دارد. پوسته های باکتری که در سطح فلز تشکیل می شوند عملیات شیمیایی فصل مشترک فلز- مایع را در جهت خوردگی بیشتر تغییر می دهند. پوسته های لجنی موضعی سبب تشکیل پیلهای غلظتی اکسیژن (با مواد دیگر) می شوند که می توانند سبب انواع مختلف خوردگی موضعی شوند. این پوسته های لجنی حتی

می‌توانند در سطح فلز شرایط بی‌هوای ایجاد کرده و موجب رشد باکتریهای احیا کننده سولفات شوند که سبب خوردگی شدید آهن می‌شوند [۱۲].

۲-۲- معرفی کلی دریاچه ارومیه

۲-۲-۱- مقدمه

دریاچه ارومیه در ۱۸ کیلومتری شرق ارومیه قرار داشته و یکی از بزرگترین آبگیرهای دائمی آسیای غربی و جزء اندک دریاچه‌هایی در جهان است که غلظت بسیار بالایی از نمک دارد (شکل ۱-۲). از اسامی دیگر آن ریما، چی‌چست، زیاتا، کبودان و شور را می‌توان نام برد.

مساحت متوسط این دریاچه حدود ۵۷۵۰ کیلومتر مربع می‌باشد. این وسعت با میزان بارش سالانه و مقدار آبی که وارد دریاچه می‌شود ارتباط مستقیم دارد. در ماههای اردیبهشت و خرداد با توجه به مقدار آبهای وارده به دریاچه بر اثر ذوب برفهای اطراف، دریاچه دارای حداکثر وسعت و در اواخر فصل تابستان تا اواخر پاییز دارای حداقل وسعت می‌باشد.

دریاچه ارومیه از نظر جغرافیایی بین ۳۷ و ۳۹ درجه عرض شمال جغرافیایی و ۴۵ و ۴۶ درجه عرض شرق جغرافیایی قرار گرفته است. ارتفاع از سطح آزاد دریاها ۱۲۸۰ متر می‌باشد. طول دریاچه از ۱۳۰ الی ۱۴۶ کیلومتر متغیر و عرض آن در پهن‌ترین قسمت که در جنوب شرقی دریاچه واقع شده است ۵۸ کیلومتر می‌باشد. کم‌عرض‌ترین نقطه آن ۱۵ کیلومتر است که بین کوه زنبیل و جزیره اسلامی قرار دارد و این مقدار در ماههای مختلف سال تغییر می‌کند. البته با ایجاد بزرگراه شهید کلانتری در این بخش از دریاچه، عرض دریاچه به حدود یک کیلومتر تقلیل یافته است.

در طی سالهای ۱۳۷۶ الی ۱۳۸۰ دریاچه با یک بحران اکولوژیکی بی‌سابقه‌ای مواجه بوده و به علت کاهش بارش برف و باران و گرمتر شدن هوا از یک طرف و از طرف دیگر احداث سد های مخزنی بر روی رودخانه‌ها باعث گردیده تا از آب دریاچه به مقدار بسیار زیادی کاسته شود. بطوریکه از میانگین عمق آب تا حدود ۳ متر کاسته شده و عقب‌نشینی‌های ساحلی بین یک متر الی ده کیلومتر در نقاط مختلف دریاچه دیده شده است. لذا کلیه آمار و ارقام مربوط به دریاچه در حد قابل توجه تغییر یافته است [۶].

۲-۲-۲- حوضه آبریز دریاچه ارومیه

مساحت کلی حوضه آبریز دریاچه ارومیه ۵۱۴۴۰ کیلومتر مربع می‌باشد که از حد شمالی بوسیله رود ارس، حد شرقی کوههای سهند و سبلان، حد جنوب شرقی رود قرل اوزن، حد جنوبی کوههای کردستان و حد غربی کوههای مرزی ایران و ترکیه احاطه شده است.

حدود پانزده رودخانه دائمی که در اغلب فصل سال جریان دارند و نیز هفت رودخانه فصلی دریاچه ارومیه را مشروب می‌سازند.

رودخانه‌های دائمی عبارتند از:

زربنه رود، سیمینه رود، مهاباد چای، گذار چای، بار اندور چای، شهر چای، روضه چای، نازلو چای، آجی چای، آذر چای، قلعه چای، صوفی چای، مردوق چای، لیلان چای.

رودخانه‌های فصلی عبارتند از:

شیخ چای، شیدان چای، خرخره چای، تیوان چای، طسوج چای، دریان چای، گبی چای [۶].

۲-۲-۳- خواص فیزیکی و شیمیایی آب دریاچه ارومیه

دمای آب دریاچه در فصول مختلف سال متغیر بوده و در فصل زمستان بین صفر تا ۲۰ درجه سلسیوس بالای صفر در نوسان می‌باشد. رنگ آب دریاچه نزدیک ساحل که در تماس با لجن است تیره می‌باشد ولی در ارلن بی‌رنگ دیده می‌شود. مزه آب دریاچه شور و تلخ بوده و شوری آن در نقاط مختلف به دلیل رودهای مختلفی که به آن می‌ریزند متغیر است. در بهار آب دریاچه از نظر غلظت ناهمگن بوده و به سه منطقه شمالی، جنوب غربی، مرکزی و جنوب شرقی تقسیم‌بندی می‌شود. در پاییز آب دریاچه از نظر غلظت در سطح و عمق روی هم رفته همگن است. دریاچه ارومیه از نظر شوری پس از بحرالحمیت شورترین دریاچه جهان محسوب می‌شود.

آنالیز آب دریاچه ارومیه در چند ماه مختلف از سال در جدولهای ۱-۲ و ۲-۲ آورده شده است [۷]. مطابق جدولهای مزبور آنیونهای عمده دریاچه شامل کلرید، سولفات، بی‌کربنات و برومید بوده و کاتیونهای عمده آن سدیم، منیزیم، کلسیم و پتاسیم می‌باشند. مقام اول آنیونها متعلق به کلرورها و مقام دوم متعلق به سولفاتهاست. از کاتیونها سدیم در درجه اول و منیزیم در درجه دوم قرار دارد. تلخی آب دریاچه مربوط به وجود یون منیزیم در آن می‌باشد.

جدول ۱-۲ آنالیز آب دریاچه ارومیه در خرداد ماه از مکانهای مختلف دریاچه

	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۶
Mg(g/L)	9.18	8.67	9.15	9.25	9.15	9.45±0.18
Ca(mg/L)	504	460	476	460	464	521±16
Na(g/L)	116±0.4	118	117	115	114	115
K(g/L)	2.37	2.24	2.30±0.18	2.32	2.32	2.32
Fe(μg/L)	<7	<7	<7	<7	<7	<7
Cu(μg/L)	9	9	9	8±0.6	9	8
Ba(mg/L)	<1	<1	<1	<1	<1	<1
SiO ₂ (mg/L)	0.75	0.85±0.09	1.02	0.88	1.20	3.92
Cl ⁻ (g/L)	207	197	199	204	202	198±3.00
SO ₄ ²⁻ (g/L)	21.38	21.30	21.94	19.20	21.38	21.86±0.2
Cl ₂ (mg/L)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
HCO ₃ ⁻ (mgCaCO ₃ /L)	3762	594	3366	4158	3366	3069±99
CO ₃ ²⁻	-	-	-	-	-	-
pH	7.87	7.92	7.87	7.88±0.01	7.87	7.80
Density(g/mL)	1.222	1.217	1.219	1.217	1.213	1.218
Viscosity	2.391	2.345	2.365	2.361	2.357	2.346
Dissolved oxygen(mg/L)	0.73	0.85	0.49	0.49	0.36	0.91
Total solid content(g/L)	345	339	348	342	345	341
Total suspended solid (g/L)	3	2	10	4	6	4
Total dissolved solid(g/L)	342	337	338	338	339	337
Primary salinity(g/Kg)	305.8	292.2	294.7	302.6	300.6	293.4
Alkalinity (mg CaCO ₃ /L)	346	342	345±2	343	347	355

جدول ۲-۲ آنالیز آب دریاچه ارومیه در اسفند ماه از مکانهای مختلف دریاچه

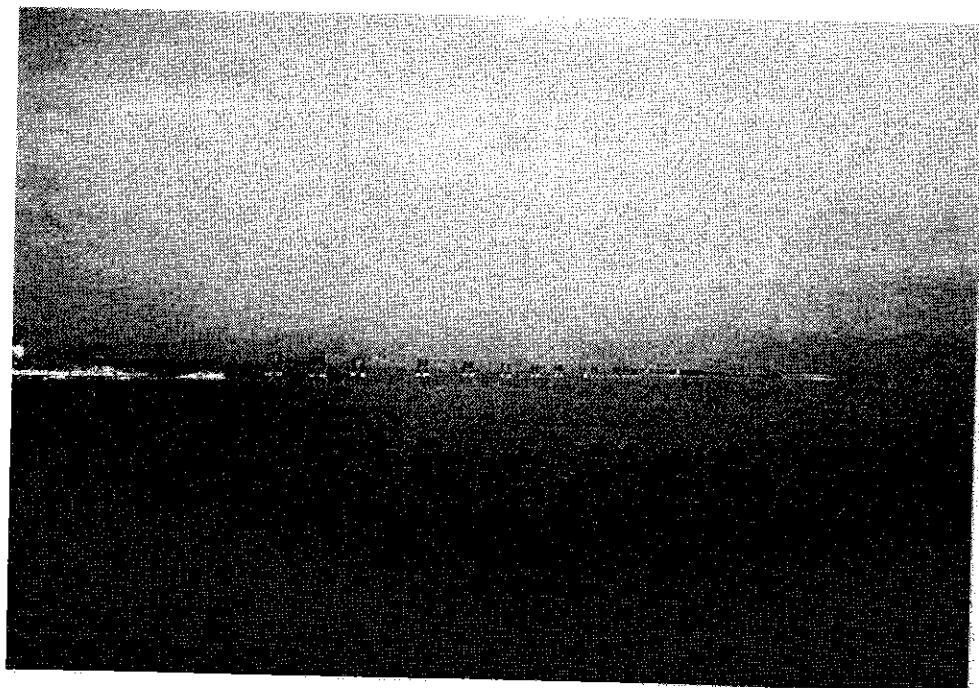
	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۶
Mg(g/L)	7.840	7.305	7.120± 0.025	7.415	7.184	7.220
Ca(mg/L)	460.92	380.76	447.56±12	440.88	420.84	440.88
Na(g/L)	100.56	95.00	96.59	93.58±0.4	92.88	97.91
K(g/L)	1.77±0.01	1.64	1.67	1.69	1.66	1.66
Fe(μg/L)	<7	<7	<7	<7	<7	<7
Cu(μg/L)	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Ba(mg/L)	<1	<1	<1	<1	<1	<1
SiO ₂ (mg/L)	3.92	3.71±0.06	3.80	3.80	3.72	3.68
Cl ⁻ (g/L)	223±2	192	205	227	166	223
SO ₄ ²⁻ (g/L)	21.5	17.5	18.5±0.5	21.1	17.2	18.7
Cl ₂ (mg/L)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
HCO ₃ ⁻ (mgCaCO ₃ /L)	1200	1200	1066±55	1100	1000	1000
CO ₃ ²⁻	-	-	-	-	-	-
pH	7.98	8.07±0.02	8.07	8.06	8.06	8.07
Density(g/mL)	1.198	1.181	1.183	1.187	1.188	1.179
Viscosity	1.759	1.688	1.714	1.748	1.712± 0.006	1.726
Dissolved oxygen(mg/L)	0.352	0.368	0.824	0.344	0.344	0.320± 0.04
Total solid content(g/L)	355	315	323	318	322	308
Total suspended solid (g/L)	10	9	8	5	4	7
Total dissolved solid(g/L)	325	306	315	313	318	301
Primary salinity(g/Kg)	336.32± 3	293.78	313.12	345.52	252.54	341.73
Alkalinity (mg CaCO ₃ /L)	301	297±1.7	293	301	292	293

۲-۲-۴- شرایط زیست محیطی دریاچه ارومیه

از لحاظ محیط زیست، دریاچه ارومیه دارای یکی از ظریف‌ترین و حساس‌ترین اکوسیستم‌ها می‌باشد. موجودات زنده آب دریاچه شامل جلبکها، باکتری‌ها و نوعی سخت پوست به نام آرتمیآ ارومیانا است که در طول چند ماه از سال در توده‌های بسیار انبوه قابل مشاهده می‌باشد. در بررسی‌های انجام گرفته از میان باکتری‌ها به وجود سه باکتری به نامهای کلتیدیوم پرفرینجنس، استرپتوکوکوس فکالیس و ویبریو و از میان جلبکها به وجود شش جلبک سبز آبی، چهار جلبک سبز و دو جلبک طلایی اشاره شده است.

محیط آرام و ایده‌آل این دریاچه به همراه با ویژگی‌های خاص زیست محیطی، نه تنها تجمع و مهاجرت تعداد زیادی از پرندگان بومی و مهاجر (گونه‌های مختلف از پرندگان بویژه پلیکان و فلامینگو) را به منطقه سبب شده، بلکه به دلیل داشتن شرایط اقلیمی و طبیعی مطلوب، آن را به محل زاد و ولد و زمستان‌گذرانی این پرندگان تبدیل کرده است.

دریاچه ارومیه دارای ۱۰۲ جزیره و صخره‌های سنگی می‌باشد که غیر از جزیره اسلامی (شاهی سابق) بقیه جزایر غیر مسکونی می‌باشند. تعدادی از این جزایر از قبیل جزیره کبودان (قویون داغی)، جزیره اسپیر، جزیره اشک داغی، جزیره آرزو و جزیره دو قوزلار به لحاظ داشتن شرایط زیستی مناسب همراه با جاذبه‌های طبیعی، از تنوع حیات گیاهی و جانوری (قوچ، میش و گوزن زرد) بسیار با ارزشی برخوردار هستند. از بنادر این دریاچه می‌توان از بنادر شرفخانه، گلخانه، رحمانلو و دانالو نام برد [۶].



شکل ۲-۵- نمایی از محل احداث پل میانگذر دریاچه ارومیه

۳-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

۳-۲-۱- مقدمه

با توجه به اهمیت دریاچه ارومیه در منطقه، بررسی و تحقیقات بسیار کمی بر تاثیر آب دریاچه روی خوردگی قطعات فلزی مورد استفاده در آن صورت گرفته است. بررسی خوردگی کشتی‌ها (پروانه کشتی، ورق زیرین و ...)، تاسیسات موجود در دریاچه، ستونهای پل در حال احداث، بتن مسلح بکار رفته در پل و موارد دیگر ضروری به نظر می‌رسد. همچنین پدیده‌های نادری نظیر پدیده بلوری شدن در آب دریاچه ارومیه در بعضی از فصول سال که در آبهای دریاها و دریاچه‌های دیگر جهان بسیار کم قابل مشاهده است، قابل مطالعه می‌باشد.

