Danesh Aria
شرکت دانش آریا (سهامی خاص)

اطلس حفاظت کاتدی

گردآورنده : امیر اخلاقی شاد

Iranian Corrosion Association
انجمن خوردگی ایران

Danesh Aria
شرکت دانش آریا (سهامی خاص)

اطلس حفاظت کاتدی

گردآورنده : امیر اخلاقی شاد

Iranian Corrosion Association
انجمن خوردگی ایران

شرکت دانش آریا

مدیر عامل : امیر اخلاقی شاد

شرکت "دانش آریا " در زمینه سیستمهای حفاظت کاتدی و سیستمهای ارتینگ فعالیت می نماید، همچنین در راستای رسالت اجتماعی خود و ارتقا سطح دانش و مهارت صنعت حفاظت کاتدی، بر آن شدیم که وبینارهای تخصصی، عمومی، طراحی و آشنایی با محصولات حفاظت کاتدی را به صورت رایگان در سایت «شرکت دانش آریا» قرار دهیم. در همین زمینه بسیار مفتخریم که کتاب «اطلس حفاظت کاتدی» را نیز به صورت رایگان در اختیار عموم مشتاقان این علم، قرار داده ایم تا بتوانیم دست در دست هم به تعالی مهارت حفاظت کاتدی در کشور عزیزمان یاری رسانیم.

مقدمه

«شرکت دانش آریا» در زمینه سیستم‌های حفاظت کاتدی فعالیت می‌نماید و در راستای رسالت اجتماعی خود و ارتقا سطح دانش و مهارت حفاظت کاتدی، بر آن شدیم که وبینارهای تخصصی عمومی، طراحی، آشنایی با محصولات حفاظت کاتدی و... را به‌صورت رایگان در سایت «شرکت دانش آریا» قرار دهیم. در همین زمینه بسیار مفتخریم که کتاب «اطلس حفاظت کاتدی» را نیز به‌صورت رایگان در اختیار عموم مشتاقان این علم، قرار دهیم تا بتوانیم دست‌دردست هم به تعالی مهارت حفاظت کاتدی در کشور عزیزمان منجر گردد.

تألیف و گردآوری این کتاب قریب به دو سال با تلاش شبانه‌روزی و دقت در انتخاب مطالب و عناوین توسط تیم مربوطه به درازا کشید و در این کتاب سعی بر آن شده که به همراه خواننده از علوم پایه مربوط به حفاظت کاتدی، شروع به توضیح نموده و مخاطب بر اساس نیاز تا سطح طراحی سامانه‌های حفاظت کاتدی بر اساس استاندارد NACE نیز پیشرفت داشته باشد. کتاب پیش‌رو کتابی کاربردی و تخصصی مخصوص کارشناسان، دانشجویان، علاقه‌مندان حفاظت کاتدی و دیگر مخاطبان علاقه‌مند به حوزه حفاظت کاتدی می‌باشد که در قسمت پیشگفتار به‌صورت کامل عناوین فصول ارائه شده، اشاره گردیده است.

و در انتها از تمامی کسانی که این کتاب را مطالعه می‌نمایند خواهشمندیم نظرات خود را برای بهبود مستمر مطالب این کتاب به این شرکت ارسال نمایند.

پیشگفتار

اغلب افراد با مفهوم زنگ‌زدن، خصوصاً در رابطه با قطعات آهنی ناآشنا نیستند؛ مفهومی که در بیان علمی «خوردگی» نام دارد. با وجودی که خوردگی به‌ظاهر، اتفاقی دم‌دستی است، اما در عمل، زیان هنگفتی را بر اقتصاد، چه به‌صورت مستقیم و چه غیرمستقیم وارد می‌کند. اطلاعات موجود از برآورد ارقام سرسام‌آوری خبر می‌دهد که این پدیده، بر اقتصاد ایران تحمیل می‌کند. هرچند طبق برآوردها، زیان ناشی از خوردگی در ایران، حداقل ۱۲ تا ۱۵ درصد تولید ناخالص داخلی است، با وجود این، اگر فرض کنید که زیان ناشی از خوردگی در ایران، فقط پنج درصد تولید ناخالص داخلی باشد، سالانه کشور ما عدد زیادی به علت کم توجهی، زیان اقتصادی در زمینه خوردگی می‌بیند. لذا از پارس جنوبی برای قیاس کمک می‌گیریم، برای مثال هر فاز پارس جنوبی حدود یک درصد به تولید ناخالص داخلی ما اضافه می‌کند. با اعداد و ارقامی که اشاره شد، مثل این می‌ماند که پنج فاز پارس جنوبی را تعطیل کنیم، چون هرچه تولید می‌کنند عملاً به‌وسیله خوردگی تباه و مضمحل می‌شود. اگر خوب کار کنیم شاید تا ۳۰ درصد بتوان جلوی این ضرر را گرفت، چون این یک واکنش طبیعی است و نمی‌توان صددرصد مهارش کرد و پیش‌بینی می‌شود میزان سرمایه‌گذاری برای مهار خوردگی حداقل باید در کشور، ۱۰ برابر میزان فعلی گردد که در مقایسه با خسارت ایجاد شده از عدم هزینه، عدد بسیار ناچیزی است. مثال دیگر می‌توان در اکثر سازه‌های بتنی نزدیک دریا به‌وسیله سیستم حفاظت کاتدی از خوردگی میلگردهای میانی جلوگیری کرد و عمر یک سازه بتنی را دو برابر بالا برد، در همین خصوص تصور کنید که با حداکثر یک درصد از هزینه اجرای بتن‌ریزی در یک اسکله یا بندر می‌توانید عمر آن را دوبرابر نمایید و تأسیساتی که روی آن قرار می‌گیرند نیز به همان نسبت بیشتر کار کنند. لذا این موضوع می‌تواند به نگهداشت سرمایه‌های ملی نیز کمک شایانی نماید. ازاین‌رو، بعنوان متخصص خوردگی، خطاب به مدیران هشدار می‌دهم خوردگی، به‌ویژه در مقوله‌های حساسی مانند لوله گاز، لوله نفت، سازه‌های دریایی، مخازن نگهدارنده نفت و...، مانند بمب ساعتی است و باید هرچه زودتر، برای کنترل هرچه بیشتر آن وارد عمل شد.

خوردگی را می‌توان به طور خلاصه تخریب و انهدام فلزات در اثر عوامل محیطی تعریف نمود. مطابق قوانین ترمودینامیک، هیچ عاملی نمی‌تواند به‌صورت کامل مانع انجام فرایند خوردگی گردد. به همین دلیل می‌توان از روش‌هایی در خصوص تعویق یا کاهش نرخ خوردگی استفاده نمود که به نام مهندسی خوردگی شناخته می‌شود. در واقع، نقش مهندس خوردگی کاهش نرخ خوردگی سازه‌های در تماس با الکترولیت می‌باشد.

روش‌های جلوگیری از خوردگی چیست؟

روش‌های جلوگیری از خوردگی متنوع بوده ولی مهم‌ترین آنها عبارتند از انتخاب مواد مناسب، پوشش دهی یا عایق‌کاری، استفاده از ممانعت‌کننده‌ها، سیستم‌های حفاظت کاتدی وآندی و... می‌باشد که هرکدام از این موارد دنیایی از استاندارد، علم و مهارت بوده، که می‌بایست هرکدام توسط متخصصان آن حوزه مورد بررسی قرار گیرد.

در این کتاب، روش حفاظت کاتدی را بیشتر توضیح می‌دهیم:

حفاظت کاتدی چیست؟ به‌عنوان یکی از بهترین و مؤثرترین روش‌های حفاظت از خوردگی می‌باشد. در این روش سازه مورد حفاظت، کاتد می‌شود. در دانش الکتروشیمیایی، آند خورده می‌شود و کاتد محافظت می‌گردد لذا جهت جلوگیری از خوردگی سازه‌ها، از سیستم‌های حفاظت کاتدی استفاده می‌گردد.

حفاظت کاتدی عبارت است از جلوگیری یا کاهش سرعت خوردگی فلزات توسط اعمال یک جریان الکتریکی خارجی DCیا تماس آن با یک آند فداشونده، بر روی سطح فلز مورد نظر (در مناطق آندی خوردگی صورت می‌گیرد و در مناطق کاتدی حفاظت صورت می‌گیرد).

عملیات حفاظت کاتدی را می‌توان در مورد خوردگی فلزاتی از قبیل فولاد، مس، سرب، و برنج و... در زمین (خاک) و محلول‌های مختلف آبی به کار برد. به کمک حفاظت کاتدی می‌توان از خوردگی حفره‌ای فلزات روئین از جمله فولادهای ضدزنگ جلوگیری نمود.

دو نوع سیستم حفاظت کاتدیک به‌وسیله آندهای فداشونده (آلومینیم، منیزیم، روی) و دیگری سیستم حفاظت کاتدیک به روش آندهای تزریق جریان (آند چدنی پر سیلیس یا سیلیکونی، آند MMO و...) وجود دارد.

در کتاب «اطلس حفاظت کاتدی» سعی بر آن شده است از ابتدایی‌ترین موارد و مطالب مورد نیاز در صنعت حفاظت کاتدی اشاره گردد و در انتها نیز موارد پیشرفته از جمله طراحی سامانه‌های حفاظت کاتدی بر اساس استاندارد NACE نیز آورده شده است.

عناوین مربوط به فصول کتاب اطلس حفاظت کاتدی به شرح زیر است:

فصل یک: مقدمه و نقشه راه

فصل دو: خوردگی

فصل سه: مبانی الکتروشیمیایی خوردگی در حفاظت کاتدی

فصل چهار: سیستم حفاظت کاتدی

فصل پنج: سیستم حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده

فصل شش: سیستم حفاظت کاتدی به‌وسیله آند تزریق جریان

فصل هفت: تجهیزات سیستم حفاظت کاتدی

فصل هشت: طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی

فصل نه: طراحی عملی سیستم‌های حفاظت کاتدی با ذکر مثال

این کتاب با حمایت «شرکت دانش آریا» گردآوری گردیده است، لذا «شرکت دانش آریا» ضمن اعلام آمادگی جهت تأمین و تولید تمامی محصولات حفاظت کاتدی از جمله انواع آندهای فداشونده (آلومینیم، روی و منیزیم)، آندهای تزریق جریان (MMO و HSCI)، کابل کاینار، اسپارک گپ و دیگر ملزومات حفاظت کاتدی که منطبق بر بالاترین کیفیت مورد پذیرش استانداردهای روز دنیا می‌باشد، به استحضار می‌رساند که در راستای رسالت اجتماعی خود با همت «شرکت دانش آریا» به‌صورت رایگان حدود یک‌صد وبینار آموزشی در زمینه خوردگی فلزات، سیستم‌های حفاظت کاتدی، عیب‌یابی سیستم

حفاظت کاتدی، مشاوره و طراحی حفاظت کاتدی و همچنین آشنایی با تجهیزات، استانداردها و نحوه بازرسی و تست عملکرد آنها، در بستر سایت www.danesharia.com و در سایت آپارات و یوتیوب بارگذاری می‌گردد تا مورد استفاده فعالان این صنعت قرار گیرد.

گردآوری این کتاب نیز در همین زمینه بوده و بعد از چاپ، در فضای مجازی به‌صورت کاملاً رایگان بارگذاری می‌گردد و در اختیار عموم علاقه‌مندان قرار خواهد گرفت.

فهرست مطالب

فصل اول **۱**

نقشه راه خوردگی و حفاظت کاتدی **۱**

هزینه‌های خوردگی ۱

مهندسی خوردگی ۱

تعریف خوردگی ۲

محیط‌های خورنده ۳

خسارت ناشی از خوردگی ۳

طبقه‌بندی خوردگی ۶

دورنمای آینده ۶

روش‌های جلوگیری از خوردگی **۷**

انتخاب مواد ۷

فلزات و آلیاژها ۷

خالص کردن فلز ۹

غیرفلزات ۹

تغییر محیط خورنده ۱۰

کاربرد ممانعت‌کننده ۱۱

جدول ۱ - ۱ لیست مراجع ممانعت‌کننده‌های خوردگی ۱۳

طراحی ۲۰

ضخامت دیواره ۲۰

قوانین طراحی ۲۱

حفاظت کاتدی و حفاظت آندی ۲۳

حفاظت کاتدی ۲۳

جدول ۱-۲ جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی فولاد ۲۶

نگهداری سیستم حفاظت کاتدی ۳۰
حفاظت آندی ۳۰
مقایسه حفاظت کاتدی و آندی ۳۲
پوشش‌ها ۳۴
پوشش‌های فلزی و پوشش‌های غیرآلی دیگر ۳۴
پوشش‌های آلی ۳۸
استانداردهای کنترل خوردگی ۴۳
فصل دوم ۴۵
خوردگی ۴۵
اصول خوردگی ۴۵
مقدمه ۴۵
روش‌های بیان سرعت خوردگی ۴۶
جنبه‌های الکتروشیمیایی خوردگی ۴۷
واکنش‌های الکتروشیمیایی ۴۷
پولاریزاسیون ۵۲
روئین شدن یا غیرفعال شدن ۵۴
اثرات یا فاکتورهای محیطی ۵۶
اثر اکسیژن و اکسیدکننده‌ها ۵۶
اثرات سرعت خوردگی ۵۷
اثر درجه حرارت ۵۹
اثرات غلظت محیط خورنده ۵۹
اثر اتصال گالوانیکی ۶۰
جنبه‌های متالورژیکی ۶۱
خواص فلزی ۶۱
ملاحظات اقتصادی ۶۴
اهمیت بازرسی ۶۹

انواع خوردگی ۷۰
خوردگی یکنواخت ۷۱
خوردگی گالوانیک یا دو فلزی ۷۲
نیروی الکتروموتوری (EMF) و سری گالوانیک ۷۳
اثرات محیط ۷۶
اثر فاصله دو الکترود ۷۷
اثر سطح ۷۸
جلوگیری ۸۰
کاربردهای مفید ۸۱
خوردگی‌های مهم در مبحث کاتدی ۸۲
خوردگی یکنواخت ۸۲
خوردگی غلظتی ۸۳
خوردگی پیل غلظتی ۸۳
خوردگی گالوانیک ۸۶
خوردگی جریان سرگردان ۸۷
ترمودینامیک خوردگی ۹۰
انرژی آزاد گیبس ΔG ۹۱
پسیو شدن ۹۲
دیاگرام‌های پوربه ۹۳
ناحیه ایمن ۹۵
نواحی خوردگی ۹۵
ناحیه پسیو ۹۵
تعادل خوردگی و جذب‌ها ۹۵
پیل‌های خوردگی غلظتی ۹۷
پلاریزاسیون ۹۹
پلاریزاسیون اکتیواسیون ۱۰۰

پلاریزاسیون غلظتی ۱۰۰
پلاریزاسیون اهمی ۱۰۰
نمودارهای پلاریزاسیون ۱۰۱
نرخ خوردگی ۱۰۲
سرعت خوردگی ۱۰۵
تأثیرات الکتریکی بر سرعت خوردگی ۱۰۵
مقاومت ویژه الکترولیت ۱۰۵
مقاومت تماسی ۱۰۵
پوشش سازه ۱۰۵
قطبی‌شدن سازه ۱۰۶
مقدار جریان ۱۰۶
دما ۱۰۶
غلظت یون ۱۰۶
غلظت الکترون ۱۰۷
الکترولیت ۱۰۷
پلاریزاسیون سازه ۱۰۷
عوامل مؤثر بر خوردگی ۱۰۷
ماهیت فلز ۱۰۷
خلوص فلز ۱۰۸
حالت فیزیکی فلز ۱۰۸
پسیو شدن ۱۰۸
ماهیت محصول خوردگی ۱۰۸
ماهیت فیلم اکسیدی ۱۰۹
ماهیت محیط خورنده ۱۰۹
خوردگی مواد ۱۱۰
فرسودگی یا خوردگی مواد سرامیکی ۱۱۰

فرسودگی یا پوسیدگی پلیمرها ۱۱۱
خوردگی یا فرسودگی فلزات ۱۱۱
آهن، فولاد و فولاد ضدزنگ ۱۱۲
آلومینیم و آلیاژهای آن ۱۱۶
منیزیم و آلیاژهای آن ۱۱۸
مس و آلیاژهای آن ۱۱۹
نیکل و آلیاژهای آن ۱۱۹
تیتانیم و آلیاژهای آن ۱۲۰
سرب و آلیاژهای آن ۱۲۰
خوردگی آلیاژهای کامپوزیتی (برای مثال قوطی قلع) ۱۲۰
پیشگیری و محافظت از خوردگی **۱۲۱**
طراحی مناسب ۱۲۲
انتخاب مواد ۱۲۳
خلوص مواد شیمیایی در محیط ۱۲۳
غلظت الکترولیت ۱۲۴
ماهیت الکترولیت ۱۲۴
اثر محصولات خوردگی ۱۲۴
تغییرات دمایی ۱۲۴
حضور اکسیژن ۱۲۴
پیل‌های غلظتی اکسیژن ۱۲۴
اثرات تداخل ۱۲۵
پوشش‌های حفاظتی ۱۲۵
فیلم‌های اکسیدی محافظ و پسیو شدن ۱۲۶
پوشش‌های حاوی فلزات، آلیاژها یا مواد رسانا ۱۲۷
پوشش‌های حاوی مواد غیرآلی نارسانا ۱۳۰
پوشش‌های حاوی مواد آلی نارسانا ۱۳۲

تغییر عوامل محیطی تسریع‌کننده خوردگی ۱۳۲
بازدارنده‌ها ۱۳۳
حذف رفتار گالوانیک ۱۳۷
تغییر دادن مشخصه‌های الکتروشیمیایی سطح فلز ۱۳۷
حفاظت کاتدی ۱۳۷
حفاظت آندی ۱۳۷
فصل سوم **۱۴۰**
مبانی الکتروشیمیایی خوردگی در حفاظت کاتدی **۱۴۰**
فرایند خوردگی در حفاظت کاتدی **۱۴۰**
پیل خوردگی در حفاظت کاتدی **۱۴۰**
آند ۱۴۰
کاتد ۱۴۰
رابطه آند/کاتد ۱۴۱
الکترولیت ۱۴۱
مسیر فلزی ۱۴۱
..... ۱۴۱
پیل خوردگی ۱۴۲
واکنش آندی ۱۴۲
واکنش کاتدی ۱۴۲
سایر واکنش‌های کاتدی ۱۴۳
سری‌های گالوانیکی ۱۴۳
مقدمه‌ای بر حفاظت کاتدی: ۱۴۴
فصل چهارم **۱۴۶**
حفاظت کاتدی **۱۴۶**
سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده **۱۴۷**

سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان ۱۴۷
جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی ۱۴۹
اثر پوشش بر حفاظت کاتدی ۱۵۰
اثر غیر فعال شدن بر حفاظت کاتدی ۱۵۰
معیارهای حفاظت کاتدی ۱۵۱
مقدمه ۱۵۱
معیار الکتریکی ۱۵۱
معیار پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت ۱۵۲
استاندارد انجمن ملی مهندسین آمریکا (NACE) شماره RP-01-69 ..... ۱۵۲
معیار برای حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی و چدنی ۱۵۲
معیار حفاظت برای آلومینیم ۱۵۳
معیار حفاظت برای مس ۱۵۳
معیار حفاظت برای سازه‌های تشکیل شده از فلزات غیرهمجنس ۱۵۳
معیار حفاظت برای سرب ۱۵۳
آنالیز نرخ تخریب ۱۵۴
تجهیزات آزمایشگاهی غیرمخرب ۱۵۴
آنالیزهای چشمی ۱۵۴
عواقب حفاظت ناکافی و زیر حد مجاز ۱۵۵
عواقب اعمال حفاظت اضافی ۱۵۵
کنده شدن پوشش‌های محافظ ۱۵۵
تردی هیدروژنی ۱۵۶
سامانه‌های حفاظت کاتدی خودکار، معیارهای حفاظت کاتدی آهن ۱۵۶
معیارهای حفاظت کاتدی آهن ۱۵۶
معیار ۸۵۰- mV ۱۵۶
معیار جابه‌جایی پتانسیل ۳۰۰ mV ۱۵۶
معیار جابه‌جایی قطبش پتانسیل ۱۰۰ mV ۱۵۷

نقطه آغاز ناحیه تافل ۱۵۷
قابلیت اطمینان معیار حفاظت کاتدی ۱۵۷
اثرات تداخل سامانه‌های حفاظت کاتدی ۱۵۸
تداخل آندی ۱۵۸
تداخل کاتدی ۱۵۹
موارد تداخل ویژه ۱۶۰
معیارهای پروژه‌های حفاظت کاتدی ۱۶۳
هزینه‌های حفاظت کاتدی ۱۶۳
مقایسه سامانه‌های حفاظت کاتدی ۱۶۴
نقشه‌برداری و اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک ۱۶۶
واحدهای مقاومت ویژه خاک ۱۶۶
تعیین مقاومت ویژه به‌وسیله دو میل ۱۶۷
تعیین مقاومت ویژه به روش چهار میل ۱۶۸
روش‌های دیگر ۱۷۱
تعیین مکان «نقاط داغ» بر خطوط لوله بدون پوشش ۱۷۱
نقشه‌هایی برای بستر زمین ۱۷۳
نقشه‌های منطقه ۱۷۴
محدوده‌های لگاریتمی مقاومت ویژه ۱۷۵
خلاصه مقاومت ویژه خاک ۱۷۶
نقشه‌برداری و اندازه‌گیری پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت ۱۷۸
ولت‌سنج ۱۷۹
پتانسیومتر با مقاومت متغیر ۱۸۰
پتانسیومتر- ولت‌سنج ۱۸۱
ولت‌سنج لوله خلاء ۱۸۲
ابزار اندازه‌گیری چندگانه ۱۸۳
پتانسیل‌متر الکترونیک ۱۸۳

جای‌گذاری الکترود ۱۸۴
اتصال خط لوله ۱۸۵
نقشه‌برداری پتانسیل خطی برای خوردگی ۱۸۶
پتانسیل لوله نسبت به خاک به‌عنوان معیار حفاظت کاتدی ۱۸۸
سایر کاربردهای پتانسیل لوله نسبت به خاک ۱۸۹
معیارهای دیگر ۱۸۹
خلاصه ۱۸۹
الکترولیز جریان سرگردان ۱۹۰
خوردگی جریان سرگردان ۱۹۰
منابع جریانهای سرگردان ۱۹۰
آشکارسازی جریان سرگردان ۱۹۲
اندازه‌گیری‌های اصلاحی ۱۹۲
اتصال ترمینال منفی ۱۹۳
مناطق در معرض ۱۹۳
نقشههای پتانسیل ۱۹۴
تماس ثانویه ۱۹۵
خلاصه ۱۹۵
تداخل در حفاظت کاتدی ۱۹۶
مشکل ۱۹۶
راه حل‌های اساسی ۱۹۶
طراحی ۱۹۷
اتصالات متقاطع ۱۹۷
محاسبه مقاومت اتصال ۲۰۰
اتصالات چندتایی ۲۰۲
زهکشی کمکی ۲۰۳
خطوط موازی ۲۰۴

تداخل در جریان شعاعی ۲۰۴
خطوط خارجی با اتصالات عایق ۲۰۴
خلاصه ۲۰۶
انواع بسترهای حفاظت کاتدی تزریق جریان ۲۰۶
سیستم‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان از راه دور عمودی ۲۰۶
سیستم‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان از راه دور افقی ۲۰۷
سیستم‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان توزیع شده ۲۰۷
سیستم‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان از راه دور عمقی ۲۰۸
اندازه‌گیری جریان مستقیم DC ۲۰۹
مقدمه ۲۰۹
ابزارها و تجهیزات ۲۰۹
نکات لازم ۲۰۹
روش‌های اندازه‌گیری جریان خط لوله ۲۱۰
الف- آمپرسنج DC گیره‌ای ۲۱۰
ب- پل جریان خط لوله ۲۱۱
تداخل جریان سرگردان DC ۲۱۹
مقدمه ۲۱۹
ابزارها و تجهیزات ۲۲۲
تست جریان سرگردان DC پس از حذف آن ۲۳۰
الف- باندها: ۲۳۰
ب- آندهای فداشونده: ۲۳۱
ج- حفاظت کاتدی اضافی: ۲۳۲
د- پوشش‌دهی مجدد نواحی ورود جریان: ۲۳۲
ه- نصب عایق‌های الکتریکی اضافی: ۲۳۲
و- باندهای جریان تحمیلی: ۲۳۳
تداخل دینامیک ۲۳۶
جریان سرگردان تلوریک (طبیعی) ۲۳۶

جریان سرگردان دینامیک ناشی از یک منبع ایستای انسانی ۲۳۶
تداخل دینامیک ناشی از یک منبع متحرک انسانی ۲۳۶
جریان زمین (earth) ۲۳۷
ارزیابی برای تنظیم ۲۳۷
مقدمه ۲۳۷
ابزارها و تجهیزات ۲۳۷
نکات مقدماتی ۲۳۸
دستورالعمل‌ها ۲۳۸
اطلاعات مورد نیاز قبل از انجام ارزیابی تنظیمی ۲۳۸
منبع جریان مستقیم DC ۲۳۹
پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت ۲۴۰
تست‌های جریان سرگردان DC (تداخل) ۲۴۳
بررسی دلایل ناکافی بودن حفاظت کاتدی ۲۴۴
اندازه‌گیری جریان خط لوله ۲۴۴
ولتاژ AC در سازه‌ها ۲۴۴
آنالیز ۲۴۵
معیارهای حفاظت کاتدی ۲۴۵
پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت ۲۴۸
جریان سرگردان دینامیک ۲۴۹
قطع منبع جریان DC ۲۵۰
اندازه‌گیری جریان خط لوله ۲۵۰
راندمان رکتیفایر ۲۵۰
ارزیابی برای راه‌اندازی ۲۵۰
مقدمه ۲۵۰
ابزارها و تجهیزات ۲۵۰
دستورالعمل ۲۵۱
آنالیز ۲۶۰

فصل پنجم ..... **Error! Bookmark not defined.**
سیستم حفاظت کاتدی به‌وسیله آند فداشونده **۲۶۸**
پتانسیل‌های آندی و قطبش آندی **۲۶۸**
جریان الکتریکی مورد نیاز حفاظت کاتدی گالوانیک **۲۶۹**
ظرفیت جریان آندی و بازدهی جریان آندی **۲۶۹**
عمر یک آند **۲۷۰**
حداقل تعداد آندهای گالوانیکی **۲۷۰**
آندهای گالوانیکی (آند فداشونده) مورد استفاده رایج **۲۷۰**
آندهای منیزیم **۲۷۲**
آندهای روی **۲۷۳**
آندهای آلومینیم **۲۷۴**
اندازه‌گیری عملکرد آندهای گالوانیک **۲۷۵**
ترکیب شیمیایی **۲۷۶**
دوام مکانیکی **۲۷۶**
مقاومت الکتریکی **۲۷۶**
آزمون‌های الکتروشیمیایی **۲۷۶**
۱. روش گالوانواستاتیک **۲۷۶**
۲. روش خروجی جریان آزاد **۲۷۷**
بسترهای آند گالوانیک **۲۷۷**
مواد پرکننده بستر آندی **۲۷۸**
مقاومت بستر آندی **۲۷۸**
پروژه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده **۲۸۰**
نگهداری و تعمیرات سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده **۲۸۰**
پتانسیل خط لوله/زمین پایه **۲۸۱**
کاهش تولید جریان آندی **۲۸۱**
فصل ششم **۲۸۲**

سیستم حفاظت کاتدی به‌وسیله آند تزریق جریان ۲۸۲
دستگاه ترانس رکتیفایر □□□ ۲۸۲
بازده دستگاه ترانس رکتیفایر T/R ۲۸۳
دستگاه ترانس رکتیفایر T/R با پتانسیل ثابت ۲۸۳
نصب دستگاه ترانس رکتیفایر T/R ۲۸۴
مشخصات فنی دستگاه ترانس رکتیفایر T/R ۲۸۴
انواع آندهای تزریق جریان ۲۸۵
آندهای گرافیتی..... ۲۸۵
آند آهن - سیلیکون ۲۸۶
آندهای سرب – نقره ۲۸۶
آندهای تیتانیوم با پوششی از پلاتین..... ۲۸۷
آندهای تیتانیوم با پوششی از اکسیدهای فلزی (MMO ANODE) ۲۸۷
مقاومت بستر آندی ۲۸۸
انواع بستر آندی ۲۸۹
سطح مقطع کابل ۲۹۱
پروژه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان ۲۹۱
تعمیر و نگهداری سامانه حفاظت کاتدی به روش تزریق جریان ۲۹۳
اندازه‌گیری دوره‌ای و کنترل‌های کل سیستم ۲۹۳
اندازه‌گیری‌های دوره‌ای و کنترل‌های دستگاه ترانس رکتیفایر T/R ۲۹۴
مشکلات معمول ۲۹۴
فصل هفتم ۲۹۶
تجهیزات حفاظت کاتدی و دیتاشیت‌ها ۲۹۶
آندهای فداشونده ۲۹۶
آند فداشونده آلومینیم..... ۲۹۶
انواع آند فداشونده آلومینیم..... ۲۹۸
آند فداشونده منیزیم ۲۹۹

انواع آند فداشونده منیزیم ۳۰۱
آند فداشونده روی ۳۰۱
انواع آند فداشونده روی ۳۰۴
آندهای تزریق جریان **۳۰۴**
آند سیلیکونی یا HSCI Anode: ۳۰۵
آندهای میکس متال اکساید یا (MMO) ۳۰۷
ساختار میکروسکوپی پوشش آندهایMMO ۳۰۸
انواع آندهای میکس متال اکساید یا MMO: ۳۰۹
شکل ۷-۳ ..... ۳۱۰
آند MMO وایری ۳۱۰
آند MMO نواری ۳۱۱
نوارهای تیتانیومی ۳۱۲
ترانسفورمر رکتیفایر ۳۱۳
ترانسفورماتور ۳۱۵
شکل ۷-۹ ..... ۳۲۲
سیستم‌های کنترل و پایش از راه دور حفاظت کاتدی ۳۲۲
لوازم جانبی سیستم حفاظت کاتدی ۳۲۵
الکترودهای مرجع ۳۲۵
الکترود مرجع مس/سولفات مس ۳۲۵
الکترود مرجع نقره/کلرید نقره ۳۲۶
الکترود مرجع روی/ سولفات روی ۳۲۷
شکل ۷-۱۳ ..... ۳۲۷
کابل مقاوم به کلر (کاینار) یا (HMWPE/PVDF) ۳۲۷
تست باکس و نشانگر ۳۳۱
پشتبند در سیستم آندهای فداشونده ۳۳۴
پلاریزیشن سل ۳۳۴

PCR ۳۳۵
مفصل‌های رزینی ۳۳۶
شکل ۷-۱۹ ..... ۳۳۷
کیت عایقی ۳۳۷
Spark Gap ۳۳۹
فصل هشتم **۳۴۱**
طراحی حفاظت کاتدی **۳۴۱**
اصول طراحی حفاظت کاتدی **۳۴۱**
روش‌های طراحی عمومی ۳۴۱
نقشه‌ها و مشخصات ۳۴۱
نقشه‌ها و مشخصات سازه تحت حفاظت ۳۴۲
نقشه‌های مربوط به محل ۳۴۲
بازرسی‌های میدانی ۳۴۲
آنالیز شیمیایی از محیط ۳۴۲
مشخصات خاک ۳۴۲
اصول روش طراحی برای سیستم آندهای فداشونده **۳۴۶**
اصول طراحی سیستم حفاظت کاتدی اعمال جریان **۳۴۸**
مفاهیم حفاظت کاتدی در طراحی **۳۵۹**
انرژی ۳۶۰
قطبیت و قرارداد علائم ۳۶۳
معیارها، نگهداری و مدیریت حفاظت کاتدی ۳۷۴
سایر معیارها ۳۸۴
عوامل تأثیرگذار بر طراحی حفاظت کاتدی **۳۹۰**
عوامل محیطی ۳۹۱
رطوبت ۳۹۱

بافت خاک ۳۹۱
pH ۳۹۱
دما ۳۹۲
حرکت ۳۹۳
فعالیت‌های میکروبیولوژیک ۳۹۴
سازه ۳۹۵
موقعیت الکتروشیمیایی ۳۹۵
حساسیت به خسارت هیدروژنی ۳۹۷
فلزهای آمفوتر ۳۹۹
تأثیر ترکیبی مواد و محیط ۴۰۰
خلاصه‌ای از اثر یکپارچگی الکتریکی بر طراحی حفاظت کاتدی ۴۰۳
عوامل طراحی و محاسبات سیستم حفاظت کاتدی ۴۱۰
نکات احتیاطی برای طراحی حفاظت کاتدی ۴۳۲
طراحی سیستم اعمال جریان حفاظت کاتدی ۴۴۲
طراحی سیستم فداشونده حفاظت کاتدی ۴۹۲
مواد آند فداشونده ۴۹۸
فصل نهم **۵۱۳**
طراحی عملی سیستم حفاظت کاتدی با ذکر مثال **۵۱۳**
طراحی سیستم حفاظت کاتدی در بتن **۵۱۳**
مثال عملی طراحی دوره NACE برای آرماتورهای فولادی در سازه‌های بتنی ۵۱۷
مثال ۵۲۵
طراحی سیستم حفاظت کاتدی خطوط لوله ۵۳۴
مثال عملی طراحی دوره NACE برای خطوط لوله انتقال ۵۴۲
فولاد بدون پوشش/یک‌سوکننده/آندهای توزیع شده ۵۵۷
آزمون‌ها پس از ساخت ۵۶۰
فولاد پوشش‌دار/یک‌سوکننده/آندهای عمیق ۵۶۲

فولاد پوشش‌دار/آندهای توزیع شده منیزیمی ۵۶۹
آندهای توزیع شده/منیزیم/چدن ۵۷۵
فولاد پوشش‌دار/یک‌سوکننده/بسترهای آندی متداول ۵۷۹
حفاظت کاتدی مخازن ذخیره ۵۸۴
خوردگی و حفاظت کاتدی سطوح داخلی مخازن ذخیره نفت خام و موادنفتی ۵۸۴
ذخیره نفت خام و موادنفتی ۵۸۴
مثال عملی طراحی دوره NACE برای حفاظت کاتدی مخازن زیرزمینی ذخیره نفت خام و مواد نفتی ۵۸۹
مثال عملی طراحی دوره NACE برای حفاظت کاتدی سطوح خارجی مخازن ذخیره نفت خام و مواد نفتی ۵۹۷
مثال‌های طراحی کف مخازن ذخیره‌سازی روزمینی ۵۹۷
مثال عملی طراحی دوره NACE برای حفاظت کاتدی لوله‌های جداره چاه ۶۱۰
مثال‌های طراحی لوله‌های جداره چاه ۶۱۰
مثال عملی طراحی دوره NACE برای حفاظت کاتدی سازه‌های دریایی و دور از ساحل ۶۲۷
مثال‌های طراحی برای کاربردهای دریایی و دور از ساحل ۶۲۷
مثال عملی طراحی دوره NACE برای حفاظت کاتدی مخازن آب، کندانسورهای سطحی و غلیظ‌کننده‌ها ۶۴۹
مثال‌های طراحی برای مخازن آب، کندانسورهای سطحی و غلیظ‌کننده‌ها ۶۴۹
حفاظت کاتدی کشتی‌ها و شناورها ۶۸۴
منابع ۷۸۴

فصل اول

نقشه راه خوردگی و حفاظت کاتدی

هزینه‌های خوردگی

تخمین‌های هزینه‌های سالانه خوردگی ایالات متحده بین ۸ بیلیون دلار تا ۱۲۶ بیلیون دلار است که ۳۰ بیلیون دلار واقعی‌ترین رقم است. به هر ترتیب، خوردگی زیان اقتصادی عظیمی است و برای کاهش دادن به آن کارهای زیادی می‌توان انجام داد. اگر این نکته را در نظر بگیریم که هرجا فلز و مواد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند خوردگی با درجه و شدت‌های متفاوتی واقع می‌گردد، این رقم‌های بزرگ دلاری چندان غیرمنتظره نخواهند بود.