در این قسمت به دو مورد مطالعه خوردگی که بر روی فولادهای St37, St70 و فولاد ستونهای پل تخریب شده انجام گرفته است، اشاره شده است.

۳-۲-۲- بررسی خوردگی آب دریاچه ارومیه روی فولادهای St37, St70 [۸]

در این آزمایش نمونه‌های فلزی تهیه شده به ابعاد ۱۲/۷ در ۵۰/۸ در ۰/۸ میلیمتر از یک انتها به یک میله مسی لحیم شده‌اند. دستگاه بکار رفته برای بررسی خوردگی دستگاه آرم فیلد بوده که هشت بشر یک لیتری داشته و در هر سل در حدود یک ثانیه به میزان ۳۰۰ سانتیمتر مکعب در دقیقه هوادهی شده‌اند. آزمایشها در دو محلول یکی آب دریاچه ارومیه و دیگری آب دریای استاندارد بوده است. حداکثر زمان آزمایش ۳۷ شبانه روز بوده است. سرعت خوردگی بعد از گذشت این مدت در آب دریاچه ارومیه برای فولاد St37 حدود $10,6 \text{ mdd}$ (میلیگرم بر دسیمتر مربع بر روز) و برای فولاد St70، $11,51 \text{ mdd}$ محاسبه شده است. در آب دریای استاندارد سرعت خوردگی در فولاد St37، $23,18 \text{ mdd}$ گزارش شده است.

۳-۳-۲- بررسی خوردگی آب دریاچه ارومیه روی ستونهای فولادی پل تخریب

شده [۷]

در این آزمایش چهار نمونه تهیه شده، هر کدام درون یک بشر مجزا در آزمایشگاه در حالت‌های غوطه‌وری، تر و خشک، اتمسفری و آب و گل قرار داده شده‌اند. حداکثر زمان آزمایش ۱۰۰۰ ساعت بوده که بعد از سپری شدن این مدت سرعت خوردگی در حالت غوطه‌وری $5,7 \text{ mpy}$ ؛ (مایل در سال)، تر و خشک $1,2 \text{ mpy}$ و آب و گل $0,6 \text{ mpy}$ گزارش شده است.

فصل سوم

آزمایشهای خوردگی

۳-۱- مقدمه

آزمایشات خوردگی و کاربرد نتایج آنها، یکی از مهمترین جنبه‌های مهندسی خوردگی است. هر ساله هزاران آزمایش خوردگی انجام می‌گیرد که ارزش و اعتبار اطلاعات به دست آمده از آنها به جزئیات بستگی دارد. اکثر آزمایشات دارای هدفهای معینی هستند. در بعضی موارد نتایج دقیق و معینی مورد نظر است و گاهی فقط مقایسه‌های کیفی لازم است. در هر حال، ارزش و اعتبار هر آزمایش به هدف و برنامه‌ریزی آن بستگی دارد. آزمایشاتی که به خوبی برنامه‌ریزی شده و همچنین به خوبی انجام می‌شوند، دارای اعتبار بوده و نتایج حاصل از آن قابل تکرار می‌باشند [۲].

متداولترین روش برای سنجش و ارزیابی میزان خوردگی یک سیستم، آزمایشهای آهنگ خوردگی یا سرعت خوردگی می‌باشد.

سرعت خوردگی میزان خورده شدن یک فلز را در یک محلول نسبت به زمان بیان می‌کند.

۳-۲- روشهای سنجش آهنگ خوردگی

متداولترین روشهای سنجش آهنگ خوردگی عبارتند از:

- روش کاهش وزن^۱
- روش الکتروشیمیایی^۲

۳-۲-۱- روش کاهش وزن

ساده‌ترین و متداولترین متد اندازه‌گیری سرعت خوردگی متد کاهش وزن می‌باشد. در این روش ابتدا نمونه‌هایی به ابعاد مناسب تهیه می‌شوند. پس از آماده سازی سطح، جرم سنجی شده و در معرض محیط خورنده قرار می‌گیرند. بعد از گذشت مدت زمان معین نمونه‌ها از محیط خورنده بیرون آورده شده و پس از

1 - Weight Loss Method

2 - Electrochemical Method

تمیز کردن سطح از محصولات خوردگی دوباره جرم سنجی می‌شوند. سرعت خوردگی با توجه به مقدار فلز خورده شده (جرم کم شده) و مساحت سطح در تماس با محیط خورنده محاسبه می‌شود.

۳-۲-۱-۱- طبقه‌بندی کلی آزمایش‌ها

آزمایشهای خوردگی به چهار گروه تقسیم می‌شوند:

• مطالعات آزمایشگاهی شامل آزمایشها برای رد یا قبول مواد.

در مطالعات آزمایشگاهی عموماً اندازه نمونه‌ها کوچک بوده، حجم کوچکی از محلول مورد استفاده قرار می‌گیرد و نیز سعی می‌شود آزمایش در شرایطی که حتی الامکان مشابه شرایط واقعی کاربرد فلز باشد انجام شود.

مهمترین امتیاز روشهای آزمایشگاهی، حذف سریع موادی است که در آزمایش رد می‌شوند. به این ترتیب به سرعت می‌توان موادی را که ارزش مطالعه و بررسی بیشتری دارند پیدا نمود.

گاهی اوقات فقط براساس مطالعات آزمایشگاهی سازه‌ها ساخته می‌شوند که این امر ناکافی بوده و نتایج ممکن است با نتایج آزمایشگاهی مطابقت نداشته و غیر منتظره باشد.

• آزمایشهای پایلوت پلانت^۱

آزمایشهای پایلوت پلانت، آزمایشهایی هستند که در شرایط واقعی در مقیاس کوچکتر انجام می‌شوند و معمولاً بهترین و مطلوبترین نوع می‌باشند. در این روش، شرایط واقعی کار در مقیاس بزرگ، بوسیله یک مقیاس کوچکتر تکرار می‌گردد. مواد، غلظتها، دماها، سرعتها و نسبت حجم مایعات به سطح فلز مشابه حالت واقعی انتخاب می‌شوند. زمان آزمایشها را زیاد در نظر می‌گیرند تا نتایج معتبرتر باشد. در این روش می‌توان نمونه‌های مختلف را مورد آزمایش قرار داد. همچنین وسایل و تجهیزات مختلف را از نظر خوردگی مطالعه نمود. یک عیب این روش این است که برای به دست آوردن مناسبترین شرایط کار، ممکن است لازم شود که متغیرهای سیستم را بطور وسیعی تغییر داد، بنابراین بایستی تغییرات سیستم را به دقت ثبت نمود.

• آزمایشهایی در شرایط واقعی کار

آزمایش در شرایط واقعی در یک سیستمی که در حال فعالیت است انجام می‌شود. در اینجا هدف ارزیابی مواد بهتر یا اقتصادی‌تر و یا مطالعه رفتار خوردگی مواد مورد استفاده می‌باشد.

• آزمایشهای عملی^۲

موارد ۳ و ۴ را می‌توان در یکدیگر ادغام نمود. لیکن به منظور پرهیز از اشتباه، از نظر واژه بین این دو اختلاف قایل می‌شویم. در شماره ۳، آزمایشها در یک کاربرد معین یا یک سیستم مورد نظر صورت می‌گیرد،

1- Pilot Plant

2 - Field Tests

در صورتیکه در آزمایشهای عملی، انجام آزمایشهای مواد مختلف در شرایط واقعی برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر می‌باشد.

مثلاً قرار دادن نمونه‌هایی از آلیاژهای مختلف در معرض اتمسفر در یک یا چند نقطه جغرافیایی، به منظور مطالعه مقاومت خوردگی اتمسفری، و آزمایشهایی از این قبیل در خاکها یا آب دریا، از این نوع می‌باشد.

۳-۲-۱-۲- اهداف آزمایشها

توجیه اصلی آزمایشهای خوردگی می‌تواند بصورت زیر باشد:

- ارزیابی یا انتخاب مواد برای کار در یک محیط معین و یا یک کاربرد خاص. از قبیل یک سیستم جدید یا فرآیندی که اطلاعات قبلی درباره آن وجود ندارد. آزمایشها می‌تواند مشتمل بر یک واحد قدیمی یا فرآیندی باشد که با مواد ساختمانی مقاومتر، مطمئن‌تر، آسانتر یا ارزانتر و نیز موادی با محصولات خوردگی کمتر جایگزین می‌شود و یا توسعه می‌یابد.
- ارزیابی فلزات و آلیاژهای جدید و قدیمی به منظور تعیین محیطهای مناسب برای آنها. این آزمایشها بیشتر بوسیله تولیدکنندگان یا فروشندگان این مواد انجام می‌شود. اطلاعات به دست آمده برای انتخاب مواد برای آزمایش در یک محیط مورد نظر مفید هستند. نتایج آزمایشها روی مواد دیگری که در این محیط مورد استفاده صنعتی دارند برای مقایسه مفید خواهند بود.

- کنترل مقاومت به خوردگی مواد با خوردگی محیط. آزمایشهای مذکور روش متداول ارزیابی کیفیت مواد هستند. مثال در این زمینه آزمایش نمک پاشی^۱ است. در این آزمایش نمونه‌ها در یک جعبه یا محفظه‌ای در معرض پاشش آب دریا یا آب نمکدار قرار می‌گیرند. این نوع آزمایشها را ممکن است بتوان بطور مستقیم به کاربرد مورد نظر مرتبط کرد. ولی گاهی در مشخصات فنی ذکر می‌گردد. در بعضی موارد برای تعیین تغییرات در خوردگی محیط در اثر تغییر دما، مواد خام، تغییر در غلظت محلولها، یا تغییرات دیگری که بوسیله پرسنل بهره برداری از نظر خوردگی کم اهمیت تلقی می‌شوند، انجام آزمایشها در فواصل زمانی معین لازم می‌باشد.
- مطالعه مکانیزم‌های خوردگی با مقاصد تحقیقاتی و توسعه دیگر. این آزمایشها معمولاً مشتمل بر روشهای خاص، اندازه‌گیری دقیق و کنترل خیلی دقیق می‌باشد.

۳-۲-۱-۳- مواد و نمونه‌ها

اولین مرحله در آزمایشهای خوردگی، مربوط به نمونه‌های آزمایش می‌باشد. این مرحله مهمی است و اساس و پایه کار تلقی می‌شود. اگر درباره فلز مورد نظر، اطلاعات کامل در دسترس نباشد، نتایج حاصل ممکن است در عمل بدون استفاده باشند. بنابراین ترکیب شیمیایی، تاریخچه تولیدی، تاریخچه عملیات

حرارتی لازم می‌باشد. در عمل مقدار کافی از آلیاژی که مورد نظر است تهیه شده و نمونه‌هایی از آن تهیه می‌شود. آلیاژ و نمونه‌ها را بوسیله شماره مشخص می‌کنند. شماره‌گذاری نمونه‌ها اغلب بوسیله سنبه انجام می‌گیرد.

اگر آلیاژ ترد باشد می‌توان بوسیله شیاری روی لبه‌های نمونه‌ها آنها را مشخص نمود. شماره‌گذاری بایستی به گونه‌ای باشد که در مراحل آزمایش از بین نرود.

فلزات و آلیاژهای تولید شده به روشهای نورد یا ریخته‌گری یا هر دو حالت می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. اگر در کاربرد آتی جوشکاری مطرح باشد، بایستی نمونه‌های حاوی جوش آزمایش شوند.

اندازه و شکل نمونه‌ها متفاوت بوده و موقع انتخاب، سهولت کار در نظر گرفته می‌شود. نمونه‌ها می‌توانند بصورت مربع، مستطیل و دیسک استوانه‌ای باشند. به دلیل سهولت کارکردن و آماده سازی سطح، نمونه‌های تخت ارجح‌تر می‌باشند.

در مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌های با ابعاد کوچک مثلاً نمونه‌هایی به ضخامت ۲ میلیمتر و ابعاد ۲۵ در ۵۰ میلیمتر متداول هستند. نمونه‌هایی که در مطالعات عملی بکار می‌روند معمولاً بزرگ هستند ولی از اندازه‌های کوچک نیز می‌توان استفاده کرد. چون در تجهیزاتی که از ورقهای نوردی ساخته می‌شوند، سطح نورد شده در معرض محیط خورنده قرار می‌گیرد، لذا در نمونه‌های نورد نسبت سطح نورد به سطح لبه‌ها بایستی بالا باشد. این یک دلیل کاربرد نمونه‌های نازک می‌باشد. آزمایشها نشان داده‌اند که لبه‌های برش داده شده فلز، دو برابر سریعتر از سطوح نوردی خورده می‌شوند. در نتیجه چنانچه نمونه‌هایی دیسکی شکل از یک میله نوردی تهیه گردد، ممکن است نتایج گمراه کننده‌ای به دست آید. در این حالت نسبت سطح نورد به سطح برشکاری شده پایین است. همچنین نمونه‌های کوچک را دقیق‌تر می‌توان جرم سنجی کرد و ابعاد آنها را اندازه‌گیری نمود. بویژه در آزمایشهای کوتاه مدت یا موقعی که سرعت خوردگی پایین است.

۳-۲-۱-۴- آماده سازی سطوح

در حالت ایده‌آل سطح نمونه‌های آزمایش بایستی مشابه سطح تجهیزات مورد استفاده باشد. ولی این حالت معمولاً به ندرت امکان‌پذیر است، زیرا وضعیت سطح فلزات و آلیاژهای تجارتي با توجه به نحوه ساخت و تولید، متفاوت است. مقدار پوسته‌های سطحی یا اکسیدها و نیز آلودگی‌های سطحی نیز متفاوت می‌باشند. به همین دلیل و نیز به دلیل اینکه مقاومت خوردگی خود فلز یا آلیاژ اهمیت دارد، معمولاً سطح فلز را قبل از آزمایش کاملاً تمیز می‌کنند. برای سهولت مقایسه نتایج آزمایشهای مختلف یک شرایط سطح استاندارد لازم و ضروری می‌باشد.

۳-۲-۱-۵- اندازه‌گیری و توزین

بعد از آماده سازی سطح، ابعاد و جرم نمونه‌ها را بایستی به دقت اندازه‌گیری کرد. چون مقدار سطح نمونه‌ها و مقدار کاهش جرم در محاسبه سرعت خوردگی وارد می‌شود، بنابراین دقت آزمایش بستگی به دقت اندازه‌گیری دارد. بعد از توزین، نمونه‌ها را بایستی فوراً در محیط خورنده قرار دارد و یا در دیسکاتور نگهداری نمود. بویژه اگر فلز در برابر اتمسفر مقاوم نباشد. از دست زدن مستقیم به نمونه‌ها نیز بایستی پرهیز نمود.