در حقیقت، اگر خوردگی وجود نداشت، اقتصاد جامعه ما به‌شدت تغییر می‌کرد. مثلاً اتومبیل‌ها، کشتی‌ها، خطوط لوله‌های زیرزمینی و وسایل خانگی احتیاج به پوشش نداشتند، صنایع فولاد زنگ نزن از بین می‌رفتند و مس فقط برای مقاصد الکتریکی به کار می‌رفت. اکثر کارخانجات و محصولاتی که از فلز ساخته می‌شوند از فولاد یا چدن ساخته می‌شدند.

اگرچه خوردگی اجتناب‌ناپذیر است، ولی هزینه آن را به مقدار زیادی می‌توان کاهش داد. مثلاً یک آند ارزان قیمت منیزیم می‌تواند عمر تانک آبگرم خانگی را دو برابر کند. شست‌وشوی اتومبیل برای زدودن نمک‌هایی مفید است که برای یخبندان روی جاده می‌پاشند. انتخاب صحیح مواد و طراحی خوب، هزینه‌های خوردگی را کاهش می‌دهد. یک برنامه صحیح تعمیرات و نگهداری رنگ چندین برابر مخارجش را صرفه‌جویی می‌کند. اینجاست که مهندسی خوردگی وارد صحنه می‌شود و می‌تواند مؤثر باشد- مأموریت اصلی او مبارزه با خوردگی است.

جدا از مخارج مستقیم دلاری، خوردگی یک مشکل جدی است زیرا به طور روشنی باعث تمام شدن منابع طبیعی ما می‌گردد. مثلاً فولاد از سنگ‌آهن به دست می‌آید، و میزان تولید داخلی سنگ‌آهن پر عیار که مستقیماً قابل استفاده باشد، به‌شدت کاهش یافته است. توسعه صنعتی سریع بسیاری از کشورها نشان می‌دهد که قیمت منابع فلزی افزایش خواهد یافت.

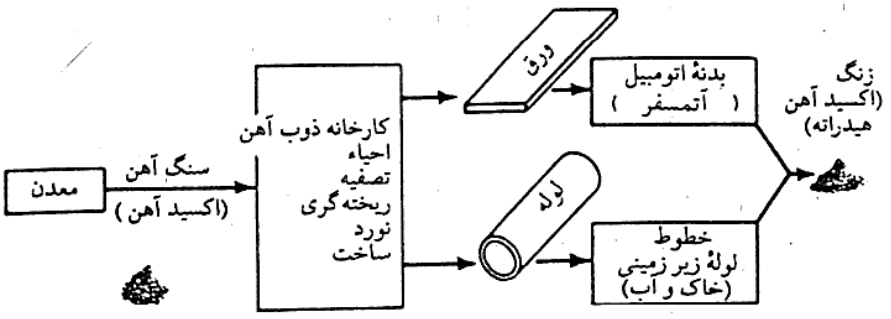
مهندسی خوردگی

مهندسی خوردگی، کاربرد دانش و فن یا هنر جلوگیری یا کنترل خسارت ناشی از خوردگی به روش اقتصادی و مطمئن است. برای اینکه مهندس خوردگی به‌خوبی از عهده وظایف خود برآید، بایستی با اصول خوردگی و عملیات مبارزه با آن، خواص شیمیایی، متالوژیک، فیزیکی و مکانیکی مواد، آزمایشات خوردگی، ماهیت محیط‌های خورنده، قیمت مواد اولیه، نحوه ساخت و تولید، دانش کامپیوتر و طراحی قطعات آشنا باشد. او همچنین بایستی خصوصیات معمول یک مهندس که عبارت است از: توانایی ارتباط برقرار کردن با دیگران، صداقت، توانایی تفکر و تجزیه‌وتحلیل کردن، آگاهی عمیق از اهمیت خطرات در عمل، عقل سلیم، منظم و مرتب بودن و مهم‌تر از همه احساس عمیق و صحیح مسائل اقتصادی را دارا باشد. در حل مسائل خوردگی، مهندس خوردگی بایستی روشی را انتخاب نماید که بیشترین بهره‌وری و منفعت را دربرداشته باشد.

در گذشته تعداد نسبتاً کمی از مهندسان با آموزش رسمی در خوردگی وجود داشتند. اکثراً افرادی که در این رشته کار می‌کردند دارای زمینه‌های شیمی، برق یا متالوژی بودند. خوشبختانه این وضعیت امروزه تغییر کرده است.
در گذشته و حتی امروزه، خوردگی را به‌عنوان «معضلی که بایستی آن را تحمل کرد در نظـر می‌گیرند.» غفلت از این مسئله باعث انهدام‌های زودرس و غیرمنتظره می‌باشد، غفلت به‌وسیله افرادی که بایستی اطلاعات بهتری داشته باشند بسیار ناپسندتر است، به طور مثال، دو فروشنده آندهای فداشونده، سیستم‌هـای خـود را حفاظت آندی می‌نامند! در حقیقت، این سـیسـتم حفاظت کاتدی به‌وسیله آندهای فداشونده است و حفاظت آندی سیستم دیگری است که کاملاً متفاوت است.

تعریف خوردگی

خوردگی را تخریب یا فاسد شدن یک ماده در اثر واکنش با محیطی که در آن قرار دارد تعریف می‌کنند. برخی اصرار دارند که این تعریف بایستی محدود به فلزات باشد، یعنی غالباً مهندس خوردگی بایستی برای حل یک مسئله هم فلزات و هم غیرفلزات را در نظر بگیرد. ولی در اصل خوردگی برای سرامیک‌ها، پلاستیک‌ها، لاستیک و مواد غیرفلزی دیگر نیز مطرح شده‌اند. مثلاً تخریب رنگ و لاستیک به‌وسیله نور خورشید یا مواد شیمیایی، خورده شدن جداره کوره فولادسازی و خورده شدن یک فلز جامد به‌وسیله مذاب یک فلز دیگر، تقریباً تماماً خوردگی نامیده می‌شوند. خوردگی می‌تواند سریع یا کند صورت گیرد. فولاد زنگ نزن ۸- ۱۸ در حالت حساس شده به‌وسیله اسید پلی‌تیونیک ظرف چند ساعت به‌شدت خورده می‌شود. ریل‌های راه‌آهن معمولاً به آهستگی زنگ می‌زنند. ستون آهنی معروف دهلی در هندوستان حدود ۲۰۰۰ سال پیش ساخته شده است و هنوز به‌خوبی روز اول است. ارتفاع آن ۳۲ فوت و قطر آن ۲ فوت است. لکن بایستی توجه شود که این ستون آهنی عموماً در شرایط جوی خشک قرار داشته است.



شکل ۱- ۱ متالورژی استخراجی

خوردگی فلزات را همان‌طور که در شکل ۱- ۱ نشان داده شده است می‌توان برعکس متالورژی استخراجی در نظر گرفت. در متالورژی استخراجی، هدف عمدتاً به دست آوردن فلز از سنگ معدن و تصفیه یا آلیاژسازی آن برای مصارف مختلف است. اکثر سنگ‌معدن‌های آهن حاوی اکسیدهای آهن هستند و زنگ زدن فولاد به‌وسیله آب و اکسیژن منجر به تشکیل اکسید آهن

هیدراته می‌گردد. اگرچه اکثر فلزات موقعی که خورده می‌شوند تشکیل اکسیدهایشان را می‌دهند ولی لغت زنگ زدن فقط در مورد آهن و فولاد به کار می‌رود. می‌گوییم فلزات غیرآهنی خورده می‌شوند و نمی‌گوییم زنگ می‌زنند.

محیط‌های خورنده

عملاً کلیه محیط‌ها خورنده هستند، لکن قدرت خورندگی آنها متفاوت است. مثال‌هایی در این مورد عبارتنداز : هوا و رطوبت، آب‌های تازه، مقطر، نمک‌دار و معدنی، آتمسفرهای روستایی، شهری و صنعتی، بخار و گازهای دیگر مثل کلر، آمونیاک، سولفورهیدروژن، دی‌اکسید گوگرد و گازهای سوختنی، اسیدهای معدنی مثل اسید کلریدریک، سولفوریک و نیتریک، اسیدهای آلی مثل اسید نفتنیک، استیک و فرمیک، قلیایی‌ها، خاک‌ها، حلال‌ها، روغن‌های نباتی و نفتی و انواع و اقسام محصولات غذایی. به طور کلی مواد «معدنی» خورنده‌تر از مواد «آلی» هستند. مثلاً خوردگی در صنایع نفت بیشتر در اثر کلرور سدیم، گوگرد، اسید سولفوریک و کلریدریک و آب است تا به خاطر روغن، نفت و بنزین. کاربرد درجه حرارت‌ها و فشارهای بالا در صنایع شیمیایی باعث امکان‌پذیر شدن فرایندهای جدید یا بهبود فرایندها قدیمی شده است، به‌عنوان مثال راندمان بالاتر، سرعت تولید بیشتر، یا تقلیل قیمت تمام شده. این مطلب همچنین در مورد تولید انرژی از جمله انرژی هسته‌ای صنایع فضایی و تعداد بسیار زیادی از روش‌ها و فرایندها صادق است. درجه حرارت‌ها و فشارهای بالاتر معمولاً باعث ایجاد شرایط خوردگی شدیدتری می‌شدند. بسیاری از فرایندها و عملیات متداول امروزه بدون استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی غیرممکن یا غیراقتصادی هستند

خسارت ناشی از خوردگی

در چند پاراگراف بعدی بعضی اثرات زیان‌بار خوردگی تشریح خواهد شد. لکن قبل از شروع به این مطلب بعضی کاربردهای مفید آن ذکر می‌شود. مثلاً ماشین‌کاری به‌وسیله مواد شیمیایی[1] یا سوراخ‌کاری به‌وسیله ماشین‌کاری به طور وسیعی در صنایع هواپیماسازی و صنایع دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. نواحی بدون روکش فلزی در معرض اسید قرار داده شده و مقدار لازم فلز اضافی در اسید حل می‌شود. این روش در مواردی اقتصادی‌تر است و در مواردی که قطعات سخت بوده و به‌وسیله روش‌های معمول به‌سختی ماشین‌کاری می‌شوند، به کار می‌رود. آندایزه کردن آلومینیم نیز یک فرایند مفید خوردگی است که برای به دست آوردن ظاهر مطلوب و پوسته اکسیدی مقاوم در برابر خوردگی، روی سطح این فلز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ظاهر: رنگ کردن اتومبیل‌ها به این علت است که سطوح زنگ زده خوشایند نیستند. تجهیزات زنگ زده یا به‌شدت خوره شده در یک کارخانه تأثیر بدی روی بیننده خواهد گذاشت. در بسیاری از محیط‌های روستایی و بیرون شهری ضخیم‌تر اختیار کردن فلز (به خاطر مسئله خوردگی) ارزان‌تر از رنگ‌کاری و تعمیرات و نگهداری آن است. برای زیبایی، سطوح خارجی سازه‌های خارجی ساختمان‌ها از فولاد زنگ نزن، آلومینیم ویا مس ساخته می‌شوند. این مطلب در رستوران‌ها و

[1]

تأسیسات تجارتی دیگر نیز صادق است. اینها مثال‌هایی از هزینه‌هایی است که برای حفظ ظاهر در مقابل خوردگی متحمل می‌شویم.

مخارج تعمیرات و نگهداری و بهره‌برداری: کاربرد مواد مقاوم در برابر خوردگی باعث صرفه‌جویی‌های عمده‌ای در بعضی کارخانجات می‌شود. در این زمینه یک مثال کلاسیک وجود دارد. در یک کارخانه صرفاً با تغییر جنس پیچ‌های مورد استفاده به یک فلز مقاوم‌تر در شرایط کار، سالانه ۱۰،۰۰۰ دلار صرفه‌جویی شد. هزینه این تغییر جنس ناچیز بود. یک کارخانه بازیابی اسید چندین ماه ضرر می‌داد تا اینکه یک مسئله خوردگی حاد آن حل شد. کاربرد حفاظت کاتدی در مورد خطوط لوله‌های زیرزمینی از سوراخ شدن آنها جلوگیری نموده و در نتیجه صرفه‌جویی بزرگی در مخارج تعمیراتی به عمل می‌آید. مخارج نیروی انسانی ایجاب می‌کند که به منظور کم کردن قیمت تمام شده محصول، هزینه‌های تعمیرات و نگهداری به‌دقت بررسی شوند.

همکاری نزدیک بین مهندس خوردگی و پرسنل بهره‌برداری و طراحی، قبل از ساخت یک کارخانه باعث حذف یا کاهش عمده مخارج تعمیرات و نگهداری می‌شود. تغییرات جزیی در فرایندها غالباً بدون تأثیر بر خود فرایند باعث تقلیل خورندگی محلول‌های مورد استفاده شده و در نتیجه امکان استفاده از مواد ارزان‌تر را مقدور می‌سازند. غالباً این تغییرات را بعد از ساخت کارخانه نیز می‌توان انجام داد، ولی در نظر گرفتن اقدامات اولیه مطلوب‌تر است، مشکلات خوردگی را اغلب می‌توان در مرحله طراحی سیستم کاهش داد یا حذف نمود و زمان این کار در مرحله طراحی اولیه کارخانه است.

متوقف‌سازی خطوط در کارخانه: غالباً به خاطر انهدام‌های غیرمنتظره خوردگی واحدی را متوقف می‌سازند یا قسمتی از یک سیستم را می‌خوابانند. گاهی اوقات توقف‌ها در اثر خوردگی است بدون آنکه تغییری در شرایط سیستم داده شود. ولی گاهی اوقات این توقف‌ها در اثر تغییراتی در روش‌های بهره‌برداری است که اشتباهاً از نظر خوردگی بدون تأثیر تلقی می‌شوند.

گاهی اوقات تغییرات جزئی در پروسه یا افزودن یک ماده جدید می‌تواند مسئله خوردگی را کاملاً دگرگون سازد. برای افزایش تولید، درجه حرارت محیط سردکننده در سیستم مبدل حرارتی[2]تقلیل داده شده و در نتیجه زمان لازم برای سیکل عملیات کم شد. لکن پایین آوردن درجه حرارت محیط خنک‌کننده باعث ایجاد شیب‌های حرارتی شدیدتری در دیواره فلزی شده و تنش‌های بالاتری در فلز به وجود آمد. ترک خوردن در اثر خوردگی و تنش (SCC) به‌سرعت واقع شده و منجر به خواباندن کارخانه گردید.

نظارت دائمی بر فرایند و محیط خورنده در جلوگیری از اقدامات غیرمنتظره و خواباندن کارخانه نقش بسزایی دارد.

قرار دادن نمونه‌هایی از فلزی که تجهیزات از آن ساخته شده، در معرض پروسه و کنترل و بازرسی متناوب آنها با استفاده از یک الکترود که دائماً سرعت خوردگی را ثبت می‌نماید، از این قبیل می‌باشند. بازرسی متناوب تجهیزات در مواقعی که کارخانه به دلایل دیگری کار نمی‌کند، نیز از اقدامات غیرمنتظره جلوگیری می‌نماید.

آلوده شدن محصول: در اکثر موارد قیمت یک محصول در بازار به خلوص و کیفیت آن بستگی دارد. عاری بودن از آلودگی‌های جزئی فاکتور حیاتی در تولید و حمل و نقل پلاستیک‌های شفاف، رنگ‌ها، مواد غذایی، داروها و

[2] [illegible]

نیمه‌هادی‌هاست. در بعضی موارد مقدار کمی خوردگی که باعث وارد شدن یون‌های فلزی به داخل محلول می‌گردد ممکن است باعث تجزیه کاتالیزوری یک محصول گردد، به‌عنوان مثال در تولید و انتقال پراکسید هیدروژن غلیظ و یا هیدرازین. در مواردی که با آلودگی و تجزیه محصول مواجه هستیم عمر قطعه فاکتور مهمی نخواهد بود با وجود اینکه فولاد معمولی ممکن است سال‌ها دوام بیاورد، ولی فلز گران‌تری به کار برده می‌شود تا از آلودگی محصول به زنگ ناشی از فولاد معمولی اجتناب گردد.

نشت یا از بین رفتن محصولات با ارزش: نشت جزئی اسید سولفوریک به فاضلاب نگرانی حادی ایجاد نمی‌کند، زیرا اسید سولفوریک ماده ارزان قیمتی است. لکن، نشت یا از بین رفتن ماده‌ای که گالنی چند صد دلار ارزش دارد، بایستی سریعاً متوقف گردد. نشت جزئی ترکیبات یا محلول‌های اورانیم خطرناک است و می‌تواند خیلی گران تمام شود. در چنین مواردی استفاده از طراحی گران‌تر و مواد بیشتر برای ساخت تجهیزات به‌خوبی قابل توجیه هستند.

اثرات بر امنیت و قابلیت اعتماد: کار کردن با مواد خطرناک مثل گازهای سمی، اسید کلریدریک، اسید سولفوریک و اسید نیتریک غلیظ، مواد منفجره و قابل اشتغال، مواد رادیو اکتیو و مواد شیمیایی در دماها و فشارهای بالا مستلزم استفاده از نوعی مواد ساختمانی است که خطر انهدام‌های خوردگی به حداقل برسد. ترک خورن در اثر خوردگی توأم با تنش در دیواره فلزی که سوخت و عامل اکسیدکننده را در یک موشک از هم جدا می‌سازد، می‌تواند باعث اختلال زودرس شده و باعث از بین رفتن میلیون‌ها دلار و جراحات انسانی گردد. شکست یک قطعه کوچک ممکن است باعث انهدام یا تخریب تمام ساختمان گردد. تجهیزاتی که در حال خورده شدن هستند می‌توانند باعث تبدیل شدن ترکیبات نسبتاً بی‌خطر به مواد منفجره شوند. صرفه‌جویی در مواد ساختمانی در مواردی مطلوب نیست که امنیت به خطر افتد.

ملاحظات دیگر بهداشتی نیز می‌توانند مهم باشند مثل آلودگی آب آشامیدنی. محصولات خوردگی می‌توانند باعث شوند که ضدعفونی کردن تجهیزات مشکل‌تر گردد. یک مثال جالب توجه در این رابطه در مورد کارخانجات شیر و محصولات لبنیاتی دیگر است. در کارخانجات تولید مواد لبنیاتی و شیر در گذشته از فولادهای زنگ نزن فریتی استفاده می‌شد و دستگاه‌ها طوری طراحی می‌شدند که به‌راحتی قابل باز کردن برای تمیز کردن و ضدعفونی کردن باشند.[3] در کارخانجات مدرن تجهیزات در جا تمیز و ضدعفونی می‌شوند. در این روش از مواد شیمیایی قوی و خورنده (از نقطه نظر یون‌های کلر و ایجاد خوردگی حفره‌ای) استفاده می‌شود. این محلول‌ها را داخل سیستم سیرکوله می‌کنند بدون اینکه تجهیزات را باز نمایند و بدین ترتیب در نیروی انسانی صرفه‌جویی‌های زیادی می‌شود. در این کارخانجات بایستی از فولاد زنگ نزن مقاوم در برابر خوردگی حفره‌ای یعنی نوع ۳۱۶ محتوی نیکل و مولیبدن استفاده شود.

خوردگی همچنین نقش مهمی در فلزاتی بازی می‌کند که در داخل بدن به کار می‌روند. در فلزاتی که در اتصال مفصل‌ها، پیچ‌ها، ورق‌ها و دریچه‌های قلب به کار می‌روند قابلیت اعتماد از اهمیت والایی برخوردار است.

3 □□□ □□□□□□□

یک تجربه غیرعادی[4] بر اهمیت ملاحظات امنیتی تأکید می‌کند. یک تانک فولاد کربنی بزرگ تمیز و شسته شده و یک کارگر برای تعمیرات وارد آن شد. این کارگر در اثر خفگی جان سپرد زیرا مقدار اکسیژن هوای داخل تانک در اثر «زنگ زدن سریع تانک»؛ کاهش یافت (به حدود ٪۱ اکسیژن) اگر یک دریچه دیگر باز گذاشته شده بود، جریان طبیعی هوا را عوض می‌کرد.
مسئولیت عملکرد محصول: یک روند مهم و نگران کننده‌ای که در این مملکت در جریان است، این است که مسئولیت قانونی انهدام قطعات در اثر خوردگی یا هر دلیل دیگری را برعهده تولیدکننده یا سازنده می‌اندازند. یک مثال مضحک (برای روشن کردن مسئله) شکایت از سازنده اتومبیل به خاطر خورده شدن اتومبیل در اثر رانندگی در دریاچه‌ای از اسید کلرئیدریک می‌باشد. اتومبیل را می‌توان از تانتال ساخت. ولی قیمت آن سر به آسمان می‌زند، و هیچ‌کس آن را نمی‌تواند بخرد، و بعد کمپانی سازنده بایستی برای سلب مسئولیت از خود کتباً اعلام کند که اسید فلوریدریک نبایستی در محیط وجود داشته باشد.
منظور این است که تولیدکننده یا سازنده یک محصول بایستی مطمئن باشد که از مواد مناسب استفاده شده و کنترل کیفیت خوب وجود داشته است.

طبقه‌بندی خوردگی

خوردگی را به روش‌های مختلف طبقه‌بندی می‌کنند. در یک روش، خوردگی به دو گروه خوردگی در درجه حرارت‌های بالا و درجه حرارت‌های پایین تقسیم می‌گردد. در یک روش دیگر خوردگی به ترکیب مستقیم (یا اکسیداسیون) و خوردگی الکتروشیمیایی تقسیم‌بندی می‌گردد. در اینجا طبقه‌بندی عبارتست از: (۱) خوردگی تر؛ (۲) خوردگی خشک؛ خوردگی تر در حضور یک مایع انجام می‌شود. معمولاً مایع شامل محلول‌ها یا الکترولیت‌هایی بوده و عامل قسمت اعظم خوردگی است. یک مثال در این مورد خوردگی فولاد به‌وسیله آب می‌باشد. خوردگی خشک موقعی است که فاز مایع وجود نداشته باشد یا بالای نقطه شبنم محیط باشیم. در این موارد بخارات و گازها خورنده بوده و غالباً این نوع خوردگی در درجه حرارت‌های بالا صورت می‌گیرد. یک مثال در این حالت خوردگی فولاد به‌وسیله گازهای کوره است.
وجود حتی مقادیر کم رطوبت می‌تواند شکل خوردگی را به کلی دگرگون سازد. مثلاً کلر خشک معمولاً باعث خوردگی فولاد نمی‌شود، لکن کلر مرطوب یا کلر حل شده در آب، به‌شدت خورنده بوده و باعث خوردگی اکثر فلزات و آلیاژها می‌گردد. در مورد تیتانیم عکس این مطلب صادق است. گاز کلر خشک خورنده‌تر از گاز کلر مرطوب برای این فلز است.

دورنمای آینده

در آینده مهندسان خوردگی بایستی جوابگوی انتظارت بیشتر و بیشتری باشند. مهندسان خوردگی بایستی با تخصص و کاربرد نبوغ خود جوابگوی مشکلات جدید بوده و آنها را حل نمایند. مسئله انرژی، کمبود مواد و جنبه‌های سیاسی فاکتورهای پیچیده‌کننده نسبتاً جدیدی هستند. شرایط غیرعادی امروز، فردا عادی خواهد بود. در گذشته تأکید بر توسعه آلیاژها و مواد بهتر و وسیع‌تر بود. در آینده ممکن است آلیاژهای قابل قبولی جایگزین گردند. مثلاً ممکن است هنگامی که مقاومت کامل

4 [illegible]

فولاد زنگ نزن ٪۱۸ کرم- ٪۸ نیکل ضروری نباشد به‌جای آن از آلیاژ آهن- ٪۶ کرم- ٪۶ آلومینیم استفاده کرد. امروزه وسایل تحقیقاتی جدیدی وجود دارند و در آینده نیز انواع بهتری به وجود خواهد آمد تا در مطالعه و درک خوردگی و جلوگیری از آن به کار روند. همکاری نزدیک بین مهندسان خوردگی و محققان خوردگی اجباری است. همکاری‌های بیشتری بین ممالک مختلف انجام خواهد شد.

همکاری نزدیک‌تر بین مهندسان خوردگی (و مهندسان مواد) و مهندسان طراح، یک اجبار است. مهندس خوردگی از شروع پروژه بایست عضوی از تیم طراحی باشد. او نیز بایست نقشه‌ها و دستورالعمل‌ها را تأیید نماید. مهندسان خوردگی و طراحی بایستی جنبه‌های مکانیک شکست و همچنین روش‌های بازرسی و بررسی‌های غیرمخرب را بدانند.

نسبت به دهه قبل آگاهی ملی بیشتر شده است. شاهدی بر این مدعا مطالعه هزینه خوردگی تحت درخواست کنگره است. این آگاهی افزایش خواهد یافت.[5] وان‌دوورده در مقاله «مواد مهندسی برای تکنولوژی پیشرفته در زمینه انرژی- نقطه نظرات اروپایی‌ها»[6] بر بسیاری از نکاتی تأکید می‌کند که در این قسمت در این فصل آمده است.

تقاضاهای بسیار زیادی از دانشگاه‌ها و کالج‌ها برای آموزش در زمینه خوردگی وجود دارد. همکاری نزدیک‌تر بین دانشگاه‌ها و صنایع بایستی صورت گیرد. بهترین راه کاهش هزینه‌های خوردگی این است که تکنیسین‌ها و مهندسان خوردگی بیشتری داشته باشیم. دورنمای شغلی جالب و فوق‌العاده درخشانی برای مهندسان خوردگی وجود دارد.

روش‌های جلوگیری از خوردگی

انتخاب مواد

فلزات و آلیاژها

متداول‌ترین روش جلوگیری از خوردگی انتخاب فلز یا آلیاژ مناسب برای کاربرد مورد نظر است. چون این روش در واقع مهم‌ترین روش جلوگیری یا کم کردن خسارت حاصل از خوردگی است. یکی از متداول‌ترین برداشت‌های غلط افرادی که با متالورژی یا مهندسی خوردگی آشنایی ندارند، درباره موارد استفاده و ویژگی‌های فولاد زنگ نزن[7] است. فولاد زنگ نزن به معنای واقعی «زنگ نزن» نبودن، همچنین مقاوم‌ترین فلز در برابر خوردگی نیز نبوده و یک آلیاژ مشخص هم نیست. فولاد زنگ نزن اسمی کلی است که به یک گروه بیش از ۳۰ نوع آلیاژ مختلف شامل ۱۱/۵ تا ۳۰ درصدم کرم و صفر تا ۲۲ درصد نیکل به همراه عناصر آلیاژی دیگر اطلاق می‌شود. 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 کلر و حاوی تنش، فولادهای زنگ نزن از فولاد ساختمانی معمولی نیز ضعیف‌تر است. فولادهای زنگ نزن نسبت به فولادهای ساختمانی معمولی

---

[5] - در بودجه فدرال در سال ۱۹۸۵ بالغ به ۱ بیلیون دلار برای تحقیق و توسعه ([illegible]) در مهندسی و علم مواد بودجه درخواست شده (متریال پرفورمانس، مه ۱۹۸۴)

[6] [illegible]

[7] [illegible]

استعداد بیشتری به خوردگی موضعی مثل خوردگی بین دانه‌ای، ترک خوردن در اثر خوردگی توأم با تنش و حفره‌دار شدن دارند. غالباً کیفیت فولادهای زنگ نزن را به‌وسیله آهن‌ربا تعیین می‌کنند. اعتقاد بر این است که فولادهای زنگ نزن غیرمغناطیسی بهتر از نوع مغناطیسی هستند. لکن این آزمایش بی‌اساس بوده و در حقیقت ممکن است گمراه کننده باشد. گروه زیادی از آلیاژهای فولاد زنگ نزن غیرمغناطیسی بوده و اکثر فولادهای زنگ نزن آستنیتی ریختگی از خود رفتار مغناطیسی نشان می‌دهند. رابطه‌ای بین مغناطیس‌پذیری و مقاومت خوردگی وجود ندارد. تحت بعضی شرایط بسیاری از فولادهای زنگ نزن مغناطیسی بهتر از انواع غیرمغناطیسی کار می‌کنند. به طور خلاصه، این تصور که فولادهای زنگ نزن در کاربردهای مشتمل بر خوردگی همواره بهترین هستند، منجر به انهدام‌های بسیار زیادی شده است. در حقیقت فولادهای زنگ نزن گروهی از آلیاژهای مقاوم در برابر خوردگی با قیمت نسبتاً کم هستند که بایستی با احتیاط و دقت مورد استفاده قرار بگیرند.

در انتخاب آلیاژها، چند زوج موفق فلز – محیط خورنده وجود دارد. این زوج‌ها معمولاً نشان‌دهنده بیشترین مقاومت خوردگی با حداقل هزینه می‌باشند. بعضی از این زوج‌های موفق در زیر آمده است:

۱) فولاد زنگ نزن – اسید نیتریک
۲) نیکل و آلیاژهای آن – مواد قلیایی
۳) مونل – اسید فلوریدریک
۴) هاستولی‌ها (کلریمیت‌ها) – اسید کلریدریک گرم
۵) سرب – اسید سولفوریک رقیق
۶) آلومینیم – آتمسفرهای پاکیزه
۷) قلع – آب مقطر
۸) تیتانیم – محلول‌های اکسیدان قوی و گرم
۹) تانتال – بیشترین مقاومت
۱۰) فولاد – اسید سولفوریک غلیظ

لیست فوق تنها لیست، از زوج‌های موفق نیست. در بسیاری موارد، مواد ارزان‌تر یا مواد مقاوم‌تر وجود دارند. برای کار در اسید نیتریک، معمولاً اول فولاد زنگ نزن در نظر گرفته می‌شود، زیرا فولادهای زنگ نزن دارای مقاومت عالی در این محیط تحت شرایط بسیار مختلف است. قلع و پوشش‌های قلع، تقریباً همیشه برای نگهداری یا لوله‌کشی آب‌مقطر خیلی خالص انتخاب می‌شود. سال‌های زیادی است که تانتال را به‌عنوان فلزی که دارای بالاترین مقاومت خوردگی است به کار می‌برند. تانتال در اکثر اسیدها در تمام غلظت‌ها و تمام دماها مقاوم است و معمولاً در شرایطی که کمترین مقدار خوردگی بایستی وجود داشته باشد، مثلاً در اندام‌های مصنوعی داخل بدن انسان به کار می‌رود. یک ویژگی جالب در مورد تانتال این است که از نظر مقاومت در برابر خوردگی دقیقاً شبیه شیشه است، هم شیشه و هم تانتال در تمام محیط‌ها مقاوم‌اند به‌جز اسید فلوریدریک و محلول‌های بازی. به علت این شباهت تانتال و شیشه، تولیدکنندگان تجهیزات با روکش شیشه‌ای از درپوش‌هایی از جنس تانتال برای پوشاندن نواقص سطحی روکش استفاده می‌کنند.

همچنین چند قانون کلی دیگر نیز در انتخاب فلزات و آلیاژها می‌توان مورد استفاده قرار داد. در محیط‌های احیاکننده یا غیر اکسیدان مثل اسیدها و محلول‌های آبی فاقد هوا، از نیکل، مس و آلیاژهای آنها می‌توان استفاده کرد. در شرایط اکسیدکننده، آلیاژهای کرم‌دار مفید هستند. در شرایط اکسیدکننده بسیار قوی تیتانیم و آلیاژهای آنها قابل استفاده است.

خالص کردن فلز

مقاومت خوردگی یک فلز خالص معمولاً بهتر از فلز ناخالص است. لیکن فلزات خالص معمولاً گران‌تر بوده و نسبتاً نرم و ضعیف هستند. به طور کلی این روش در موارد معدودی که خیلی خاص می‌باشند به کار برده می‌شود.

آلومینیم مثال خوبی است زیرا در حالت نسبتاً خالص ٪۹۹/۵ نسبتاً ارزان است. برای نگهداری آب اکسیژنه از آلومینیم خالص تجارتی استفاده می‌کنند، زیرا وجود ناخالصی‌ها می‌تواند باعث تجزیه آب اکسیژنه گردد. در یک مورد دیگر، در اثر جدایش[8] ناخالصی‌های آهن در آلیاژ آلومینیم خوردگی موضعی واقع گردید. تقلیل مقدار ناخالصی آهن باعث از بین رفتن خوردگی فوق شد.

مثال دیگر زیرکونیم تولید شده به‌وسیله قوس الکتریکی است که از نظر خوردگی دارای مقاومت بیشتری نسبت به زیرکونیم تولید شده به‌وسیله کوره القایی است. علت این امر وجود ناخالصی بیشتر در زیرکونیم تولید شده به وسیله کوره القایی است. این شیوه کاربرد خاص در نیروگاه‌های اتمی است که مقادیر بسیار کم خوردگی، خیلی زیاد محسوب می‌شود.

غیرفلزات

در این گروه هم قطعات و تجهیزات و هم روکش‌های غیرفلزی قرار دارند. منظور از روکش‌های غیرفلزی پوشش‌هایی با ضخامت زیاد هستند که از این نظر از رنگ‌ها متمایز هستند. پنج گروه کلی مواد غیرفلزی عبارتند از: (۱) لاستیک‌های طبیعی و مصنوعی (۲) پلاستیک‌ها (۳) سرامیک‌ها (۴) کربن و گرافیت (۵) چوب. به طور کلی، لاستیک‌ها و پلاستیک‌ها در مقایسه با فلزات و آلیاژها، ضعیف‌تر، نرم‌تر، مقاوم‌تر در برابر یون‌ها 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 ۱۷۰ تا $200°F$ (برای اکثر آنها).

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 حرارت خوبی داشته ولی شکننده می‌باشند. چوب به‌وسیله محیط‌های خورنده از بین می‌رود.

8

تغییر محیط خورنده

تغییر محیط خورنده یک روش عمومی برای تقلیل خوردگی است. نمونه تغییراتی که غالباً به کار برده می‌شود عبارتند از: (۱) تقلیل درجه حرارت (۲) تقلیل سرعت (۳) خارج ساختن اکسیژن یا اکسیدکننده‌ها و (۴) تغییر غلظت. در بسیاری موارد این تغییرات به نحو مؤثری می‌تواند خوردگی را کم نماید، لکن بایستی به احتیاط عمل شود.

کم کردن درجه حرارت: این کار معمولاً باعث تقلیل قابل ملاحظه سرعت خوردگی می‌گردد. لکن در بعضی شرایط تقلیل درجه حرارت تأثیر کمی بر سرعت خوردگی خواهد داشت. در موارد دیگر، افزایش درجه حرارت خوردگی را کم می‌کند. این حالت موقعی اتفاق می‌افتد که آب تازه یا نمک‌دار به نقطه جوش می‌رسد و در نتیجه تقلیل قابلیت انحلال اکسیژن با بالا رفتن درجه حرارت می‌باشد. بنابراین آب دریا به‌صورت جوشان، خوردگی کمتری نسبت به آب دریا به‌صورت داغ (مثلاً ۱۵۰ درجه فارنهایت) دارد.

کم کردن سرعت حرکت: یکی از روش‌هایی که اغلب برای کنترل خوردگی به کار می‌رود، تقلیل سرعت حرکت است. افزایش سرعت حرکت معمولاً سرعت خوردگی را افزایش می‌دهد، اگرچه استثنائات مهمی در این مورد وجود دارند. فلزات و آلیاژهایی که غیرفعال می‌شوند، مثل فولادهای زنگ نزن معمولاً در محیط‌های متحرک بهتر عمل می‌کنند تا در محلول‌های ساکن. هرجا که امکان داشته باشد، از سرعت‌های خیلی بالا بایستی اجتناب شود، زیرا خوردگی سایشی به وجود می‌آید.

خارج کردن اکسیژن یا اکسیدکننده‌ها: این روش یکی از روش‌های خیلی قدیمی کنترل خوردگی است. برای مثال آب تغذیه دیگ‌های بخار را از میان توده انبوهی از قراضه‌های فولادی عبور می‌دادند. روش‌های مدرن امروزه شامل: کاربرد خلاء، دمیدن گاز خنثی به داخل محلول یا استفاده از مواد حذف‌کننده اکسیژن می‌باشند. اسید کلریدریکی که موقع تولید یا نگهداری آن با فولاد در تماس بوده است، حاوی کلرورفریک می‌باشد که یک ناخالص اکسیدکننده است. این اسید ناخالص که در صنعت اسید کلریدریک شور یا اسید موریاتیک[۹] نامیده می‌شود، آلیاژهای نیکل - مولیبدن (هایتولی B، کلریمت ۲) را به سرعت می‌خورد، درحالی‌که، این آلیاژها در اسید کلریدریک خالص مقاومت بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند. اگرچه هوازدایی[۱۰] کاربرد وسیعی دارد، ولی برای فلزات یا آلیاژهای فعال و غیرفعال توصیه نمی‌شود. برای تشکیل پوسته غیرفعال و باقی ماندن آنها روی سطح فلز، این فلزات و آلیاژها بایستی در معرض مواد اکسیدکننده قرار بگیرند و معمولاً در محیط‌های احیاکننده یا غیراکسیدان مقاوم نیستند.

تغییر غلظت: کاهش غلظت عامل خورنده معمولاً مفید است. در تعداد زیادی از فرایندها، عامل خورنده به طور اتفاقی وارد می‌شود. مثلاً با حذف یون‌های کلر، خوردگی آب خنک‌کننده در راکتورهای هسته‌ای کاهش می‌یابد. تعداد زیادی از اسیدها مثل اسید سولفوریک و فسفریک در غلظت‌های بالا در درجه حرارت‌های متوسط تقریباً کاملاً خنثی هستند. در این موارد، با افزایش غلظت اسید خوردگی کاهش می‌یابد.

بحث کنترل خوردگی بدون ذکری از وسایل جادویی یا دستگاه‌های تصفیه آب که به طور وسیعی برای کنترل خوردگی آب فروخته شده و می‌شوند کامل نخواهد بود. معمولاً ادعا می‌شود که این وسایل «خوردگی را متوقف کرد»، «از زنگ زدگی

9 □□□ □□□□□□□□

1 □□□ □□□□□□□□□□□□ 0

جلوگیری می‌کنند»، «باکتری‌ها را از بین می‌برند»، «مزه و بوی آب را بهتر می‌کنند»، یا «سختی آب را کم می‌کنند» بعضی تولیدکنندگان در مورد محصولات مذکور تمام موارد فوق را ادعا می‌کنند. به هر صورت این وسایل بر اساس بعضی اصول شبه علمی قرار دارند، به سادگی ساخته می‌شوند، قیمت بازار آنها گران است و کاملاً فاقد ارزش هستند. با کمال تعجب، سالانه تعداد زیادی از این وسایل به‌وسیله مهندسان نصب می‌گردد.

کاربرد ممانعت‌کننده

ممانعت‌کننده‌ها موادی هستند که وقتی به مقادیر کم به یک محیط خورنده اضافه شوند، سرعت خوردگی را کم می‌کنند. در واقع ممانعت‌کننده را می‌توان یک کاتالیزور بازدارنده فرض کرد. ممانعت‌کننده‌های بسیار زیادی با ترکیبات مختلف موجود می‌باشند. اکثر این مواد با آزمایشات تجربی پیدا شده و اصطلاح یافته‌اند و بسیاری از آنها با نام‌های تجاری عرضه می‌گردند و ترکیب شیمیایی آنها مخفی نگه داشته می‌شود. به همین دلیل فرایند حفاظت به این روش به طور کامل مشخص و روشن نیست. لکن ممانعت‌کننده‌ها را می‌توان برحسب مکانیزم و ترکیب طبقه‌بندی نمود.

ممانعت‌کننده‌های جذبی:[1] این مواد بزرگ‌ترین گروه ممانعت‌کننده‌ها هستند. به طور کلی، این نوع ممانعت‌کننده‌ها ترکیبات آلی هستند که جذب سطح فلز شده و واکنش‌های انحلال فلز و احیا را کند می‌نمایند. در اکثر موارد، ممانعت‌کننده‌های جذبی بر هر دو فرایند آندی و کاتدی تأثیر می‌گذارند، هرچند که در بعضی موارد این تأثیر یکسان نیست. آمین‌های آلی موارد نمونه‌ای از این گروه هستند.

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 مؤثر هستند ولی در محیط‌هایی بی‌اثر می‌باشند که واکنش‌های کاتد دیگری مثل احیا اکسیژن کنترل‌کننده است.

مواد حذف‌کننده عوامل مضر:[2] این مواد عوامل خورنده را از محیط حذف می‌نمایند. مثال‌هایی از این نوع ممانعت‌کننده عبارتند از سولفیت سدیم و هیدرازین که طبق روابط زیر با اکسیژن حل شده در محیط ترکیب می‌شوند:

$$2Na_2SO_2 + O_2 \rightarrow 2Na_2SO_4$$

$$N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$$

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

مواد اکسیدکننده: موادی مثل کرومات، نیترات و نمک‌های فریک نیز در بسیاری موارد به‌عنوان یک ممانعت‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور کلی، این مواد برای جلوگیری از خوردگی فلزات و آلیاژهایی که انتقال فعال – غیرفعال از خودشان می‌دهند، به کار برده می‌شود. مثل فولاد و آلیاژهای آن و فولادهای زنگ نزن.

1 1
1 2

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

در جدول ۱ – ۱ بعضی ممانعت‌کننده‌های مهم، به همراه کاربرد و منبع آنها نشان داده شده است. مثال‌هایی از کلیه انواع مختلف ممانعت‌کننده‌های فوق‌الذکر در این جدول وجود دارند. لازم به ذکر است که ممانعت‌کننده‌ها از نظر فلز، محیط خورنده، درجه حرارت و غلظت معمولاً منحصربه‌فرد هستند. همان‌طور که در بالا بدان اشاره شد غلظت و نوع ممانعت‌کننده‌ای که در یک محیط خورنده مورد نظر بایستی استفاده شود با آزمایش و به تجربه تعیین می‌گردد، و این‌گونه اطلاعات را معمولاً از تولیدکنندگان آن مواد می‌توان دریافت نمود. درصورتی‌که غلظت ممانعت‌کننده کمتر از اندازه کافی باشد، ممکن است خوردگی تسریع شود، مخصوصاً خوردگی‌های موضعی مثل حفره‌دار شدن. لذا درصورتی‌که غلظت ممانعت‌کننده کمتر از اندازه کافی باشد خسارت بیش از موقعی خواهد بود که ممانعت‌کننده اصلاً به کار برده نشود.

برای پرهیز از این خطر بایستی غلظت ممانعت‌کننده همواره بیش از مقدار مورد نیاز باشد و غلظت آن به طور متناوب تعیین گردد. موقعی که دو یا چند ممانعت‌کننده به یک سیستم خورنده اضافه می‌گردد، تأثیر آنها گاهی اوقات بیشتر از تأثیر هرکدام به تنهایی است. این خاصیت را اثر تقویتی[۳] می‌نامند. تعداد بسیاری از ممانعت‌کننده‌هایی که در جدول ۱ – ۱ آمده‌اند ترکیباتی مرکب از چند ممانعت‌کننده هستند. مکانیزم اثر تقویتی کاملاً روشن نیست.

اگرچه در موارد بسیاری از ممانعت‌کننده‌ها به‌خوبی می‌توان استفاده نمود، ولی محدودیت‌هایی نیز برای این نوع حفاظت از خوردگی وجود دارد. ممکن است اضافه کردن ممانعت‌کننده به سیستم به خاطر آلوده کردن محیط عملی نباشد. به‌علاوه بسیاری از ممانعت‌کننده‌ها سمی بوده و کاربرد آنها محدود به محیط‌هایی است که به طور مستقیم یا غیرمستقیم در تهیه مواد غذایی یا محصولات دیگری نمی‌باشد که مورد استفاده انسان قرار می‌گیرند. به همین دلیل نمک‌های آرسنیک که در اسیدهای قوی ممانعت‌کننده‌های بسیار مؤثری هستند کاربرد محدودی دارند. ممانعت‌کننده‌ها عمدتاً در سیستم‌های بسته کاربرد داشته و معمولاً در سیستم‌های کاملاً باز[۴] به کار برده نمی‌شوند. بالاخره با افزایش درجه حرارت و غلظت محیط درجه مؤثر بودن ممانعت‌کننده‌ها به‌سرعت از بین می‌رود.

اطلاعات عمومی بیشتر، شامل جنبه‌های تئوریک و همچنین مثال‌های دیگری از کاربردهای انواع مختلف ممانعت‌کننده‌ها در اینجا بحث می‌شود.

---

1 [illegible] 3

1 [illegible] 4

جدول ۱ – ۱ لیست مراجع ممانعت‌کننده‌های خوردگی

فلز	محیط	ممانعت‌کننده
آدمیرالتی	آمونیاک ٪۵	٪۰/۵ اسید فلوریدیک
آدمیرالتی	هیدروکسید سدیم، $4°B$	۰/۶ مول H_2O بازای هر مول NaOH
آلومینیم	اسید کلریدریک □ ۱	۰/۰۰۰۳ مول آلفافنیل آکریرین، بتانفتوکوینول
		تیوریا یا ۲– فنیل کوینولین
آلومینیم	اسید نتیریک، ٪۵ – ۲	۰/۰۵ ٪ هگزامتیلن تترامین
آلومینیم	اسید نتیریک، ٪۱۰	۰/۱ ٪ هگزامتیلن تترامین
آلومینیم	اسید نتیریک، ٪۱۰	۰/۱ ٪ کرومات قلیایی
آلومینیم	اسید نتیریک، ٪۲۰	۰/۵ ٪هگزامتیلن تترامین
آلومینیم	اسید فسفریک	کرومات‌های قلیایی
آلومینیم	اسید فسفریک، ٪۲۰	۰/۵ ٪کرومات سدیم
آلومینیم	اسید فسفریک، ٪۸۰ – ۲۰	۱٪ کرومات سدیم
آلومینیم	اسید فسفریک غلیظ	۵٪ کرومات سدیم
آلومینیم	ضد یخ الکی	نیتریت سدیم و ملیبدات سدیم
آلومینیم	آب برم	سیلیکات سدیم
آلومینیم	برموفرم	آمین‌ها
آلومینیم	آروماتیک‌های کلربنه	۲٪ – ۰/۱ نیتروکلروبنزن
آلومینیم	آب کلر	سیلیکات سدیم
آلومینیم	کلرور کلسیم، اشباع	سیلیکات‌های قلیایی
آلومینیم	اتانول، داغ	دی کرومات پتاسیم
آلومینیم	اتانول، تجاری	۰/۰۳ ٪کربنات‌ها، لاکتات‌ها، استات‌ها با بورات‌های قلیایی
آلومینیم	اتیلن گلایکول	تنگستنات سدیم یا مولیبدات سدیم
آلومینیم	اتیلن گلایکول	بورات‌ها و فسفات‌های قلیایی
آلومینیم	اتیلن گلایکول	۱٪ – ۱۰ نیترات سدیم
آلومینیم	پراکسید هیدروژن، قلیایی	سیلیکات سدیم

آلومینیم	پراکسید هیدروژن	نیترات‌های فلزات قلیایی
آلومینیم	پراکسید هیدروژن	سدیم متاسیلیکات
آلومینیم	متیل الکل	کارات سدیم + نیتریت سدیم
آلومینیم	متیل کلراید	آب
آلومینیم	سیال پلی اکسی آلکین	۲٪ اسید دو طرفینی □□□□ (اسید دی لینولئیک)، ۱/۲۵٪ $N(CHM_2)_3$، ۰/۲ ٪– ۰/۰۵ ٪ مرکاپتوبنز و نیازول
آلومینیم	آب دریا	۰/۷۵ ٪ آمیل استئارات ثانویه
آلومینیم	کربنات سدیم، رقیق	فلو سیلیکات سدیم
آلومینیم	هیدروکسید سدیم، ۱٪	سیلیکات‌های قلیایی
آلومینیم	هیدروکسید سدیم، ۱٪	۴٪ – ۲ پرمنگنات سدیم
آلومینیم	هیدروکسید سدیم، ۴٪	۱۸٪ گلوکز
آلومینیم	هیپوکلریت سدیم موجود در مواد سفید کننده	سیلیکات سدیم
آلومینیم	استات سدیم	سیلیکات‌های قلیایی
آلومینیم	کلرور سدیم، ۳/۵٪	۱٪ کرمات سدیم
آلومینیم	کربنات سدیم، ۱٪	۰/۲ ٪ سیلیکات سدیم
آلومینیم	کربنات سدیم، ۱۰٪	۰/۰۵ ٪ سیلیکات سدیم
آلومینیم	سولفید سدیم	گوگرد
آلومینیم	سولفید سدیم	۱٪ متاسیلیکات سدیم
آلومینیم	محلول ۵۰٪ تری کلرواستات سدیم	۰/۵ ٪ دی کرمات سدیم
آلومینیم	الکل تتراهیدروفورفوریل	۱٪ نیترات سدیم یا ۰/۳ ٪ کرومات سدیم
آلومینیم	تری انانولامین	۱٪ متاسیلیکات سدیم
آهن قلع اندود شده	عوامل پاک کننده قلیایی مثل تری سدیم، فسفات، کربنات سدیم و غیره	دی اتیلن دی آمینوکبالتیک نیترات

آهن قلع اندود شده	صابون قلیایی	۱٪ نیتریت سدیم
آهن قلع اندود شده	کربن تتراکلراید	۲٪ مسی تیل اکسید، ۰/۰۰۱ ٪ ردیفنیل آمین
آهن قلع اندود شده	کلرور سدیم، ۰/۰۵٪	۰/۲ ٪ نیتریت سدیم
آهن گالوانیزه	آب مقطر	□□□ ۱۵ مخلوط متافسفات کلسیم و روی
آهن گانوانیزه	۵۵/۴۵ اتیلن گلایکول - آب	۰/۰۲۵٪ تِری سدیم فسفات
آهن	نیتروآریلامین‌ها،	دی بنزیل انیلین
برنج	کربن تتراکلرید، مرطوب	۰/۱ ٪- ۰/۰۰۱ انیلین
برنج	فورفورال	۰/۱ ٪ مرکاپتو بنزوتیازول
برنج	سیال‌های پلی اکسی الکین	۲٪ اسید □□□□ (اسید دی لینولئیک)، ۱/۲۵ ٪ ۰/۲، $N(\mathrm{CHM_2})_3$ ٪- ۰/۰۵ مرکاپتوبنزو تیازول
برنج	محلول ۵۰٪ تری کلرواستات سدیم	۰/۵ ٪ دی کرومات سدیم
تیتانیم	اسید کلریدریک	عوامل اکسید کننده مثل اسید کرومیک یا سولفات مس
تیتانیم	اسید سولفوریک	عوامل اکسیدکننده با سولفات‌های معدنی
روی	آب مقطر	□□□ ۱۵ مخلوط متافسفات‌های کلسیم و روی
سرب	کربن تتراکلراید، مرطوب	۰۰/۱ ٪- ۰/۰۰۱ آنیلین
فولاد زنگ نزن	اسید سولفوریک، ۲/۵٪	□□□ ۲۰ - ۵، $\mathrm{CaSO_2, 5H_2}$
فولاد زنگ نزن	سیانامید	□□□ ۵۰۰ - ۵۰ فسفات آمونیم

فولاد	۱:۴ متانول – آب	به ۴ لیتر آب و ۱ لیتر متانول، ۱ گرم پیریدین و ۰/۰۵ گرم پیراگول اضافه کنید.
فولاد	محلول‌های کود شیمیایی نیتروژن‌دار	۰/۱ ٪ آمونیم تیوسیانات
فولاد	اسید فسفریک، غلیظ	۰/۰۰۱ ٪ پتاسیم آیودید، پتاسیم آیودات یا اسید آیوداستیک
فولاد	سیال‌های پلی آکسی آلکن گلایکول	۲٪ اسید □□□□ (دی لینولئیک اسید)، $N(CHMe_2)_3$ ۱٪۲۵
فولاد	کلرور سدیم، ٪۰/۰۵	۰/۲ ٪ نیتریت سدیم
فولاد	محلول ٪۵۰ سدیم تری کلرواستات	۰/۵ ٪ دی کرومات سدیم
فولاد	آب‌های شور حاوی سولفید	فرم آلدئید
فولاد	الکل تتراهیدروفورفوریل	۱٪ نیترات سدیم یا ۰/۳ ٪کرومات سدیم
فولاد	آب	اسید بنزئیک
فولاد	آب آبیاری	آمین ررزین
فولاد	هیدروکربن‌های اشباع از آب	نیتریت سدیم
فولاد	آب، مقطر	آئروسل (یک عامل یونی تر کننده)
فولاد با پوشش کادمیم	۵۵/۴۵ اتیلن گلایکول – آب	۱٪ فلوروفسفات سدیم
فولاد زنگ نزن، ۸–۱۸	پرمنگنان پتاسیم موجود در مواد سفید کننده	سیلیکات سدیم
فولاد زنگ نزن، ۸–۱۸	کلرور سدیم، ٪۴	۰/۸ ٪ هیدروکسیدسدیم
فولاد	اسید سیتریک	نمک‌های کادمیم
فولاد	اسید سولفوریک رقیق	آمین‌های آروماتیک
فولاد	اسید سولفوریک، ٪۷۰ – ۶۰	آرسنیک
فولاد	اسید سولفوریک، ٪۸۰	۲٪ تری فلورایدیر

فولاد	کلرور آلومینیم - آمپلکس‌های هیدروکربنی که موقع ایزومریزاسیون تشکیل می‌شوند.	۲٪ - ۰/۲ ید، اسید هیدرویدیک یا هیدروکربن آیدید
فولاد	نیترات آمونیم آمونیاکی	۰/۲ ٪ تیوربا
فولاد	محلول‌های نیترتت آمونیم - اوره	۰/۱ ٪ - ۰/۰۵ آمونیاک، ٪۰/۱ تیوسیانات آمونیم
فولاد	آب شور حاوی اکسیژن	۳٪ - ۰/۰۰۱ دی تیوکاریامال‌های متیل، اتیل، یا جایگزین به‌وسیله پروپیل
فولاد	کربن تتراکلراید، مرطوب	۰/۱ ٪ - ۰/۰۰۱ آنیلین
فولاد	مواد قلیایی - محلول کرسیلات	۱٪ - ۰/۱ فسفات تری سدیم در ارزیابی محلول‌های شست‌وشوی قلیایی پالایشگاه‌ها $240 - 260°F$
فولاد	اتیل الکل، خالص یا محلول در آب	۰/۳ ٪ اتیل آمین یا دی اتیل آمین
فولاد	۵۵/۴۵ اتیلن گلایکول - آب	۰/۲۵ ٪ فسفات تری سدیم
فولاد	اتیلن گلایکول	یورات‌ها و فسفات‌های قلیایی
فولاد	اتیلن گلایکول	گانیدین یا کربنات گانیدین
فولاد	اتیل الکل، ٪۷۰	۰/۱۵ ٪ کربنات آمونیوم + ۱ ٪ هیدروکسید آمونیم
فولاد	فورفورال	۰/۱ ٪ مرکاپتوبنزوتیازول
فولاد	سیال‌های دی الکتریک هالوژنه شده	۴٪ - ۰/۰۴ $(C_2H_3S()_4Sn)$، $C_2H_3\,SSnPh_3$ یا $(C_2H_3)_2Sn$
فولاد	مواد عایق آلی مثل دیفریل کلرید شده	٪۰/۱ $(NH_2)2C_6H_3NHPh$ ، $O\text{-}MeH_4NH_2$ یا $P\text{-}NO_2C_6H_4NH_2$
فولاد	سم علف‌کش مثل ۲، ۴ دی نیتروآلکیل قبول‌ها در روغن-های آروماتیک	۱/۵ ٪ - ۱ فورفورال

فولاد	ایزوپروپانول، ٪۳	٪ ۰/۰۳ نیتریت سدیم + ٪۰/۰۵ اسید اولئیک
قلع	کربن تتراکلراید، مرطوب	۰/۱ ٪ – ۰/۰۰۱ آنیلین
قلع	آروماتیک‌های کلرینه	۰/۲ ٪ – ۱ نیتروکلروبنزن
مس قلع اندود شده	هیپوکلریت سدیم موجود در مواد سفید کننده	سیلیکات سدیم
مس	اسیدهای چرب به‌عنوان اسیک	H_2SO_4، $(COOH)_2$، H_2SiF
مس	هیدروکربن‌های حاوی گوگرد	□ – هیدروکسی بنزوفنون
مس	سیال‌های پلی آکسی آلکن گلایکول	۲٪ اسید □□□□ (اسید دی لیبولئیک)، ۲/۲۵ ٪ $N(CHMe_2)_3$، ۰/۲ ٪– ۰/۰۵ مرکاپتو بنزوتیازول
مس و برنج	اسید سولفوریک رقیق	بنزیل تیوسیانات
مس و برنج	اتیلن گلایکول	بران‌ها و فسفات‌های قلیایی
مس و برنج	ضدیخ پلی هیدریک الکل	۱/۶ ٪– ۰Na_3PO_4/۴ + ٪۶– ۰/۰۵ مرکاپتو بنزوتیازول سدیم
مس و برنج	روغن بذر ترب	اسید سولسینیک
مس و برنج	گوگرد در محلول بنزن	۹۰۰/۲ ٪، ۱۰ آنتراکوئینون
مس و برنج	الکل تتراهیروفورفوریل	۱٪ نیترات سدیم یا ۰/۳ ٪کرومات سدیم
مس و برنج	آب – الکل	۰/۲۵ ٪ اسید بنزوئیک، با ۲۵ ٪ بنزوات سدیم در ۱۰ – ۷/۵ = □□
منیزیم	الکل	سولفیدهای فلزات قلیایی
منیزیم	الکل – متیل	۱٪ اسید اولئیک یا استئاریک که با آمونیاک خنثی شده است.
منیزیم	الکل‌ها، پلی هیدریک	فلوریدهای محلول در ۱۰ – ۸ = □□
منیزیم	گلیسرین	سولفیدهای فلزات قلیایی
منیزیم	گلیکول	سولفیدهای فلزات قلیایی
منیزیم	تری کلرواتیلن	۰/۰۵ ٪ فرم آمید
منیزیم	آب	۱٪ دی کرومات پتاسیم
مونل	کربن تتراکلراید، مرطوب	۰/۱ ٪– ۰/۰۰۱ آنیلین

مونل	کلرور سدیم، ۰/۱٪	۰/۱ ٪ نیتریت سدیم
مونل	آب آشامیدنی	۰/۱ ٪ نیتریت سدیم
نیکل و نقره	هیپوکلریت سدیم موجود در مواد سفیدکننده	سیلیکات سدیم

روزنفلد[15] در نطق افتتاحیه کنگره سالانه NACE در ۱۹۸۱ بحث تئوریک و همچنین کاربرد محاسبات شیمی کوانتم، اسپکتروسکوپی فتوالکترون اشعه ایکس، ردیاب‌های رادیواکتیو (مثلاً ^{36}Cl) و پولاریزاسیون شیمیایی را به‌عنوان «ابزارهایی» برای مطالعه پدیده ممانعت‌کنندگی بحث می‌کند. ممانعت‌کنندگی می‌تواند هم به‌وسیله جذب سطحی و هم لایه‌های فازی روی سطح فلز صورت پذیرد. وی نشان می‌دهد که ممانعت‌کنندگی با جذب سطحی مانع از حفره‌دار شدن فولادهای زنگ نزن می‌شود. حفاظت به جذب سطحی یون‌های غیرفعال‌کننده به سطح فلز و جایگزین شدن آنها به جای عامل مخرب ([illegible]) نسبت داده شده است. حفاظت به قدرت جایگزین شدن نسبت داده شده، به قدرت اکسیدکنندگی، آنیون NO_3 مؤثرتر از CrO_4 است، هرچند که دومی اکسیدکننده قوی‌تری است. روزنفلد نشان می‌دهد که حفاظت فولاد در برابر خوردگی به‌وسیله سولفید هیدروژن به خاطر ظهور فیلم‌های فازی شامل آهن، گوگرد، و اجزاء ممانعت‌کننده روی سطح فولاد است. وی همچنین اشاره می‌کند که فقط درصد کوچکی (در یک مورد ۴٪) از سطح بایستی به‌وسیله ممانعت‌کننده جذب سطحی پوشیده شود تا خوردگی متوقف گردد. جذب سطحی در بعضی موارد دارای ماهیت شیمیایی است. نکته اصلی کلام روزنفلد آن است که «مکانیزم ممانعت‌کننده، بدون توجه به مقداری که جذب سطح می‌شود، مشتمل است بر تغییر خواص الکتروفیزیکی اتم‌های سطح به‌وسیله واکنش‌های سطحی تا پوشاندن سطح فلز و جدا کردن آن از محیط خورنده.»

در ماه مه ۱۹۸۳ یک کنفرانس بین‌المللی در مورد ممانعت‌کنندگی برگزار گردید. شواهدی در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند که بسیاری از ممانعت‌کننده‌های آلی و معدنی با اندرکنش کردن با یکی از چند محصول خوردگی و تشکیل یک فاز محافظ عمل حفاظت را انجام می‌دهند تا با جذب سطح فلز شدن. در این کنفرانس بر متمایز کردن ممانعت‌کننده‌ها از نظر آنکه جذب سطح فلز می‌شوند یا با تشکیل فلزها حفاظت را انجام می‌دهند تأکید گردید. مجموعه مقالات این کنفرانس حاوی حدود ۳۰ مقاله به‌وسیله NACE در ۱۹۸۴ به چاپ رسیده است. یک ممانعت‌کننده و برطرف‌کننده رنگ با نام تجارتی K -۹۹ از نوع فازی است.

گرین[16] مکانیزم‌ها، کاربردها و محدودیت‌های ممانعت‌کننده‌های اکسیدکننده را بحث کرده است. این ممانعت‌کننده‌ها در حضور یون‌های هالیدی و سایر یون‌هایی که باعث تشدید خوردگی موضعی می‌شوند بایستی با احتیاط بسیار زیاد به کار روند.

[15] [illegible]

[16] [illegible]

یک علت مهم خوردگی در مسیرهای بالایی در پالایشگاه‌های نفت، خوردگی به‌وسیله سولفید هیدروژن و اسید کلریدریک است. در این موارد ممانعت‌کننده‌های تشکیل‌دهنده فیلم به‌وسیله ناتان و پروگیونی[۱۷] پیشنهاد می‌شود. سوابق اتفاقی که روی داده بیان شده است. ممانعت‌کننده‌ها همچنین در کم کردن تاول زدن هیدروژنی مفید هستند.
ملاحظات محیط زیستی باعث معطوف شدن توجه به ممانعت‌کننده‌ها حاوی فلزات سبک شده است (مثلاً کاربرد کرومات‌ها ممنوع شده است).

طراحی

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. در تمام موارد طراحی مکانیکی یک جزء بایستی بر اساس مواد ساختمانی باشد زیرا مواد ساختمانی که برای مبارزه با خوردگی به کار می‌رود از نظر ویژگی‌های مکانیکی بسیار متفاوتند.

ضخامت دیواره

چون خوردگی باعث نازک شدن فلز می‌شود، لذا بایستی این مقدار نازک شدن را در طراحی لوله‌ها، تانک‌ها و قطعات دیگر در نظر گرفت. به طور کلی، ضخامت دیواره را دو برابر ضخامت حداقل لازم می‌گیرند. مثلاً اگر برای یک تانک ۱۰ سال عمر در نظر گرفته می‌شود و سرعت خوردگی تانک در آن محدوده محیط حدود MPY ۱۲ باشد، بنابراین تخمین عمق خوردگی در ۱۰ سال $\frac{1}{8}$ اینچ است و در نتیجه ضخامت تانک را $\frac{1}{4}$ اینچ در نظر می‌گیرند. در این صورت، تغییرات جزئی در عمق نفوذ خوردگی یکنواخت، که در اکثر موارد کاملاً یکنواخت نیست، اشکالی به وجود نخواهد آورد. البته ضخامت دیواره بایستی نیازهای مکانیکی مثل فشار، وزن بر تنش‌های دیگر را نیز برآورده سازد.
این قانون کلی در مواردی ممکن است صادق نباشد که اطلاعات دقیق و قابل اطمینان خوردگی و نظارت مؤثر بر خوردگی لازم است. والاس و وب[۱۸] بحث جالبی در مورد مقدار واقعی خوردگی ارائه نموده‌اند. آنها این سؤال را مطرح می‌کند که «آیا شما مخازن خود را با پول نقد می‌کنید؟» به‌عبارت‌دیگر، اگر مقدار خوردگی را بیش از حد لازم منظور کنیم وزن و قیمت بالا خواهد رفت. آنها همچنین پیشنهاد می‌کنند که در یک مخزن عمودی مرتفع، مقدار خوردگی در مناطق مختلف را بایستی متفاوت در نظر گرفت. قسمت‌های بالایی مخزن می‌تواند در معرض خوردگی کمتری نسبت به نیمه پائین قرار داشته باشد.

[1] [7]
[1] [8]

قوانین طراحی

قوانین طراحی بسیاری وجود دارند که برای به دست آوردن بهترین مقاومت در برابر خوردگی بایستی رعایت شوند. بعضی از قواعد طراحی که بایستی در نظر گرفته شوند در زیر آمده‌اند. اگر طراح دارای زمینه خوبی در مورد خوردگی باشد، مفید خواهد بود ولی متأسفانه معمولاً این حالت وجود ندارد.

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

۲) تانک‌ها و محفظه‌های دیگر را طوری طراحی کنید که به سهولت قابل تخلیه و تمیز کردن باشند. کف تانک‌ها بایستی به طرف سوراخ تخلیه شیب داشته تا از باقی ماندن محصول در کف تانک هنگام تخلیه جلوگیری شود. اسید سولفوریک غلیظ خوردگی بسیار کمی روی فولاد دارد. ولی درصورتی‌که، تانک به طور کامل تخلیه نگردد و محلول باقی مانده در تماس با هوا باشد، اسید با جذب رطوبت هوا و رقیق شدن باعث خوردگی سریع تانک می‌شود.

۳) سیستم‌ها را طوری طراحی کنید تا اجزایی که به سرعت خورده می‌شوند به سهولت قابل تعویض باشند. در کارخانجات اجزاء پمپ‌ها اغلب به خاطر خوردگی احتیاج به تعمیر یا تعویض پیدا می‌کنند، لذا سیستم را طوری طراحی می‌کنند که به سهولت بتوان آنها را از مدار خارج نمود.

۴) از تنش‌های مکانیکی بالا و مراکز تنش در قطعاتی بپرهیزند که در معرض محیط خورنده قرار دارند. تنش‌های مکانیکی یا داخلی یکی از عوامل ترک خوردن در اثر خوردگی توأم با تنش می‌باشد. این مطلب مخصوصاً در مورد آلیاژهایی که مستعد به SCC هستند مثل فولادهای زنگ نزن و برنج‌ها بایستی رعایت گردد.

۵) حتی‌الامکان از تماس الکتریکی فلزات غیرهمجنس جلوگیری کنید تا خوردگی گالوانیکی به وجود نیاید. در صورت امکان در تمام سیستم از یک‌نوع فلز یا آلیاژهای هم خانواده استفاده کنید و در غیر این صورت فلزات غیرهمجنس را از یکدیگر عایق نمایید.

۶) در سیستم‌های لوله‌کشی از زانوها با زاویه‌های تند بپرهیزند. پیچ های تند و جاهای دیگری که در آنها جهت سیال به‌سرعت عوض می‌شود باعث خوردگی سایشی می‌گردد. این مطلب خصوصاً در سیستم‌هایی که مستعد به خوردگی سایشی هستند، مثل سرب، مس و آلیاژهای آنها مهم می‌باشد.

۷) برای شرایطی که سیال با فلز برخورد می‌کند، ضخامت بیشتری از فلز در نظر بگیرید.

۸) درباره انتخاب صحیح مواد اطمینان حاصل کنید.

۹) مشخصات کامل تهیه مواد ساختمانی را لیست کنید و دستورالعمل‌هایی تهیه کنید تا مطمئن شوید مشخصات تعیین شده در تمام طول مسیر تا بازرسی نهایی رعایت می‌شود. درصورتی‌که لازم باشد، دستورالعمل‌های کنترل کیفیت را نیز تعیین کنید.

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

۱۱) تاریخ تحویل تجهیزات را به طور واقع‌بینانه و به‌صورت برنامه‌ریزی شده تنظیم کنید.

۱۲) دستورالعمل‌هایی برای آزمایشات و نگهداری در انبار قطعات و تجهیزات تعیین کنید. مثلاً پس از آزمایش هیدرولیکی نبایستی وسیله مربوطه پر یا نیمه پر به‌مدت طولانی باقی بماند. این می‌تواند منجر به خوردگی میکروبی، حفره‌دار شدن و خوردگی تنشی گردد. در مورد نگهداری در انبار، لوله‌های یدکی از جنس فولاد زنگ نزن موقع نگهداری در انبار نزدیک ساحل دریا در اثر خوردگی تنشی ترک خوردند.

۱۳) دستورالعمل‌های بهره‌برداری و نگهداری را تعیین کنید (مثلاً توقف های برنامه‌ریزی شده).

۱۴) به گونه‌ای طراحی نمایید که ارتعاشات شدید وجود نداشته باشد، نه فقط برای قطعاتی که در معرض چرخش هستند، بلکه همچنین در مثلاً لوله‌های مبدل حرارتی.

۱۵) در مورد تانک‌هایی که موقع تخلیه هوای مرطوب دریایی را به داخل می‌کشند، سیستم تزریق هوای خشک یا گاز خنثی در نظر بگیرید.

۱۶) در صورت امکان موقعیت کارخانه یا تجهیزات را طوری انتخاب کنید که در مسیر حرکت باد ناشی از کارخانه یا اتمسفرهای «آلوده» قرار نداشته باشد.

۱۷) در عملیات انتقال حرارت از نقاط گرم[۱۹]جلوگیری کنید. مبدل‌های حرارتی و دستگاه‌های انتقال حرارت دیگر بایستی طوری طراحی گردند که شیب درجه حرارت یکنواخت داشته باشند. توزیع غیریکسان درجه حرارت منجر به گرم شدن موضعی و سرعت‌های خوردگی بالا می‌شود. به‌علاوه نقاط گرم‌تر باعث تنش‌هایی می‌گردند که ممکن است منجر به خوردگی توأم با تنش گردد.

۱۸) موقع طراحی حذف هوا را در نظر داشته باشید. احیا اکسیژن یکی از مهم‌ترین واکنش‌های کاتدی در خوردگی است و اگر اکسیژن حذف گردد، غالباً خوردگی نیز کم می‌شود یا متوقف می‌گردد. در طراحی تجهیزات کارخانجاتی که با مواد شیمیایی سروکار دارند توجه خاصی بایستی به همزن‌ها، مدخل ورودی محلول و نواحی دیگری معطوف شود که امکان وارد کردن هوا به سیستم را دارند. نصب شیرهای هواگیری و استفاده منظم از آنها مفید است. فلزات و آلیاژهای فعال – غیرفعال در این موارد استثنا هستند. تیتانیم و فولادهای زنگ نزن در اسیدهای هوادار یا اکسیدکننده‌های دیگر مقاوم‌ترند.

۱۹) کلی‌ترین قانون، اجتناب از غیریکنواختی است. فلزات غیرهمجنس، حباب‌های هوا، توزیع یکنواخت حرارت و تنش و اختلافات دیگر در نقاط مختلف سیستم باعث خوردگی می‌گردد. لذا هنگام طراحی بایستی سعی شود کلیه شرایط را در تمام سیستم تا حد امکان یکنواخت نمود.

1 9

حفاظت کاتدی و حفاظت آندی

حفاظت کاتدی

حفاظت کاتدی، روشی الکتروشیمیایی برای جلوگیری از خوردگی سازه‌های فلز مدفون در خاک و غوطه‌ور در آب است. در سیستم‌های حفاظت کاتدی از اعمال جریان الکتریکی برای کنترل خوردگی استفاده می‌شود. اگر اعمال جریان الکتریکی متوقف شود، خوردگی مطابق با نرخ عادی مربوط به آن سیستم فلز – محیط پیش می‌رود. اگر میزان جریان اعمالی برای ایجاد حفاظت کاتدی کامل کافی نباشد، در این صورت خوردگی با نرخ کمتر از حالت عادی پیش می‌رود.

بعد از آنکه سیستم حفاظت کاتدی برای حفاظت کامل از خوردگی نصب و تنظیم گردید، باید میزان جریان و پتانسیل در آن سیستم، پایدار بماند. هرگونه تغییراتی در میزان جریان و پتانسیل بیانگر وقوع مشکل با معضل است.