۳-۲-۱-۶- روشهای قرار دادن نمونه‌ها در معرض محیط خورنده

برای قرار دادن نمونه‌ها در معرض محیط خورنده در آزمایشگاه یا در محیط اصلی روشهای مختلفی بکار برده می‌شود.

مهمترین نکات در این زمینه عبارتند از:

- محیط خورنده بایستی با نمونه‌ها در تماس باشد.
- گیره‌هایی که برای نگهداری نمونه‌ها در محیط خورنده به کار می‌روند، موقع آزمایش بایستی از بین بروند.
- با عایق کردن یا ایزوله کردن از تماس نمونه‌ها با فلزات دیگر جلوگیری گردد، مگر آنکه مطالعه اثرات گالوانیکی مورد نظر باشد.
- برحسب اینکه نمونه‌ها در چه شرایطی بایستی آزمایش شوند، مثلاً غوطه‌ور شدن کامل، حالت تر و خشک، یا قرار گرفتن در فاز بخار، آنها را بایستی بطور صحیح در شرایط مورد نیاز قرار داد.
- در آزمایشها در شرایط عملی، نمونه‌ها بایستی تا حد امکان به سهولت قابل دسترسی باشند.

۳-۲-۱-۷- زمان آزمایش

انتخاب صحیح زمان و تعداد دفعاتی که نمونه‌ها بایستی در معرض محیط خورنده قرار گیرند، مهم بوده و چنانچه این فاکتورها در نظر گرفته نشوند، ممکن است نتایج گمراه کننده‌ای حاصل شود. نمونه‌ها را حداقل دوبار بایستی آزمایش نمود. به این ترتیب نحوه تغییرات سرعت خوردگی با زمان بدست آمده و همچنین خطای اندازه‌گیری احتمالی نیز معلوم خواهد شد. سرعت خوردگی با زمان افزایش یا کاهش یافته و یا ثابت می‌ماند. اغلب سرعت خوردگی اولیه بالا است و سپس کاهش می‌یابد.

۳-۲-۱-۸- تمیز کردن نمونه‌ها بعد از آزمایش

تمیز کردن نمونه‌ها بعد از آزمایش، یکی از مهمترین مراحل در آزمایشهای خوردگی است. برای محاسبه سرعت خوردگی تغییر جرم نمونه‌ها بکار می‌رود. بنابراین تمیز کردن کامل یا ناقص محصولات خوردگی بطور مستقیم بر نتیجه کار تاثیر می‌گذارد. در این زمینه بایستی از دستورالعملهای مناسب استفاده شود. در

اکثر موارد مشاهده نمونه‌های خورده شده، اطلاعات با ارزشی درباره علل یا مکانیزم خوردگی به دست می‌دهد. مثلاً رسوبات سطحی یا پوسته شدن ممکن است علت حفره دار شدن فلز باشند.

۳-۲-۲- روش الکتروشیمیایی

۳-۲-۲-۱- مقدمه

یکی از مهمترین مسایل مورد بحث در بررسی‌های الکتروشیمیایی یافتن ارتباط بین فرایند خوردگی و پدیده الکتروشیمیایی است. کنش واکنشهای الکتروشیمیایی یک فلز در یک محلول الکترولیت از واکنشهای کاتدی و آندی تشکیل شده است که به جریان الکترونها در فلز و جریان یونها در محلول الکترولیت ایجاد می‌شود. اگر این دو واکنش انجام شده از لحاظ زمانی و مکانی بطور یکسان (همگن) روی سطح تقسیم شده باشند در این صورت از یک الکتروود فعال همگن صحبت می‌شود که فرایند حاصل خوردگی یکنواخت خواهد بود. اما اگر دو قسمت آندی و کاتدی از لحاظ مکانی از همدیگر جدا باشند از الکتروودهای فعال ناهمگن اسم برده می‌شود. انواع مختلف پدیده‌های خوردگی از قبیل خوردگی حفره‌ای، شیاری، تنشی نتیجه ایجاد الکتروودهای فعال ناهمگن هستند.

اساس الکتروود فعال فقط در مورد فرآیندهای خوردگی طبیعی صدق می‌کند. اما اگر تحریکی از طریق اعمال جریان الکتریکی به الکتروود انجام گیرد در این صورت ممکن است قسمتی از فعالیت الکتروود مثلاً کاتودیک حذف شود. اما با وجود این پدیده خوردگی اتفاق بیافتد. در این حالت واکنش کاتودیک در الکتروودی که اتفاق خواهد افتاد در اصطلاح الکتروود مقابل نامیده شده است که از طریق محلول الکترولیت و نیز با اتصال الکتریکی با نمونه که در اصطلاح الکتروود کار خوانده شده متصل است.

۳-۲-۲-۲- پتانسیل الکتروشیمیایی

پتانسیل الکتروشیمیایی مجموع کار شیمیایی و الکتریکی انجام شده در حرکت بار الکتریکی است. بنابراین مقیاسی است برای قابلیت یونیزه شدن یک فلز در یک محلول مشخص الکترولیتی. در تماس یک فلز با یک محلول الکترولیت در لایه مرزی فلز - الکترولیت یک وضعیت تعادل بین یونهای فلزی در سطح فلز و الکترونها در داخل فلز اتفاق می‌افتد. برای پایداری این وضعیت تعادل بایستی یک اختلاف پتانسیل الکتریکی بین محلول الکترولیت و فلز در ناحیه لایه مرزی وجود داشته باشد که پتانسیل الکتروشیمیایی فلز در مشخص مذکور نامیده می‌شود. این پتانسیل الکتروشیمیایی با کمک الکتروودهای مرجع در محلول الکترولیت قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

۳-۲-۲-۳- اندازه‌گیری پتانسیل

روشهای اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی طبق DIN 50918 نرم بندی شده است. در این روشها اختلاف پتانسیل بین الکتروود کار در حال خوردگی و یک الکتروود مرجع توسط یک ولت متر اهم بالا مشخص

می‌شود. در الکترودهای فعال همگن کافی است که یک الکتروود مرجع در محلول الکتروولیت قرار گیرد اما در الکترودهای فعال غیر همگن یک کاپیلار (لوله آزمایش) باریک پر شده از محلول الکتروولیت (Haber - Luggin) در تماس با سطح فلز قرار می‌گیرد. کاپیلار خود به یک ظرف پر شده با محلول الکتروولیت متصل است که الکتروود مرجع در ظرف مزبور قرار می‌گیرد. توسط چنین سیستمی پتانسیل می‌تواند به صورت موضعی روی نمونه اندازه‌گیری شود. استاندارد برای الکترودهای مرجع، الکتروود استاندارد هیدروژن است، ولی به دلیل حساسیت بالای این الکتروود در مقابل آلودگی و نیز مشکل ایجاد الکتروود استاندارد برای انجام آزمایش در عمل از الکترودهای فلز و یون فلز (نیم سلول) استفاده می‌شود [۲۱].

با توجه به جدول ۱-۱ که پتانسیل‌های مرجع الکترودهای معمول در آزمایشگاه (E_0) در مقابل الکتروود استاندارد هیدروژن (E_H) نشان داده شده است، بطور معمول رابطه بین پتانسیل الکتروود و الکتروود استاندارد هیدروژن طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_H = E_{\text{نمونه}} + E_{\text{مرجع}} \quad (3-1)$$

یکی از مهمترین نتایج اندازه‌گیری عبارت است از تعیین پتانسیل سکون خوردگی طبق سیستم بین فلز و محیط. پتانسیل سکون بطور عمومی عبارت است از پتانسیل قطعه‌ای که تحت هیچگونه بار الکتریکی خارجی قرار نگرفته است. پتانسیل خوردگی عبارت است از پتانسیل یک نمونه در حال خوردگی. از جمله دیگر نتایج اندازه‌گیری می‌توان از موارد زیر نام برد:

- تعیین رفتار سیستم خوردگی بر حسب فعال یا غیر فعال بودن.
- تعیین توزیع پتانسیل در سطح، در معرض خوردگی در الکترودهای فعال ناهمگن مثلاً در یک الکتروود مخلوط از فولاد و بتن
- نمایش (Monitoring) خوردگی در سیستم‌های فعال

آزمایشهای اندازه‌گیری پتانسیل می‌تواند علاوه بر موارد فوق، در تستهای واداشته با اعمال جریان، روی نمونه نیز مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۲-۲-۴- اندازه‌گیری شدت جریان

در تمام فرآیندهای خوردگی الکتروشیمیایی، جابجایی ماده در هر کنش یا واکنش مثلاً در حل شدن آندی توسط قانون فاراده به شکل زیر نشان داده می‌شود:

$$m = \frac{M}{z \times F} \times I \times t \quad (3-2)$$

که در آن m جرم حل شده الکتروشیمیایی (g)

M جرم مولی ماده حل شده (g/mol)

Z تعداد الکترونهاي جابجا شده

F ضریب فاراده (As/mol)

I شدت جریان (A)

t زمان (s)

سرعت حل شدن شیمیایی dm/dt بنا به رابطه فوق متناسب با شدت جریان I می باشد. بدین دلیل سرعت خوردگی به شدت جریان بستگی دارد. بدین سبب اندازه گیری شدت جریان خوردگی عدد مهمی در بررسی های خوردگی می باشد. چون سطح قطعه فلزی که در معرض خوردگی است از تعداد زیادی سلول خوردگی تشکیل شده است که هر کدام شدت جریان مربوط به خود را دارند، اندازه گیری مستقیم این گونه جریانهای الکتریکی مشکل است. در الکترودهای فعال همگن نواحی آنودیک و کاتودیک از لحاظ زمانی و مکانی بطور مساوی تقسیم شده اند. بدین سبب در بعضی از سیستمها می توان روشهایی یافت که در آن بتوان بطور مستقیم شدت جریان خوردگی را اندازه گیری نمود. مثال برای چنین روشی استفاده از دو فلز غیر همنام در داخل یک محلول الکترولیت است که در آن یکی از الکترودها قطبیت کاتودیک و دومی قطبیت آنودیک اختیار می کند. در چنین مداری با قرار دادن یک آمپر متر کم اهم می توان شدت جریان خوردگی را اندازه گیری کرد.

۳-۲-۲-۵- واکنشها در یک سیستم الکتروشیمیایی

یک سلول الکتروشیمیایی از یک فلز مورد اندازه گیری (نمونه) با یک الکتروود مقابل، یک الکتروود مرجع و یک محلول الکترولیت تشکیل شده است. با قرار دادن جریان الکتریکی بین نمونه (الکتروود کار) و الکتروود مقابل و اندازه گیری همزمان اختلاف پتانسیل بین الکتروود نمونه و الکتروود مرجع می توان رابطه ای بین پتانسیل حاکم بین الکتروودها و نیز سرعت خوردگی که متناسب با شدت جریان می باشد، بدست آورد.

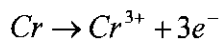
آزمایشها نشان می دهد که سرعت خوردگی به شدت تابع اختلاف پتانسیل است، بویژه در سیستمهای غیر فعال. در روشهای اندازه گیری به یکی از سه نوع فعال^۱ نیمه فعال^۲ و غیر فعال^۳ تقسیم می شود که محدوده پتانسیل هر کدام به سیستم خوردگی بستگی دارد.

برای فعال کردن سیستم فولادی از نوع 42 Cr 13 x یعنی فولاد پرآلیاژ با ۱۳ درصد کرم با یک محلول اسیدی مثلاً محلول اسید سولفوریک همانگونه که در عمل بکار برده می شود، در ناحیه کاتودیک در الکتروود نمونه آلیاژ فولاد - کرم حبابهای هیدروژن مشاهده می شود. فعل و انفعالاتی که در آن انجام می گیرد مطابق معادله ۴-۱ می باشد.

در ناحیه فعال حل شدن آندی فلز بیشتر است و فعل و انفعالی که در آن انجام می گیرد بصورت معادلات زیر می باشد:



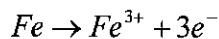
- 1 - Active
- 2 - Trans passive
- 3 - Passive



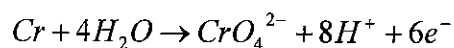
(۳-۴)

برای نشان دادن آهن دو ظرفیتی ایجاد شده می‌توان از اندیکاتور سرخ رنگ $K_3 Fe(CN)_6$ استفاده کرد که وجود آهن دو ظرفیتی، رنگ آنرا به آبی تغییر می‌دهد (آزمایش سمی است).

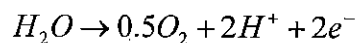
در ناحیه غیر فعال یک لایه نازک اکسید کرم و اکسید آهن روی قطعه فولادی را می‌پوشاند و از حل شدن فلز جلوگیری می‌کند. در ناحیه نیمه فعال برای حل شدن فلز و ایجاد حبابهای اکسیژن واکنشهای زیر انجام می‌گیرند:



(۳-۵)



(۳-۶)

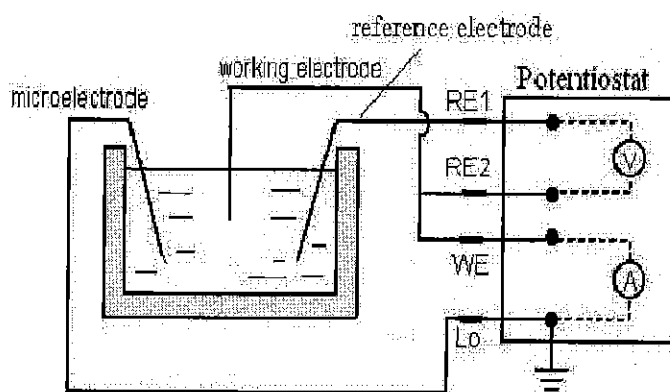


(۳-۷)

شروع ناحیه نیمه فعال گاهی به عنوان تحول پتانسیلی نام برده می‌شود. در ناحیه فعال فلزات به اکسیدهای کم ظرفیت و در ناحیه نیمه فعال به اکسیدهای پرظرفیت خود تبدیل شده و حل می‌شوند. در فرایند مربوط به معادله ۵ می‌توان وجود آهن سه ظرفیتی را با اندیکاتور NH_4SCN نشان داد که رنگ آن را به سرخ تبدیل می‌کند [۲۱].

۳-۲-۲-۶- اندازه‌گیری پولاریزاسیون

برای کاربردهای عملی مهمترین مدار الکتریکی پولاریزاسیون عبارت است از مداری با یک پتانسیواستات که وظیفه تنظیم یک پتانسیل الکتریکی ثابت را بر عهده می‌گیرد. بدین ترتیب که پتانسیواستات بین الکترودهای کار (نمونه) و الکتروود مرجع یک پتانسیل ثابت از پیش تعیین شده را تنظیم می‌کند که برای این عمل یک شدت جریان مشخص بین الکتروود کار و الکتروود مرجع لازم است. در شکل ۳-۱ مدار پتانسیواستات و طرز اتصال آن نشان داده شده است.