کاربرد:

به منظور جلوگیری از خوردگی تأسیسات زیر از حفاظت کاتدی استفاده می‌شود:

۱) مخازن سوخت مدفون در زمین و کف مخازن سوخت در روی زمین
۲) سیستم‌های توزیع سوخت
۳) سطوح داخلی مخازن آب مرتفع و یا مخازن قرار گرفته بر روی زمین
۴) سیستم‌های توزیع آب آشامیدنی
۵) سیستم‌های توزیع گاز طبیعی
۶) سیستم‌های توزیع هوای فشرده
۷) سیستم‌های اطفاء حریق
۸) ورق‌های فولادی اسکله‌ها
۹) شمع‌های فولادی اسکله‌ها

فوائد:

برای صاحبان تأسیسات دو انتخاب وجود دارد: (۱) نصب و نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی (۲) به طور متناوب تعویض نمودن قطعاتی از تأسیسات که در اثر خوردگی، مسائل فنی و اقتصادی بسیاری را به وجود آورده‌اند. درصورتی‌که یک سیستم حفاظت کاتدی به طور اصولی و صحیح نصب، راه‌اندازی و نگهداری شود به طور قابل ملاحظه‌ای هزینه‌های آن سیستم به‌واسطه طولانی شدن عمر آن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر نصب سیستم‌های حفاظت کاتدی از انجام صدمات ناگهانی همچون انفجارها در خطوط انتقال گاز جلوگیری به عمل می‌آورد. باید خاطر نشان کرد که پاکسازی محیط، انتقال و جمع‌آوری و دور ریختن خاک‌های آلوده که در اثر خوردگی خطوط لوله انتقال نفت و گاز ایجاد می‌شود و همچنین هزینه‌های مربوط به ارزیابی و مانیتورینگ خوردگی در این خطوط سالانه هزینه‌های هنگفتی را به صنایع نفت و گاز وارد می‌آورد؛ بنابراین نصب سیستم‌های حفاظت کاتدی بر سازه‌های فولادی در محیط‌های خورنده بسیار ضروری است.

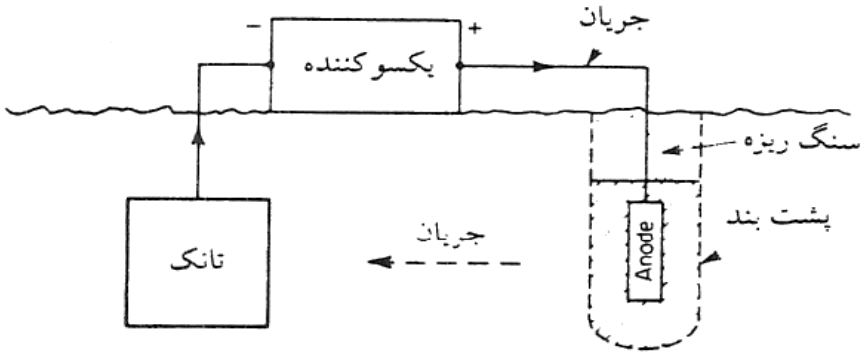
حفاظت کاتدی قبل از به وجود آمدن علم الکتروشیمی مورد استفاده قرار گرفته است. در ۱۸۲۴ دیوی[۲۰] این روش را برای حفاظت کشتی‌های انگلیسی به کار برد. اساس حفاظت کاتدی را می‌توان با در نظر گرفتن خوردگی فلز M در یک محیط اسیدی توضیح داد. واکنش‌های الکتروشیمیایی انحلال فلز و آزاد شدن گاز هیدروژن است، بر طبق معادلات زیر:

$$M \rightarrow M^{n+} + ne$$

$$2H + + 2e^{-} \rightarrow H_2 \square$$

با فراهم نمودن الکترون برای فلزی که بایستی محافظت شود، حفاظت کاتدی انجام می‌شود. بررسی معادلات فوق نشان می‌دهد که با دادن الکترون به فلز، انحلال آن تقلیل می‌یابد و تصعید هیدروژن انجام می‌شود. اگر فرض کنیم جریان از قطب مثبت به قطب منفی می‌رود، مطابق قرار داد در قوانین الکتریسیته، بنابراین درصورتی که جریان از الکترولیت وارد سطح فلز گردد، باعث محافظت آن می‌شود. برعکس اگر جریان از سطح فلز وارد الکترولیت گردد خوردگی شدید واقع می‌گردد. در تکنولوژی حفاظت کاتدی قرارداد جهت جریان به‌صورت فوق فرض شده و در اینجا نیز به همین صورت بیان می‌شود.

دو روش برای حفاظت کاتدی وجود دارد: (۱) به‌وسیله یک مولد برق یا (۲) به‌وسیله ایجاد یک زوج گالوانیکی مناسب. در شکل ۱-۲ حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان الکتریکی نشان داده شده است. در این شکل یک تانک زیرزمینی به قطب منفی مولد جریان مستقیم[۲۱] وصل شده است و قطب مثبت به یک آند خنثی مثل گرافیت یا دورآیرون[۲۲] متصل است.



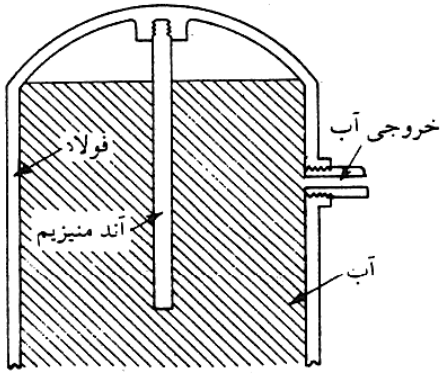
شکل ۱-۲ حفاظت کاتدی یک تانک زیرزمینی با استفاده از روش اعمال جریان خارجی

2 □□□ □□□ □□□□ 0
2 □□□ □□ 1
2 □□□ □□□□□□ 2

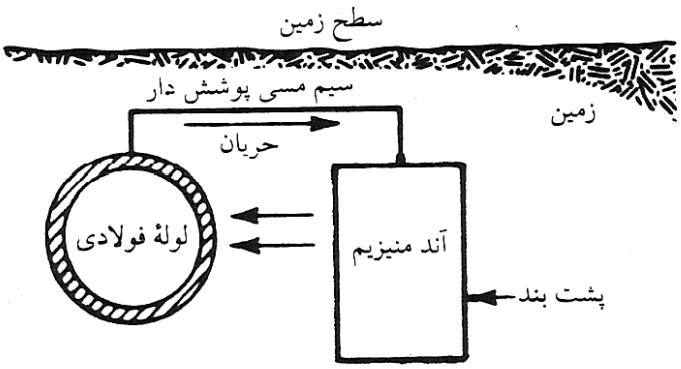
محل اتصال کابل به تانک و الکترود خنثی به‌دقت عایق می‌شود تا از نشت جریان جلوگیری شود. آند معمولاً به‌وسیله پشت‌بند[۲۳] شامل پودر کک، گچ یا بنتونیت محصور شده است تا اتصال الکتریکی بین آند و زمین مجاور را بهبود بخشد. همان‌طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است جریان از زمین (الکترولیت) وارد سطح تانک می‌شود و باعث کاهش خوردگی آن می‌گردد.

در شکل ۱-۳ حفاظت کاتدی با متصل کردن فلزی که بایستی مورد حفاظت قرار گیرد به منیزیم نشان داده شده است. همان‌طور که در فصول بعد گفته شده است، منیزیم نسبت به فولاد آندی بوده و در زوج گالوانیکی با فولاد، منیزیم خورده خواهد شد. آند در این حالت، آند فداشونده[۲۴]نام دارد زیرا در طی فرایند حفاظت فولاد مصرف می‌شود. حفاظت کاتدی با استفاده از آند فداشونده همچنین برای حفاظت لوله‌های زیرزمینی نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.(شکل ۱-۴).

در این مورد آندهایی با فواصل یکسان در طول لوله کار گذاشته می‌شوند تا توزیع یکنواختی از جریان الکتریکی به سطح لوله برسد.



شکل ۱-۳ حفاظت کاتدیک تانک آبگرم خانگی به‌عنوان آند فداشونده



شکل ۱-۴ حفاظت یک لوله زیرزمینی با یک آند منیزیمی

2 [illegible] 3
2 [illegible] 4

جریان الکتریکی لازم برای محافظت فلز به طور تجربی تعیین می‌گردد، در جدول ۱-۲بعضی مقادیر به‌عنوان نمونه داده شده است. محیط‌های خورنده مثل اسیدهای گرم نیاز به جریان بیشتری دارند درصورتی‌که در محیط‌هایی که قدرت خوردندگی کمتری دارند جریان بسیاری کمتری مورد نیاز است (مثلاً در بتن). جدول ۱-۲ مقادیر متوسط جریان را به طور نمونه نشان می‌دهد و کاربردهای خاص ممکن است مقادیر متفاوتی نیز داشته باشند. مثلاً در بعضی خاک‌های خیلی اسیدی غالباً ۱۰ تا ۱۵ میلی‌آمپر بر فوت‌مربع جریان لازم است، همچنین چنانچه لوله دارای پوشش آلی باشد جریان به مراتب کمتری لازم خواهد بود، زیرا تنها محل‌هایی از فلز که به‌واسطه نواقص در پوشش در معرض محیط خورنده قرار دارند، بایستی محافظت شوند. در این گونه موارد به روش سعی و خطا، اندازه آند یا جریان مورد نیاز بایستی تعیین گردد. یک روش دقیق‌تر و سریع‌تر اندازه‌گیری پتانسیل فلز مورد نظر به‌وسیله یک الکترود و مرجع مناسب است.

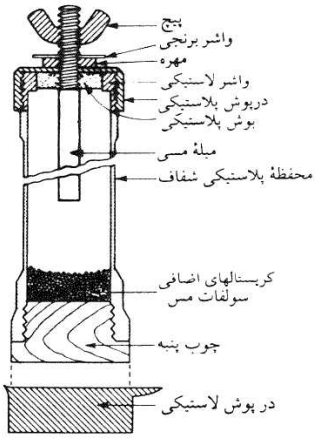
تجهیزات فولادی در تماس با خاک‌ها، آب‌های شیرین و شور و آب دریا چنانچه به پتانسیل ۰/۸۵- ولت نسبت به الکترود مقایسه مس - سولفات مس پلاریزه گردند محافظت خواهند شد. شکل ۱-۵ الکترود مزبور را که برای حفاظت کاتدی مورد استفاده قرار می‌گیرد نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲ جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی فولاد

دانسیته جریان، mA/ft^2	شرایط	محیط	ساختمان
۵۰،۰۰۰	ساکن	داغ H_2SO_4	تانک
۳ - ۱	ساکن	زیرزمینی	خطوط لوله و
-	-	(خاک)	تانک‌های ذخیره
۱۰ - ۵	متحرک	آب شیرین	خطوط لوله
۳ - ۱	حرکت آهسته	آب شیرین و داغ	آبگرمکن
۸ - ۶	حرکت در اثر جذر و مد	آب دریا	ستون‌ها
۰/۵ - ۰/۱	ساکن	بتن	آرماتورهای بتنی

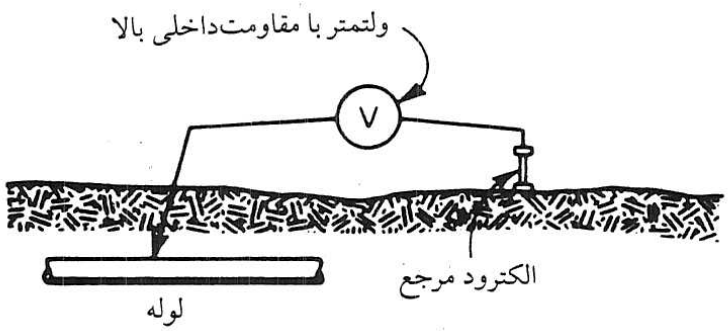
منبع: بعضی اطلاعات داده شده از منبع زیر گرفته شده است:

M. Stern, Principles of Cathodic Protection, Symposium on Corrosion Fundamentals, 1956:84, University of Tennessee press.



شکل ۱-۵ الکترود پرتابل مس - سولفات مس

این الکترود دارای این مزایا است: ارزان بودن، دقت خوب و محکم و با دوام بودن. پتانسیل یک فلز به‌وسیله یک ولت‌متر با مقاومت بالا به‌صورتی که در شکل ۱-۶ نشان داده شده است اندازه‌گیری می‌شود و موقع اندازه‌گیری الکترود مقایسه را داخل زمین یا روی یک قطعه اسفنج آغشته به آب نمک‌دار می‌گذارند تا اتصال الکتریکی برقرار شود. دانسیته جریان لازم برای پلاریزه کردن فلز تا ۰/۸۵- ولت به سهولت اندازه‌گیری می‌شود. در مواردی که از آندهای فداشونده (مثلاً منیزیم) استفاده می‌شود، از همین اندازه‌گیری به منظور تعیین تعداد و اندازه آندها برای حفاظت کامل استفاده می‌شود. در مورد لوله‌های بلند یا اسکلت‌های فلزی بزرگ و پیچیده، اندازه‌گیری پتانسیل به‌وسیله الکترود مقایسه برای تعیین یکنواختی جریان انجام می‌شود.



شکل ۱-۶ اندازه‌گیری پتانسیل لوله زمینی به‌وسیله الکترود مرجع

انتخاب آند برای حفاظت کاتدی بر اساس ملاحظات مهندسی و اقتصادی قرار دارد. در جدول ۱-۳ چند نوع آند فداشونده و آند برای روش اعمال جریان خارجی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بین آندهای فداشونده، منیزیم، متداول‌ترین است. اگرچه راندمان آن پایین است (حدود ۵۰ درصد) لکن این کمبود با پتانسیل بسیار منفی آن جبران شده و در نتیجه جریان بالایی به دست می‌دهد.

آندهایی که در روش اعمال جریان خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرد متنوع‌تر هستند و از قراضه‌های فولادی ارزان قیمت که به سرعت خورده می‌شوند، تا تیتانیم پلاتینیزه خنثی که هم راندمان بالایی دارد و هم گران‌قیمت است را دربرمی‌گیرد. فولاد، گرافیت و آهن سیلیسیم‌دار متداول‌ترین هستند، سرب و تیتانیم پلاتینیزه شده کاربرد روزافزونی در محیط‌های دریایی پیدا کرده‌اند.

جریان‌های سرگردان[۲۵] غالباً در سیستم‌های حفاظت کاتدی باعث اشکالاتی می‌گردند. اصطلاح جریان‌های سرگردان به جریان‌های مستقیم موجود در منطقه مورد نظر اطلاق می‌گردد. چنانچه یک شیء فلزی در یک محیط میدان جریان الکتریکی قرار گیرد، اختلاف پتانسیل، روی آن به وجود آمده و در نقاطی جریان از سطح شیء وارد خاک می‌گردد، خوردگی شدیدی ملاحظه می‌گردد. در سال‌های گذشته به خاطر نشت جریان تراموای الکتریکی، مشکلات ناشی از جریان‌های سرگردان کاملاً متداول بودند، لوله‌ها و تانک‌هایی که زیر مسیر تراموا قرار داشتند به‌سرعت خورده می‌شدند. لکن چون این نوع وسیله حمل و نقل امروزه کنار گذاشته شده، جریان‌های سرگردان از این منابع دیگر وجود ندارد.

جدول ۱-۳ مقایسه آندهای فداشونده و آند با جریان خارجی برای حفاظت کاتدی آندهای فداشونده

	منیزیم	روی	آلومینیم و قلع
مصرف تئوریکی	–	–	–
Ib/amp-yr	۹	۲۳	۶/۵
مصرف واقعی	–	–	–
Ib/amp-yr	۱۸	۲۵	۱۶ - ۲۰
پتانسیل نسبت به $Su/CuSO_4$	-۱/۷	-۱/۱۵	-۱/۳

آندهای جریان خارجی

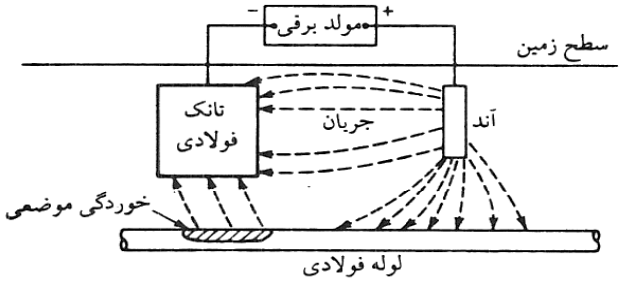
کاهش وزن Ib/amp-yr	کاربرد	مواد
۲۰	خاک، آب شیرین و دریا	قراضه فولادی
۱۲ – ۱۰	خاک، آب شیرین و دریا	آلومینیم
۵/۰ – ۰/۲۵	خاک، آب شیرین	گرافیت
۱/۰ – ۰/۲۵	خاک، آب شیرین و دریا	چدن پر سیلیسیم و چدن Si-Cr
۰/۲۵ – ۰/۱	آب دریا	سرب
صفر	آب دریا	تیتانیم پلاتینیزه شده

Modified from J. H. Morgan, Cathodic Protection The Macmillan Company, New York, 1960.

2 [illegible] 5

منبع متداول‌تر جریان‌های سرگردان، سیستم‌های حفاظت کاتدی می‌باشند. این مسئله مخصوصاً در حوزه‌های نفتی شلوغ و کمپلکس‌های صنعتی وجود دارد که دارای لوله‌های زیرزمینی بسیاری می‌باشند.

شکل ۱-۷ جریان‌های سرگردان ناشی از یک سیستم حفاظت کاتدی را نشان می‌دهد. صاحب تانک زیرزمینی حفاظت کاتدی نصب نمود. او از خط لوله مجاور که در اثر حوزه جریان‌های سرگردان به‌سرعت سوراخ شد بی‌اطلاع بود. اگر صاحب خط لوله، حفاظت کاتدی به لوله خود متصل می‌کرد، خوردگی ناشی از جریان‌های سرگردان لوله از بین می‌رفت، لکن باعث خوردگی روی تانک مجاور می‌شد.



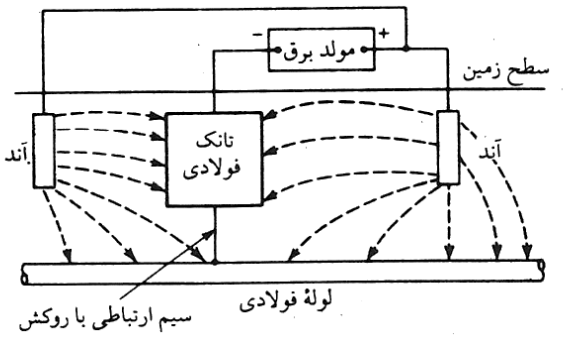
شکل ۱-۷ جریان‌های سرگردان ناشی از حفاظت کاتدی

به سهولت می‌توان دید که چگونه خوردگی در اثر جریان‌های آوازه تشدید می‌شود.

افزایش جریان برای حفاظت روی هرکدام باعث افزایش جریان مورد نیاز برای حفاظت دیگری می‌شود، در یک منطقه صنعتی که دارای دانسیته بالایی از خطوط لوله زیرزمینی بود، جریان مورد نیاز برای حفاظت در بعضی مناطق به ۲۰ میلی‌آمپر بر فوت‌مربع افزایش یافت.

راه حل این مسئله هماهنگی بین دو سیستم است. مثلاً خوردگی ناشی از جریان‌های سرگردان شکل ۱-۷ به‌صورت شکل ۱-۸ قابل حل است. به این ترتیب لوله و تانک بدون ایجاد جریان‌های سرگردان حفاظت شده و مخارج حفاظت بین دو سیستم تقسیم می‌شود.

حفاظت کاتدی با اعمال جریان خارجی برای کاهش مخارج تعمیرات و نگهداری شاهراه‌ها و پل‌ها به کار رفته است و صرفه‌جویی‌های قابل ملاحظه‌ای صورت گرفته است. خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن کاهش داده می‌شود. در مناطق خارج از شهر، استفاده از پنل‌های خورشیدی برای تأمین جریان الکتریکی پیشنهاد شده است. حفاظت کاتدی هنوز بیشتر یک فن است تا یک علم و تجربیات قبلی بهترین مبنا برای قضاوت است. این نظریه یک مهندس خوردگی بود که بعد از ۳۰ سال تجربه عمدتاً در حفاظت کاتدی خطوط لوله‌ها بازنشسته می‌شد. شرکت‌های زیادی در زمینه حفاظت کاتدی وجود دارند و درصورتی‌که پروژه بزرگی وجود داشته باشد بایستی با آنها مشورت نمود.



شکل ۱-۸ جلوگیری از خوردگی ناشی از جریان‌های سرگردان با طراحی صحیح

نگهداری سیستم حفاظت کاتدی

عملکرد سیستم حفاظت کاتدی از طریق اندازه‌گیری جریان اعمالی و پتانسیل سازه یا ترجیحاً هر دو روش قابل ارزیابی است. نگهداری مدون سیستم، شامل بازرسی و تنظیم عواملی چون جریان یک‌سوکننده و آندها می‌باشد. نگهداری غیرمدون شامل برنامه‌های رفع عیوب و تعویض و تعمیر مواردی همچون بسترهای آند و کابل‌های جریان الکتریکی هستند که در خلال نگهداری مدون شناسایی شده‌اند.

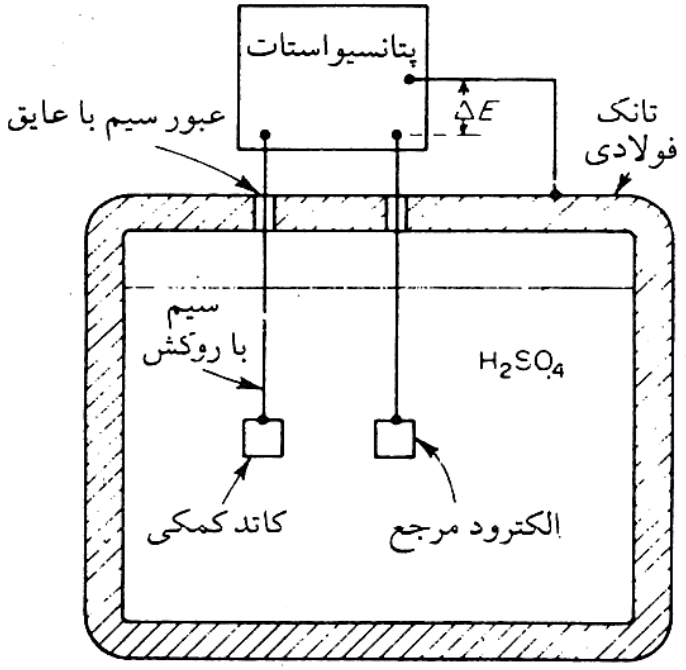
حفاظت آندی

برعکس حفاظت کاتدی، حفاظت آندی نسبتاً جدید است و اولین بار در ۱۹۵۴ پیشنهاد شد. این تکنیک با استفاده از اصول سینتیک الکترود ابداع گردید و بدون اطلاع از نظریه‌های مدرن تئوری الکتروشیمی توصیف آن مشکل است. به طور خلاصه، حفاظت آندی بر اساس تشکیل یک پوسته سطحی محافظ روی فلزات با اعمال جریان‌های آندی است. همان‌طور که در معاملات مشاهده می‌شود با اعمال جریان آند به یک فلز قاعدتاً سرعت انحلال فلز بایستی افزایش پیدا کند و سرعت آزاد شدن هیدروژن کاهش یابد.

معمولاً در مورد فلزات این حالت اتفاق می‌افتد به‌جز در مورد فلزات فعال - غیرفعال مثل نیکل، آهن کرم، تیتانیم و آلیاژهای آنها اگر به‌دقت جریان آندی به این فلزات اعمال گردد، غیرفعال شده و سرعت انحلال تقلیل می‌یابد. برای حفاظت آندی، دستگاهی به نام پتانسیواستات لازم است، پتانسیواستات یک دستگاه الکترونیک است که فلز را در یک پتانسیل ثابت نسبت به یک الکترود مقایسه نگه می‌دارد. در شکل ۱-۹ حفاظت آندی یک تانک فولادی حاوی اسید سولفوریک نشان داده شده است.

پتانسیواستات دارای ۳ ترمینال است، یکی به تانک متصل می‌شود، دیگری به یک الکترود کمکی به‌عنوان کاتد (الکترود پلاتین یا پوشش داده شده به‌وسیله پلاتین) و سومی به یک الکترود مقایسه (مثلاً الکترود کالومل). در عمل پتانسیواستات، همواره پتانسیل ثابتی بین تانک و الکترود مقایسه برقرار می‌سازد. پتانسیل لازم را با اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی قبلاً معین می‌کنند.

حفاظت آندی سرعت خوردگی را به‌شدت تقلیل می‌دهد. جدول۱-۴ سرعت خوردگی فولاد زنگ نزن آستنیتی را در محلول‌های اسید سولفوریک حاوی یون‌های کلر با و بدون حفاظت آندی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حفاظت آندی باعث می‌شود سرعت خوردگی در بعضی سیستم‌ها ۱۰۰،۰۰۰ برابر کمتر شده اگرچه حفاظت آندی محدود به فلزات فعال – غیرفعال است ولی باید توجه داشت که اکثر فلزات ساختمانی شامل این فلز می‌باشند.



شکل ۱-۹حفاظت آندی یک تانک فولادی حاوی اسید سولفوریک

لذا این محدودیت برخلاف آنچه که در ابتدا به نظر می‌رسد، چندان مهم نیست. جدول ۵-۱ بعضی سیستم‌هایی که حفاظت آندی به طور موفقیت‌آمیزی در آنها به کار رفته نشان می‌دهد.

مزیت عمده حفاظت آندی قابلیت استفاده از آن در محیط‌های بسیار خورنده و نیاز به جریان الکتریکی کم است.

یک کاربرد جالب توجه و اقتصادی از حفاظت آندی، استفاده از لوله‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن نوع ۳۱۶ برای خنک کردن اسید در واحدهای اسید سولفوریک است.

جدول ۴-۱ حفاظت آندی فولاد زنگ نزن آستینیتی در ۳۰ درجه سانتی‌گراد (حفاظت در ۰/۵ ولت نسبت به الکترود اشباع کالومل)

نوع آلیاژ	محیط (در تماس با هوا)	سرعت خوردگی، □□ □□	
		حفاظت نشده	با حفاظت آندی
۳۰۴ (19Cr-9Ni)	$NH_2SO_4 + 10^{-5}MNaCl$	۱۴	۰/۰۲۵
	$NH_2SO_4 + 10^{-3}MNaCl$	۲/۹	۰/۰۴۵
	$NH_2SO_4 + 10^{-1}MNaCl$	۳/۲	۰/۲۰
	$10NH_2SO_4 + 10^{-5}MNaCl$	۱۹۳۰	۰/۰۱۶
	$10NH_2SO_4 + 10^{-3}MNaCl$	۱۱۲۵	۰/۰۴
	$10NH_2SO_4 + 10^{-1}MNaCl$	۷۷	۰/۲۱

منبع: □S. J. Acello and N. A. Greene. Corrosion, 18: 286 (1962).

لوله‌ها دارای حفاظت آندی هستند و این کار به جای استفاده از مبدل‌های حرارتی چدنی ضخیم صورت می‌گیرد.

مقایسه حفاظت کاتدی و آندی

در جدول ۶-۱ بعضی از اختلافات مهم حفاظت کاتدی و آندی آورده شده است. هریک از این دو روش دارای معایب و مزایایی هستند، و درعین‌حال، مکمل یکدیگرند. حفاظت آندی در محیط‌های ضعیف تا خیلی خورنده می‌تواند به مورد استفاده قرار گیرد، درحالی‌که، حفاظت کاتدی محدود به محیط‌های متوسط از نظر خوردگی می‌باشد زیرا با اضافه شدن خورندگی محیط، جریان الکتریکی بیشتری لازم است. لذا حفاظت کاتدی فلزات در محیط‌های بسیار خورنده عملی نیست. برعکس در حفاظت آندی جریان‌های بسیار کمی به کار می‌رود، لذا در محیط‌های بسیار خورنده می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

جدول ۱-۵ جریان مورد نیاز برای حفاظت آندی

مایع و غلظت H_2SO_4	درجه حرارت °F	فلز	دانسیته جریان ma/ft^2 برای غیرفعال کردن	برای نگهداری در حالت غیرفعال
۱ (□ □□)	۷۵	۳۱۶□□	۲۱۰۰	۱۱
٪۱۵	۷۵	۳۰۴	۳۹۰	۶۷
٪۳۰	۷۵	۳۰۴	۵۰۰	۲۲
٪۴۵	۱۵۰	۳۰۴	۱۶۵،۰۰۰	۸۳۰
٪۶۷	۷۵	۳۰۴	۴۷۰۰	۳/۶
٪۶۷	۷۵	۲۱۶	۴۷۰	۰/۰۹
٪۶۷	۷۵	کارپنتر ۲۰	۴۰۰	۰/۸

۲۱	۲۶۰	فولاد کم کربن	۷۵	٪۹۳
۱۱	۴۴۰۰	فولاد کم کربن	۷۵	دودکننده
–	–	–	–	H_3PO_4
۱۹،۰۰۰	۳۸،۰۰۰	فولاد کم کربن	۷۵	٪۷۵
۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۳	۳۰۴□□	۱۸۰	٪۱۱۵
–	–		–	□□□□□
۹/۴	۴۴۰۰	۳۰۴□□	۷۵	٪۲۰

منبع: .□C. E. Locke et al., Chem. Eng. Progr., 56:50 (1960)

مخازن سیستم حفاظت کاتدی چندان گران نیست زیرا اجزاء مورد استفاده ساده بوده و به سهولت نصب می‌گردند. حفاظت آندی نیاز به تجهیزات پیچیده‌ای شامل پتانسیواستات و الکترود مقایسه داشته و مخارج نصب آن نیز بالاتر است. مخارج بهره‌برداری از این دو روش نیز به دلیل اختلاف جریان الکتریکی مورد نیاز که در بالا بدان اشاره شد، با یکدیگر متفاوت است. منطقه مورد حفاظت یا قدرت پرتاب[26] حفاظت کاتدی کم می‌باشد، لذا برای برقراری جریان یکنواخت احتیاج به الکترودهای متعدد در فواصل نزدیک به یکدیگر دارد. سیستم‌های حفاظت آندی دارای قدرت پرتاب بالایی هستند، لذا با یک الکترود کمکی به تنهایی می‌توان یک خط لوله طویل را محافظت کرد.

جدول ۶-۱ مقایسه حفاظت آندی و کاتدی

حفاظت کاتدی	حفاظت آندی	
تمام فلزات	فقط فلزات فعال – غیرفعال.	قابلیت کاربرد
ضعیف تا متوسط	ضعیف تا خورنده	محیط خورنده
		مخارج نسبت
پایین	بالا	نصب
متوسط تا بالا	خیلی کم	بهره‌برداری
پائین	خیلی بالا	قدرت پرتاب
پیچیده – نشان‌دهنده	غالباً نشان‌دهنده	اهمیت جریان
سرعت خوردگی نیست	سرعت خوردگی	اعمال شده
	فلز تحت حفاظت می‌باشد	
معمولاً بایستی با	می‌تواند دقیقاً و سریعاً با	شرایط
آزمایش‌های عملی تعیین گردد.	اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی تعیین شود.	

حفاظت آندی دارای دو ویژگی منحصربه‌فرد است. اول جریان الکتریکی اعمال شده معمولاً با مقدار خوردگی سیستم تحت حفاظت برابر است. لذا حفاظت آندی نه تنها یک روش حفاظت است، بلکه یک روش اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای خوردگی

[26] □□□□□□□□□□□□□□□□

است. دوم شرایط لازم برای حفاظت آندی را با رسم منحنی پلاریزاسیون در آزمایشگاه به‌دقت می‌توان تعیین نمود. برعکس شرایط عمل برای حفاظت کاتدی معمولاً با آزمایشات متعدد به روش سعی و خطا تعیین می‌گردد. اگرچه روش‌های ارزیابی سریع مختلفی برای تخمین جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی پیشنهاد شده است، تمام آنها کم‌وبیش غیرقابل اطمینان هستند و انتخاب نهایی معمولاً بر اساس تجربیات قبلی است.

حفاظت آندی بر اساس اصول علمی دقیقی قرار دارند و به طور موفقیت‌آمیزی برای حل مشکلات صنعتی به کار رفته است. لکن از زمان معرفی این روش، وارد شدن آن در مهندسی خوردگی به کندی صورت گرفته است. عدم تمایل مهندسان خوردگی برای استفاده از این روش حفاظت، عمدتاً به خاطر تجارت شخصی و اطلاعاتی می‌باشد که در مجلات خوردگی کلاسیک وجود دارند. اگر قطب‌های مولد جریان مستقیم در یک سیستم حفاظت کاتدی اشتباهاً به فلز مورد نظر متصل شوند، نتیجه وحشتناکی به بار خواهد آمد. خوردگی سریع آند در یک زوج گالوانیکی، قانون کلی در مجلات خوردگی پلاستیک که جریان‌های آندی اعمال شده خوردگی را تشدید می‌کنند، تمام اینها باعث کندی وارد شدن این روش حفاظت کاتدی در عمل شده است. در واقع حفاظت آندی یک حالت استثناء در مورد قاعده کلی تشدید خوردگی در اثر جریان‌های آندی یا گرفتن الکترون از فلز می‌باشد. حفاظت آندی در آینده احتمالاً انقلابی در زمینه حفاظت در مهندسی خوردگی به وجود خواهد آورد. با استفاده از این روش می‌توان برای یک کاربرد معین خوردگی فلز ارزان‌تری به کار برد. حفاظت آندی را می‌توان یکی از مهم‌ترین دستاوردهای علم خوردگی در تمام طول تاریخ آن دانست.

پوشش‌ها

پوشش‌های فلزی و پوشش‌های غیرآلی دیگر

پوشش‌های نسبتاً نازک فلزی و یا مواد غیرآلی می‌تواند سد یا مانع مناسبی بین فلز و محیط آن باشد. کار اصلی این‌گونه پوشش‌ها (صرف نظر از پوشش‌های فداشونده مثل Zn) به وجود آوردن سدی مؤثر بین فلز و محیط آن می‌باشد. پوشش‌های فلزی با روش آبکاری الکتریکی[۲۷] پاشیدن مشعلی[۲۸] روکش کردن[۲۹] غوطه‌وری گرم[۳۰] گازی[۳۱]به دست می‌آیند. پوشش‌های غیرآلی (معدنی) به‌وسیله پاشیدن[۳۲]دیفوزیون، یا تبدیل شیمیایی اعمال می‌گردند. معمولاً پاشیدن[۳۳]پختن یا حرارت دادن در درجه حرارت بالا را به دنبال دارد. پوشش‌های فلزی معمولاً قابلیت تغییر شکل‌پذیری دارند، درحالی‌که، پوشش‌های غیرآلی ترد هستند. در هر دو مورد بایستی مانع کاملی روی سطح فلز به وجود آید. تخلخل پوشش یا نواقص دیگر می‌تواند باعث خوردگی موضعی فلز زمینه در اثر خوردگی گالوانیکی گردد.

---

2 [illegible] 7
2 [illegible] 8
2 [illegible] 9
3 [illegible] 0
3 [illegible] 1
3 [illegible] 2
3 [illegible] 3

مثال‌هایی از اشیا پوشش‌دار، سپرهای اتومبیل، زه‌های اتومبیل، وسایل خانگی، ظروف نقره‌ای، فولاد گالوانیزه و قوطی‌های مواد غذایی می‌باشند. وان‌های حمام و تانک‌های فولادی با پوشش شیشه‌ای[۳۴] مثال‌هایی از پوشش‌های سرامیکی می‌باشند. مثال‌هایی از پوشش‌هایی که به‌وسیله دیفوزیون و یا تبدیل شیمیایی به دست می‌آیند به ترتیب فولاد کرم کاری[۳۵] و آلومینیم آندیزه[۳۶] می‌باشند.

آبکاری الکتریکی[۳۷]: این روش مشتمل بر فرو بردن قطعه در داخل محلولی از فلزی که بایستی پوششی داده شود و عبور جریان مستقیم (D.C) بین قطعه و یک الکترود دیگر است. مشخصات رسوب بستگی به فاکتورهای متعددی شامل درجه حرارت، دانسیته جریان، زمان و ترکیب شیمیایی محلول دارد. این متغیرها را می‌توان طوری تنظیم نمود که پوشش‌های ضخیمی مثلاً تا ۲ میل یا نازکی تا حدود هزارم میل (هر میل یک هزارم اینچ است) به دست آید. همچنین با تنظیم این متغیرها می‌توان پوشش‌های تیره، درخشان، نرم (سرب) یا سخت (کرم)، و انعطاف‌پذیر یا ترد به دست آورد. پوشش‌های سخت برای مبارزه با خوردگی سایشی به کار برده می‌شوند. پوشش می‌تواند از یک لایه فلز تشکیل شده باشد، یا از چند لایه فلزی تشکیل یابد، یا حتی دارای ترکیب آلیاژی باشد (مثل برنج). مثلاً سپر اتومبیل دارای یک لایه داخلی مس (برای چسبندگی خوب)، یک لایه داخلی نیکل (برای حفاظت از خوردگی) و یک لایه نازک از کروم صرفاً به خاطر ظاهر می‌باشد. از نظر مقدار مصرف پوشش‌های فلزی به ترتیب زیر قرار دارند: روی، نیکل، قلع و کادمیم. پوشش‌های طلا، نقره و پلاتین نیز معمول هستند. اکثریت فلزات را با آبکاری الکتریکی می‌توان روی فلزات دیگر پوشش داد.

پاشیدن مشعلی[۳۸]: این فرایند که متالیزه کردن نیز نامیده می‌شود توسط مشعل انجام می‌شود. با هدایت سیم فلزی یا پودر فلزی از طریق یک مشعل که باعث ذوب آن می‌شود و به‌صورت ذرات ریز مذاب به سطح فلزی پاشیده می‌شود که بایستی پوشش داده شود. اکسیژن و استیلن یا پروپان معمولاً برای ایجاد شعله به کار برده می‌شود. این پوشش‌ها معمولاً متخلخل بوده و در شرایط حاد خورنده مرطوب محافظ نیستند. معمولاً با افزایش نقطه ذوب فلز، تخلخل پوشش افزایش می‌یابد. روی، قلع و سرب از این نظر بهتر از فولاد یا فولاد زنگ نزن می‌باشند. سطحی که بایستی پوشیده شود بایستی زبر گردد (با ماسه پاشی) تا باند یا اتصال مکانیکی به وجود آید. گاهی اوقات یک پوشش رنگ روی پوششی اعمال می‌گردد که به این طریق حاصل می‌شود تا حفره‌ها را پر نماید و مانع بهتری به وجود آید. فلز متخلخل زمینه مناسبی برای رنگ بوده و اتصال خوبی به وجود می‌آید. پاشیدن مشعلی یک روش اقتصادی برای بازیابی سطوح فرسوده مثل شفت‌ها می‌باشد. فلزات با نقطه ذوب بالا را می‌توان با جت‌های پلاسما رسوب داد.

کاربردهای پاشیدن مشعلی مشتمل است بر تمام انواع تانک‌ها و مخازن، پل‌ها، بدنه کشتی‌ها و اسکلت داخلی آنها[۳۹] و بسیاری محصولات فولادی دیگر. دودکش‌های پوشیده به‌وسیله آلومینیم و آب‌بندی شده به‌وسیله یک پوشش آلی سیلیسیم – آلومینیم تا ۹۰۰ درجه فارنهایت محافظ هستند. فولاد زنگ نزن ۸ – ۱۸ که توسط این روش و با آلومینیم پوشش داده شده است تا

3 [illegible] 4
3 [illegible] 5
3 [illegible] 6
3 [illegible] 7
3 [illegible] 8
3 [illegible] 9

حوالی 1500°Fدر هوا مقاوم می‌باشد. قیمت پوششی به ضخامت ۵ میل، ۶ سنت بر فوت‌مربع برای آلومینیم و ۱۲ سنت بر فوت‌مربع برای روی می‌باشد.

روکش کردن:[۴۰] این روش مشتمل است بر پوشش دادن سطح فلز به‌وسیله نورد کردن دو ورق فلزی به یکدیگر. مثلاً با نورد گرم یک ورق فولادی و ورق نیکلی می‌توان یک ورق دوبله مثلاً با ضخامت $\frac{1}{8}$ اینچ نیکل و یک اینچ فولاد به وجود آورد. فلز روکش معمولاً نازک‌تر از فلز زمینه است. آلومینیم با استحکام بالا، غالباً به‌وسیله آلومینیم خالص تجارتی روکش داده می‌شود تا مانعی در مقابل SCC آلومینیم زمین گردد.

گاهی اوقات یک لایه نازک را به دیواره‌های تانک‌های فولادی نقطه جوش[۴۱] می‌کنند. Ni، Al، Cu، Ti و فولادهای زنگ نزن و فلزات دیگر غالباً برای روکش کردن فولاد به کار برده می‌شوند.

توسعه فولادهای زنگ نزن کم کربن (۳۰۴ L) کاربرد مخازن روکش داده شده را افزایش داده است. یک تانک فولادی با روکش فولاد زنگ نزن را نمی‌توان عملیات حرارتی، کوانچ و آنیل نمود. موقع جوش دادن قطعات روکش شده برای اجتناب از رقیق شدن فلز جوش، لازم است الکترود پر آلیاژتری استفاده کرد. مثلاً الکترود فولاد زنگ نزن نوع ۳۱۰ برای اتصال ورق فولاد روکش شده به‌وسیله نوع ۳۰۴ L به کار می‌رود. روکش کردن مزایای اقتصادی بسیار زیادی دارد زیرا در آن مانع خوردگی یا فلز گران‌تر نسبتاً نازک بوده و به‌وسیله لایه‌زیری ارزان قیمت فولادی تقویت می‌شود. مثال خوبی در این مورد یک مخزن تحت فشار بالاست که دارای روکش $\frac{1}{16}$ یا $\frac{1}{8}$ اینچ روی فولاد به ضخامت ۳ اینچ می‌باشد. اگر تمام فولاد از فلز گران قیمت مقاوم خوردگی انتخاب می‌شد، قیمت چندین برابر بود.

روش غوطه‌وری گرم:[۴۲] با فرو بردن فلزات به داخل حمام مذاب فلز با نقطه ذوب پایین، عمدتاً Zn، Sn، Pb، Al انجام می‌شود که بایستی پوشش داده شود. این فرایند یکی از روش‌های قدیمی پوشش دادن فلزات است. فولاد گالوانیزه مثال معروفی است. ضخامت پوشش خیلی بیشتر از حالت آبکاری الکتریکی است زیرا به دست آوردن ضخامت‌های نازک بسیار مشکل است. قطعات پوشش داده شده را با عملیات حرارتی و به وجود آوردن باند آلیاژی بین پوشش و فلز زمینه می‌توان کامل‌تر نمود.

روش گازی:[۴۳] این کار در یک محفظه با خلاء نسبتاً بالا انجام می‌شود. فلزی که بایستی پوشش باشد به‌وسیله جریان الکتریکی حرارت داده می‌شود و بخار حاصل از آن روی سطح قطعه‌ای که بایستی پوشش داده شود می‌نشیند. این روش گران‌تر از روش‌های دیگر بوده و معمولاً کاربرد آن محدود به قطعات بحرانی و خاصی می‌باشد، به‌عنوان مثال قطعاتی با استحکام بالا برای راکت‌ها و موشک‌ها به استثنا روش جدیدی که در یک خط تولید فولاد را به‌وسیله آلومینیوم پوشش می‌دهند.

روش نفوذی:[۴۴] این روش مشتمل است بر عملیات حرارتی برای به وجود آوردن آلیاژ روی سطح در اثر نفوذ یک فلز به داخل فلز دیگر است. به این دلیل این روش «آلیاژسازی سطحی»[۴۵] نیز نامیده می‌شود. قطعاتی که بایستی پوشش داده شوند در مواد

---

4 [illegible] 0
4 [illegible] 1
4 [illegible] 2
4 [illegible] 3
4 [illegible] 4
4 [illegible] 5

جامد مناسب یا محیط گازی مناسب قرار می‌گیرند. گالوانیزه خشک[۴۶](پوشش روی) کرمایز کردن[۴۷]پوشش کرم، آلونایز کردن[۴۸]پوشش آلومینیم مثال‌هایی در این مورد می‌باشند. در مورد آلونایز کردن، سطح را نیز اکسید می‌نمایند تا یک لایه محافظ AL_2O_3 نیز به وجود آید. فولادهای ساده کربنی، کم آلیاژ و زنگ نزن را می‌توان آلونایز کرد. مقاومت خوردگی خوبی در برابر هوا و گازهای گوگرددار در دماهای بالا (حدود $1650°F$) ایجاد می‌شود. این فولادهای آلونایز شده در صنایع نفت و شیمیایی برای مبدل‌های حرارتی یا سطوح داغ دیگر به کار می‌روند (مثلاً در تولید اسید سولفوریک). این روش معمولاً برای محیط‌های آبی توصیه نمی‌شود.

فولادهای آلونایز شده بر اساس قیمت رقابتی به کار می‌روند، لکن درصورتی‌که کمبود کرم به وجود آید، به نحو گسترده‌ای جایگزین کرم خواهد شد.

تبدیل شیمیایی[۴۹]در این روش با خورده شده سطح فلز لایه‌ای از محصول خوردگی که محافظ باشد، به وجود می‌آورند. آندیزه کردن[۵۰]مشتمل بر اکسیداسیون آندی در یک حمام اسیدی برای به وجود آوردن لایه اکسیدی، معروف‌ترین مثال در این مورد آلومینیم آندیزه شده است که روی آن پوسته محافظ (AL_2O_3) به وجود آمده است. بهبود خیلی زیادی در مقاومت خوردگی به وجود نخواهد آمد، لذا آلومینیم آندایزه شده نبایستی در جاهایی که آلومینیم معمولی سریعاً خورده شده به کار رود. پوسته به وجود آمده متخلخل بوده و لذا برای رنگ بسیار مناسب است. البته چنانچه سطح آندیزه شده در معرض آب جوش قرار بگیرد، به اصطلاح آب‌بندی می‌شوند. در واقع آلومینیم آندیزه شده عمداً اکسید شده، تا لایه سطحی یکنواختی روی آن به وجود آید. آلومینیم آندیز شده برای بسیاری از مقاصد آرشیتکتی (مثلاً پانل‌های دیواری در ساختمان‌ها) و سایر مواردی به کار می‌رود که ظاهر مجذوب مورد نظر است. به بیان دیگر، آندیز کردن آلومینیم را می‌توان یک اکسیداسیون کنترل شده در نظر گرفت که به منظور ایجاد یک لایه سطحی یکنواخت انجام می‌شود.

مثال‌هایی دیگر در این مورد به اندریزه کردن[۵۱]و پارکریزه کرده[۵۲]فسفات کردن در حمام اسید فسفریک)، کروماتیزه کردن[۵۳] (در معرض اسید کرومیک و دی کرومات‌ها قرار دادن)، و پوشش‌های اکسیدی یا حرارتی روی فولادها می‌باشد. بدنه‌های اتومبیل بهترین مثال برای فسفاته کردن[۵۴]می‌باشد. در اینجا زمینه خوبی برای رنگ‌کاری بعدی فراهم می‌آید و همچنین درصورتی‌که رنگ صدمه ببیند، شروع زنگ‌زدگی مدتی به تأخیر می‌افتد. کروماته کردن به قطعاتی که از منیزیم یا روی ساخته شده‌اند اعمال می‌گردد و تا حدودی مقاومت خوردگی را افزایش می‌دهد، لکن غالباً قطعات رنگ می‌شوند. پوسته‌های اکسیدی روی فولاد با حرارت دادن در هوا یا فرو بردن در محلول‌های داغ به وجود می‌آید. این پوسته‌ها را به منظور جلوگیری

4 [redacted] 6
4 [redacted] 7
4 [redacted] 8
4 [redacted] 9
5 [redacted] 0
5 [redacted] 1
5 [redacted] 2
5 [redacted] 3
5 [redacted] 4

از زنگ‌زدگی بایستی با یک محصول نفتی روغن کاری نمود. برای آبی کردن لوله‌های تفنگ آنها را به داخل محلول داغ قلیایی فرو برده و سپس سطح اکسید شده فلز را با روغن برزک[۵۵]خام، درحالی‌که، فلز داغ است ماساژ می‌دهند.

ایجاد تغییرات در سطح فلز: عملیات سطحی مشتمل بر تابش اشعه‌های پر انرژی به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار دارند. موقعی که عناصر آلیاژی مثل کرم به سهولت قابل دسترس نباشند در آینده این روش‌ها به کار خواهند رفت.

آلیاژسازی سطحی با لیزر در یک مقاله پیمایشی به وسیله درپیر[۵۶]بیان شده است. در این مقاله روش‌ها، ملاحظات اساسی و نتایج تشریح شده‌اند. لیزرهای SO_2 متداول‌ترین هستند. یک کتاب خوب شامل مباحث اثرات تابش مستقیم و رفتار حاصله آلیاژهای مختلف فولاد، آلومینیم، و مس و (برنز Fe-Al) وجود دارد.[۵۷]مک کافرتی[۵۸]شان داده است که تابش لیزر مقاومت خوردگی آلومینیم ۳۰۰۳ در اسید کلریدریک و محلول‌های سیتراتی را بهبود می‌بخشد و هیچ‌گونه تأثیری روی پتانسیل حفره‌دار شدن در محلول ۰/۱ مولار نمک طعام ندارد. موروموک کافرتی[۵۹]شان داده‌اند که فولاد آلیاژ شده با ۵، ۲۰ و ۸۰ درصد کرم غیرفعال شده است. لیزر همچنین برای وارد ساختن ذرات سخت در فلز (مثل WC و TIC) برای بهبود مقاومت سایشی به کار می‌رود.

کاشت یون: کاربرد کاشت یون برای ایجاد تغییرات در سطح، روش دیگری است که در آینده کاربردهای عملی پیدا خواهد کرد. پاتر و همکاران[۶۰]در یک مقاله پیمایشی نتایج مفید این روش بر مقاومت خوردگی را بحث می‌کنند.

فولاد با لعاب شیشه‌ای[۶۱]فلز مهمی برای صنایع شیمیایی و همچنین منازل می‌باشد، از مزایای این روش آسانی تمیز کردن سطوح صاف است (مخصوصاً موقعی که مواد چسبنده در میان باشند مثل صمغ یا بعضی رزین‌ها). فولادهای لعاب‌دار به طور وسیعی در صنایع داروسازی صنایع غذایی، نوشابه‌سازی و بسیاری کاربردهای دیگری که مشتمل بر محیط‌های بسیار خورنده می‌باشند یا آلودگی محصول مهم است به کار می‌روند.

پوشش‌های آلی

پوشش‌های آلی مشتمل بر مانع بسته نسبتاً نازکی بین فلز و محیط آن می‌باشند. رنگ‌ها[۶۲]حلال‌ها[۶۳]لاک‌ها[۶۴]بدون شک از نقطه نظر تناژ بیشتر از هر دو روش دیگر برای حفاظت فلزات به کار می‌روند. پوشش‌های مورد استفاده برای سطوح خارجی برای همه آشناست، ولی پوشش‌ها یا روکش‌های داخلی نیز به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ایالات متحده

---

55 [illegible]
56 [illegible]
57 [illegible]
58 [illegible]
59 [illegible]
60 [illegible]
61 [illegible]
62 [illegible]
63 [illegible]
64 [illegible]

سالانه حدود ۲ میلیون دلار صرف پوشش‌های آلی می‌شود. انواع و اقسام و محصولات مختلفی وجود دارد که بعضی از آنها خواص مفیدی دارند. اطلاعات زیادی در این زمینه پیچیده، لازم است تا عملکرد موفق باشد. بهترین روش برای کسی که تازه وارد این زمینه می‌شود آن است که با تولیدکنندگان معتبر پوشش‌های آلی مشورت کند. به‌عنوان یک قانون کلی، این پوشش‌ها در محیط‌هایی که به‌سرعت فلز زمینه را می‌خورند نبایستی به کار برده شوند. مثلاً رنگ برای حفاظت فولاد در مقابل اسید کلریدریک به کار نخواهد رفت، زیرا نواقص کوچک رنگ باعث سوراخ شدن سریع فلز می‌گردد. همچنین توصیه می‌شود آزمایشاتی برای ارزیابی استقامت رنگ به عمل آید.

جدا از کاربرد صحیح، سه فاکتور اصلی برای پوشش‌های آلی، به ترتیب اهمیت عبارتند از: (۱) آماده کردن سطح (۲) انتخاب آستر (۳) انتخاب صحیح لایه یا لایه‌های رویی.

اگر سطح فلز به طور صحیح آماده نگردد، در اثر اتصال ضعیف ممکن است رنگ پوسته‌پوسته شود. اگر آستر چسبندگی خوبی نداشته باشد یا با لایه رویی سازگار نباشد، سیستم پوشش عمر طولانی نخواهد داشت. اگر دو فاکتور اولی مناسب نباشند، سیستم پوشش بدون توجه به کیفیت و نوع لایه روبی به‌سرعت از بین خواهند رفت. در اکثر موارد عمر کم پوشش‌ها در اثر عدم آماده‌سازی سطحی و انتخاب صحیح می‌باشد.

آماده کردن سطح: عبارت است از زبر کردن سطح برای به دست آوردن اتصال مکانیکی (دندانه‌های سطحی) و همچون تمیز کردن کثافات، زنگ، پوسته اکسیدی، روغن، گریس، فلاکس‌های جوشکاری، علائم رنگی، نوشته‌های روی سطح فلز و ناخالصی‌های دیگر. به‌عبارت‌دیگر، برای به دست آوردن یک سطح تمیز و خشن ماسه پاشی[۶۵] سطح فولاد بهترین روش است. روش‌های دیگر عبارتند از: اسیدشویی[۶۶] یا عملیات شیمیایی دیگر، کاردک زدن[۶۷] برس زدن، تمیز کردن به روش شعله‌ای (حرارت دادن به‌وسیله مشعل و سپس تمیز کردن کثافات و اکسیدهای سطحی) و تراشیدن با اسکنه.[۶۸] در یک مطالعه تأثیر آماده‌سازی سطحی نشان داده شد که عمر رنگ با روش ماسه پاشی ۱۰/۳ سال، با روش اسیدشویی ۹/۶ سال و ۲/۳ سال برای روش تمیز کردن دستی بوده است. مک‌های[۶۹] ژرز جوش و لبه‌های تیز را بایستی با سنگ‌زنی آماده کرد تا از اتصال بین رنگ و فلز اطمینان حاصل شود. روش‌های شیمیایی دیگر عبارتند از: تمیز کردن با حلال‌های آلی، تمیز کردن با مواد قلیایی گرم یا سرد، فسفاته کردن، کروماته کردن و روش‌های الکتروشیمیایی مثل آندیزه کردن و تمیز کردن به روش کاتدی.

علاوه بر ملاحظات اقتصادی، انتخاب روش آماده‌سازی سطحی بستگی به فاکتورهای مختلفی دارد، مثل نوع فلز، شکل، اندازه و امکان دسترسی به آن، سیستم پوشش و شرایط کار سیستم.

آسترها:[۷۰] می‌توانند شامل مواد رنگی ضدزنگ مثل کرومات روی و پودر روی باشند و به این ترتیب علاوه بر ایجاد یک مانع نقش دیگری نیز ایفا نمایند. برای اینکه شیارها و نواقص سطحی دیگر به‌وسیله آستر پر شوند قابلیت تر کردن[۷۱] نیز بایستی وجود

---

5 [illegible]
6 [illegible]
6 [illegible]
6 [illegible] یا [illegible]
6 [illegible]
7 [illegible]
7 [illegible]

6 [illegible]
6 [illegible]
7 [illegible]
8 [illegible]
9 [illegible]
0 [illegible]
1 [illegible]

داشته باشد، زمان خشک شدن بایستی کوتاه باشد تا از آلوده شدن سطح قبل از اعمال لایه رویی جلوگیری شود، مخصوصاً در شرایط عملی.

لایه رویی:[۷۲] انتخاب لایه رویی بسیار مهم است. انتخاب لایه رنگی رویی ارزان قیمت روش اشتباهی است، زیرا قسمت عمده هزینه‌های رنگ‌کاری، مخازن نیروی انسانی است. در بسیاری موارد، هدف از رنگ‌کاری حفظ ظاهر است، در غیر این صورت، اگر در ابتدا فولاد را کمی ضخیم‌تر می‌گرفتند، مسئله خوردگی ارزان‌تر حل می‌شد. ولی هیچ‌کس وجود تجهیزات زنگ زده را در اطراف خود نمی‌پسندد. نکته مهم در اینجا این است که با صرف یک مقدار اضافی خیلی کم (کسری از یک سنت بر فوت‌مربع در سال) و با انتخاب یک لایه رویی صحیح، ظاهر مطلوب و حافظت خوب در برابر خوردگی، حتی در آتمسفرهای خورنده قابل حصول است.

ضخامت پوشش بایستی به اندازه‌ای باشد که تمام سطح فلز را بپوشاند. پوشاندن کامل سطح فلز، یا عدم وجود کامل مک‌ها یا نواقص دیگر، با یک‌بار رنگ کردن، مک‌های یک لایه به‌وسیله لایه بعدی پوشیده خواهد شد. ضخامت پوشش نیز مهم است زیرا در اثر تماس رنگ با محیط نیز فساد ایجاد شده و به مرور زمان پوشش از بین می‌رود.

به روش‌های مختلفی می‌توان مخارج تعمیرات و نگهداری پوشش‌ها را تقلیل داد. مثلاً انجام برنامه‌های لکه‌گیری (کاری که در مورد اتومبیل خود نیز بایستی انجام دهید) نقاط ضعیف به جای اینکه آن‌قدر صبر کنیم که پوشش آن‌قدر خراب شده باشد که احتیاج به رنگ‌کاری مجدد باشد. به‌ندرت پیش می‌آید که یک پوشش در یک زمان در تمام نقاط از بین برود. یک روش دیگر کاربرد رنگ به‌وسیله روش پاشیدن به‌صورت گرم می‌باشد.[۷۳] در این روش به خاطر بالا بودن درجه حرارت، جامدات بیشتر (با تینر کمتر) به سطح پاشیده می‌شود و ضخامت بیشتری در هر لایه ایجاد می‌گردد. کاربرد نوارهایی روی لبه‌ها برای محافظت آنها، روش دیگری در این مورد است. بدیهی است که لبه‌ها را مشکل‌تر می‌توان حفاظت نمود. یک روش دیگر این است که سیستم را طوری طراحی کنیم که مقدار سطح و لبه‌ها حداقل باشد.

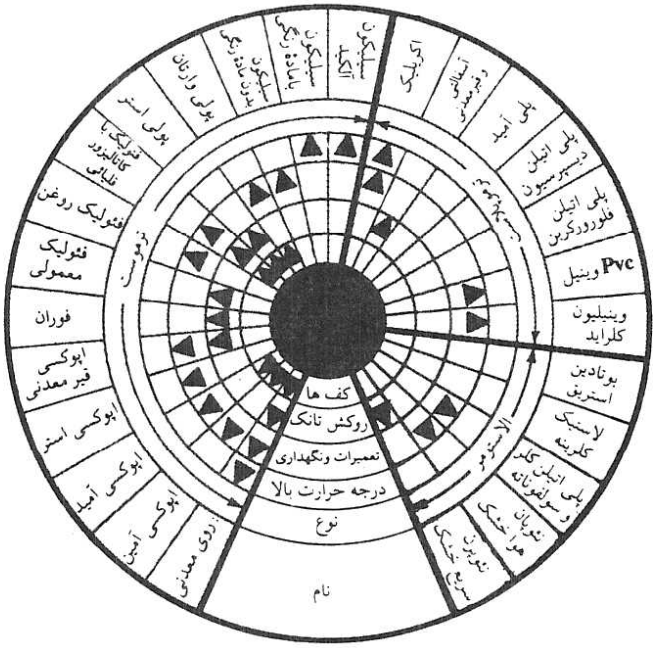
اغلب کارخانجات، رنگ‌کاری مورد نیاز خود به‌صورت مناقصه به شرکت‌های دیگر واگذار می‌کنند. این عمل ممکن است ابتدا باعث هزینه کمتر گردد، ولی معمولاً در درازمدت پر خرج‌تر خواهد بود. اگر در یک کارخانه رنگ‌کاری به مقدار کافی وجود داشته باشد، بهتر است خود اقدام به استخدام در ترتیب رنگ‌کار نماید. یک کارخانه این کار را انجام داد و سالانه هزار دلار صرفه‌جویی نمود.

به طور خلاصه، رنگ‌کاری خوب مشتمل است بر آماده‌سازی سطحی مناسب، انتخاب پوشش مناسب و کاربرد صحیح آن. انواع بسیار زیادی از رنگ‌های مختلف وجود دارند، لکن ذکر جزئیات آنها در محدوده این کتاب نیست، غالباً رنگ‌های قیر معدنی[۷۴] و بیتومینی[۷۵] برای پوشش دادن لوله‌ها به کار می‌روند. گاهی اوقات برای تقویت پوشش به‌وسیله پارچه آغشته به رنگ،

2 [illegible]
3 [illegible]
4 [illegible]
5 [illegible]

لوله‌ها را نوار پیچی می‌کنند. رنگ‌های آلکید،[۷۶] گلیپتول،[۷۷] بتن، سرب قرمز، اکسید آهن، فنولیک، لیتوپون،[۷۸] دی‌اکسیدتیتانیم و لاستیک کلرینه شده تنها مثال‌های معدودی در این زمینه هستند. رنگ‌های وینیل[۷۹] و اپوکسی به طور وسیعی در کاربردهای مشتمل برخوردگی مصرف می‌شوند.

شکل ۱-۱۰ برای انتخاب اولیه نوع پوشش برای یک کاربرد داده شده می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.[۸۰] یک دستورالعمل عالی در مورد رنگ‌ها و پوشش‌های محافظ که به‌وسیله وزارت دفاع، نیروی دریایی و نیروهای هوایی تهیه شده و به قیمت ارزان قابل تهیه است توصیه می‌گردد.[۸۱] کربی[۸۲] تعمیرات و نگهداری رنگ را در دو مقاله بحث کرده است.



شکل ۱-۱۰ راهنمای انتخاب پوشش‌های آلی که در انتخاب اولیه بهترین نوع پوشش برای یک کاربرد مورد نظر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. مثال: پوشش‌های زیر برای کار در دماهای بالا می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد: روی معدنی، سیلیکون، ماده رنگی، سیلیکون آلکید و آتریلیک.

جدول ۱-۷ نکات مهمی که درباره پوشش‌هایی که انتخاب می‌کنید باید بدانید

پوشش	مزایا	به خاطر داشته باشید:

7 6
7 7
7 8
7 9
8 0
8 1
8 2

پایه نفتی	نفوذ خوب در زنگ زمینه را خوب خیس می‌کند.	مقاومت ضعیف در اسید، قلیا، حلال و اکسیداسیون، به آهستگی خشک می‌شود، با پیر شدن زرد و ترد می‌شود. روی آسترهای غنی از رو به کار نبرید.
آلکید نفتی - کوتاه	ارزان نیست، زود خشک می‌شود، چسبندگی خوب، به سهولت دوباره پوشش می‌شود.	مقاومت متوسط در برابر اسید، قلیا، حلال و اکسیداسیون مقاومت متوسط در برابر ضربه
نفتی - بلند	دوام خوب، مقاومت خوب در هوا، قابل انعطاف، به سهولت دوباره پوشش می‌شود.	مقاومت ضعیف در برابر حلال‌های آروماتیک، موقعی که برس زده می‌شود «نخ نما» می‌شود، مقاومت متوسط در برابر دما.
اپوکسی	جامع	ممکن است سطح آن در آفتاب سفیدک بزند، در خارج از ساختمان از رنگ‌های روشن استفاده شود. محدودیت‌های لکه‌گیری و رنگ کردن مجدد را چک کنید.
کول - تار	مقاومت عالی در آب، آب دریا و خاک	قابلیت انعطاف، و مقاومت در برابر فرسایش را چک کنید فقط رنگ‌های تیره.
آمین	مقاومت خوب در آب، قلیا و حلال، سخت و مقاوم در برابر دما	پوست را تحریک می‌کند. محدودیت‌های رنگ کردن را چک کنید.
پلی آمید	مقاومت خوب در آب، قلیا، مقاوم در برابر ضربه و مقاومت خوب در برابر دما	محدودیت‌های رنگ کردن مجدد را چک کنید.
کتی مین	زمان رنگ کردن مجدد نامحدود، مقاومت در برابر طیف وسیعی از حلال‌ها و مواد شیمیایی.	موقع خشک شدن گازها کتونی آزاد می‌سازد.
یورتان	مقاومت خوب در آب، اسید، قلیا، و حلال	محدودیت‌های دمایی را چک کنید.
(دو جزئی آلیفاتیک)	مقاومت فرسایش خوب، برق و رنگ خود را خوب نگه می‌دارد. کاربرد در دماهای پایین	گازهای حلال آن را چک کنید. گران‌قیمت قابلیت رنگ کردن مجدد را چک کنید.
وینیل	مقاومت خوب در آب، اسید، قلیا، مقاوم در برابر ضربه، قابلیت رنگ کردن	مقاوم در دماهای پائین (150°F) مقاومت ضعیف در حلال کتونی آروماتیک درصد پائین جامدات، به سطح خوبی نیاز دارد.

	مجدد خوب، سریع خشک می‌شود. کاربرد در دماهای پایین (5°F)	اکثراً اسپری می‌شود. گازهای کتونی
آسترهای غنی از روی معدنی	بهترین مقاومت در برابر حلال‌های آلی مقاومت خوب در برابر فرسایش. مقاوم تا 1000°F	نیاز به آماده سازی سطحی خوب دارد. محدود به [illegible]های ۵ تا ۱۰. معمولاً اسپری می‌شود ضخامت لایه محدودیت دارد.

استانداردهای کنترل خوردگی

انجمن ملی مهندسین خوردگی[۳] استانداردهایی (روش‌های توصیه شده) برای موارد مختلف خوردگی تهیه نموده است. این روش‌ها در جدول ۱-۸ لیست شده‌اند.

جدول ۱-۸ استاندارد کنترل خوردگی NACE

دستورالعمل‌های توصیه شده ([illegible])	
[illegible]	حفاظت فولاد زنگ نزن آستنیتی در پالایشگاه‌ها در برابر ترک خوردن در اثر خوردگی توأم با تنش ([illegible]) با استفاده از محلول‌های خنثی‌کننده موقع خوابیدن کارخانه.
[illegible]	آماده‌سازی سطحی فولاد و مواد سخت دیگر با استفاده از پاشیدن آب قبل از پوشش‌کاری یا پوشش‌کاری مجدد.
[illegible]	محاسبه مستقیم ارزیابی اقتصادی روش‌های کنترل خوردگی.
[illegible]	روش پوشش دادن تانک‌ها یا اپوکسی قیر معدنی.
[illegible]	روش‌ها و کنترل‌های جلوگیری از ترک خوردن جوش‌های فولاد کربنی (۱ -[illegible]) موقع کار در محیط‌های خورنده پالایشگاه‌های نفت.
[illegible]	طراحی، نصب بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری حفاظت کاتدی با اعمال جریان خارجی توسط بسته‌های زمینی عمیق.
[illegible]	جمع‌آوری و شناسایی محصولات خوردگی.
[illegible]	کار کردن و/یا کاربرد صحیح اسیدهای مناطق نفتی که به آنها ممانعت‌کننده اضافه شده است.
[illegible]	کنترل خوردگی سیستم‌های توزیع برق زیرزمینی مناطق مسکونی.
[illegible]	بازرسی پوشش‌های لوله‌ها قبل از نصب به‌وسیله ولتاژ بالا.
[illegible]	کنترل خوردگی سطوح داخلی در خطوط لوله و سیستم‌های لوله‌کشی فولادی.
[illegible]	اعمال پوشش‌های آلی در سطوح خارجی لوله‌های فولادی برای کار در زیر زمین.
[illegible]	اعمال و کار با پوشش‌های محافظ مومی و سیستم‌های نوارپیچی برای خطوط لوله زیرزمینی.

8 [3] [illegible]

[illegible]	انتخاب مواد فلزی مورد استفاده در قسمت‌های مختلف آماده‌سازی آب برای تزریق در فرماسنون‌ها نفت‌دار.
[illegible]	طراحی، نصب، بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی سطوح داخلی در مخازن تصفیه نفت.
[illegible]	کنترل خوردگی لوله‌هایی که در دریا قرار دارند.
[illegible]	آماده‌سازی و نصب کوپن‌های خوردگی و تجزیه‌وتحلیل نتایج در عملیات تولید نفت.
[illegible]	کنترل خوردگی برای سکوهای ثابت دریایی در رابطه با تولید نفت.
[illegible]	پوشش‌های آسفالتی – ماستیکی اکسترود شده برای لوله‌های زیرزمینی.
[illegible]	کف‌پوش‌های آلی مونولیتیکی مقاوم در برابر خوردگی.
[illegible]	کاهش اثرات جریان‌های متناوب و رعد و برق بر سازه‌های فلزی و سیستم‌های کنترل خوردگی.
[illegible]	طراحی، ساخت و رنگ‌آمیزی تانک‌ها و مخازن فلزی برای کار در محیط‌های شیمیایی.
[illegible]	طراحی و کار برج‌های استریپ برای خارج ساختن اکسیژن از آب.
[illegible]	حفاظت کاتدی سیستم تصفیه آب کارخانجات کاغذ و خمیر کاغذسازی.
[illegible]	تنظیم مقدماتی تجهیزات سردکننده آب.
[illegible]*	(تجدید نظر شده [illegible]) کنترل خوردگی سطوح خارجی سیستم‌های لوله‌کشی فلزی زیرزمینی یا زیرآبی.

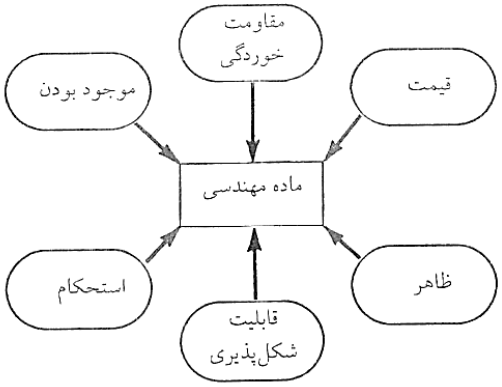
فصل دوم

خوردگی

اصول خوردگی

مقدمه

برای ترسیم دورنمای صحیح مهندسی خوردگی، لازم به یادآوری است که انتخاب مواد[۴] برای کاربردهای مورد نظر بستگی به فاکتورهای مختلفی دارد که یکی از آنها مقاومت در برابر خوردگی است. در شکل ۲-۱ بعضی از خواص که در انتخاب مواد ساختمانی بایستی در نظر گرفته شوند نشان داده شده است. اگرچه عمدتاً مقاومت خوردگی فلزات مورد نظر ماست، لکن انتخاب نهایی غالباً به فاکتورهای دیگر بستگی خواهد داشت. در اکثر کاربردهای مهندسی که مقاومت شیمیایی مورد نیاز است قیمت و مقاومت خوردگی مهم‌ترین فاکتورها می‌باشند، اگرچه در کاربردهای معماری غالباً نشان ظاهر مهم‌ترین مسئله است.

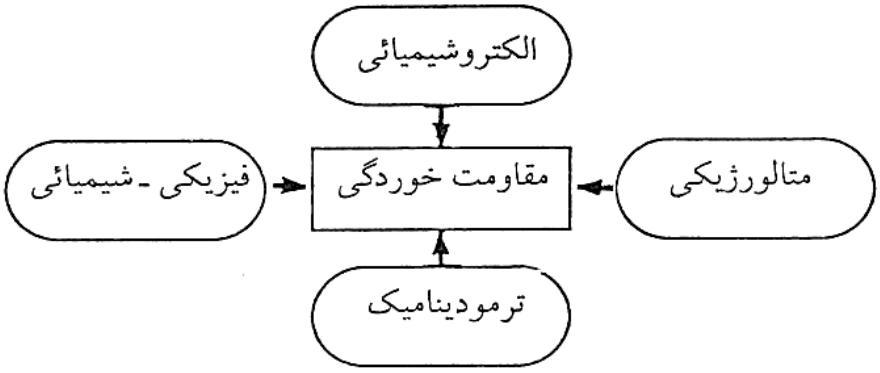


شکل ۲-۱ فاکتورهای مؤثر در انتخاب مواد مهندسی

قابلیت تولید[۵] که نشان‌دهنده سهولت شکل دادن، جوشکاری و عملیات مکانیکی نیز بایستی در نظر گرفته شود. در کاربردهای مهندسی، رفتار مکانیکی یا استحکام نیز مهم است و حتی در مواردی که انتخاب برای مقاومت در برابر خوردگی صورت می‌گیرد بایستی در نظر گرفته شوند. بالاخره، در مورد بعضی مواد بسیار مقاوم در برابر خوردگی مثل طلا، پلاتین و بعضی سوپر آلیاژها غالباً مسئله موجود بودن[۶] این مواد عامل تعیین‌کننده می‌باشند. در بعضی موارد زمان تحویل سفارش قطعاتی از فلزات و آلیاژهای خیلی خاص طولانی است به‌طوری‌که ممکن است از کاربرد آنها صرف‌نظر شود.