شکل ۳-۱ مدار پتانسیواستات برای اندازه‌گیری پولاریزاسیون

البته روش اندازه‌گیری دیگری نیز که مدار گالوانو استاتیکی نامیده می‌شود متداول است. در این روش اختلاف پتانسیل بین الکترودهای کار و مرجع ثابت نگه داشته نمی‌شود بلکه شدت جریان بین الکتروده کار و الکتروده مقابل تنظیم می‌گردد بطوریکه $I = \text{Const}$ گردد.

• آزمایشها

در آزمایشهای زیر، منحنیهای موضعی چگالی جریان - پتانسیل روی یک الکتروده کار (فولاد آلیاژی ۰.۱۳٪ کرم) یک بار در محلول a) ($0.2 \text{ M H}_2\text{SO}_4$) و بار دوم در محلول b) ($0.2 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$) اندازه‌گیری می‌شوند که بعداً از اندیکاتورها استفاده می‌شود. پس از اندازه‌گیری‌های پتانسیواستاتیکی منحنی‌های چگالی جریان - پتانسیل رسم شده و بررسی و نتیجه‌گیری می‌شود.

• مواد مورد نیاز

- ظرف انجام آزمایش (مثلاً یک بشر و یا ظرف پلی اتیلن شفاف)
- الکترودهای کار (میلگرد از جنس X42Cr13)
- الکتروده مقابل (شبه توری از جنس تیتان)
- الکتروده مرجع ($\text{Ag/AgCl } E = +198 \text{ mv}$)
- محلول الکترولیت (KCl اشباع شده)
- پتانسیو استات
- آمپر متر

• روش و تجهیزات

اندازه‌گیری پلاریزاسیون با استفاده از کنترل پتانسیواستات انجام می‌گیرد. بدین معنا که پتانسیل نسبت به الکتروده مرجع توسط دستگاه پتانسیومتر بصورت اتوماتیک تنظیم می‌گردد (ثابت نگه داشته می‌شود) و شدت جریان اندازه‌گیری می‌گردد.

در حین انجام آزمایش محلول به هم زده می‌شود. قبل از اندازه‌گیری بایستی الکتروده کار سنگ زده شود و با استفاده از استن چربی‌گیری شود.

در سلول پر شده با محلول الکترولیت، الکترودها و یک همزن مغناطیسی قرار داده می‌شود. مدار مشابه شکل ۱-۳ ایجاد می‌گردد. نوک کاپیلار بایستی از الکتروده کار فاصله‌ای حدود دو برابر قطر کاپیلار داشته باشد. پس از ایجاد مدار سلول خوردگی حدود ۱۵ دقیقه بدون جریان قرار داده می‌شود. در این حالت پتانسیل سکون یعنی E_R دو الکتروده کار اندازه‌گیری می‌شود.

شدت جریان بر حسب میلی آمپر (mA) نسبت به سطح آزاد الکتروده کار محاسبه می‌شود [۲۱].

فصل چهارم

آزمایشها

۴-۱- مقدمه

در این فصل آزمایشهای انجام شده برای محاسبه سرعت خوردگی فولاد به کار رفته در ستونهای پل میانگذر در دست احداث شهید کلاتری دریاچه ارومیه و فولاد به کار رفته در ورق زیرین شناورهای در حال بهره‌برداری دریاچه ارومیه توضیح داده شده است. در این آزمایشها خوردگی قطعات فولادی مزبور از طریق محاسبه سرعت خوردگی یکنواخت با روش کاهش وزن و روش الکتریکی (پولاریزاسیون) تحت پوشش قرار گرفته‌اند.

خوردگی یک فلز غوطه‌ور در آب به دو عامل اساسی بستگی دارد؛ تمایل فلز برای خورده شدن و تمایل محیط خورنده برای پیشبرد خوردگی.

تمایل ماده برای خورده شدن عموماً بوسیله اندازه‌گیری سرعت خوردگی آن و مقایسه با سرعت خوردگی مواد دیگر در همان محیط خورنده تعیین می‌شود [۹]. برای این منظور فولاد ستونهای پل در دست احداث با فولاد کشتی در حال بهره‌برداری در آب دریاچه ارومیه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

خوردگی یک محیط خورنده بوسیله مقایسه سرعت خوردگی یک ماده در آن محیط با سرعتهای خوردگی همان ماده در محیطهای خورنده دیگر تعیین می‌شود [۹]. برای این منظور فولادهای مزبور در آب دریاچه ارومیه و آب مقطر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

برای بررسی تاثیرات کلی عوامل محیطی از قبیل: تغییرات دما، غلظت، جریان سیال، بلوری شدن نمک روی قطعات و سایر عوامل محیطی، قطعات نمونه همزمان در آزمایشگاه و در شرایط طبیعی دریاچه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

۴-۲- مراحل انجام آزمایشها

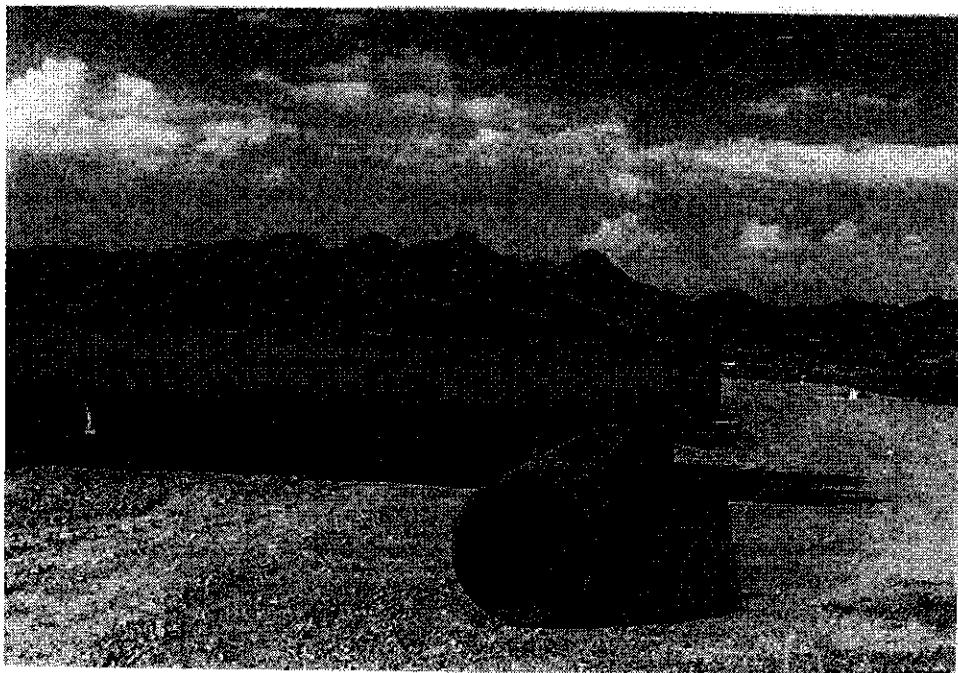
۴-۲-۱- روش کاهش وزن

برای محاسبه سرعت خوردگی فولادهای مذکور در محیط آب شور دریاچه ارومیه به روش کاهش وزن به ترتیب زیر عمل شده است:

۴-۲-۱-۱- آماده سازی نمونه‌ها

آماده سازی نمونه‌ها شامل مراحل زیر می‌باشد:

- تهیه قطعاتی از فولادهای مورد استفاده در ستونهای پل در دست احداث و ورقهای بکار رفته در شناورهای در حال بهره‌برداری. برای این منظور یک تکه از ورق دور ریز کشتی فلامینگو به ابعاد تقریبی $11 \times 240 \times 320$ میلیمتر تهیه شد. سپس قسمتی از لوله‌هایی که به عنوان ستونهای پل میانگذر بکار رفته‌اند (شکل ۱-۴)، به ابعاد $22 \times 300 \times 500$ میلیمتر بوسیله گاز استیلن بریده شد.



شکل ۱-۴ ستونهای مورد استفاده در پل بزرگراه شهید کلانتری

• آنالیز فولادهای مزبور

تکه کوچکی از هر دو نوع فولاد به ابعاد تقریبی 20×50 میلیمتر برای آنالیز درصد مواد تشکیل دهنده، توسط دستگاه کوانتومتر لیزری تهیه شدند. جدولهای ۱-۴ و ۲-۴ آنالیز فولادهای مزبور را نشان می‌دهند.

با توجه به آنالیز مزبور هر دو فولاد از نوع فولادهای دریایی بوده، طبق استاندارد اروپایی EN 10225 فولاد ستونهای پل میانگذر و A36-212 فولاد ورق شناور می‌باشند [۱۰].

جدول ۱-۴ آنالیز فولاد ستونهای پل میانگذر شهید کلانتری

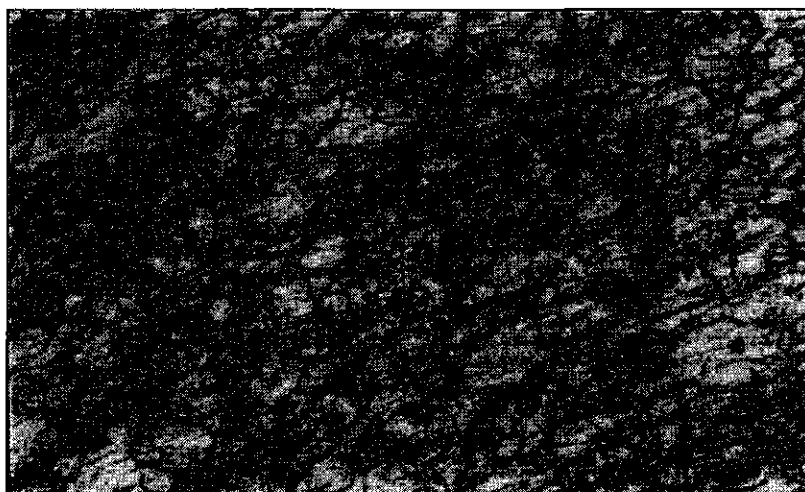
عنصر	درصد	عنصر	درصد	عنصر	درصد
P	0.018	Cr1	0.063	Cu1	0.032
S	0.006	Fe2	97.7	Zn	-
B	0.0012	Mg	-	Ni3	0.060
Al	0.039	Si	0.291	Sn	0.001
As	0.010	Mn1	1.39	Mn	-
C	0.042	Cu2	-	Si2	-
Fe1	-	Al2	-	Mo	0.010
W	0.009	V1	0.070	Pb1	0.0008
Cr2	-	Sn1	-	Ce	-
Co	0.009	Nb	0.038	-	-
Fe3	-	Ti	0.004	-	-

جدول ۲-۴ آنالیز فولاد مصرف شده در ورق کشتی

عنصر	درصد	عنصر	درصد	عنصر	درصد
P	0.018	Cr1	0.018	Cu1	0.029
S	0.006	Fe2	98.5	Zn	-
B	0.0009	Mg	-	Ni3	0.049
Al	0.044	Si	0.180	Sn	0.001
As	0.010	Mn1	0.652	Mn	-
C	0.182	Cu2	-	Si2	-
Fe1	-	Al2	-	Mo	0.005
W	0.038	V1	0.010	Pb1	0.0008
Cr2	-	Sn1	-	Ce	-
Co	0.014	Nb	0.005	-	-
Fe3	-	Ti	0.004	-	-

- ساختار متالوگرافی

نمونه‌ای به سطح مقطع تقریبی یک سانتیمتر مربع پس از سمباده‌زنی و پولیش کاری با اسید نیتریک اچ شد. شکل ۲-۴ ساختار فولاد EN10225 را نشان می‌دهد. در این ساختار زمینه سفید فریتی همراه با مقادیر کم پرلیت قابل مشاهده است.



شکل ۲-۴ ساختار میکروسکوپی فولاد EN10225 با بزرگنمایی ۲۰۰x

- ماشینکاری قطعات برای تهیه نمونه‌هایی به ابعاد استاندارد ۱۰۲×۱۳×۰/۸ میلیمتر [۹]

قطعه فولادی A36-212 توسط ابزار انگشتی روی دستگاه فرز به عرض ۱۰۲ میلیمتر ماشینکاری شد. سپس ضخامت ورق از ۱۱ میلیمتر به ۳ میلیمتر توسط ابزار T-Max ماشینکاری شد. به علت عدم توانایی گیره مغناطیسی دستگاه فرز در نگه داشتن قطعه بقیه ضخامت توسط دستگاه سنگ تخت به ضخامت ۰/۸ میلیمتر رسانده شد.

در حین سنگزنی مایع خنک کننده با فشار بالا بر روی قطعه کار در حال پاشش بوده و پیشروی دستگاه روی ۰/۱ تنظیم شده بود تا در اثر افزایش دمای ناشی از اصطکاک، تغییرات سطحی به کمترین مقدار برسد. در نهایت در دستگاه گیوتین به عرض ۱۳ میلیمتر به تعداد ۲۱ عدد بریده شدند.

برای قطعه فولادی EN10225 ابتدا امتداد طول لوله توسط دستگاه فرز به اندازه ۱۰۲ میلیمتر ماشینکاری شد. سپس به دلیل قوس موجود در قطعه ابتدا توسط دستگاه اره نواری به ضخامت تقریبی ۲ میلیمتر به تعداد ۲۱ عدد بریده شده و سپس توسط سنگ تخت به ضخامت ۰/۸ میلیمتر درآمدند.

- سوراخ کاری یکی از لبه‌های نمونه‌ها

به منظور امکان نصب نمونه‌ها بر روی یک قلاب و برای نگهداری آنها در طول آزمایشها، سوراخی به قطر ۷ میلیمتر به فاصله ۸ میلیمتر از یک انتهای نمونه توسط دریل ایجاد شد [۹].

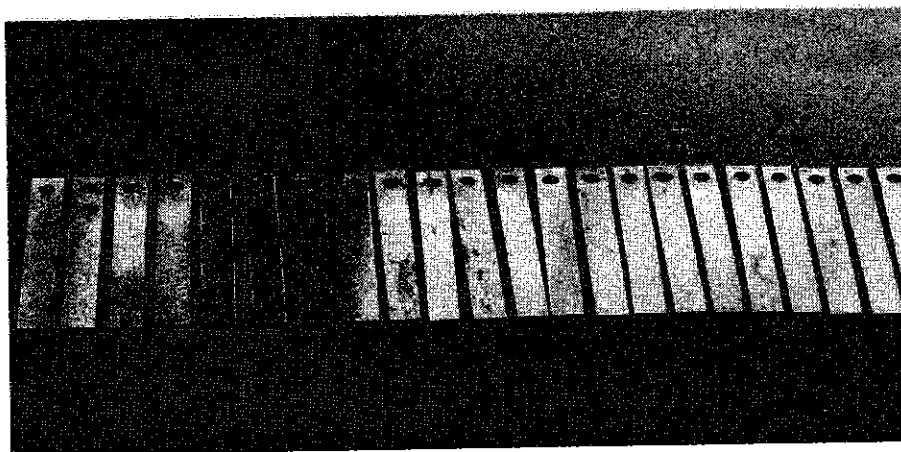
- پلیسه‌گیری از تمام لبه‌ها و تیزی‌ها

به منظور جلوگیری از تمرکز تنش، تمام لبه‌ها و تیزی‌ها با سوهان و سوراخ $\phi 7$ میلیمتر با مته $\phi 9$ میلیمتر پلیسه‌گیری شدند [۹].