4 [illegible] 8
5 [illegible] 8
6 [illegible] 8

جنبه‌های مهندسی مقاومت خوردگی نیز نبایستی نادیده گرفته شوند. مقاومت کامل در برابر خوردگی تقریباً تمام محیط‌ها با استفاده از پلاتین یا شیشه امکان‌پذیر است، اما در اکثر موارد استفاده از این مواد عملی نیست.
مقاومت خوردگی یا مقاومت شیمیایی بستگی به فاکتورهای مختلفی دارد و همان‌طور که در شکل ۲- ۲ نشان داده شده است، مطالعه کامل و جامع آن مستلزم داشتن اطلاعات در چندین زمینه علمی می‌باشد. ترمودینامیک و الکتروشیمی برای درک و کنترل خوردگی بسیار مهم هستند.



شکل ۲- ۲ فاکتورهای مؤثر بر مقاومت خوردگی یک فلز

مطالعات و محاسبات ترمودینامیکی نشان‌دهنده جهت انجام یک واکنش می‌باشند. در مورد خوردگی، محاسبات ترمودینامیکی می‌تواند امکان یا عدم امکان تئوریک خوردگی را تعیین کند. الکتروشیمی زمینه مربوطه و کینتیک الکترودها در این فصل بررسی می‌شود. غالباً فاکتورهای متالوژیک تأثیر زیادی بر مقاومت خوردگی می‌گذارند. موارد زیادی وجود دارد که در آنها از کنترل ساختمان متالوژیک آلیاژها برای تقلیل خوردگی واکنش‌های خوردگی، شرایط فیزیکی و زمینه‌های مختلف آن در مطالعه مکانیزم‌های واکنش‌های خوردگی، شرایط سطحی و بعضی خواص اصلی فلزات مورد استفاده قرار خواهند گرفت که بسیار مفید می‌باشند. چون در کاربردهای مهندسی سرعت خوردگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، تئوری و نظریه‌های الکتروشیمیایی مفصل‌تر بحث خواهند شد.

روش‌های بیان سرعت خوردگی

در این فصل از کتاب، فلزات و غیرفلزات براساس مقاومت خوردگی با یکدیگر مقایسه خواهند شد. برای اینکه این مقایسه‌ها مفهومی داشته باشند، سرعت خوردگی مواد بایستی به طور کمی بیان گردد. برای بیان سرعت خوردگی از روش‌های مختلفی مثل درصد کاهش وزن، $mg/cm^2.day$ و g/in2.h استفاده می‌گردد.
این روش‌ها ضخامت از دست رفته را نمی‌توانند نشان دهند. از نقطه نظر مهندسی، سرعت نازک شدن یک قطعه ساختمانی می‌تواند مستقیماً برای پیش‌بینی عمر آن به کار رود.

به دلایل فوق، ضخامت از دست رفته برحسب هزارم اینچ در سال (mpy) بهترین روش بیان سرعت خوردگی است و در این کتاب مورد استفاده قرار خواهد گرفت. با داشتن تقلیل وزن نمونه در آزمایش خوردگی به وسیله رابطه زیر می‌توان mpy را محاسبه نمود.

$$\text{mpy}=\frac{534W}{\text{DAT}}$$

در این رابطه W = تقلیل وزن، میلی‌گرم

D = دانسیته نمونه، گرم بر سانتی‌مترمکعب

A = سطح نمونه، به اینچ‌مربع

T = زمان آزمایش، ساعت

سرعت خوردگی که بدین ترتیب حاصل می‌گردد از اعداد صحیح تشکیل شده که کار کردن با آن راحت‌تر است.

جنبه‌های الکتروشیمیایی خوردگی

واکنش‌های الکتروشیمیایی

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

$$\text{Zn} + 2\text{HCI} \rightarrow \text{ZnCI}_2 + H_2$$

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

$$\text{Zn} + 2H^+ \rightarrow \text{Zn}^{+2} + H_2$$

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 فوق را می‌توان به سادگی به دو واکنش، اکسیداسیون روی و احیا یون‌های هیدروژن تقسیم نمود:

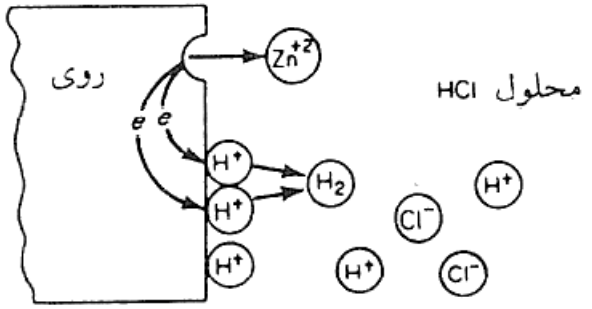
$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{+2} + 2e^-$ اکسیداسیون (واکنش آندی)[۸۷]

[۸۷] - تا این اواخر تئوری خوردگی معمولاً براساس مفهوم نواحی موضعی آندی و کاتدی موجود در سطح استوار بوده است. لکن بیان پدیده خوردگی براساس اصول مدرن سینتیک الکترود (تئوری پتانسیل فلز مختلط) حالت عمومی‌تری دارد زیرا این تئوری قابل کاربرد به انواع سیستم‌های خورنده است. همچنین این تئوری به فرضیات توزیع واکنش‌های آندی و کاتدی بستگی ندارد. قابل ذکر است که این دو روش تجزیه‌وتحلیل پدیده خوردگی با یکدیگر مغایرت نداشته و تنها نشان‌دهنده دو نوع روش مختلف برای نزدیک شدن به مسئله می‌باشند، در این کتاب به‌واسطه سادگی و عمومی‌تر کاربرد از مفهوم سیستیک الکترود استفاده می‌گردد.

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$ احیا (واکنش کاتدی)

در واکنش اکسیداسیون ظرفیت افزایش می‌یابد یا به‌عبارت‌دیگر، الکترون تولید می‌شود. درصورتی که در واکنش احیا ظرفیت کم می‌شود یا الکترون مصرف می‌شود. واکنش اکسیداسیون را آندی و واکنش احیا را کاتدی نیز می‌نامند. معادلات بالا واکنش‌های جزئی بوده[8] هر دو بایستی در یک زمان و با سرعت یکسان روی سطح فلز اتفاق بیفتند. در غیر این صورت، فلز به طور ناگهانی دارای بار الکتریکی خواهد شد، که غیرممکن است. این یکی از مهم‌ترین اصول خوردگی است، در مرحله خوردگی فلزات، سرعت اکسیداسیون مساوی سرعت احیا است (از نقطه نظر تولید و مصرف الکترون).

مسئله فوق در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. در اینجا یک اتم روی تبدیل به یون روی و دو الکترون شده است. این الکترون‌ها که در فلز باقی می‌مانند، در واکنش احیا یون‌های هیدروژن به‌سرعت مصرف می‌شوند. در شکل ۲-۳ این دو واکنش به خاطر واضح‌تر بودن، جدا از هم نشان داده شده‌اند. این مسئله که آنها عملاً در یک نقطه اتفاق می‌افتند، یا خیر، اصل بقا الکتریکی را نقض نمی‌کند. در بعضی حالات، واکنش اکسیداسیون به طور یکنواخت روی سطح فلز واقع می‌شود، درحالی‌که، در برخی موارد دیگر موضعی بوده و در نواحی خاصی اتفاق می‌افتد.



شکل ۲-۳ واکنش‌های الکتروشیمیایی به هنگام خورده شدن فلز روی در اسید کلریدریک عاری از هوا (فاقد اکسیژن حل شده) اتفاق می‌افتند.

خوردگی روی در اسید کلریدریک یک فرایند الکتروشیمیایی است. هر واکنش را که می‌توان تقسیم به دو یا چند واکنش جزئی اکسیداسیون و احیا نمود؛ واکنش الکتروشیمیایی می‌نامند. تقسیم واکنش‌های الکتروشیمیایی خوردگی به واکنش‌های جزئی، مطالعه آنها را آسان‌تر می‌کند.

آهن و آلومینیم نیز به‌وسیله اسید کلریدریک به‌سرعت خورده می‌شوند و واکنش‌های خوردگی آنها عبارتند از:

$$Fe + 2HC1 \rightarrow FeCl_2 + H_2$$

$$2Al + 6HCl \rightarrow 2AlCl_3 + 3H_2$$

8 [illegible] 8

اگر چه در اولین نگاه این واکنش‌ها کاملاً مختلف به نظر می‌رسند، مقایسه واکنش‌های جزئی اکسیداسیون و احیا نشان می‌دهد که واکنش‌های بالا کاملاً مشابه یکدیگر هستند. تمام این واکنش‌ها مشتمل بر احیا یون هیدروژن بوده و تنها واکنش‌های آندی یا اکسیداسیون آنها با یکدیگر فرق دارد.

$$Zn \rightarrow Zn^{+2} + 2e^-$$
$$Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^-$$
$$Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^-$$

بدین ترتیب مسئله چگونگی خورندگی اسید کلریدریک، حل می‌شود زیرا هر موردی واکنش کاتدی آزاد شدن گاز هیدروژن بر طبق واکنش بالا است. این مطلب در مورد خورندگی اسیدهای دیگر مثل اسید سولفوریک، فلوریدریک و اسیدهای آلی محلول در آب مثل اسیدفرمیک و اسید استیک نیز صادق است. در هر مورد، تنها یون هیدروژن عامل فعال است و یون‌های دیگر مثل سولفات، فسفات و استات در واکنش الکتروشیمیایی شرکت نمی‌کنند.

هنگامی که از نقطه نظر واکنش‌های جزئی اکسیداسیون و احیا مسئله را در نظر بگیریم، کلیه انواع خوردگی را می‌توان در تعداد معدودی از واکنش‌های عمومی خلاصه نمود. واکنش آندی در هر فرایند خوردگی، اکسیداسیون فلز به یون‌های آن می‌باشد. این مطلب را به‌صورت کلی زیر می‌توان نوشت:

$$M \rightarrow M^{+n} + ne^-$$

چند مثال در این باره:

$$Ag \rightarrow Ag^{+} + e^-$$
$$Zn \rightarrow Zn^{+2} + e^-$$
$$Al \rightarrow Al^{+3} + e^-$$

در هر مورد تعداد الکترون‌ها تولید شده مساوی با ظرفیت یون می‌باشد. خوردگی فلزات چند نوع واکنش کاتدی مختلف وجود دارد که غالباً به‌صورت یک یا چند تا از واکنش‌های زیر می‌تواند بیفتد:

آزاد شدن هیدروژن $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

احیا اکسیژن (محلول‌های اسیدی) $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

احیا اکسیژن (محلول‌های خنثی یا بازی) $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH$

احیا یون فلزی $M^{+3} + e^- \rightarrow$ □ $^{+2}$

راسب شدن فلزی $M^+ + e^- \rightarrow M$

آزاد شدن هیدروژن یک واکنش کاتدی متداول است زیرا محلول‌های اسیدی در عمل فراوانند. احیا اکسیژن نیز خیلی معمول است زیرا هر محصول آبی که در تماس با هوا باشد قادر خواهد بود این واکنش را انجام دهد. احیا یون فلزی یا راسب شدن

فلز، واکنش‌های نادرتری بوده و بیشتر در مسیرهای فرایندهای شیمیایی اتفاق می‌افتد. تمام این واکنش‌ها کاملاً مشابه هستند- تمام آنها الکترون مصرف می‌کنند.

واکنش‌های جزئی فوق را می‌توان برای تفسیر تقریباً تمام مسائل خوردگی به کار برد. مثلاً وقتی که آهن را درون آب یا آبی که در تماس با اتمسفر قرار دارد، فروببریم خوردگی واقع می‌شود (مثال عملی در این مورد، زنگ زدن بدنه اتومبیل در اثر رطوبت هوا، یا زنگ زدن ستون فولادی در آب دریا می‌باشد). واکنش آندی عبارت است از:

$$\mathrm{Fe} \rightarrow \mathrm{Fe}^{+2} + 2e^{-}$$

چون محیط مورد نظر در تماس با اتمسفر قرار دارد بنابراین حاوی اکسیژن حل شده است. آب و آب دریا تقریباً خنثی هستند و بدون ترتیب واکنش کاتدی عبارت خواهد بود از:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4\mathrm{OH}$$

با توجه به اینکه یون‌های سدیم و کلر در واکنش شرکت نمی‌کنند، واکنش کلی از جمع دو واکنش بالا به دست می‌آید:

$$2Fe \; + \; 2\,H_2O \; + \; O_2 \rightarrow 2Fe^{2+} + \; 4OH^{-} \; + \; 2Fe(OH)_2$$

رسوبات فروهیدروکسید از محلول جدا می‌شوند. لکن این ترکیب در محلول‌های اکسیژن‌دار ناپایدار بوده و به نمک‌های فریک اکسید تبدیل می‌شود.

$$2\mathrm{Fe(OH)}_2 + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2\mathrm{Fe(OH)}_3$$

محصول نهایی همان «زنگ» معروف آهن است.

مثال کلاسیک واکنش‌های جابه‌جایی، واکنش روی با محلول سولفات مس، راسب شدن فلز را نشان می‌دهد.

$$\mathrm{Zn} + \mathrm{Cu}^{+2} \rightarrow \mathrm{Zn}^{+2} + \mathrm{Cu}$$

یا از نقطه نظر واکنش‌های جزئی

$$\mathrm{Zn} \rightarrow \mathrm{Zn}^{+2} + 2e^{-}$$

$$\mathrm{Cu}^{+2} + 2e^{-} \rightarrow \mathrm{Cu}$$

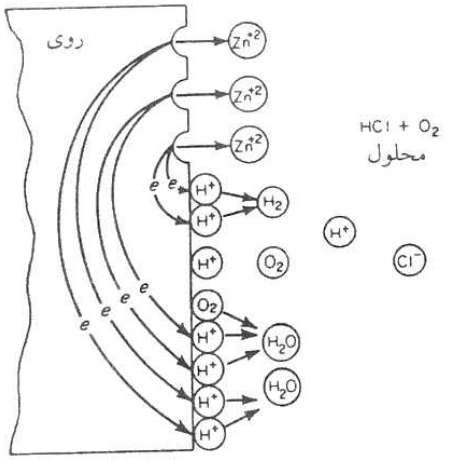
ابتدا روی به‌وسیله لایه‌ای از مس پوشیده شده و در نهایت جرم متخلخلی از مس و محلول سولفات روی خواهیم داشت.

هنگام خوردگی ممکن است بیشتر از یک واکنش اکسیداسیون و احیا صورت گیرد. هنگام خوردگی یک آلیاژ فلزات تشکیل‌دهنده آن به‌صورت یون‌های خود به داخل محلول می‌روند. زمانی موضوع اهمیت بیشتر پیدا می‌کند که بیش از یک واکنش احیا انجام می‌پذیرد. مثلاً وضعیتی را در نظر بگیرید که در آن روی در اسید کلریدریک هوادار خورده می‌شود. در این حالت دو واکنش کاتدی امکان‌پذیر است. آزاد شدن هیدروژن و احیا اکسیژن، این مسئله در شکل ۲-۴ نشان داده شده

است. روی سطح فلز روی دو واکنش مصرف‌کننده الکترون وجود دارد. چون سرعت‌های اکسیداسیون و احیا بایستی مساوی باشند، افزایش کل سرعت احیا باعث افزایش سرعت حل شدن روی در محلول می‌گردد. بنابراین محلول‌های اسیدی حاوی اکسیژن حل شده، خورنده‌تر از اسیدهای عاری از اکسیژن می‌باشند. احیاء اکسیژن یک وسیله دیگر مصرف الکترون را آماده می‌سازد. اگر عوامل اکسیدکننده دیگری نیز در محلول‌های اسیدی وجود داشته باشند، حالت مشابهی به وجود می‌آید. یک ناخالصی که در اسید کلریدریک صنعتی تقریباً همیشه وجود دارد، یون فریک به‌صورت کلروفریک می‌باشد. در چنین اسید صنعتی، فلزات خیلی سریع‌تر خورده می‌شوند زیرا در این حالت نیز دو واکنش کاتدی وجود دارد، آزاد شدن هیدروژن و احیا یون فریک:

$$Fe^{+3} + e^{-} \rightarrow Fe^{+2}$$

به دلیل وابسته بودن واکنش‌های آندی و کاتدی به یکدیگر، می‌توان با تقلیل سرعت هریک از این واکنش‌ها؛ سرعت خوردگی را کاهش داد. در مورد فوق که اسید ناخالص وجود دارد اگر یون‌های فریک آن را حذف نماییم، کل مقدار واکنش‌های کاتدی کم می‌شود. با قطع ارتباط هوا با محلول‌های آبی یا حذف هوایی که در آن حل شده، واکنش احیا اکسیژن نیز حذف می‌گردد. اگر آب دریا بدون اکسیژن داشته باشیم، آهن در آن خورده نخواهد شد زیرا در این حالت واکنش کاتدی وجود ندارد.



شکل ۲-۴ واکنش‌های الکتروشیمیایی که هنگام خورده شدن فلز روی در اسید کلریدریک هوادار (دارای اکسیژن حل شده) اتفاق می‌افتند.

هنگامی که سطح یک فلز را با رنگ یا پوسته‌های عایق دیگر می‌پوشانیم، سرعت واکنش‌های کاتدی و آندی هر دو تقلیل یافته و خوردگی متوقف می‌گردد. ممانعت‌کننده‌های خوردگی[۸][۹] موادی هستند که وقتی مقدار کم از آنها را به محلول خورنده اضافه نماییم، خورندگی آن محلول کم می‌شود. طرز عمل ممانعت‌کننده‌های خوردگی ایجاد اختلال در واکنش‌های کاتدی

8 9

یا آندی، یا هر دو می‌باشد. اکثر این ممانعت‌کننده‌ها ترکیبات آلی هستند و طرز عمل آنها تشکیل پوسته نازک و نفوذناپذیری روی سطح فلز یا ایجاد اختلال در یکی از واکنش‌های کاتدی یا آندی می‌باشد.

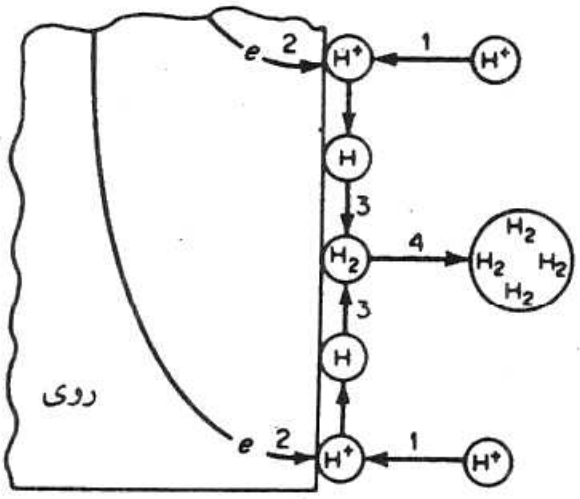
آمین‌هایی که جرم مولکولی بالایی دارند مانع از واکنش آزاد شدن هیدروژن می‌شوند و در نتیجه سرعت خوردگی کاهش می‌یابد. واضح است که خوردگی یک فلز مستلزم هدایت الکتریکی بالا در فلز و الکترولیت مربوطه است. البته افزایش مقاومت فلز عملی نیست زیرا وقتی که نقاط آندی و کاتدی روی یک سطح قرار دارند محل آنها کاملاً مشخص نیست و همچنین قابل پیش‌بینی هم نیستند، ولی می‌توان مقاومت الکتریکی یا محیط خورنده را افزایش داد و بدین ترتیب سرعت خوردگی را کم نمود. آب خیلی خالص خورندگی خیلی کمتری نسبت به آب‌های ناخالص یا آب‌های طبیعی دارد. علت این امر بالا بودن مقاومت الکتریکی آب خیلی خالص است.

پولاریزاسیون

به دلیل اهمیت پولاریزاسیون در درک خوردگی و واکنش‌های آن، در اینجا مسئله پولاریزاسیون به طور مختصر بحث می‌شود. سرعت یک واکنش الکتروشیمیایی به‌وسیله فاکتور شیمیایی و فیزیکی مختلفی کنترل می‌شود. بدین ترتیب گفته می‌شود واکنش الکتروشیمیایی در اثر فاکتورهای محیطی پولاریزه یا مختل شده است. دو نوع پولاریزاسیون، یعنی پولاریزاسیون اکتیواسیون و پولاریزاسیون غلظتی را در اینجا مورد بحث قرار می‌دهیم.

پولاریزاسیون اکتیواسیون به یک واکنش الکتروشیمیایی اطلاق می‌شود که به‌وسیله ترتیب مراحل مختلف واکنش در فصل مشترک فلز- الکترولیت کنترل می‌گردد. این مطلب را به سادگی می‌توان با در نظر گرفتن اتفاقی که در واکنش آزاد شدن هیدروژن روی سطح فلز روی در حین خوردگی در اسید اتفاق می‌افتد، نشان داد.

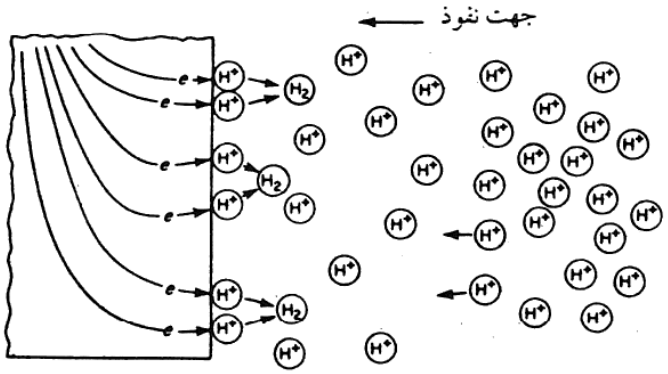
در شکل ۲-۵ به طور شماتیک مراحل مختلفی که احیا هیدروژن روی سطح روی می‌تواند طی کند، نشان داده شده است. این مراحل همچنین می‌توانند در حین احیا هر یونی بر روی سطح فلز، انجام شوند. قبل از آنکه واکنش بتواند انجام شود یون‌های هیدروژن بایستی جذب سطح بشوند یا به سطح متصل شوند (مرحله ۱). بعد از این مرحله، انتقال الکترون (مرحله ۲) بایستی اتفاق بیفتد، در این مرحله یون هیدروژن احیا می‌شود. سپس بایستی دو اتم هیدروژن با همدیگر ترکیب شده و تشکیل مولکول هیدروژن بدهند (مرحله ۳). مرحله بعدی، تجمع مولکول‌های هیدروژن برای تشکیل حباب هیدروژن (مرحله ۴) است. سرعت احیا یون‌های هیدروژن به‌وسیله کندترین مرحله کنترل می‌گردد. مکانیزم‌های مختلفی برای احیا هیدروژن پیشنهاد شده که اکثر آنها پیچیده‌تر از تصویر مذکور هستند.



شکل ۲-۵ واکنش احیا هیدروژن تحت تأثیر پولاریزاسیون اکتیواسیون قرار دارد.

پولاریزاسیون غلظتی به واکنش‌های الکتروشیمیایی اطلاق می‌گردد که به‌وسیله نفوذ یا دیفوزیون[۹] در الکترولیت کنترل می‌شود. این مسئله در شکل ۲-۶ در مورد واکنش آزاد شدن هیدروژن نشان داده شده است. در اینجا، مقدار یون‌های هیدروژن در محلول کاملاً پایین است، و سرعت واکنش به‌وسیله دیفوزیون یون‌های هیدروژن به سطح فلز کنترل می‌گردد.

توجه کنید که در این مورد سرعت احیا بیشتر به‌وسیله اتفاقاتی که در داخل محلول اتفاق می‌افتد، کنترل می‌گردد تا به‌وسیله فعل و انفعالاتی که در سطح واقع می‌شوند. پولاریزاسیون اکتیواسیون معمولاً در خوردگی در محیطی که شامل غلظت بالایی از یون‌های فعال است (مثل اسیدهای غلیظ) واقع می‌شود. پولاریزاسیون غلظتی موقعی کنترل‌کننده است که غلظت یون‌های احیا شونده پایین باشد (مثلاً اسیدهای رقیق، محلول‌های نمکی اکسیژن‌دار). در اکثر موارد پولاریزاسیون غلظتی در مرحله حل شدن در داخل محلول (واکنش‌های اکسیداسیون) معمولاً کم بوده و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد، پولاریزاسیون غلظتی تنها در واکنش‌های احیا اهمیت دارد. تشخیص بین پولاریزاسیون اکتیواسیون و پولاریزاسیون غلظتی اهمیت زیادی دارد.



شکل ۲-۶ پولاریزاسیون غلظتی در مرحله احیا هیدروژن

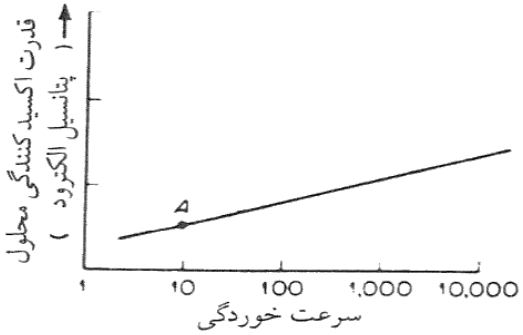
9 0

برحسب نوع پولاریزاسیونی که واکنش احیا را کنترل می‌کند، متغیرهای محیط اثرات مختلفی می‌توانند داشته باشند. مثلاً هر نوع تغییری در سیستم که سرعت دیفوزیون را افزایش دهد اثرات پولاریزاسیون غلظتی را از بین خواهد برد و در نتیجه سرعت خوردگی افزایش خواهد یافت. بنابراین، موقعی که واکنش کاتدی به‌وسیله پولاریزاسیون غلظتی کنترل می‌شود، اضافه کردن سرعت یا تلاطم محیط خورنده باعث افزایش سرعت خوردگی خواهد گردید. اگر هر دوی واکنش های آندی و کاتدی به‌وسیله پولاریزاسیون اکتیواسیون کنترل شوند، تلاطم محیط خورنده، تأثیری بر سرعت خوردگی نخواهد داشت.

روئین شدن یا غیرفعال شدن

از زمان فارادی تا کنون، بیشتر از ۱۲۰ سال، غیرفعال شدن باعث اعجاب و تحسین دانشمندان بوده است. این پدیده را به‌سختی می‌توان تعریف نمود، زیرا طبیعت آن پیچیده است و شرایطی که تحت آن به وجود می‌آید شرایط خاص است. می‌توان گفت غیرفعال شدن، از بین رفتن میل ترکیب شیمیایی است که در مورد بعضی فلزات و آلیاژها تحت شریط معینی به وجود می‌آید. بدین معنی که بعضی فلزات و آلیاژها تقریباً کاملاً نجیب و خنثی شده و طوری رفتار می‌کنند که گویا فلزات نجیبی مثل پلاتین و طلا هستند. خوشبختانه مستعدترین فلزات از این نظر، فلزات ساختمانی معمولی و مهندسی، مثل آهن، نیکل، سیلیسیم، کرم، تیتانیم و آلیاژهای شامل این فلزات می‌باشند. همچنین تحت شریط محدودتری فلزات دیگری مثل روی، کادمیم، قلع، اورانیم و توریم نیز خاصیت غیرفعال شدن از خود نشان می‌دهند.

اگرچه غیرفعال شدن را به‌سختی و مشکل می‌توان تعریف کرد، لکن با مشخص کردن نحوه رفتار فلزاتی که این اثرات را از خود نشان می‌دهند، می‌توان آن را به طور کلی بیان نمود. ابتدا رفتار فلزی که می‌توان آن را فلز نرمال نامید در نظر گرفته می‌شود (فلزی که خاصیت غیرفعال شدن را از خود نشان نمی‌دهد). در شکل ۲-۷ نحوه رفتار این فلز نشان داده شده است. فرض کنید فلزی را در اسید عاری از اکسیژن فروکرده‌ایم. قدرت اکسیدکنندگی اسید و سرعت خوردگی حاصل نقطه A را به دست می‌دهد.

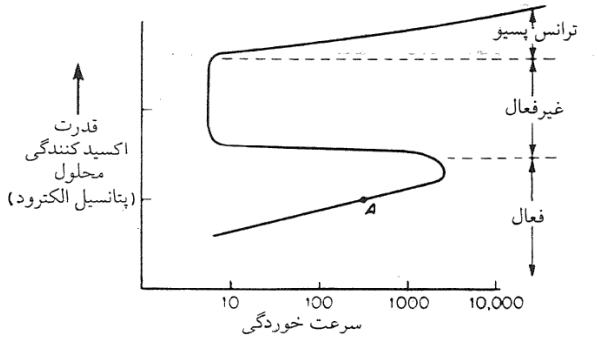


شکل ۲-۷ سرعت خوردگی فلز برحسب اکسیدکنندگی محلول (پتانسیل الکترود)

حال اگر قدرت اکسیدکنندگی محلول را افزایش دهیم (مثلاً با اضافه کردن اکسیژن یا یون فریک)، سرعت خوردگی فلز به‌سرعت افزایش می‌یابد. توجه کنید که در مورد این فلز، با افزایش قدرت اکسیدکنندگی محلول، سرعت خوردگی نیز مدام افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت خوردگی به‌صورت اکسپونانسیل بوده و اگر در مقیاس نیمه لگاریتمی رسم شود، شکل

۲-۷، خط مستقیمی به دست خواهد آمد. قدرت اکسیدکنندگی محلول به قدرت اکسیدکنندگی یون‌های محلول و غلظت آنها بستگی دارد.

شکل ۲-۸ نشان‌دهنده رفتار عمومی فلزاتی است که خاصیت غیرفعال شدن را از خود نشان می‌دهند. رفتار این فلزات را به سهولت می‌توان به سه منطقه فعال، غیرفعال و ترانس‌پسیو تقسیم نمود. در منطقه فعال، رفتار فلز شبیه رفتار یک فلز نرمال است. افزایش جزئی قدرت اکسیدکنندگی محلول باعث افزایش سریع سرعت خوردگی می‌شود. چنانچه افزایش عامل اکسیدکننده ادامه یابد، سرعت خوردگی به طور ناگهانی کم می‌شود. این حالت مربوط به آغاز ناحیه غیرفعال[1]می‌باشد. افزایش بیشتر عامل اکسیدکننده (درصورتی‌که اثر داشته باشد) تأثیر بسیار کمی بر سرعت خوردگی فلز مورد نظر خواهد داشت. بالاخره، در غلظت‌های خیلی بالای ماده اکسیدکننده یا در حضور اکسیدکننده‌های خیلی قوی، سرعت خوردگی دوباره افزایش یافته و این ناحیه را ناحیه ترانس‌پسیو[2]می‌نامند.



شکل ۲-۸ رفتار خوردگی فلزی که دارای انتقال فعال- غیرفعال است برحسب قدرت اکسیدکنندگی محلول (پتانسیل الکترود)

توجه نمایید که در مرحله انتقال از منطقه فعال به غیرفعال، معمولاً سرعت خوردگی 10^3 تا 10^8 برابر کم می‌شود. علت دقیق انتقال حالت فعال- غیرفعال- ترانس‌پسیو، کاملاً مشخص نیست. این یک حالت خاص از پولاریزاسیون اکتیواسیون است که ناشی از تشکیل یک پوسته یا فیلم سطحی یا یک مانع محافظ است. این پوسته سطحی در محدوده وسیعی از قدرت اکسیدکنندگی پایدار بوده و نهایتاً در محلول‌های اکسیدکننده بسیار قوی از بین می‌رود. طبیعت یا ماهیت این پوسته محافظ نامعلوم است، لکن برای کاربردهای مهندسی دانستن مکانیزم این پدیده غیرعادی حیاتی نیست، زیرا به سهولت می‌توان به‌وسیله اطلاعاتی شبیه شکل ۲-۸ آن را کاملاً مشخص نمود و مورد استفاده قرار داد.

به طور خلاصه، فلزاتی که دارای خاصیت انتقال فعال- غیرفعال هستند در محیط‌های اکسیدکننده خیلی قوی تا محیط‌های اکسیدکننده متوسط غیرفعال می‌شوند یعنی در مقابل خوردگی بسیار مقاوم می‌شوند. این فلزات در شرایط بسیار قوی مقاومت در برابر خوردگی خود را از دست داده و سرعت خوردگی افزایش می‌یابد. این ویژگی به طور موفقیت‌آمیز در توسعه و اصلاح روش‌های جدید مقابل با خوردگی و پیش‌بینی مقاومت خوردگی به کار رفته است. این کاربردها به طور مفصل‌تر در فصول بعدی مورد بحث قرار گرفته‌اند.

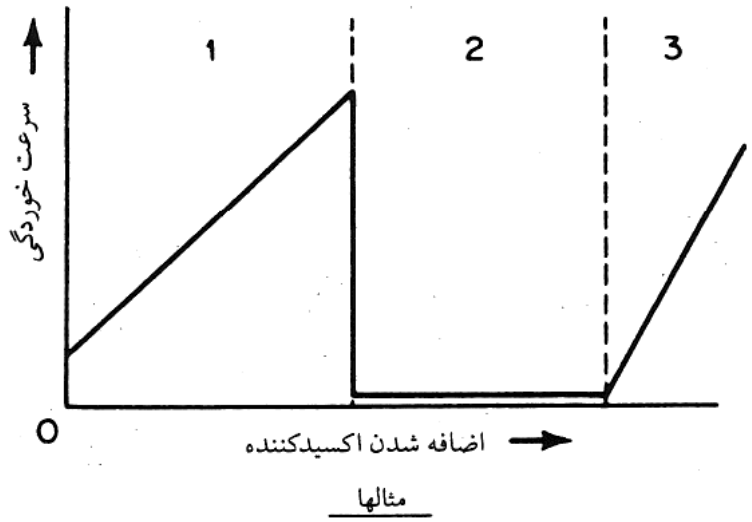
1 9 □□□□□□□□□□□□
2 9 □□□□□□□□□□□□□□□□

اثرات یا فاکتورهای محیطی

غالباً در صنایع فرایندی مواقعی پیش می‌آید که لازم است بعضی متغیرها و فاکتورهای سیستم را تغییر داد. یکی از متداول‌ترین سؤالات این است که اثر این تغییرات روی سرعت خوردگی چگونه است.

اثر اکسیژن و اکسیدکننده‌ها

اثر اکسیدکننده‌ها و قدرت اکسیدکنندگی در رابطه با رفتار فعال- غیرفعال فلز در بالا بحث شد. اثر اکسیدکننده‌ها بر سرعت خوردگی به‌وسیله شکل ۲-۹ نشان داده شده است. توجه کنید این منحنی شبیه شکل منحنی ۲-۸است و این شکل نیز به ناحیه تقسیم شده است. رفتاری شبیه رفتار در منطقه ۱ خصوصیت یک فلز نرمال است و همچنین نشان‌دهنده رفتار یک فلز فعال- غیرفعال است که در حالت فعال قرار دارد. فلزاتی که انتقال فعال- غیرفعال از خود نشان می‌دهند، تنها در صورتی غیرفعال می‌شوند که مقدار کافی عامل اکسیدکننده قوی به محیط آنها اضافه شود. افزایش سرعت خوردگی با افزایش غلظت اکسیدکننده، منطقه ۱، ویژه مونل و مس در محلول‌های اسیدی محتوی اکسیژن می‌باشد، به‌طوری‌که این دو فلز غیرفعال نمی‌شوند.



شکل ۲-۹ تأثیر اکسیدکننده‌ها و هوادهی بر سرعت خوردگی

اگرچه آهن می‌تواند در آب غیرفعال شود، لکن قابلیت انحلال اکسیژن در آب محدود است و در اکثر موارد برای به‌وجود آوردن یک حالت غیرفعال در آهن کافی نخواهد بود، (شکل ۲-۸).

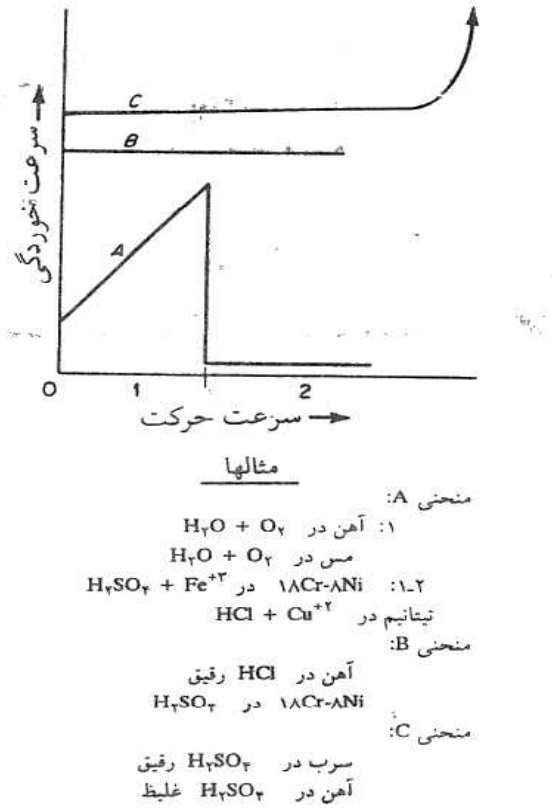
افزایش سرعت خوردگی و به دنبال آن کاهش سریع سرعت خوردگی و ثابت ماندن سرعت خوردگی علی‌رغم افزایش غلظت اکسیدکننده، ویژه فلزات و آلیاژهای فعال- غیرفعال مثل فولاد $18Cr - 8Ni$ (فولاد زنگ نزن) و تیتانیم است.

اگر یک فلز فعال- غیرفعال در آغاز در یک محیط در حالت غیرفعال باشد، افزایش عوامل اکسیدکننده اثر ناچیزی بر سرعت خوردگی خواهد داشت. این حالت غالباً وقتی اتفاق می‌افتد که یک فلز فعال- غیرفعال را به درون یک محیط اکسیدکننده مثل اسیدنیتریک یا کلرورفریک فرو می‌کنیم. رفتاری که به‌وسیله مناطق ۲ و ۳ نشان داده شده است، موقعی اتفاق می‌افتد که یک فلز که ابتدا در حالت غیرفعال قرار دارد، در معرض اکسیدکننده‌های خیلی قوی قرار گرفته و به منطقه ترانس‌پسیو منتقل می‌شود. این نوع رفتار غالباً در مورد فولادهای زنگ نزن اتفاق می‌افتد که در معرض محیط‌های خورنده محتوی عوامل اکسیدکننده بسیار قوی مثل کرومات‌ها می‌باشند. در مخلوط‌های نیترانه کردن گرم شامل اسید سولفوریک غلیظ و اسید نیتریک، کل نواحی فعال- غیرفعال- ترانس‌پسیو را با افزایش نسبت اسید نیتریک به اسید سولفوریک می‌توان به دست آورد. واضح است که اثر افزایش عامل اکسیدکننده یا وجود اکسیژن بر سرعت خوردگی بستگی به دو عامل محیط و فلز دارد. سرعت خوردگی با افزایش اکسیدکننده‌ها ممکن است افزایش یابد، اکسیدکننده‌ها ممکن است اثری بر سرعت خوردگی نداشته باشند یا یک رفتار خیلی پیچیده مشاهده گردد. با اطلاع از خصوصیات اصلی فلز و آلیاژ و محیطی که با آن در تماس است، می‌توان در اکثر موارد، اثر افزایش عامل اکسیدکننده را پیش‌بینی نمود.

اثرات سرعت خوردگی

اثرات سرعت حرکت بر خوردگی، مثل افزایش قدرت اکسیدکنندگی، پیچیده است و بستگی به خصوصیات فلز و محیط آن دارد.

شکل ۲-۱۰ اثر بهم خوردن و سرعت حرکت محلول را بر سرعت خوردگی نشان می‌دهد. در واکنش‌های خوردگی که به‌وسیله پولاریزاسیون اکتیواسیون کنترل می‌شوند، سرعت یا تلاطم بر سرعت خوردگی بی‌اثر است، این حالت را منحنی B، از شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. اگر فرایند خوردگی تحت پولاریزاسیون غلظتی کاتدی قرار داشته باشد، در این صورت بهم خوردن با تلاطم محلول سرعت خوردگی را افزایش می‌دهد، (ناحیه ۱ از منحنی A در شکل ۲-۱۰. این اثر معمولاً موقعی اتفاق می‌افتد که یک عامل اکسیدکننده در مقادیر خیلی کم وجود دارد، مثلاً وقتی که در آب یا اسید مقداری اکسیژن حل شده وجود داشته باشد.

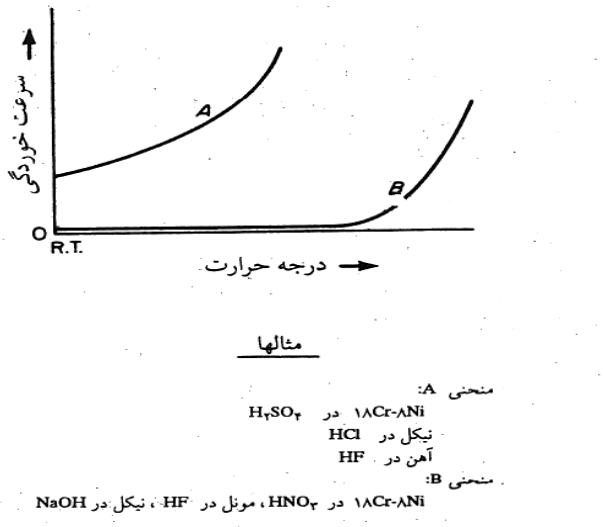


شکل ۲-۱۰ تأثیر سرعت حرکت بر سرعت خوردگی

اگر واکنش تحت کمترل دیفوزیونی باشد و فلز به سادگی غیرفعال شود، در این صورت مناطق ۱ و ۲ از منحنی A، مشاهده خواهند شد. یعنی با افزایش سرعت، فلز از حالت فعال به حالت غیرفعال منتقل می‌شود. آلیاژها یا فلزاتی که به سهولت غیرفعال می‌شوند مثل فولاد زنگ نزن و تیتانیم، در مواقعی که سرعت محیط خورنده بالاست، مقاومت بیشتری در مقابل خورده شدن دارند. بعضی فلزات مقاومت در مقابل خوردگی در بعضی محیط‌ها را مدیون پوسته‌های محافظ و ضخیمی می‌باشند که روی سطح آنها تشکیل می‌شود. این پوسته‌ها از لایه‌های نازک غیرفعال‌کننده متمایز هستند زیرا به سهولت قابل رؤیت بوده و دارای چسبندگی کمتری به سطح فلز نسبت به پوسته‌های غیرفعال می‌باشند. عقیده بر آن است که سرب و فولاد به‌وسیله پوسته‌های نامحلول سولفات از خورندگی اسید سولفوریک در امان می‌مانند. این‌گونه فلزات چنانچه در معرض محیط خورنده با سرعت حرکت بسیار بالا قرار گیرند، خسارات مکانیکی یا کنده شدن این پوسته‌ها می‌تواند اتفاق بیفتد و منجر به خوردگی سریع و ناگهانی، مشابه منحنی C در شکل ۲-۱۰ شود. این نوع خوردگی را خوردگی سایشی می‌نامند که در فصول بعد مورد بحث قرار خواهد گرفت. در مورد منحنی C، توجه کنید که تا موقعی که خسارت مکانیکی اتفاق نیافتاده است تأثیر افزایش سرعت یا تلاطم محیط خورنده، تقریباً ناچیز است.

اثر درجه حرارت

درجه حرارت باعث افزایش سرعت اکثر واکنش‌های شیمیایی می‌شود. شکل ۲-۱۱ تأثیر درجه حرارت بر سرعت خوردگی فلزات را نشان می‌دهد. منحنی A رفتاری که در بالا به آن اشاره شد را نشان می‌دهد، یعنی با بالا رفتن درجه حرارت سرعت خوردگی خیلی سریع و یا اکسپونانسیلی افزایش می‌یابد. رفتاری که به‌وسیله منحنی B نشان داده شده نیز متداول است.
یعنی افزایش درجه حرارت ابتدا اثر بسیار کمی بر سرعت خوردگی داشته و در درجه حرارت‌های بالاتر به طور ناگهانی سرعت خوردگی افزایش می‌یابد. در مورد فولاد زنگ نزن ۸- ۱۸ در اسیدنیتریک، این اثر را به سادگی می‌توان توضیح داد. افزایش درجه حرارت اسید نیتریک قدرت اکسیدکنندگی آن را به‌شدت افزایش می‌دهد. در درجه حرارت‌های پایین تا متوسط، فولاد زنگ نزن در حالت غیرفعال و نزدیک منطقه ترانس‌پسیو قرار دارد.

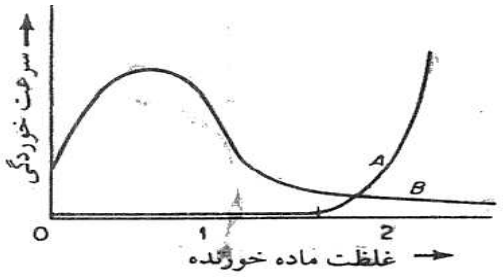


شکل ۲-۱۱ تأثیر درجه حرارت بر سرعت خوردگی

بدین ترتیب، افزایش قدرت اکسیدکنندگی، فلز را به منطقه ترانس‌پسیو برده و در نتیجه سرعت خوردگی آن به‌شدت افزایش می‌یابد. مکانیزم مشابهی نیز برای توجیه رفتار مونل و نیکل، در شکل ۲-۱۱ وجود دارد. در بعضی موارد ممکن است نمودار B اشتباهاً نشان‌دهنده رفتار واقعی باشد. درصورتی‌که سرعت خوردگی در درجه حرارت‌های پایین خیلی کم بوده و به‌صورت اکسپوناسیل افزایش یابد نمودار خطی همانند منحنی B خواهد بود بدین معنی که سرعت خوردگی سریعاً با درجه حرارت افزایش خواهد یافت، چیزی که به‌واسطه مقیاس انتخاب شده در نمودارهای معمولی سرعت خوردگی برحسب درجه حرارت، مشاهده نمی‌شود.

اثرات غلظت محیط خورنده

شکل ۲-۱۲ به طور شماتیک اثرات غلظت محیط خورنده را بر سرعت خوردگی نشان می‌دهد. توجه کنید که در این شکل، منحنی A، دارای دو قسمت است. اکثر موادی که خاصیت غیرفعال شدن دارند به طور نامحسوسی تحت تأثیر تغییرات وسیعی از غلظت محیط خورنده قرار می‌گیرند، این مطلب در منطقه ۱ از منحنی A مشاهده می‌گردد.



مثالها

منحنی A :

۱: نیکل در NaOH

۱۸Cr-۸Ni در HNO_3

هاستولی B در HCl

Ta در HCl

۱-۲: مونل در HCl

سرب در H_2SO_4

منحنی B :

Al در اسید استیک CH_3COOH و HNO_3

۱۸Cr-۸Ni در H_2SO_4

آهن در H_2SO_4

شکل ۲-۱۲ تأثیر غلظت محیط خورنده بر سرعت خوردگی

بعضی دیگر رفتار مشابهی دارند با این تفاوت که در غلظت‌های خیلی بالا سرعت خوردگی به‌شدت افزایش می‌یابد. این موضوع در مناطق ۱ و ۲ از نمودار A نشان داده شده است. سرب دارای این خاصیت است و عقیده بر آن است که سولفات سرب که در غلظت‌های پایین اسید سولفوریک پوسته محافظتی است، در اسید سولفوریک غلیظ قابل حل است.

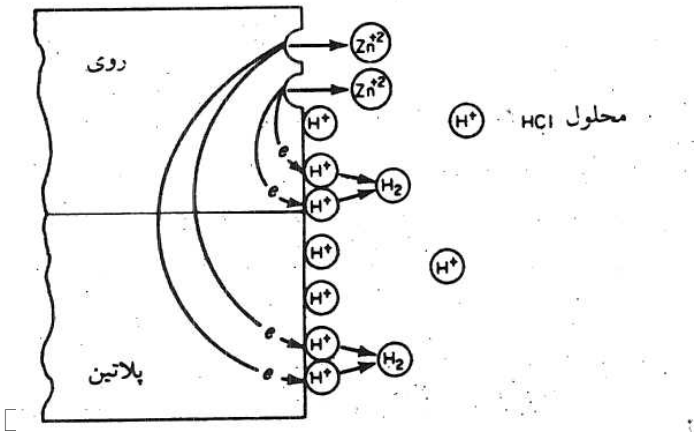
اسیدهایی که به هر غلظتی در آب قابل حل هستند غالباً باعث ایجاد منحنی‌هایی مثل منحنی B می‌شوند. ابتدا با افزایش غلظت محیط خورنده، سرعت خوردگی نیز افزایش می‌یابد. این خاصیت عمدتاً این است که مقدار یون‌های هیدروژن که عوامل فعال هستند با افزایش غلظت اسید، افزایش می‌یابد. لکن با ادامه افزایش غلظت اسید، سرعت خوردگی به یک ماکزیمم رسیده و از آن به بعد تقلیل می‌یابد که بدون شک به خاطر این واقعیت است که در غلظت‌های خیلی بالا اسیدها، یونیزاسیون کم می‌شود. به خاطر این مسئله، اکثر اسیدهای متداول مثل اسید سولفوریک، استیک، فلوریدریک و غیره در حالت خالص و با غلظت صددرصد، در درجه حرارت‌های متوسط تقریباً خنثی هستند.

اثر اتصال گالوانیکی

در اکثر کاربردها در عمل، تماس یک فلز با یک غیرهمجنس، اجتناب‌ناپذیر است. در فرایندهای شیمیایی پیچیده و سیستم‌های لوله‌کشی، فلزات و آلیاژهای مختلف غالباً تماس با یکدیگر در معرض محیط خورنده قرار دارند. اثرات اتصال گالوانیک بعداً به طور مفصل مورد بحث قرار خواهد گرفت و تنها در اینجا به اختصار بیان می‌گردد. در شکل ۲-۱۳ یک قطعه روی را که به یک قطعه فلز نجیب[۹۳]متصل است، در داخل محلول اسید کلریدریک نشان داده شده است. چون پلاتین در این محیط خنثی

9 3

است[۴] تنها سطحی افزایش می‌یابد که روی آن آزاد شدن هیدروژن می‌تواند انجام شود. به‌علاوه واکنش آزاد شدن هیدروژن روی سطح پلاتین بسیار سریع‌تر از سطح روی انجام می‌شود. این دو فاکتور سرعت واکنش کاتدی و در نتیجه سرعت خوردگی روی را افزایش می‌دهند. توجه کنید که اثر اتصال گالوانیکی در این حالت تقریباً شبیه اضافه کردن یک ماده اکسیدکننده به محلول خورنده است. در هر دو حالت سرعت مصرف الکترون افزایش می‌یابد و بدین ترتیب سرعت حل شدن فلز نیز افزایش می‌یابد. باید دانست که اتصال گالوانیکی همواره سرعت خوردگی یک فلز را افزایش نمی‌دهد. در بعضی موارد سرعت خوردگی فلز را کم می‌کند. این موارد خاص در فصول بعدی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.



شکل ۲-۱۳ واکنش‌های الکتروشیمیایی که روی کوپل گالوانیکی روی و پلاتین اتفاق می‌افتند

جنبه‌های متالورژیکی

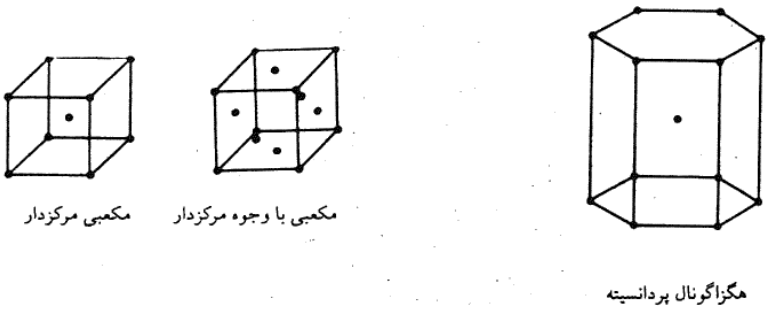
خواص فلزی

فلزات و آلیاژها جامداتی کریستالی هستند، بدین معنی که اتم‌های یک فلز در شبکه‌های معینی قرار دارند که از تکرار آنها جامد فلزی حاصل می‌گردد. متداول‌ترین شبکه‌های فلزی در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده‌اند. ساختمان شبکه آهن و چدن، مکعبی مرکزدار، فولادهای زنگ نزن آستنیتی، مکعبی با وجود مرکزدار و منیزیم، منشور فشرده است. خواص فلزی با خواص جامدات کریستالی دیگر مثل سرامیک‌ها و نمک‌های شیمیایی دیگر فرق دارد. فلزات انعطاف‌پذیر هستند (می‌توان آنها را تغییر شکل پلاستیکی داد) و همچنین هدایت الکتریسیته و گرمایی خوبی دارند. این خواص به علت پیوندهای غیرجهت‌دار بین اتم‌ها در فلزات می‌باشد. هر اتم با حداکثر تعداد اتمی که از نظر هندسی امکان دارد تشکیل پیوند می‌دهد. بدین ترتیب همان‌طور که در شکل ۲-۱۴ مشاهده می‌شود، ساختمان‌های کریستالی فلزات اکثراً ساده و پر دانسیته هستند.

انعطاف‌پذیری احتمالاً مهم‌ترین خاصیت فلزی است. در اثر اعمال نیرو، فلزات معمولاً قبل از شکست، متحمل تغییر شکل پلاستیکی یا دائم می‌شوند. در کاربردهای مهندسی این خاصیت بسیار با ارزش است. در مرحله ریخته‌گری وقتی که فلز منجمد می‌شود، اتم‌ها که در حالت مذاب بدون نظم خاصی قرار دارند، در شبکه‌های منظم که ویژگی حالت جامد است قرار می‌گیرند،

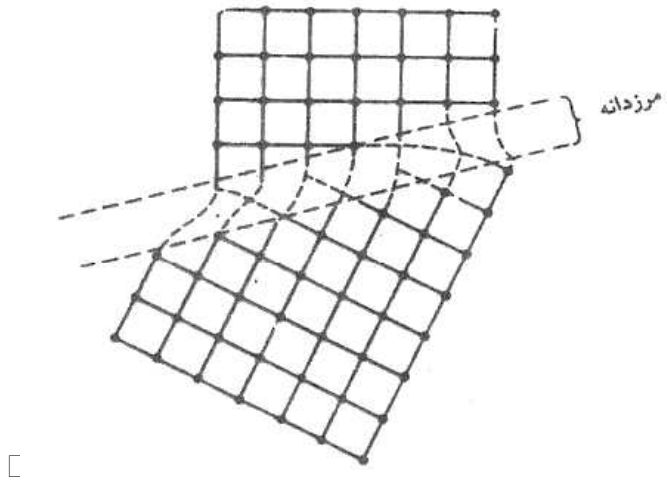
9 [illegible] 4

لکن، به دست آوردن نظم حالت جامد در نقاط متعددی در داخل مذاب شروع می‌گردد و وقتی این مجموعه‌های کریستالی یا دانه‌ها به یکدیگر می‌رسند، در فصل مشترک کریستال‌ها دچار عدم تطابق می‌شوند.



شکل۲-۱۴ ساختمان کریستالی فلزات

فصل مشترک بین دو دانه را مرزدانه می‌گویند. در شکل ۲-۱۵ مرزدانه‌ها به‌صورت دوبعدی نشان داده شده است. چون پایدارترین حالت اتم‌ها وقتی است که در شبکه کریستالی معین خود قرار می‌گیرند، مرزدانه‌ها نواحی پر انرژی بوده و از نظر شیمیایی فعال‌تر می‌باشند. بدین علت موقعی که سطح یک فلز در معرض یک ماده خورنده قرار می‌گیرد، مرزدانه‌ها اندکی سریع‌تر از سطح دانه‌ها خورده می‌شوند. همین اختلاف میل ترکیبی شیمیایی بین دانه‌ها و مرزدانه‌ها اساس اچ کردن در متالوگرافی است که بدین‌وسیله دانه‌های فلزات قابل رؤیت می‌شوند. در شکل ۲-۱۶ تصویر بزرگ شده سطح یک فولاد زنگ نزن $18Cr-8Ni$ که در محلول اسید اچ شده است نشان داده شده است. مرزدانه‌ها بیشتر از دانه‌ها خورده شده‌اند و در نتیجه تیره رنگ به‌نظر می‌آیند.



شکل ۲-۱۵ مرزانه در یک جامد چند کریستالی (نمایش دو بعدی)

شکل ۲-۱۶ تصویر میکروسکوپی فولاد زنگ نزن $18Cr-8Ni$ که برای نشان دادن مرزدانه‌ها اچ شده است $(\times 100)$

آلیاژها مخلوط‌هایی از دو یا چند فلز یا عنصر می‌باشند. آلیاژها را می‌توان به دو نوع همگن و غیرهمگن تقسیم‌بندی کرد. آلیاژهای همگن در حقیقت محلول‌های جامد[۹۵]هستند. در این آلیاژها اجزا به هر نسبت در یکدیگر حل می‌شوند. (حلالیت کامل در حالت جامد) و آلیاژ تنها از یک فاز تشکیل می‌شود. فولاد زنگ نزن ۸- ۱۸ (شکل ۲-۱۶) مثالی از یک آلیاژ همگن یا محلول جامد می‌باشد. نیکل، کرم و کربن در آهن حل شده‌اند و آلیاژ دارای یک ترکیب یکنواخت در تمام نقاط می‌باشد. آلیاژهای غیرهمگن مخلوط‌هایی از دو یا چند فاز جداگانه می‌باشند. عناصر تشکیل‌دهنده این آلیاژها به طور کامل در یکدیگر حل نشده و به‌صورت جداگانه وجود دارند. ترکیب و ساختمان داخلی این آلیاژها یکنواخت نیست. شکل۲-۱۷ تصویر میکروسکوپی یک فولاد کم کربن را نشان می‌دهد. کربن با تعدادی از اتم‌های آهن ترکیب شده و تشکیل کاربید آهن می‌دهد. کاربید آهن معمولاً به‌صورت لایه‌لایه‌ای ظاهر می‌شود. هرکدام از این دو نوع آلیاژها دارای معایب و مزایایی هستند، آلیاژها همگن معمولاً انعطاف‌پذیرتر بوده و دارای استحکام کمتری نسبت به آلیاژهای غیرهمگن هستند. انتخاب بین این دو نوع اساس خواص مکانیکی مورد نیاز صورت می‌گیرد. آلیاژهای همگن معمولاً از نظر خوردگی مقاوم‌تر از آلیاژهای دو (یا چند) فازی هستند. زیرا در آلیاژهای همگن اثری از کویل گالوانیکی وجود ندارد. لکن استثنائات مهمی نیز وجود دارد که در فصول بعدی بررسی خواهند شد. آلیاژها خیلی شبیه محلول‌ها می‌باشند. بعضی مواد در یکدیگر حل شده و بعضی دیگر در یکدیگر نامحلولند. قابلیت انحلال معمولاً با افزایش درجه حرارت به‌سرعت افزایش می‌یابد، بدین ترتیب موقعی که یک فولاد کربنی را به درجه حرارت‌های بالا ببریم، تبدیل به یک محلول جامد می‌شود. راسب شدن فاز دوم می‌تواند از محلول‌های جامد فوق اشباع مشابه محلول‌های دیگر انجام شود. فاز دوم معمولاً از مرزدانه‌ها شروع می‌شود.

تفاوت‌های دیگر در فلزات ممکن است ماهیت شیمیایی، متالورژیکی یا مکانیکی داشته باشند. مثال‌هایی در این موارد عبارتند از: ناخالصی‌هایی مثل اکسیدها و آخال‌های[۹۶]دیگر، پوسته‌های اکسیدی[۹۷]جهت قرار گرفتن دانه‌ها، تجمع‌ها نابه‌جایی‌ها،

9 [illegible] 5
9 [illegible] 6
9 [illegible] 7

غیریکنواختی ترکیب شیمیایی در ساختمان میکروسکوپی، فازهای راسب شده، تنش‌های موضعی، خراش‌ها و شیارهای سطحی.

شکل۲-۱۷ تصویر میکروسکوپی فولاد کربنی که برای نشان دادن لایه‌های کاربید آهن اچ شده است (× 600).

تنها در موارد خاصی از فلزات با سطوح صیقل داده شده استفاده می‌شود. فلزات خیلی خالص از نظر خوردگی مقاوم‌تر از انواع تجارتی آنها هستند. مثلاً، فلز روی خیلی خالص با سطح صیقلی شده در اسید کلریدریک خیلی خالص خورده نخواهد شد ولی انواع تجارتی این دو به‌شدت با یکدیگر ترکیب می‌شوند. ولی فلزات خالص گران هستند و معمولاً استحکام کمی دارند.

در جدول مقابل تأثیر خلوص آلومینیم بر خوردگی آن توسط اسید کلریدریک نشان داده شده است.

سرعت خوردگی نسبی	درصد خلوص آلومینیم
۱	۹۹/۹۹۸
۱۰،۰۰۰	۹۹/۹۷
۳۰،۰۰۰	۹۹/۲

ملاحظات اقتصادی

کنترل خوردگی عمدتاً یک مسئله اقتصادی است. اینکه یک روش کنترل خوردگی به کار برده شود یا خیر، بستگی به مقدار صرفه‌جویی‌های به دست آمده خواهد داشت. روش یا روش‌های مورد استفاده بر اساس ملاحظات اقتصادی انتخاب می‌شوند. کاهش سرمایه‌گذاری به معنی درآمد کمتر است. هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری پائین‌تر، سود بیشتری در بر خواهد داشت. کارخانجات مختلف صرفاً برای تولید فولاد، اتومبیل و مواد شیمیایی نیستند. هدف اصلی به دست آوردن سود است. درصد برگشت یک فلز یا آلیاژ ارزان‌تر همان کارآیی فلز یا آلیاژ گران‌قیمت‌تر حاصل گردد (که به‌ندرت پیش می‌آید) تصمیم گیری ساده خواهد بود. سیستم‌های حفاظت از خوردگی از نظر هزینه معیارهای مختلفی به کار می‌برند. زمان برگشت سرمایه یک کارخانه شیمیایی کوتاه‌تر از یک نیروگاه است، زیرا احتمال اینکه کارخانه شیمیایی در زمان کوتاه‌تری از رده خارج شود بیشتر است.

بعضی واحدها برای زمان‌های کوتاه مثل ۱ سال طراحی می‌شوند بعضی دیگر برای ۵۰ سال یا بیشتر. یک پل برای ۱۰۰ سال کار طراحی می‌شود، یک اتومبیل ۵ تا ۱۰ سال و یک موشک برای یک دقیقه یا کمتر. مهندس خوردگی باید با فرایندهای کارخانه خود آشنا باشد، تا بتواند با تصمیم صحیح و مؤثر موارد مربوط به کار خود را به مدیریت (که هزینه را تصویب می‌کند) ارائه نماید. اگر برگشت هزینه تغییر یک فرایند یا ساخت یک کارخانه جدید تنها مثلاً ۳٪ باشد، به‌جای این کار می‌توان پول را در بانک گذاشت و سود بیشتری به دست آورد.

برای جزئیات بیشتر به مقاله بسیار جالب دیلون[۸]رجوع شود. در این مقاله فاکتورهایی مثل هزینه، عمر تجهیزات، نرخ بهره، نرخ مالیات، استهلاک و همچنین روش‌های ارزیابی اقتصادی مورد بحث قرار گرفته‌اند. یک مثال ساده از مقاله وی به شرح زیر است:

برگشت سرمایه‌گذاری (ROI) جایگزین کردن یک مبدل حرارتی به ارزش ۱۰،۰۰۰ دلار، با عمر ۲ سال به‌وسیله یک مبدل حرارتی از جنس فولاد زنگ نزن ۳۱۶ به ارزش ۲۰،۰۰۰ لار که ۸ سال عمر می‌کند عبارت است از:

$$\mathrm{ROI} = 100\frac{(10{,}000/2) - (20{,}000/8)}{20{,}000 - 10{,}000} = 25\%$$

فرمول عمومی و جامع‌تر در این زمینه به‌صورت زیر است:

$$\mathrm{ROI} = 100\frac{(\mathrm{Oa}+\mathrm{Ia}/\mathrm{na}) - (\mathrm{Ob}+\mathrm{Ia}/\mathrm{nb})}{\mathrm{Ib}-\mathrm{Ia}}$$

در این رابطه O = مخارج سالانه شامل مخارج تعمیرات و نگهداری، تولید، ضررها و غیره است، I/n استهلاک خطی، بدین ترتیب که I هزینه سرمایه‌گذاری یا نصب n عمر پیش‌بینی شده به سال و اندیس‌های a و b مربوط به دو حالت مختلف است.

در رابطه با قیمت فلزات و آلیاژها، ترکیب شیمیایی اولین راهنماست. فولاد زنگ نزن نوع ۴۳۰ به خاطر دارا بودن ٪۱۷ کرم گران‌تر از فولاد معمولی است، نوع ۳۰۴ به خاطر دارا بودن ٪۱۸ کرم و ٪۸ نیکل گران‌تر از نوع ۴۳۰ است و نوع ۳۱۶ که علاوه بر عناصر فوق دارای ۲ درصد مولیبدن که عنصر گران قیمتی است، گران‌تر می‌باشد. قیمت مس بیشتر از آهن است، ولی فاکتورهای مهم دیگری نیز بر قیمت تمام شده تأثیر می‌گذارند. مثلاً ارزش یک میله فولادی ممکن است به‌صورت وزنه ۵ دلار باشد ولی همان مقدار فولاد به‌صورت سوزن چرخ خیاطی ۵۰۰۰ دلار و به‌صورت وزنه‌های مورد استفاده برای بالانس کردن رقاصک ساعت ۲۰۰،۰۰۰ دلار قیمت داشته باشد. قیمت یک موتور الکتریکی کوچک برای یک موشک ۳۰۰ دلار است درحالی‌که قیمت موتورهای 1 اسب ۵۰ دلار است. قطعات چدنی ارزان‌تر از قطعات فولاد ریختگی هستند، زیرا ریختگری فولاد مشکل‌تر است. به خاطر هزینه نیروی انسانی قیمت وزنی قطعات ریختگی کوچک‌تر، بیشتر از قطعات ریختگی بزرگ‌تر از همان جنس خواهد بود. فولاد زنگ نزن نوع ۴۰۳ (نوع ۴۱۰ برای استفاده در هواپیما) نیاز به بازرسی بهتری دارد و در نتیجه گران‌تر است. فلزات و آلیاژهایی مثل هاستولی C گران‌قیمت هستند نه فقط به خاطر مقدار عناصر آلیاژی بالای آنها، بلکه به خاطر نیاز به نورد در درجه حرارت‌های بالا. برای ساخت مبدل‌هایی که با آب دریا کار می‌کنند، تیتانیم که فلز گران‌تری است،

[8] [illegible]

[9] [illegible]

به خاطر امکان گرفتگی کمتر در اثر جانداران دریایی و انتقال حرارت بیشتر، ممکن است اقتصادی‌تر از فولاد باشد. در حقیقت یکی از دلایل اصلی استفاده از لوله‌های تفلونی در مبدل‌های حرارتی همین است. کارخانه‌ای که عمدتاً تجهیزاتی از نوع ۳۱۶ تولید می‌کند، برای نوع ۳۰۴ قیمت بیشتری درخواست خواهد نمود چون برای وی ۳۰۴«خاص» تلقی می‌شود. اقلامی که میزان تولید آنها کمتر است گران‌تر از اقلامی هستند که در مقیاس بزرگ تولید می‌شوند. پیچیدگی قطعه نیز قیمت را بالا می‌برد. کمبودها نیز بر قیمت تأثیر می‌گذارند. در بحران کمبود نیکل، مقاومت خوردگی نوع ۴۳۰ افزایش می‌یابد. در یک واحد شیمیایی که محصولات متنوعی تولید می‌شوند، نوع ۳۱۶ بر نوع ۳۰۴ ارجح‌تر خواهد بود، زیرا نوع ۳۱۶ از نقطه نظر مقاومت خوردگی جامع‌تر است. تعداد بسیاری از قطعات مورد استفاده در اولین کارخانه تولید نایلون از نوع ۳۰۴ ساخته شده بودند (در واحدهای بعدی از فولاد و چدن استفاده شد) زیرا در یک فرایند جدید «نواقص» را در حداقل بایستی نگه داشت. ظاهر، خواباندن کارخانه، آلوده شدن محصول و خطرات جانی در فصل ۱ بحث شده‌اند. خوردگی امر اجتناب‌ناپذیری نیست. با کنترل خوردگی می‌توان صرفه‌جویی‌های بزرگی کرد. در یک مورد با تلاش‌های بی‌وقفه هزینه‌ها از سالی ۲۰۰،۰۰۰ دلار به ۳۵،۰۰۰ دلار کاهش پیدا کرد. برای تعیین اقلام پر خرج و محاسبه برگشت سرمایه، اطلاع از هزینه‌های دقیق تعمیرات و نگهداری ضروری است. در یک کارخانه، کار رضایت‌بخش به دست آوردن عمر پیش‌بینی شده با حداقل هزینه در سال، مهم‌ترین هدف است.

مسئله کنترل خوردگی از نظر اقتصادی به دلیل افزایش قیمت نیروی انسانی، مواد و انرژی، به همراه تغییرات سریع بهره‌های بانکی و مالیات‌ها پیچیده‌تر شده است. ارزش خالص فعلی[9] دقیق‌ترین مبنا برای تجزیه‌وتحلیل هزینه‌های تجارتی است و می‌تواند مستقیماً در مورد مسئله کنترل خوردگی از نظر اقتصادی به کار رود. اگرچه NPV شامل محاسبات وسیعی است، ولی این محاسبات را می‌توان با ماشین حساب‌های جیبی مخصوصاً انواعی که قابل برنامه‌ریزی هستند[۱۰۰] به‌سادگی انجام داد.

ایده ارزش فعلی نسبتاً ساده است، بر اساس رشد سرمایه‌گذاری به‌وسیله بهره مرکب می‌باشد:

$$\mathrm{FV}=\mathrm{PV}(1+\mathrm{i})^{n}$$

در این رابطه PV ارزش فعلی سرمایه‌گذاری، FV ارزش آینده، i نرخ بهره در دوره مرکب، و n تعداد دوره‌هاست در حالت ساده، دوره مرکب یک سال است. بنابراین i نرخ بهره سالانه و n تعداد سال می‌باشد. مثلاً اگر ۱۰۰۰ دلار سرمایه‌گذاری شده به‌مدت ۱۰ سال با بهره ۶٪:

$$\mathrm{FV}=1000(1+0/06)^{10}=1790/85 \text{ دلار}$$

محاسبه فوق را می‌توان از نقطه نظر ارزش فعلی بیان کرد: ارزش فعلی ۱۷۹۰/۸۵ در ۱۰ سال از حالا با بهره ۶٪، ۱۰۰۰ دلار است.

$$\mathrm{PV}=\frac{\mathrm{FV}}{(1+\mathrm{i})^{n}}$$

---

9 [illegible] 9

۱۰۰ [illegible]

بنابراین، هرگونه سود (یا زیان) آتی می‌تواند به ارزش فعلی نسبت داده شود. این نظریه را می‌توان توسعه داد تا هر تعداد دریافت‌های نقدی یا پرداخت‌ها را به‌وسیله فرمول کلی زیر دربرگیرد.

$$\text{NPV} = -I + \frac{C_1}{(1+\text{i})^1} + \frac{C_2}{(1+\text{i})^2} + \cdots + \frac{C_n}{(1+\text{i})^n}$$

در این رابطه NPV ارزش فعلی خالص دریافت و پراخت‌های نقدی C_1، C_2،... و C_n می‌باشد که به دنبال سرمایه‌گذاری اولیه I انجام شده است. ارزش فعلی خالص ممکن است مثبت باشد یا منفی، در ارتباط با سود یا ضرر نرخ بهره i، نرخ مورد نظر نرخ واقعی برگشت می‌باشد.