۴-۲-۱-۲- شماره گذاری نمونه‌ها

به منظور شناسایی نمونه‌ها در قسمت سطح کوچک بین لبه و سوراخ توسط سمبه شماره زن، شماره گذاری شدند [۹].

نمونه‌های تهیه شده در شکل‌های ۳-۴ و ۴-۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۴ تعدادی از نمونه‌های تهیه شده



شکل ۴-۴ نمونه‌های شماره گذاری شده

۴-۲-۱-۳- تمیز کاری سطوح نمونه‌ها

به منظور تمیز کردن نمونه‌ها از گریس، روغن و اکسیدها به ترتیب زیر عمل شد: ظرف بشر با مایع ظرفشویی و آب کاملاً شستشو شده و خشک شدند. سپس از بنزن extra Pure پر شده و نمونه‌ها به ترتیب در داخل آن فرو برده شده و روی کاغذ تمیز در مجاورت هوا خشک شدند. در

بشر دیگری ۸۰CC اسید کلریدریک غلیظ ۳۷ درصد و ۳۲۰ CC آب مقطر مخلوط شدند [۱۳]. قطعات از یک سیم روکش دار پلاستیکی عبور داده شده و بصورت حلقه در داخل بشر قرار داده شدند. بعد از مدت ۳۰ دقیقه نمونه‌ها از داخل بشر بیرون آورده شده و در سه ظرف مجزای پر شده با آب مقطر به ترتیب آبکشی شدند. در ظرف سوم کاغذ PH بدون تغییر رنگ ماند [۱۳]. پس از آبکشی با دستمال کاغذی خشک شده و درون ظرف شیشه‌ای که حاوی مقداری کلرید کلسیم جهت جذب رطوبت بود نگهداری شدند.

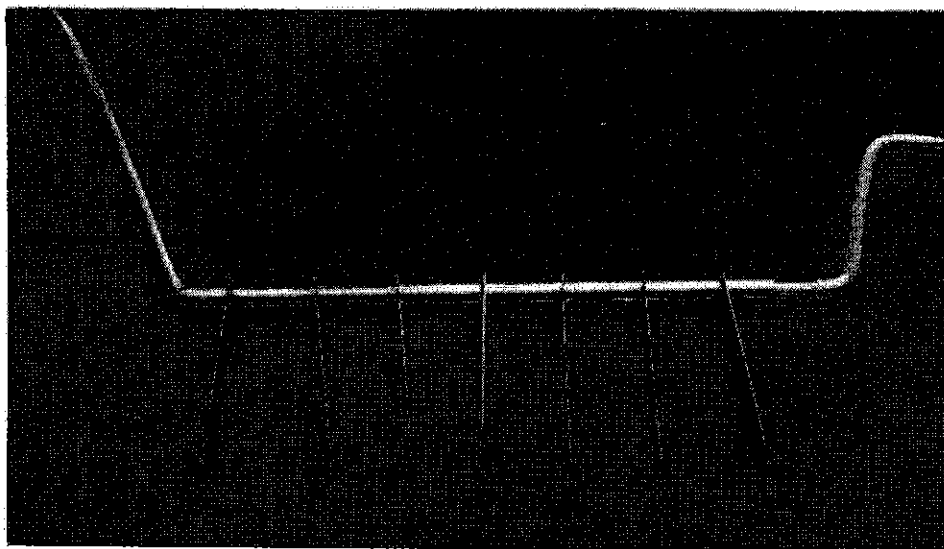
۴-۲-۱-۴- توزین نمونه‌ها

پس از تمیز کاری، نمونه‌ها با ترازوی دیجیتالی A&D با دقت یک دهم میلی‌گرم جرم سنجی شدند.

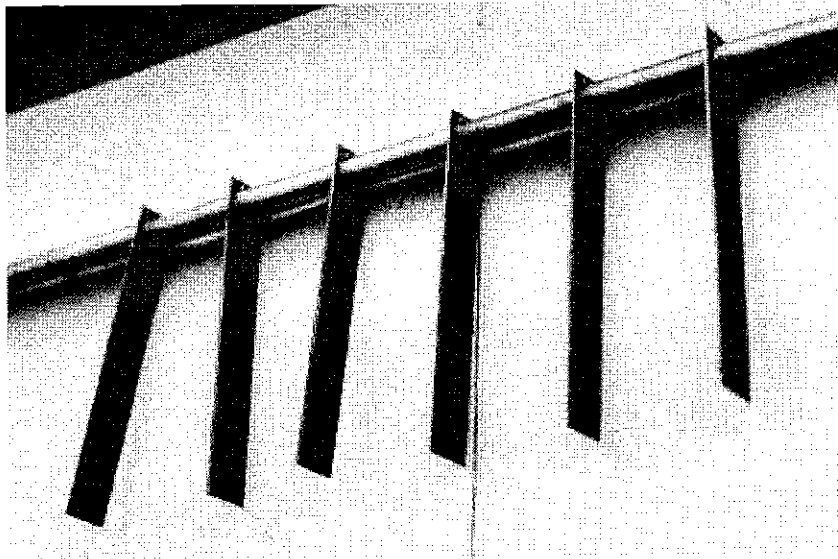
۴-۲-۱-۵- نصب نمونه‌ها بر روی قلاب

برای تهیه قلاب میله‌ای فولادی به قطر ۳ میلیمتر درون یک شیلنگ پلاستیکی به قطر خارجی ۶ میلیمتر قرار داده شد. نمونه‌ها از سوراخهای تعبیه شده، روی میله عایق شده مزبور نصب شدند. برای اطمینان از عدم تماس نمونه‌ها با یکدیگر، بین دو نمونه‌ها یک واشر پلاستیکی به قطر ۱۰ میلیمتر و طول ۴۰ میلیمتر قرار داده شد.

نمونه‌های نصب شده بر روی قلاب در شکل‌های ۵-۴ و ۶-۴ نشان داده شده اند.



شکل ۵-۴ قلاب و نمونه‌های نصب شده بر روی آن جهت استقرار در آزمایشگاه



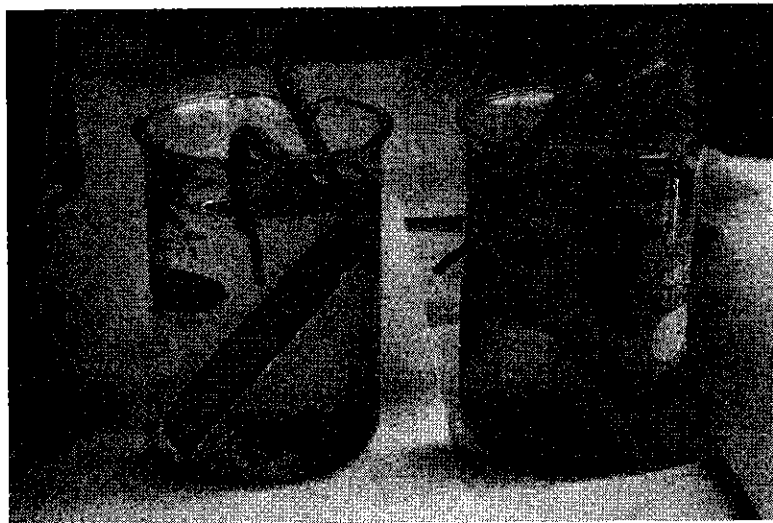
شکل ۴-۶ نمونه‌های نصب شده بر روی قلاب

۴-۲-۱-۶- استقرار نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه

به منظور استقرار نمونه‌ها در آزمایشگاه دو محفظه یکی بشر ۴۰۰ میلی لیتری و دیگری محفظه پلاستیکی ۲۰ لیتری تهیه شدند.

در بشرهای ۴۰۰ میلی لیتر استقرار نمونه‌ها بصورت انفرادی در آب دریاچه ارومیه و آب مقطر صورت گرفتند (شکل ۷-۴). در محفظه ۲۰ لیتری نمونه‌های نصب شده بر روی قلاب قرار داده شدند.

در هر دو مورد استقرار بصورت غوطه‌وری کامل انجام گرفته و ارتفاع سطح مایع در بشر حداقل ۱۰ میلیمتر و در محفظه پلاستیکی حداقل ۱۰۰ میلیمتر بالاتر از لبه بالایی نمونه‌ها بوده است. هر دو هفته آب محفظه‌ها با آب تازه دریاچه عوض شدند.



شکل ۴-۷ نمونه‌های مستقر در آب مقطر (بشر سمت راست) و آب دریاچه ارومیه (بشر سمت چپ)

۴-۲-۱-۷- استقرار نمونه‌ها در محیط طبیعی آب دریاچه

پس از هماهنگی با سازمان محیط زیست استان آذربایجان غربی که متولی امور زیست محیطی دریاچه ارومیه می‌باشد و نیز شرکت صدرا که احداث پل میانگذر شهید کلانتری را عهده‌دار است در دو نقطه دریاچه محوطه مناسبی برای استقرار نمونه‌ها در نظر گرفته شد. تعدادی از نمونه‌ها در بندر گلمانخانه، نزدیک اسکله چوبی (شکل ۸-۴) و تعدادی نیز در نزدیکی پل در دست ساخت (شکل ۹-۴) قرار داده شدند. با توجه به زمان‌بندی برنامه‌ریزی شده، پس از ساعات مشخص از محیط خورنده خارج شده و برای توزین و ثبت اطلاعات به محل آزمایشگاه آورده شدند.

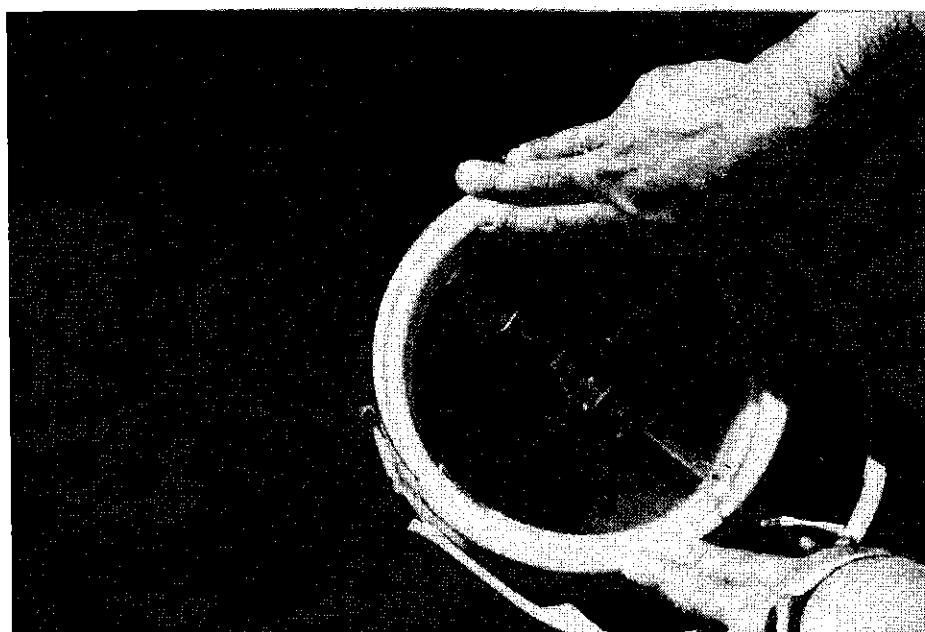


شکل ۸-۴ محل استقرار نمونه‌ها در شرایط طبیعی دریاچه ارومیه در بندر گلمانخانه



شکل ۹-۴ محل استقرار نمونه‌ها در شرایط طبیعی دریاچه ارومیه در نزدیکی محل احداث پل

نمونه‌های مستقر در دریاچه در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده اند.



شکل ۴-۱۰ نمونه‌های مستقر در دریاچه

۴-۲-۱-۸- تمیز کردن نمونه‌ها از محصولات خوردگی

ابتدا با استفاده از برس نرم پلاستیکی محصولات خوردگی از سطح نمونه‌ها پاک شدند. سپس نمونه‌ها درون محلول اسید کلریدریک که قبلاً برای تمیزکاری اولیه نمونه‌ها تهیه شده بود به مدت ۳۰ ثانیه قرار داده شدند. در نهایت آبکشی شده و با دستمال تمیز خشک شدند [۹].

۴-۲-۱-۹- اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات

در انتهای هر مرحله از زمان آزمایش، نمونه‌های مورد نظر از تماس با محیط خورنده خارج شده و پس از تمیز کردن سطوح با ترازوی دیجیتال جرم سنجی شدند. سرعت خوردگی برای هر نمونه از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۳]:

$$\text{CorrosionRate} = \frac{k \times \Delta m}{A \times t \times d} \quad (4-1)$$

k ضریب ثابت:

برای بیان سرعت خوردگی بر حسب میلیمتر در سال $k = 8.76 \times 10^4$

برای بیان سرعت خوردگی بر حسب میلی گرم بر دسی متر مربع بر روز $k = 2.14 \times 10^6 \times d$

t زمان استقرار نمونه‌ها در آب بر حسب ساعت (دقت ۰/۰۱ ساعت)

Δm کاهش جرم بر حسب گرم (دقت ۰/۱ میلی گرم)

A مساحت کل سطوح نمونه بر حسب سانتیمتر مربع (دقت $0/01$ سانتیمتر مربع)
 d چگالی بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب (برای فولاد $d = 7/86 \text{ g/cm}^3$)

۴-۲-۱-۱۰- نتایج آزمایش محاسبه آهنگ خوردگی به روش کاهش وزن

با استفاده از اطلاعات ثبت شده و رابطه (۴-۱) آهنگ خوردگی فولادهای مزبور در آب دریاچه ارومیه در شرایط محیط آزمایشگاه در جدولهای (۴-۳) و (۴-۴) آمده است.

جدول ۴-۳ آهنگ خوردگی فولاد EN10225 در شرایط آزمایشگاه

شماره نمونه	مدت زمان استقرار در آب (ساعت)	کاهش جرم (گرم)	آهنگ خوردگی (میلیمتر در سال)
۵۰	۲۴	۰,۰۰۸۵	۰,۰۱۴۰
۵۰	۳۳۶	۰,۰۱۴۸	۰,۰۱۷
۵۱	۳۳۶	۰,۰۱۵۵	۰,۰۱۸
۵۲	۶۷۲	۰,۰۲۷۱	۰,۰۱۶
۵۳	۶۷۲	۰,۰۲۷۴	۰,۰۱۶
۵۴	۱۰۰۸	۰,۰۳۹۶	۰,۰۱۵۵
۵۵	۱۰۰۸	۰,۰۳۸۱	۰,۰۱۵
۵۶	۱۳۲۰	۰,۰۴۸۸	۰,۰۱۴۶
۵۷	۱۳۲۰	۰,۰۵۰۱	۰,۰۱۵
۵۸	۱۶۸۰	۰,۰۵۸۵	۰,۰۱۳۷
۵۹	۱۶۸۰	۰,۰۶۰۴	۰,۰۱۴
۵۰	۲۵۲۰	۰,۰۷۱۴	۰,۰۱۱
۵۱	۲۵۲۰	۰,۰۷۲۲	۰,۰۱۱

جدول ۴-۴ آهنگ خوردگی فولاد A35-212 در شرایط آزمایشگاه

شماره نمونه	مدت زمان استقرار در آب (ساعت)	کاهش جرم (گرم)	آهنگ خوردگی (میلیمتر در سال)
۱	۲۴	۰،۰۰۹۵	۰،۱۵۶۷
۱	۳۴۰	۰،۰۲۵۸	۰،۰۳
۲	۳۴۰	۰،۰۲۵۷	۰،۰۳
۳	۱۰۰۰	۰،۰۴۶۲	۰،۰۱۸
۴	۱۰۰۰	۰،۰۴۸۲	۰،۰۱۹
۵	۲۰۰۰	۰،۰۶۵۱	۰،۰۱۳
۶	۲۰۰۰	۰،۰۶۲۷	۰،۰۱۲۴
۷	۳۰۰۰	۰،۱۱۴۴	۰،۰۱۵
۸	۳۰۰۰	۰،۱۰۹۵	۰،۰۱۴
۹	۳۰۰۰	۰،۱۰۵۲	۰،۰۱۴

آهنگ خوردگی برای فولادهای مورد آزمایش در شرایط طبیعی آب دریاچه مطابق جدولهای ۴-۵ و

۴-۶ می باشد.

جدول ۴-۵ آهنگ خوردگی فولاد EN10225 در شرایط طبیعی آب دریاچه ارومیه

شماره نمونه	مدت زمان استقرار در آب (ساعت)	کاهش جرم (گرم)	آهنگ خوردگی (میلیمتر در سال)
۶۰	۳۳۶	۰،۱۸۵۳	۰،۲۱۸
۶۱	۳۳۶	۰،۱۶۹۲	۰،۱۹۹
۶۲	۶۷۲	۰،۱۱۸۹	۰،۰۷
۶۳	۶۷۲	۰،۱۳۶۳	۰،۰۸
۶۴	۱۰۰۸	۰،۱۵۴۹	۰،۰۶
۶۵	۱۰۰۸	۰،۱۶۵۸	۰،۰۶۵
۶۶	۱۳۲۰	۰،۱۶۲۴	۰،۰۵
۶۷	۱۳۲۰	۰،۱۹۶۱	۰،۰۶
۶۸	۱۶۸۰	۰،۲۵۷۶	۰،۰۶
۶۹	۱۶۸۰	۰،۲۲۷۶	۰،۰۵۳

جدول ۴-۶ آهنگ خوردگی فولاد A36-225 در شرایط طبیعی آب دریاچه ارومیه

شماره نمونه	مدت زمان استقرار در آب (ساعت)	کاهش جرم (گرم)	آهنگ خوردگی (میلیمتر در سال)
۱۰	۳۴۰	۰،۱۳۰۹	۰،۱۵۲
۱۱	۳۴۰	۰،۱۲۳۶	۰،۱۴۴
۱۲	۱۰۰۰	۰،۴۶۴۴	۰،۱۸۳
۱۳	۱۰۰۰	۰،۴۰۱۵	۰،۱۵۹

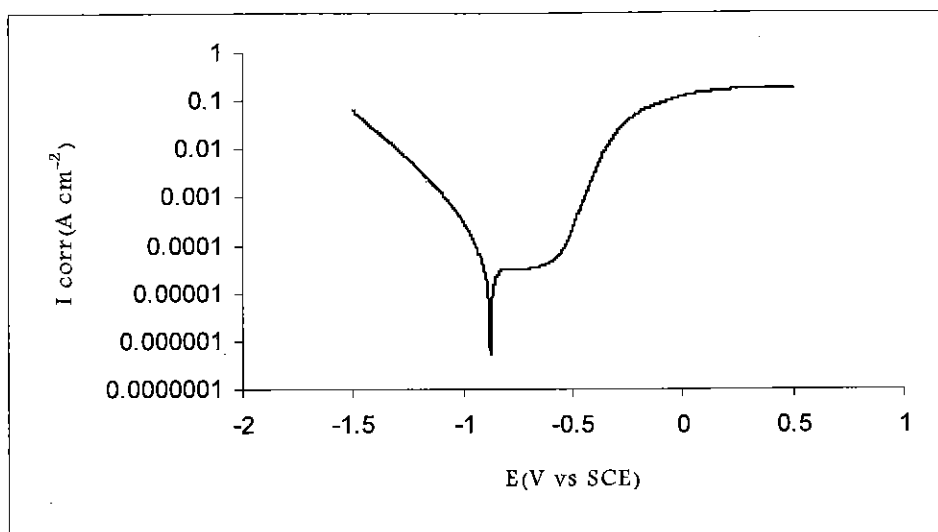
آهنگ خوردگی برای فولادهای مورد آزمایش در آب مقطر در جدولهای ۴-۷ و ۴-۸ نشان داده شده اند.

جدول ۴-۷ آهنگ خوردگی فولاد A36-225 در آب مقطر

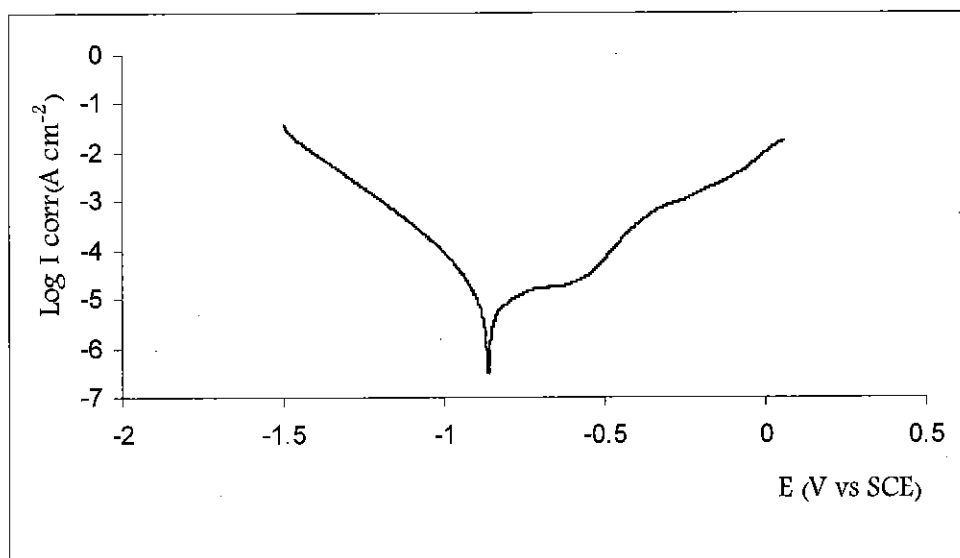
شماره نمونه	مدت زمان استقرار در آب (ساعت)	کاهش جرم (گرم)	سرعت خوردگی (میلیمتر در سال)
۱۶	۳۴۰	۰،۰۵۴۲	۰،۰۶۳
۱۷	۳۴۰	۰،۰۵۲۹	۰،۰۶۱
۱۸	۱۰۰۰	۰،۱۶۹۷	۰،۰۶۷
۱۹	۱۰۰۰	۰،۱۶۸۱	۰،۰۶۶

جدول ۴-۸ آهنگ خوردگی فولاد EN10225 در آب مقطر

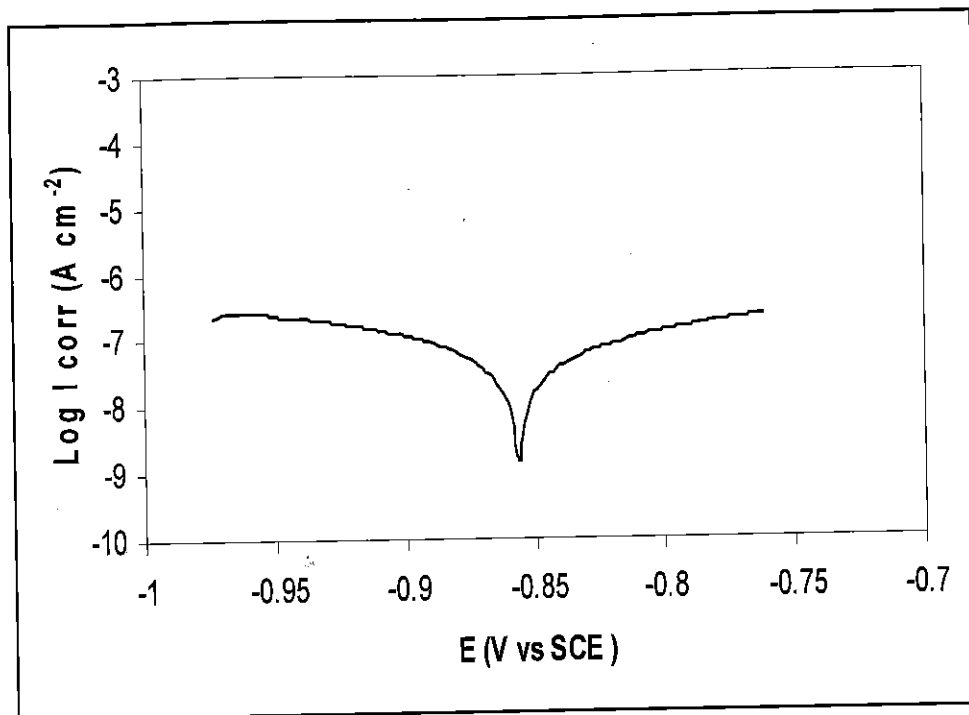
ماره نمونه	مدت زمان استقرار در آب (ساعت)	کاهش جرم (گرم)	سرعت خوردگی (میلیمتر در سال)
۶۰	۳۳۶	۰،۰۵۸۴	۰،۰۶۹
۷۰	۳۳۶	۰،۰۵۷۱	۰،۰۶۷
۶۰	۱۲۶۰	۰،۱۱۴۷	۰،۰۳۶
۷۰	۱۲۶۰	۰،۱۱۶۳	۰،۰۳۶۵
۶۰	۲۱۱۲	۰،۱۹۲۲	۰،۰۳۶
۷۰	۲۱۱۲	۰،۱۹۴۱	۰،۰۳۶۳



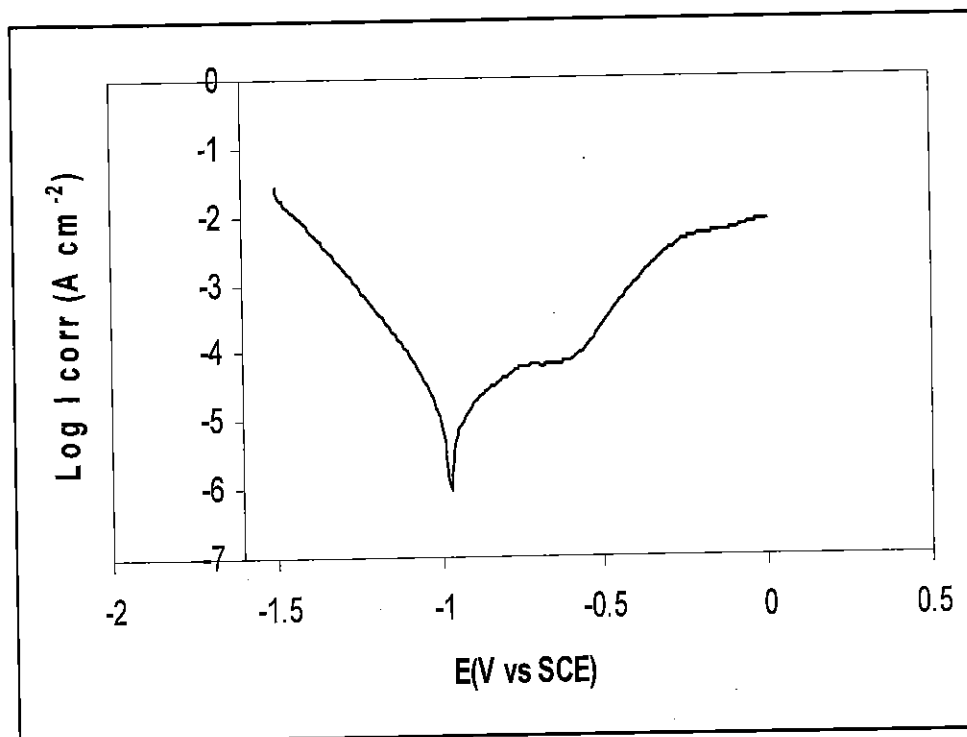
شکل ۴-۱۱ نمودار چگالی جریان-ولتاژ برای فولاد EN10225 (بعد از یک ساعت استقرار در آب)



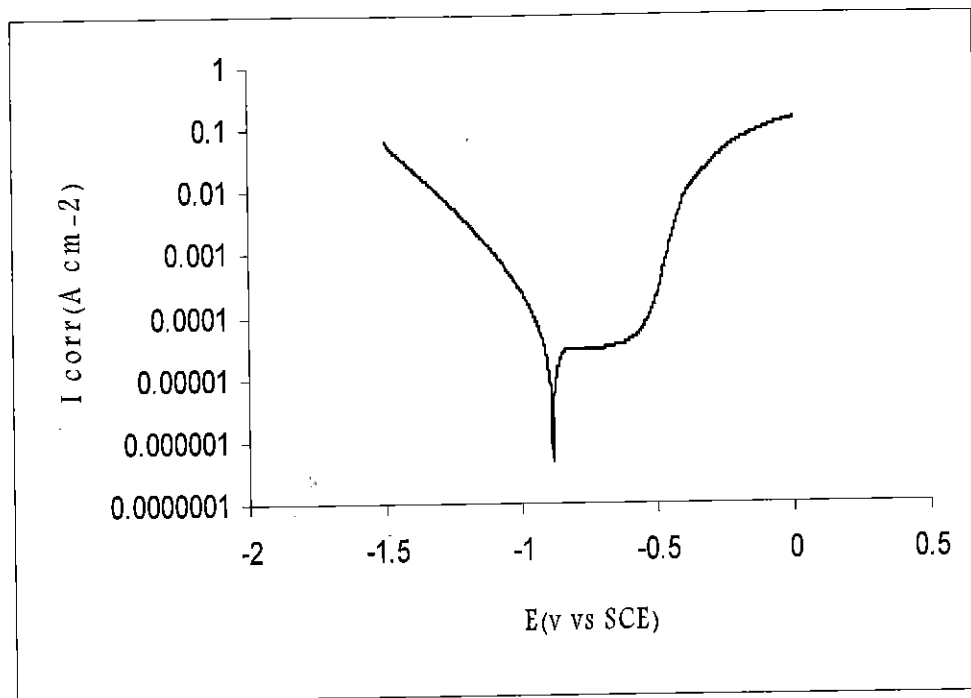
شکل ۴-۱۲ نمودار چگالی جریان-ولتاژ برای فولاد EN10225 (بعد از دو هفته استقرار در آب)



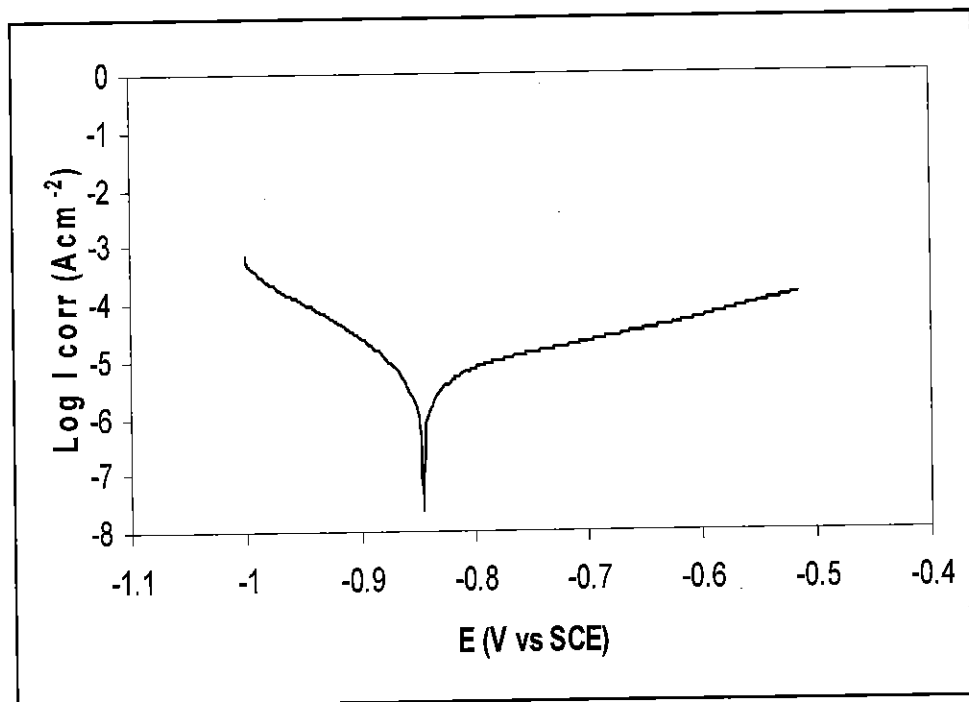
شکل ۱۳-۴ نمودار چگالی جریان-ولتاژ برای فولاد EN10225 (بعد از چهار هفته استقرار در آب)



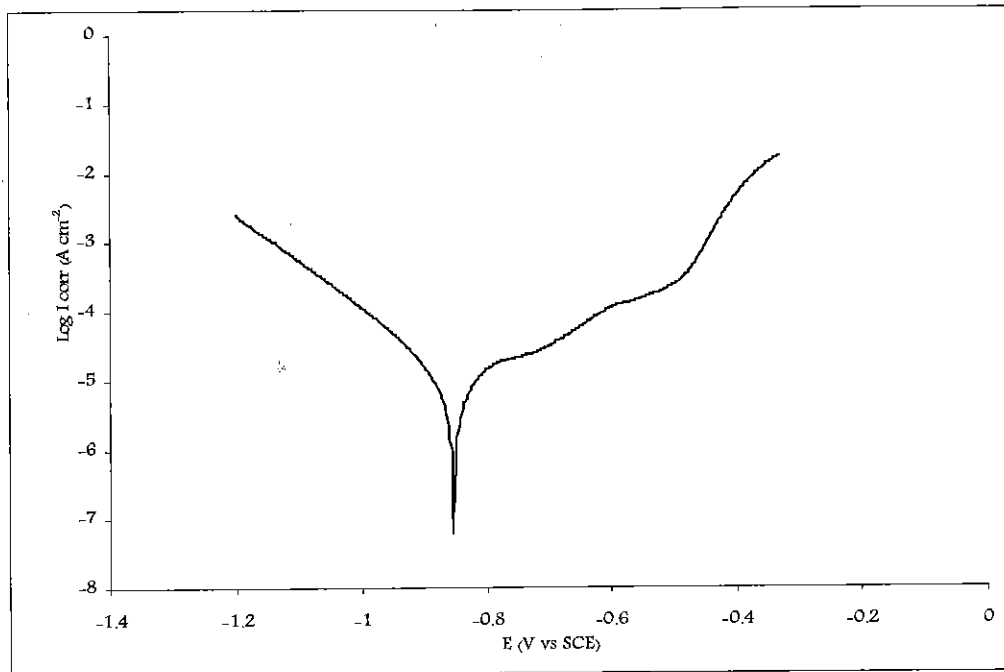
شکل ۱۴-۴ نمودار چگالی جریان-ولتاژ برای فولاد EN10225 (بعد از شش هفته استقرار در آب)



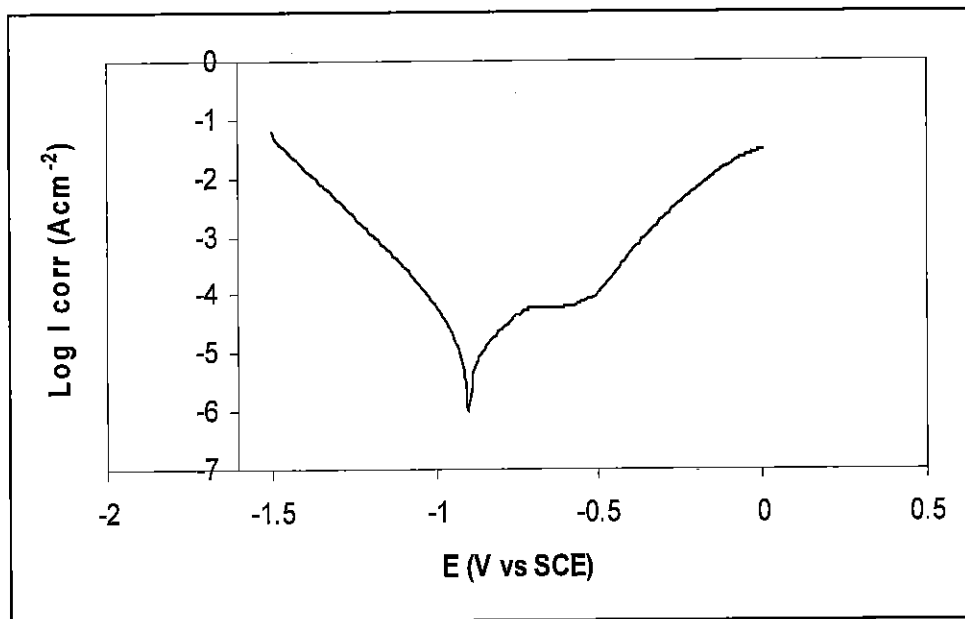
شکل ۴-۱۵ نمودار چگالی جریان-ولتاژ برای فولاد A35-212 (بعد از یک ساعت استقرار در آب)



شکل ۴-۱۶ نمودار چگالی جریان-ولتاژ برای فولاد A35-212 (بعد از دو هفته استقرار در آب)



شکل ۱۷-۴ نمودار چگالی جریان- ولتاژ برای فولاد A35-212 (بعد از چهار هفته استقرار در آب)



شکل ۱۸-۴ نمودار چگالی جریان- ولتاژ برای فولاد A35-212 (بعد از شش هفته استقرار در آب)

مقادیر شدت جریان خوردگی و آهنگ خوردگی برای نمونه‌های تهیه شده از هر دو نوع فولاد مورد آزمایش با استفاده از روش الکتروشیمیایی در جداول ۴-۹ و ۴-۱۰ نشان داده شده است. مقادیر مزبور با توجه به مدت زمان استقرار نمونه‌های مانع شده در بشر محتوی آب دریاچه ارومیه به مدت یک ساعت، دو هفته، چهار هفته و شش هفته و محدوده برونیابی ۲۰، ۳۰ و ۵۰ میلی ولت از نقطه تعادل بدست آمده اند.

جدول ۴-۹ آهنگ خوردگی فولاد EN10225 در زمانهای غوطه وری مختلف به روش الکتریکی

نمونه	مدت زمان غوطه وری	R_p ($\Omega \text{ cm}^{-2}$)	B_a (mv/dec)	B_c (mv/dec)	I_{corr} (Acm^{-2})	Corr. Rate (mm yr^{-1})	Extrapolation range
۱	یک ساعت	۱۱۰۹	-	-	5.09×10^{-5}	۱.۲۳	± 20 mv
۱	دو هفته	۴۹۸۰	۸۰	۶۸	3.3×10^{-6}	3.85×10^{-7}	± 20 mv
۲	چهار هفته	۴۰۴۰	۲۹۷	۱۹۲	1.25×10^{-7}	1.46×10^{-7}	± 20 mv
۳	شش هفته	۳۴۲۳	۳۸۵	۱۴۰	1.3×10^{-5}	1.51×10^{-1}	± 20 mv
۱	دو هفته	۴۹۸۰	۱۵۶	۹۳	5.25×10^{-6}	6.11×10^{-7}	± 30 mv
۲	چهار هفته	۴۰۴۰	۳۵۰	۲۲۵	1.46×10^{-7}	1.7×10^{-7}	± 30 mv
۳	شش هفته	۳۴۲۳	۳۴۵	۱۳۶	1.23×10^{-5}	1.43×10^{-1}	± 30 mv
۱	دو هفته	۴۹۸۰	۶۸۴	۱۳۶	1.0×10^{-5}	1.17×10^{-1}	± 50 mv
۲	چهار هفته	۴۰۴۰	۲۹۷	۲۵۰	2.16×10^{-7}	2.51×10^{-7}	± 50 mv
۳	شش هفته	۳۴۲۳	۳۳۶	۱۳۸	1.24×10^{-5}	1.44×10^{-1}	± 50 mv

جدول ۴-۱۰ آهنگ خوردگی فولاد A35-212 در زمانهای غوطه وری مختلف به روش الکتریکی

نمونه	مدت زمان غوطه وری	R_p ($\Omega \text{ cm}^{-2}$)	B_a (mv/dec)	B_c (mv/dec)	I_{corr} (Acm^{-2})	Corr. Rate (mm yr^{-1})	Extrapolation range
۱	یک ساعت	۱۱۰۹	-	-	4.71×10^{-5}	9.81×10^{-1}	± 20 mv
۱	دو هفته	۴۱۳۹	۲۲۳	۷۶	5.36×10^{-6}	6.24×10^{-7}	± 20 mv
۲	چهار هفته	۴۴۷۳	۱۶۹	۱۱۳	7.96×10^{-6}	9.27×10^{-7}	± 20 mv
۳	شش هفته	۳۳۶۲	۳۸۹	۱۲۲	1.2×10^{-5}	1.39×10^{-1}	± 20 mv
۱	دو هفته	۴۱۳۹	۲۳۶	۷۸	5.56×10^{-6}	6.47×10^{-7}	± 30 mv
۲	چهار هفته	۴۴۷۳	۱۶۶	۱۱۶	8.05×10^{-6}	9.37×10^{-7}	± 30 mv
۳	شش هفته	۳۳۶۲	۳۵۵	۱۲۲	1.17×10^{-5}	1.36×10^{-1}	± 30 mv
۱	دو هفته	۴۱۳۹	-۷۷۸۳	۱۴۰	2.85×10^{-5}	3.32×10^{-1}	± 50 mv
۲	چهار هفته	۴۴۷۳	۲۱۵	۱۳۴	9.96×10^{-6}	1.16×10^{-1}	± 50 mv
۳	شش هفته	۳۳۶۲	۳۳۵	۱۲۷	1.21×10^{-5}	1.41×10^{-1}	± 50 mv

فصل پنجم

نتایج و پیشنهادات

۱-۵- مقدمه

اگر چه خوردگی اجتناب ناپذیر است ولی می توان خسارات آن را به مقدار زیادی کاهش داد. اولین گام در راستای کنترل خوردگی شناخت محیط خورنده و بررسی تاثیر این محیط بر روی آلیاژهای مورد استفاده در آن می باشد. در این تحقیق محیط خورنده دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر آن بر روی خوردگی فولاد دریایی EN10225 که در ساخت پل میانگذر بزرگراه شهید کلانتری مورد استفاده قرار گرفته است، مورد مطالعه قرار گرفت و با فولاد A36-212 که در ساخت شناورها استفاده شده است، مقایسه شد.

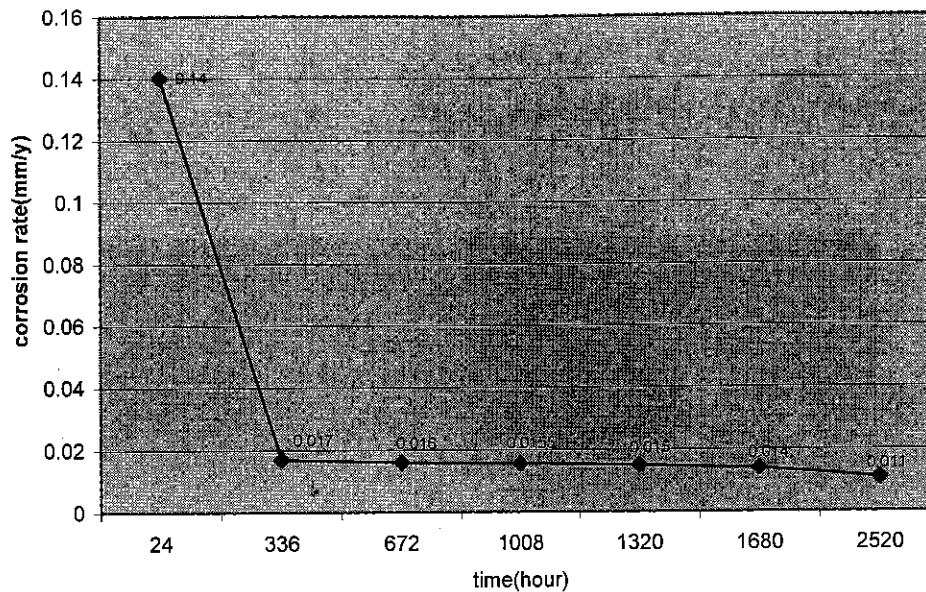
با توجه به اینکه سازه های مزبور تحت خوردگی یکنواخت قرار دارند، جهت مطالعه این خوردگی و تعیین نرخ آن از دو روش متداول کاهش وزن و الکتروشیمیایی مطابق با استاندارد ASTM استفاده شد. این فصل نتایج حاصل از این مطالعات را مورد بررسی قرار می دهد.

۲-۵- بررسی نتایج روش کاهش وزن

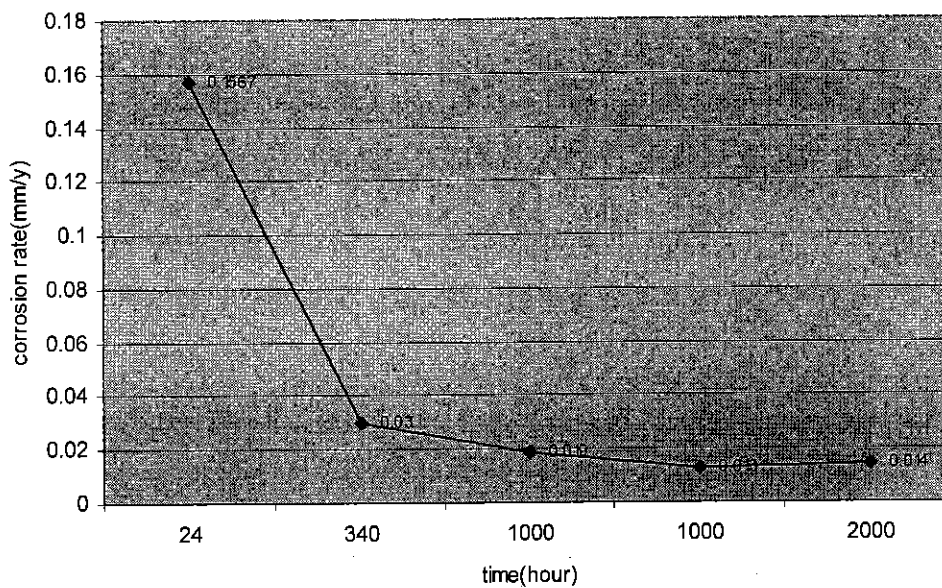
۱-۲-۵- شرایط آزمایشگاه

آزمایشهای انجام شده در شرایط فیزیکی مشابه (دما، غلظت آب شور، فشار و...) روی قطعات فولادی از نوع EN10225 و A36-212 نشان می دهد که در شرایط آزمایشگاهی (دما بین ۱۷ الی ۲۵ درجه سلسیوس) اثرات خوردگی آب دریاچه ارومیه بر هر دو نوع فولاد مشابه بوده و آهنگ خوردگی با گذشت زمان کاهش یافته و پس از حدود ۱۰۰۰ ساعت تقریباً به مقدار معین یکصدم میلیمتر در سال میل می کند. نمودار تغییرات آهنگ خوردگی برای فولادهای مزبور در شکل‌های ۱-۵ و ۲-۵ نشان داده شده اند.

بنابراین می توان آهنگ خوردگی یکصدم میلیمتر در سال را رفتار خوردگی فولادهای دریایی در شرایط مزبور دانست، که این مقاومت به خوردگی نسبی برجسته میباشد [۲].



شکل ۵-۱ نمودار تغییرات آهنگ خوردگی با گذشت زمان برای فولاد EN10225



شکل ۵-۲ نمودار تغییرات آهنگ خوردگی با گذشت زمان برای فولاد A36-212

مقایسه نمونه‌های مستقر در آب دریاچه و آب مقطر نشان می‌دهد که آهنگ خوردگی نمونه‌های مزبور در آب مقطر تقریباً سه برابر آب دریاچه می‌باشد. دلیل این موضوع را می‌توان چنین توضیح داد که به دلیل وجود درصد بالایی از نمک و یونها در آب دریاچه ارومیه مقدار اکسیژن محلول در آن کمتر از آب مقطر می‌باشد. همچنین تشکیل رسوب پایدار سولفات کلسیم که توسط اشعه ایکس در پوششهای تشکیل شده بر روی نمونه‌های مستقر در آب دریاچه ارومیه تشخیص داده شده است و نیز اکسیدهای آهن باعث می‌شود تا

سطوح نمونه‌های فولادی از تماس مستقیم با محیط خورنده تا حدود زیادی محافظت شود. شکل ۵-۳ سطح نمونه‌های مزبور را در زیر میکروسکپ نشان می‌دهد. در این شکل بلورهای سفید رنگ نمک در زمینه‌ای از اکسیدهای آهن Fe_3O_4 ، Fe_2O_3 ، FeO مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۳ پوشش تشکیل شده بر روی نمونه‌ها (بزرگنمایی $200\times$)

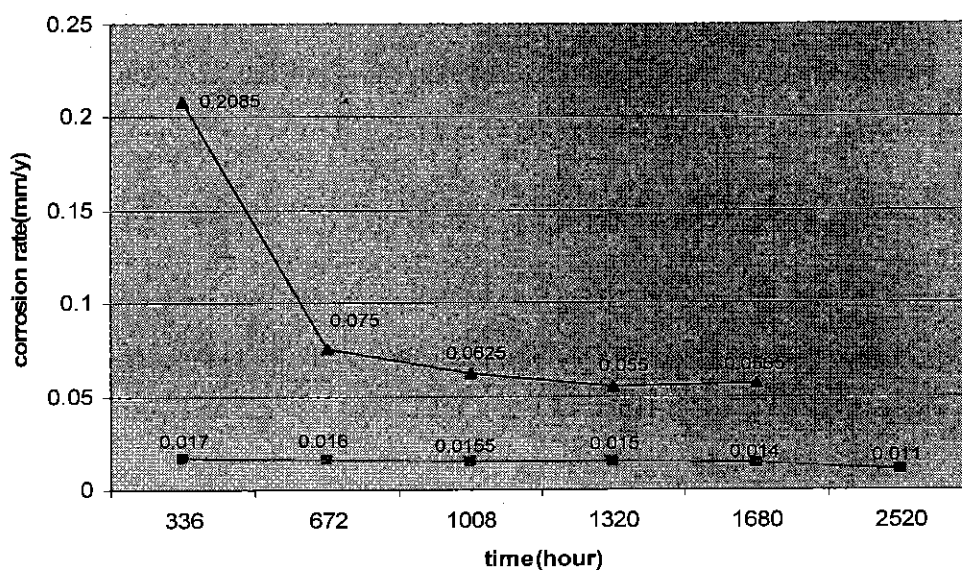
درحالی‌که سطوح قطعات مستقر در آب مقطر با تشکیل پوشش متخلخل و اسفنجی هیدروکسید آهن در حجم زیاد در تماس دائمی با محیط خورنده قرار دارند (شکل ۵-۳).



شکل ۵-۴ نمونه مستقر در آب مقطر

۵-۲-۲- شرایط طبیعی دریاچه

برای فولاد EN10225 در شرایط طبیعی آب دریاچه ارومیه، تغییرات در آهنگ خوردگی به مراتب (تقریباً پنج برابر) بیشتر از شرایط آزمایشگاه است (شکل ۵-۵). در مورد فولاد A36-212 به دلیل شرایط بد جوی نمونه‌های مستقر در دریا در شرایط تر و خشک قرار گرفته اند که این امر باعث افزایش بیشتر آهنگ خوردگی در شرایط طبیعی شده است.



شکل ۵-۵ نمودارهای تغییرات آهنگ خوردگی با گذشت زمان برای فولاد EN10225 در دریا (نمودار بالایی) و در آزمایشگاه (نمودار پایینی)

دلایل افزایش آهنگ خوردگی در شرایط طبیعی دریاچه نسبت به شرایط آزمایشگاهی را می‌توان در عوامل زیر دانست:

- نوسانات شدید دما در محیط دریاچه
- امواج آب دریاچه که دو اثر مهم دارد. اول با ایجاد خوردگی حبابی و نیز در اثر ضربات مکانیکی باعث تخریب پوشش ایجاد شده توسط محصولات خوردگی می‌گردد.
- جریان آب در دریاچه که با ایجاد خوردگی موضعی و خوردگی شیاری باعث افزایش آهنگ خوردگی می‌شود.
- پدیده بلوری شدن که با توجه به شکل ۵-۶ حجم بلورهای تشکیل شده نمک در آب دریا به مراتب بیشتر از آزمایشگاه است.



شکل ۵-۶ بلوری شدن نمک روی نمونه مستقر در دریاچه (راست) و نمونه‌های مستقر در آزمایشگاه

۵-۳- بررسی نتایج روش الکتروشیمیایی

با توجه به اینکه روش الکتروشیمیایی یکی از روشهای نوین در تجزیه و تحلیل خوردگی مواد می باشد، یک روش سریع محسوب می شود که زمان اندازه گیری فقط چند دقیقه طول می کشد. با این حال با توجه به داده‌های جداول ۹-۴ و ۱۰-۴ آهنگ خوردگی برای نمونه‌هایی که بیش از دو هفته در آب دریاچه استقرار یافته اند دارای خطای فاحشی می باشد، که علت این امر می تواند تشکیل غیر یکنواخت فیلم اکسیدها و رسوبات بر روی سطح نمونه باشد.

از طرف دیگر روش الکتریکی نسبت به روش کاهش وزن برای نمونه‌هایی که مدت زمان کوتاهی در معرض محیط خورنده قرار گرفته اند دقیقتر می باشد، زیرا تغییرات بسیار کوچک در کاهش جرم در این مدت باعث تغییرات زیاد در آهنگ خوردگی می شود.

۵-۴- نتیجه گیری

ساختار فولاد بکار رفته در ستونهای پل میانگذر شهید کلاتری یک ساختار با زمینه فریتی به همراه مقادیر کم پرلیت بوده و دارای سختی حدود ۱۱۰RB می باشد که مشخصات یک فولاد کربنی می باشد.

آهنگ خوردگی این فولاد در شرایط غوطه‌وری کامل در دریاچه ارومیه پس از سپری شدن حدود ۲۰۰۰ ساعت، ۰،۰۶ میلیمتر در سال محاسبه شد، که این مقدار در محدوده آهنگ خوردگی دریا‌های آزاد (۰،۰۵ - ۰،۰۵ mm/y) بوده [۱۷] و دو برابر مقدار پیش بینی شده [۷] می باشد.

5-5- پیشنهادات برای پروژه‌های آتی

با توجه به اینکه سازه‌های مورد استفاده در دریاچه ارومیه از جمله پل میانگذر در دست احداث برای استفاده در دراز مدت (حدود صد سال) طراحی شده‌اند [7]، بررسی و مطالعه موارد زیر در طراحی صحیح آن ضروری به نظر می‌رسد:

- روشهای متداول جلوگیری از خوردگی از جمله حفاظت کاتدی و استفاده از پوششهای مناسب ضروری بر روی ستونهای پل.
- فرایند خوردگی در بتن مسلح بکار رفته در ساخت این پل.
- بررسی تاثیر پدیده‌های نادری نظیر بلوری شدن و تغییرات دما در آب این دریاچه بر آهنگ خوردگی.
- بررسی تاثیر خوردگی توام با تنش و خوردگی موضعی توسط اختلاف دما بر ستونهای بکار رفته در ساخت پل.

منابع

- ۱- خوردگی و روشهای کنترل آن، تالیف: مهندس رجیم زمانیان، انتشارات دانشگاه تهران
- ۲- مهندسی خوردگی، تالیف: مارس. ج. فونتانا، ترجمه: دکتر احمد ساعتچی
- ۳- کنترل خوردگی در صنایع، تالیف: دکتر سید محمد سید رضی
- ۴- الکتروشیمی خوردگی، تالیف: دل. پیرون، ترجمه: دکتر محمد علی گل‌عذار
- ۵- خوردگی فلزات و جلوگیری از آن، ترجمه و تالیف: مهندس علیزاده طوسی
- ۶- مدیریت آبخیزداری جهاد سازندگی استان آذربایجان غربی و شرکت مهندسی مشاور جاماب ۱۳۶۷
- ۷- شرکت صنعتی و دریایی ایران (صدرا)
- ۸- مجموعه مقالات اولین سمپوزیوم سراسری خوردگی در صنایع ایران، اردیبهشت ۱۳۷۱، دانشگاه شیراز

- 9- Annual Book Of ASTM Standard, Metals Test Methods and Analytical Procedures, Volume 03.02, Water and Erosion; Metal Corrosion, 1986, D2776-79
- 10-Stahlschlüssel Autor C.W.Wegst
- 11-Gehring G.A. Seawater Corrosion, Materials Performance, NACE, Sep 1987
- 12-Dexter S.C. Seawater, Metals Handbook , Volume 13
- 13-Annual Book Of ASTM Standard, Metals Test Methods and Analytical Procedures, Volume 03.02, Water and Erosion; Metal Corrosion, 1986, G1
- 14-Annual Book Of ASTM Standard, Metals Test Methods and Analytical Procedures, Volume 03.02, Water and Erosion; Metal Corrosion, 1986, D2688-83
- 15-Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers, Einar Mattson
- 16-Pourlaix, M., Atlas of Electrochemical Equilibrium Aqueous Solutions. NACE, Houston, CEBELCOR, Brussels, 1974
- 17-Corrosion Uncertainty Modeling for Steel Structures, Robert E. Melchrs
- 18-Corrosion and Corrosion Control, An Introduction To Corrosion Science and Engineering, Herbert H. Uhlig
- 19-C. Chappel, J. Iron Steel Inst., 85, 270(1912)
- 20-C. Southwell and A. Alexander, Materials Prot., 9, 14(1970)
- 21-Korrosionsuntersuchungen im Bauwesen, Pro. Dr.Ing.P.Schiessl
- 22-Russell, and White, Ind. Chem., 19, 65(1927)
- 23-F. LaQue, in Corrosion Handbook, p.391

Abstract

Construction of the bridge on the Shahid Kalanteri highway will shorten the distance between the East Azerbaijan province and the West Azerbaijan province. In this project, the bridge is held through steel columns. Observation of the corrosion at ships and the columns of the previous bridge made it important to study this phenomenon in detail. This thesis has described the way of analysis of corrosion along with the results obtained according to ASTM standard. These experiments covered the weight loss and electrochemical methods. The laboratory experiments have shown that there is a high resistance against the corrosion of steel columns. However, natural environment circumstances have expedited corrosion process and affected the behavior of steel parts.



The analysis of corrosion process of
marine steels, A36-212 and EN10225
according to ASTM standard

Rahim Jafari Khushemehr

Department of mechanic engineering

March 2005

MS.Sc.Thesis

Supervisor: Dr M.Sabet