کاربرد معادله فوق را به‌وسیله یک مثال می‌توان نشان داد. فرض کنید سه امکان برای انتخاب یک مبدل حرارتی وجود دارد: (۱) فولاد به ارزش ۸۰۰۰ دلار و عمر ۲ سال، (۲) فولاد با حفاظت آندی با عمر ۸ سال یا بیشتر که نیاز به پتانسیواستات به ارزش ۷۰۰۰ دلار و نیروی انسانی به ارزش سالانه ۱۱۰۰ دلار برای نظارت و کنترل سیستم دارد و (۳) فولاد زنگ نزن با عمر ۸ سال و به ارزش ۲۰/۰۰۰ دلار محاسبات را بر اساس دوره یکساله انجام داده و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری را در نظر نمی‌گیریم، مخارج سالانه سه روش عبارتست از:

جدول ۲-۱ جدول هزینه سالانه

هزینه، دلار			
فولاد زنگ نزن	فولاد (حفاظت آندی)	فولاد	سال
۲۰/۰۰۰	۱۵۰۰۰	۸۰۰۰	صفر
–	۱۱۰۰	–	۱
–	۱۱۰۰	۸۰۰۰	۲
–	۱۱۰۰	–	۳
–	۱۱۰۰	۸۰۰۰	۴
–	۱۱۰۰	–	۵
–	۱۱۰۰	۸۰۰۰	۶
–	۱۱۰۰	–	۷
–	۱۱۰۰	–	۸

مبدل فولادی هر ۲ سال یک‌بار تعویض می‌شود. با بهره ۱۰٪، ارزش فعلی خالص NPV هر حالت را می‌توان از معادله بالا حساب کرد. مقادیر C منفی هستند چون مقدار هزینه است نه سود.

فولاد $NPV = -8000 - \frac{8000}{\left(1\frac{1}{10}\right)^2} - \frac{8000}{\left(1\frac{1}{10}\right)^3} \ldots - \frac{8000}{\left(1\frac{1}{10}\right)^6} = -24592$ دلار

فولاد $NPV = -15000 - \frac{1100}{\left(1\frac{1}{10}\right)^2} - \frac{1100}{\left(1\frac{1}{10}\right)^3} \ldots - \frac{1100}{\left(1\frac{1}{10}\right)^6} = -20869$ دلار

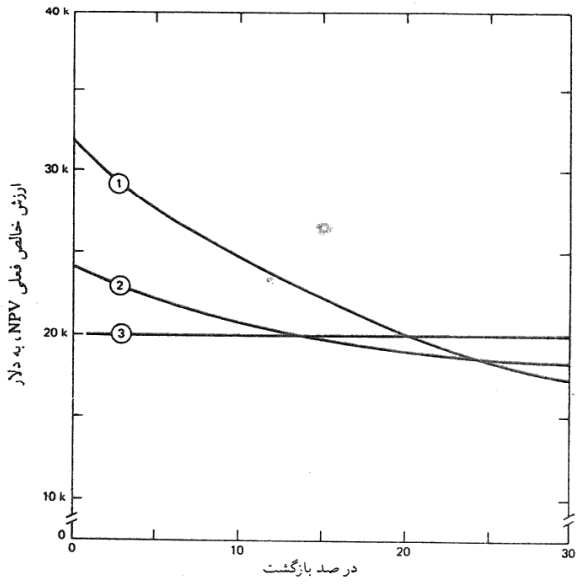
(حفاظت آندی)

NPV= − 20/000 − 0 = −20,000 دلار فولاد زنگ نزن

بنابراین بهره ۱۰٪ مبدل حرارت از جنس فولاد زنگ نزن اقتصادی‌ترین است. ولی NPV بستگی به نرخ بهره دارد. با قرار دادن نرخ بهره‌های مختلف در معادلات فوق می‌توان تغییرات NPV را نسبت به نرخ بهره رسم نمود، شکل۲-۱۸ توجه شود که اگر نرخ بهره بیشتر از ۱۴/۷ باشد مبدل حرارتی فولادی با حفاظت آندی اقتصادی‌ترین است. اگر نرخ بهره بیشتر از ۲۴/۱ باشد مبدل حرارتی فولادی ارزان‌ترین خواهد بود.

اگرچه این نرخ بهره‌ها نسبت به حساب‌های پس‌انداز معمولی بالا هستند، ولی در معادلات تجاری بزرگ غیرمعمول نیستند. در حال حاضر، بهره سپرده‌های ثابت بدون مالیات ۱۶٪ می‌باشد. بنابراین، سرمایه‌گذاری در یک واحد جدید بایستی مساوی یا بیشتر از این مقدار برگشت داشته باشد. اگر فرایند ریسک بالایی داشته باشد که با سرمایه قرضی انجام شده است، برگشت ۲۵٪ یا بیشتر ممکن است ضروری باشد. بنابراین اقتصادی‌ترین انتخاب غالباً بستگی به نرخ برگشت مورد نظر دارد. بهترین انتخاب برای یک شرکت ممکن است با دیگری تفاوت داشته باشد.

معادله بالا کلی است و می‌تواند برای انواع آنالیز هزینه‌ها به کار رود. تورم در هزینه نیروی انسانی، مخارج تجهیزات و تعمیرات و نگهداری به سهولت در پرداخت‌های سالانه Cn وارد می‌شود. همچنین، قیمت وسایل مستهلک شده و برگشت مالیات به خاطر استهلاک به‌صورت دریافت‌های سالانه Cn با علامت مثبت وارد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است، با استفاده از روش‌های حسابداری که در مورد یک شرکت قابل کاربرد می‌باشد، دو راه چاره در انتخاب مواد را به طریق ترسیمی می‌توان پیدا کرد. اگر نسبت قیمت نصب پایین و به‌طرف چپ منحنی در عمر پیش‌بینی شده باشد. دراین‌صورت آلیاژ مقاوم‌تر انتخاب اقتصادی‌تری خواهد بود و اگر نسبت فوق‌الذکر بالا و به‌طرف راست منحنی عمر پیش‌بینی شده باشد، دراین‌صورت آلیاژ ضعیف‌تر با وجودی که زودتر از بین می‌رود، اقتصادی‌تر خواهد بود.



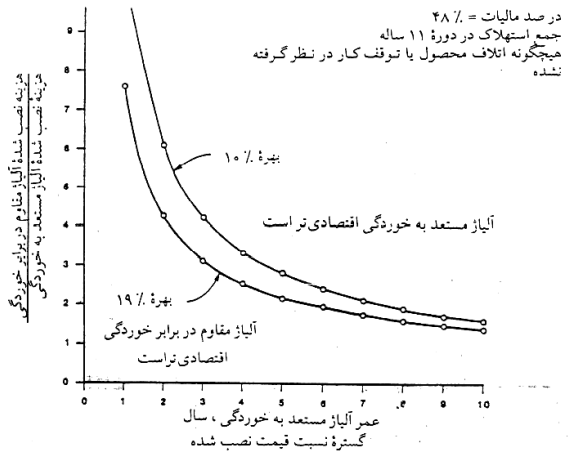
شکل۲-۱۸ NPV برحسب نرخ بهره: منحنی ۱، مبدل حرارتی فولادی. منحنی ۲، مبدل حرارتی فولادی با حفاظت آندی. منحنی ۳، مبدل حرارتی از جنس فولاد زنگ نزن

اهمیت بازرسی

ساخت برای یک کارخانه یا یک قطعه یک دستگاه ممکن است عالی باشند، ولی اگر دستورالعمل‌ها رعایت نشوند ممکن است تماماً بی‌معنی و بی‌فایده باشند. بازرسی صحیح ضرورت کامل دارد، مخصوصاً در قطعات بحرانی که در شرایط خطرناک کار می‌کنند. بازرس حین تولید و نصب بایستی دقیقاً انجام وظیفه نماید و بازرسی به محصول‌نهایی محدود نشود، بازرس علاوه بر داشتن شرایط و توانایی‌های لازم، بایستی اختیارات کافی نیز داشته باشد. جنبه‌های بازرسی به اندازه طراحی و انتخاب مواد اهمیت دارند.

مثال‌های زیادی درباره انهدام‌های زودرس و گاهی اوقات فاجعه‌آمیز وجود دارد. قسمتی از یک لوله ۱۰ اینچی که جوشکاری شده، به دلیل عدم نفوذ کافی فلز جوش به داخل شیار منهدم شد. فلز جوش فقط $\frac{1}{6}$اینچ (صرفاً یک لایه نازک) به داخل درز جوش نفوذ کرده بود. عدم نفوذ کافی فلز جوش خیلی متداول است. پایه‌های نگهدارنده لوله‌ها[1]ذر کوره یک پالایشگاه نفت به دلیل متخلخل بودن این قطعات ریختگی (حدود ۵۰٪ سطح مقطع شکست از حفره‌ها تشکیل شده بود) منهدم شدند. در اثر عدم اجرای روسی سطح داخلی فلزی که بایستی روی فولاد روکش می‌کشد[2]باقی مانده بود و در نتیجه اتصال بین دو فلز به وجود نیامده بود. لوله‌های مبدل حرارتی به‌سرعت خورده شدند چون به‌جای فولاد زنگ نزن ۳۱۶ از نوع ۳۰۴ استفاده شده بود. گوشه‌ها که گرد طراحی شده بودند، به علت عدم اجرای دقیق نقشه‌ها تیز از آب درآمدند و در نتیجه باعث خوردگی توأم با تنش یا خوردگی خستگی شدند. موارد زیادی وجود دارند که انهدام در اثر عملیات حرارتی غلط بوده است. بعضی اقدامات مثلاً خم کردن یک لوله به‌صورت سرد یا گرم برای قرار دادن آن در مسیر لازم باعث ایجاد تنش‌های بالا و تغییرات ناخواسته دیگر می‌شود. گاهی اوقات الکترود جوشکاری مناسب انتخاب نمی‌شود. آماده‌سازی سطحی بد باعث از بین رفتن سریع پوشش سطحی می‌شود. بازرسی کافی در کنترل کیفیت خلاصه می‌شود.

1 - Tube hangers 01
1 - Cladding 02



شکل ۲-۱۹ بررسی اقتصادی در زمینه انتخاب مواد برای مقاومت در برابر SCC، براساس آنالیز سالانه هزینه‌ها از NACE, PR-82-72 توجه: محدوده نسبت قیمت نصب از مرجع زیر است:

جدول ۲-۲

NACE Corrosion Engineer's Reference Book, R.S. Treseder, ED. p.110, (1980)

زیرکونیم	آلیاژ ۲۷۶-	تیتانیم با خلوص تجارتی	آلیاژ ۴۰۰	نیکل ۲۰۰	آلیاژ ۲۰	آلیاژ مقاوم / آلیاژ مستعد
						فولاد کربنی

انواع خوردگی

خوردگی را می‌توان به روش‌های مختلف طبقه‌بندی نمود. اساس طبقه‌بندی که در این کتاب مورد استفاده قرار گرفته است، ظاهر و شکل فلز خورده شده می‌باشد. بدین طریق صرفاً با مشاهده فلز خورده شده می‌توان نوع خوردگی را مشخص کرد. برای تشخیص نوع خوردگی در اکثر موارد چشم غیرمسلح کافی است، لکن گاهی اوقات بزرگ‌نمایی (مثلاً ذره بین یا میکروسکوپ‌هایی با بزرگ‌نمایی‌های کم) مفید یا ضروری است. اطلاعات با ارزش برای حل یک مسئله خوردگی غالباً با مطالعه دقیق نمونه‌های آزمایشی خورده شده یا تجهیزات یا اجزایی که منهدم شده‌اند، به دست می‌آید. بررسی و مطالعه نمونه-های خورده شده مخصوصاً قبل از تمیز کردن آنها ضروری است.

در بین انواع خوردگی می‌توان ۸ نوع منحصربه‌فرد پیدا نمود، لکن تمام آنها کم و بیش وجه تشابهی دارند. این ۸ نوع عبارتند از: (۱) خوردگی یکنواخت یا سرتاسری[۳] (۲) خوردگی گالوانیک یا دو فلزی[۴] (۳) خوردگی شیاری[۵] (۴) حفره‌دار شدن[۶] (۵) خوردگی توأم با تنش[۷] (۶) جدایش انتخابی[۸] (۷) خوردگی سایشی[۹] و (۸) خوردگی توأم با تنش.[۱۰] این طبقه‌بندی اختیاری است و ممکن است صددرصد کامل نباشد، لکن تقریباً تمام انواع مشکلات و انهدام‌های ناشی از خوردگی را شامل می‌شود. ضمناً ترتیب فوق نشان‌دهنده اهمیت انواع ذکر شده نیست.

در ادامه ۸ نوع خوردگی فوق‌الذکر از نقطه نظر خصوصیات، مکانیزم‌ها و طرق جلوگیری از آنها مورد بحث قرار خواهند گرفت. خسارات هیدروژنی، اگرچه از انواع خوردگی محسوب نمی‌شود، لکن چون به طور غیرمستقیم در اثر خوردگی واقع می‌شود، در این فصل گنجانده شده است.

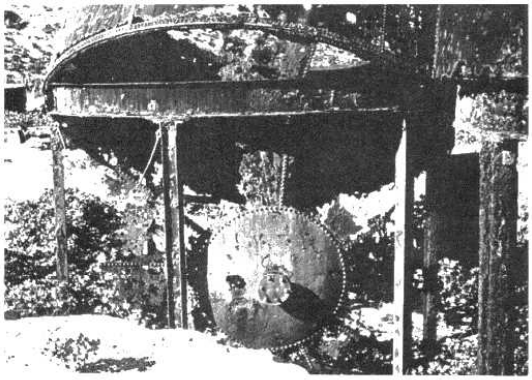
خوردگی یکنواخت

خوردگی یکنواخت معمول‌ترین نوع خوردگی است. معمولاً به‌وسیله یک واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی به طور یکنواخت در سرتاسر سطحی مشخص می‌شود که در تماس با محلول خورنده قرار دارد. فلز نازک و نازک‌تر شده و نهایتاً از بین می‌رود یا تجهیزات مورد نظر مهندم می‌شوند. مثلاً یک قطعه فولاد یا روی در داخل یک محلول رقیق اسیدسولفوریک معمولاً با سرعت یکسانی در تمام نقاط قطعه خورده خواهد شد. در شکل ۲-۲۰ یک تانک فولادی در یک کارخانه متروکه ذوب طلا نشان داده شده است. قسمت دایره‌ای در وسط عکس ضخیم‌تر از بقیه قسمت‌های تانک بود این قسمت حالا به‌وسیله شبکه‌ای میله‌ای تقویتی نگهداری می‌شود.

خوردگی یکنواخت یا سرتاسری، از نظر تناژ مقدار فلز خورده شده بالاترین رقم را دارد، لکن این نوع خوردگی از نقطه نظر فنی اهمیت چندانی ندارد، زیرا عمر تجهیزاتی که تحت این نوع خوردگی قرار می‌گیرند را دقیقاً می‌توان با آزمایشات ساده‌ای تخمین زد. برای این منظور، تنها قرار دادن نمونه‌های آزمایش در داخل محلول مورد نظر غالباً کافی است. خوردگی یکنواخت را به طرق زیر می‌توان متوقف نمود یا کم کرد: (۱) انتخاب مواد و پوشش صحیح، (۲) به‌وسیله ممانعت‌کننده و یا (۳) با استفاده از حفاظت کاتدی.

اکثر انواع دیگر خوردگی طبیعت پیچیده‌تری دارند و به‌سختی می‌توان آنها را پیش‌بینی نمود. همچنین موضعی بوده و محدود به نواحی خاصی یا قطعات یا قسمت‌های معینی از ساختمان فلزی هستند. در نتیجه باعث انهدام‌های غیرمنتظره با زودرس کارخانجات، ماشین‌آلات یا ابزارآلات می‌شوند.

1	0	3
1	0	4
1	0	5
1	0	6
1	0	7
1	0	8
1	0	9
1	1	0

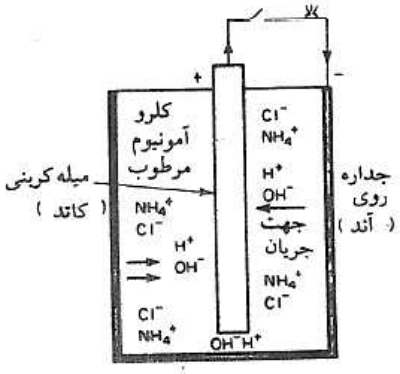


شکل ۲-۲۰ زنگ زدن یک تانک فولادی متروکه

خوردگی گالوانیک یا دو فلزی

اگر دو فلز در معرض یک محلول هادی یا خورنده قرار بگیرند، اختلاف پتانسیل بین آن دو باعث برقراری جریان الکترون بین آنها می‌شود. نسبت به موقعی که این دو فلز در تماس الکتریکی با یکدیگر نباشند، خوردگی فلزی که مقاومت خوردگی کمتری دارد، افزایش یافته و برعکس، خوردگی فلز مقاوم‌تر، تقلیل می‌یابد. فلزی که مقاومت خوردگی کمتری دارد آندی شده و فلز مقاوم‌تر (از نظر خوردگی) کاتدی می‌شود. معمولاً کاتد یا فلز کاتدی در این نوع خوردگی یا اصلاً خورده نمی‌شود و یا اگر خورده شود، مقدار خوردگی آن خیلی کم خواهد بود. به علت وجود جریان‌های الکتریکی بین فلزات غیرهمجنس این نوع خوردگی، خوردگی گالوانیکی یا دو فلزی نامیده می‌شود. این نوع خوردگی، خوردگی الکتروشیمیایی بوده، لکن برای سهولت تشخیص، اصطلاح گالوانیکی یا دو فلزی را در این مورد به کار می‌بریم.

نیروی محرکه برای برقراری جریان و در نتیجه خوردگی، پتانسیلی است که بین این دو فلز وجود دارد. باطری خشک که به طور شماتیکی در شکل۲-۲۱ نشان داده شده است مثال خوبی در این مورد است. الکترود کربنی به‌عنوان یک فلز مقاوم خوردگی- کاتد- عمل نمود و جداره بین الکترودها هادی الکتریسیته است (و خورنده) و جریان الکتریکی را در باطری هدایت می‌کند. از منیزیم نیز می‌توان به‌عنوان فلز آند یا جداره باطری استفاده نمود.



شکل ۲-۲۱ مقطع یک باتری خشک

نیروی الکتروموتوری (□ □□) و سری گالوانیک

اختلاف پتانسیل بین فلزات تحت شرایط رورسیبل یا غیرخورنده[1] اساس پیش‌بینی تمایل خوردگی می‌باشد. به طور خلاصه، پتانسیل بین فلز در تماس با محلول حاوی تقریباً یک اتم گرم یون فلز مربوطه (اکتیویته واحد)، در یک درجه حرارت ثابت به‌دقت اندازه‌گیری می‌شود. جدول ۲-۳، که غالباً جدول نیرو الکتروموتوری یا جدول emf نامیده می‌شود، طرز قرار گرفتن فلزات مختلف را نسبت به یکدیگر نشان می‌دهد. برای سادگی کلیه پتانسیل‌ها را نسبت به یک الکترود مرجع (H_2/H^+) که به طور دلخواه صفر فرض شده می‌سنجند. پتانسیل بین فلزات مختلف را با گرفتن اختلاف بین پتانسیل استاندارد (emf) آنها حساب می‌کنند، مثلاً اختلاف پتانسیل بین الکترودهای رورسیبل مس و نقره ۰/۴۶۲ ولت است. اختلاف پتانسیل بین مس و روی ۱/۱ ولت است. برای آلیاژهائی که از دو یا چند جزء فعال تشکیل شده‌اند، به دست آوردن پتانسیل رورسیبل عملی نیست، لذا در جدول ۲-۳ فقط فلزات خالص وجود دارند.

در مسائل عملی خوردگی، تماس گالوانیکی بین فلزات در حال تعادل با یون‌های خود به‌ندرت اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در بالا ملاحظه شد قسمت اعظم اثرات خوردگی گالوانیکی در اثر ارتباط الکتریکی دو فلز است که هرکدام به تنهایی قبل از اتصال الکتریکی با یکدیگر نیز در حال خورده شدن هستند. همچنین چون اکثر مواد مهندسی را آلیاژها تشکیل می‌دهند، بنابراین اتصال گالوانیکی معمولاً مشتمل بر یک (یا دو) آلیاژ فلزی می‌باشد. این شرایط جدول گالوانیکی، جدول ۲-۴ پیش‌بینی دقیق‌تری از روابط گالوانیکی می‌کند تا جدول emf. جدول ۲-۴ براساس اندازه‌گیری‌های پتانسیل و آزمایشات خوردگی گالوانیکی در آب دریا آلوده نشده می‌باشد که به‌وسیله شرکت بین‌المللی نیکل[2] انجام شده است. به خاطر اختلاف بین آزمایشات مختلف، تنها موقعیت نسبی فلزات در این جدول مشخص شده است نه پتانسیل آنها. در حالت ایده‌آل، جداول مشابهی برای فلزات و آلیاژها در تمام محیط‌ها در درجه حرارت‌های مختلف مورد نیاز خواهد بود، لکن در این صورت تقریباً بی‌نهایت آزمایش بایستی انجام شود.

به طور کلی موقعیت فلزات و آلیاژها در جدول گالوانیکی به‌نحو مناسبی با موقعیت فلزات تشکیل دهنده آنها در جدول emf تطابق دارد.

جدول ۲-۳ جدول نیروی الکتروموتوری استاندارد فلزات

پتانسیل الکترود نسبت به الکترود هیدروژن نرمال در 25°C	تعادل فلز- یون فلز (اکتیویته واحد)	
+ ۱/۴۹۸ + ۱/۲	$Au-Au^{+3}$	↑ نجیب
+ ۰/۹۸۷	$Pt-Pt^{+2}$	
+ ۰/۷۹۹	$Ag-Ag^{+}$	
+ ۰/۷۸۸	$Hg-Hg_2{}^{+2}$	
+ ۰/۳۳۷	$Cu-Cu^{+2}$	

1 □□□ □□□□□□□□□□□□□ 1 1

1 □□□□ □□□ □ 1 2

۰/۰۰۰	$H_2 - H^+$	
− ۰/۱۲۶	$Pb\text{-}Pb^{+2}$	
− ۰/۱۳۶	$Sn\text{-}Sn^{+2}$	
− ۰/۲۵۰	$Ni\text{-}Ni^{+2}$	
− ۰/۲۷۷	$Co\text{-}Co^{+2}$	
− ۰/۴۰۳	$Cd\text{-}Cd^{+2}$	
− ۰/۴۴۰	$Fe\text{-}Fe^{+2}$	
− ۰/۷۴۴	$Cr\text{-}Cr^{+3}$	
− ۰/۷۶۳	$Zn\text{-}Zn^{+2}$	
− ۱/۶۶۲	$Al\text{-}Al^{+3}$	فعال
− ۲/۳۶۳	$Mg\text{-}Mg^{+2}$	↓
− ۲/۷۱۴	$Na\text{-}Na^{+}$	
− ۲/۹۲۵	$K\text{-}K^{+}$	

25°C

غیرفعال شدن (روئین شدن) بر رفتار خوردگی گالوانیکی اثر می‌گذارد. توجه کنید در جدول ۲-۴ فولاد زنگ نزن در حالت غیرفعال در موقعیت نجیب‌تری قرار دارد نسبت به موقعی که این آلیاژها در حالت فعال قرار دارند. رفتار مشابهی به‌وسیله اینکوئل مشاهده می‌شود که یک نیکل زنگ نزن است. یک ویژگی جالب توجه دیگر جدول گالوانیکی کروشه‌هایی است که در جدول ۲-۴ نشان داده شده است. آلیاژهایی که در این پرانتزها جمع شده‌اند، تا اندازه‌ای از نظر ترکیب اصلی مشابه‌اند، مثلاً، مس و آلیاژهای مس.

جدول ۲-۴ جدول گالوانیکی بعضی فلزات و آلیاژها در آب دریا

↑ نجیب یا کاتدی	**پلاتین**
	طلا
	گرافیت
	تیتانیم
	نقره
	کلریمت ۳ (۶۲ نیکل، ۱۸ کرم، ۱۸ مولیبدن)
	هاستولی C (۶۲ نیکل، ۱۷ کرم، ۱۵ مولیبدن)
	فولاد زنگ نزن ۸- ۱۸ مولیبدن (غیرفعال)
	فولاد زنگ نزن ۸- ۱۸ (غیرفعال)
	فولاد زنگ نزن کرم‌دار حاوی ۱۱ تا ۳۰ درصد کرم (غیرفعال)
	اینکونل (غیرفعال) (۸۰ نیکل، ۱۳ کرم، ۷ آهن)
	نیکل (غیرفعال)
	لحیم نقره (Silver Solder)
	مونل (۷۰ نیکل، ۳۰ مس)
	کوپرونیکل‌ها (۶۰ تا ۹۰ مس، ۴۰ تا ۱۰ نیکل)
	برنزها (مس- قلع)

مس
برنج‌ها (مس- روی)
کلریمت ۲ (٦٦ نیکل، ۳۲ مولیبدن، ۱ آهن)
هاستولی C (٦۰ نیکل، ۳۰ مولیبدن، ٦ آهن، ۱ منگنز)
اینکونل (فعال)
نیکل (فعال)
قلع
سرب لحیم سرب- قلع
فولاد زنگ نزن ۸- ۱۸ مولیبدن (فعال)
فولاد زنگ نزن ۸- ۱۸ (فعال)
جدن پرنیکل (Ni-Resist)
فولاد زنگ نزن کرم‌دار، ۱۳ درصد کرم (فعال)
چدن
فولاد یا آهن
آلومینیم ۳۰۲٤ (٤/٥ مس، ۱/٥ منیزیم، ۰/٦ منگنز)
کادمیوم
آلومینیم خالص تجاری (۱۱۰۰)
روی
منیزیم و آلیاژهای آن

پرانتزها نشان می‌دهند که در اثر کاربردهای عملی خطر کمی برای خوردگی گالوانیکی زوج‌های فلزات و آلیاژهایی وجود دارد که در یک پرانتز خاص قرار دارند. این به دلیل نزدیکی اینها به همدیگر در جدول می‌باشد و در نتیجه پتانسیل به وجود آمده بین آنها چندان قابل توجه نخواهد بود. در این جدول نیز هرچه فلز از یکدیگر دورتر باشند، اختلاف پتانسیل بین آنها بیشتر خواهد بود.

در صورت عدم وجود نتایج آزمایشات در یک محیط خاص، سری گلوانیکی راهنمای خوبی برای اثرات احتمالی گالوانیکی است. به‌عنوان مثال چند مورد انهدام[۱۳] با استفاده از جدول ۲-۴ بررسی می‌کنیم. یک بدنه قایق از جنس مونل با میخ پرچ‌های فولادی در اثر خوردگی سریع میخ پرچ‌های فولادی سوراخ شد. لوله‌های آلومینیم متصل به لوله‌های برگشتی برنجی به‌شدت خورده شدند. تانک‌های آبگرم منازل از جنس فولاد در محل اتصال لوله‌های مسی به تانک سوراخ می‌شوند. شفت پمپ‌ها یا تیغه‌های والوها[۱۴] جنس فولاد یا مواد مقاوم‌تر در مقابل خوردگی، در اثر تماس با گرافیت خورده شدند.

خوردگی گالوانیکی گاهی اوقات در محل‌های غیرمنتظره‌ای اتفاق می‌افتد. مثلاً در یک مورد، خوردگی در لبه‌های جلوی مدخل ورودی محفظه[۱۵] موتورهای جت اتفاق افتاد. خوردگی در اثر پارچه‌ای اتفاق افتاده بود که روی مدخل ورودی موتور قرار داشت. برای جلوگیری از رویش قارچ و جلبک روی این پارچه، آن را با نمک‌های مس آمیخته کرده بودند. آمیختن پارچه با نمک‌های مس برای جلوگیری از رویش قارچ و جلبک، ضدآتش کردن و دلایل دیگر خیلی متداول است. نمک

1 [illegible] 1 3
1 [illegible] 1 4
1 [illegible] 1 5

مس باعث راسب شدن مس روی فولاد آلیاژی شده و در نتیجه فولاد به طور گالوانیکی خورده شده بود. این مسئله با استفاده از یک نایلون یا پوشش وینیلی حل شد که حاوی هیچ‌گونه فلزی نبود.

این مثال‌ها بر این واقعیت تأکید می‌کنند که مهندس طراح بایستی مخصوصاً از اثرات خوردگی گالوانیکی آگاه باشد. گاهی اوقات کاربرد فلزات همجنس در تماس با یکدیگر اقتصادی است. مثلاً دیگ بخار (بویلر) با لوله‌های مسی و صفحه لوله[۱۱۶] چدنی یا فولادی در تماس است. در صورت وقوع خوردگی گالوانیکی، صفحه لوله‌ها که ضخیم و حجیم است خورده خواهد شد (در مقایسه با لوله‌های نازک مسی)، و به دلیل ضخامت زیاد صفحه لوله‌ها، عمر آنها زیاد خواهد بود. درعین‌حال، به‌جای صفحه لوله‌های برنزی گران‌قیمت از صفحات چدنی یا فولادی استفاده شده است که ارزان‌تر هستند. در شرایطی که از نظر خوردگی شدیدتر است، مثلاً در محلول‌های رقیق اسیدی یا در مواردی که کمترین سرعت خوردگی باعث آلودگی و در نتیجه خساراتی به سیستم خواهد بود، ممکن است صفحه لوله‌ها را از جنس برنز انتخاب کنند.

پتانسیل تولید شده به‌وسیله یک پیل گالوانیکی که از دو فلز غیرهمجنس ساخته شده است با زمان تغییر می‌کند. اختلاف پتانسیل باعث جریان شده و خوردگی در الکترود آندی اتفاق می‌افتد. با پیشرفت خوردگی، محصولات حاصل از خوردگی یا واکنش‌های دیگر ممکن است روی سطح آند یا کاتد یا هر دو تجمع نمایند و بدین ترتیب سرعت خوردگی تقلیل یابد.

در خوردگی گالوانیکی، معمولاً پولاریزاسیون واکنش احیا (پولاریزاسیون کاتدی) کنترل کننده است. چون درجه پولاریزاسیون و مؤثر بودن آن بستگی به فلز و آلیاژ دارد، لذا قبل از آنکه بتوان میزان خوردگی گالوانیکی را برای یک کوپل پیش‌بینی نمود، لازم است اطلاعاتی درباره ویژگی پولاریزاسیون آنها به دست آورد. مثلاً تیتانیم در آب دریا خیلی نجیب می‌باشد (مقاومت عالی نشان می‌دهد)، باوجود این، خوردگی گالوانیکی یک فلز فعال‌تر که در تماس با تیتانیم در آب دریا قرار می‌گیرد، معمولاً شدید نخواهد بود یا کمتر از مقداریست که پیش‌بینی می‌شود. دلیل آن این است که تیتانیم به سهولت در آب دریا به تیتانیم به‌صورت کاتدی پولاریزه می‌شود.

به طور خلاصه جدول سری گالوانیکی ویژگی‌های خوردگی گالوانیکی را دقیق‌تر از جدول emf نشان می‌دهد. لکن همان‌طور که بعداً بحث خواهد شد بایستی توجه داشت که در مورد سری گالوانیکی نیز استثنائاتی وجود دارد، لذا هرجا که ممکن باشد بایستی آزمایشات خوردگی در شرایط مورد نظر انجام شود.

اثرات محیط

ماهیت و خورندگی محیط به میزان زیادی بر شدت خوردگی گالوانیکی تأثیر می‌گذارد. معمولاً فلزی آند می‌شود که مقاومت کمتری نسبت به محیط مورد نظر دارد.

بعضی وقت‌ها پتانسیل یک زوج گالوانیکی در یک محیط دیگر عکس می‌شود. جدول ۲-۵ رفتار عمومی فولاد و روی را در محیط‌های آبی نشان می‌دهد. معمولاً هم فولاد و هم روی هرکدام به تنهائی خورده می‌شوند، لکن موقعی که آنها را به هم متصل می‌کنیم روی خورده شده و فولاد حفاظت می‌شود. در موارد خاصی مثل دیگ‌های آبگرم خانگی در درجه حرارت‌های

1 □□□□□□□□□□□ 1 6

بالاتر از 180°F حالت فوق برعکس شده و فولادی آندی می‌شود. ظاهراً در این حالت محصولات خوردگی روی باعث نجیب‌تر شدن این فلز نسبت به فولاد می‌شوند. Haney[۱۷] نشان داد که در حضور یون‌های ممانعت‌کننده نظیر نیترات‌ها، بی‌کربنات‌ها و یا کربنات‌ها در آب، روی به مقدار کمی نجیب‌تر می‌گردد و پتانسیل‌ها برعکس خواهد شد.

جدول ۲-۵ تغییر وزن فولاد و روی به تنهایی و در تماس با یکدیگر (گرم)

متصل بهم		جدا از هم		
فولاد	روی	فولاد	روی	محیط
+ ۰/۰۲	- ۰/۰۵	- ۰/۰۴	۰/۰۰	0/05M $MgSO_4$
+ ۰/۰۱	- ۰/۴۸	- ۰/۱۵	- ۰/۱۷	0/05M Na_2SO_3
+ ۰/۰۱	- ۰/۴۴	- ۰/۱۵	- ۰/۱۵	0/05M NaCl
+ ۰/۰۲	- ۰/۱۳	- ۰/۱۰	- ۰/۰۶	

تانتال از نظر مقاومت در برابر خوردگی فلزی بسیاری مقاوم است و نسبت به پلاتین و کربن آند است. لکن پیل حاصل تنها در درجه حرارت‌های بالا فعال است. مثلاً در زوج تانتال - پلاتین جریان تا 110°C برقرار نمی‌شود و در 265°C جریانی حدود 100 mA/ft² وجود دارد. تانتال نسبت به چدن پر سیلیسیم در اسید سولفوریک غلیظ کاتد است، لکن جریان بین آند و به‌سرعت به‌صفر می‌رسد. در بالاتر از 145°C قطبین پیل عکس می‌شود. تانتال را نبایستی در تماس با فلزات آندی قرار داد زیرا هیدروژن کاتدی را جذب نموده و ترد می‌شود.

خوردگی گالوانیکی در اتمسفر نیز واقع می‌شود. شدت آن بستگی به دو نوع و مقدار رطوبت موجود در اتمسفر دارد. مثلاً خوردگی نزدیک سواحل دریا بیشتر از اتمسفر خشک می‌باشد. کندانس بخار در نزدیک ساحل دریا حاوی نمک است و لذا هادی‌تر و خورنده‌تر است و در رطوبت و درجه حرارت یکسان نسبت به کندانس در یک ناحیه دور از دریا الکترولیت بهتری است. آزمایشات اتمسفری در نقاط مختلف نشان داده‌اند که روی (Zn) در تمام موارد نسبت به فولاد آند است، آلومینیم وضعیت مختلف و متغیری داشته و قلع و نیکل همواره کاتد بوده‌اند. موقعی که فلزات کاملاً خشک باشند خوردگی گالوانیکی اتفاق نخواهد افتاد، زیرا الکترولیتی برای حمل جریان بین سطوح الکترودها وجود ندارد.

اثر فاصله دو الکترود

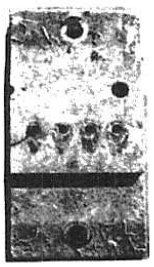
خوردگی گالوانیکی معمولاً نزدیک محل اتصال دو فلز شدیدتر است و با دور شدن از این نقطه خوردگی نیز کم می‌شود. فاصله‌ای که تحت تأثیر خوردگی قرار می‌گیرد بستگی به مقاومت محلول دارد. با در نظر گرفتن مسیر جریان و مقاومت مدار این مسئله واضح است، در آبی با مقاومت بالا و یا کاملاً خالص خوردگی ممکن است به‌صورت یک شیار باریک ظاهر گردد. خوردگی گالوانیکی از موضعی بودن آن در نزدیکی محل اتصال دو فلز به سهولت قابل تشخیص است.

1 [illegible]

اثر سطح

یک فاکتور مهم دیگر در خوردگی گالوانیکی اثر سطح، یا نسبت سطح کاتد به سطح آند می‌باشد. نسبت سطحی نامناسب مشتمل بر کاتد بزرگ و آند کوچک است، $1 \ll \frac{\text{سطح کاتد}}{\text{سطح آند}}$ برای یک مقدار معین جریان در پیل، دانسیته جریان برای الکترود کوچک به مراتب بزرگ‌تر است تا دانسیته جریان الکترود بزرگ‌تر، هرچه دانسیته جریان در یک منطقه آندی بزرگ‌تر باشد، سرعت خوردگی بیشتر است. خوردگی نواحی آندی ممکن است ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر بیشتر از حالتی باشد که سطح آند با کاتد برابرند. شکل۲-۲۲ دو مثال خوب از اثر سطح را نشان می‌دهد. نمونه‌ها، صفحات پرچ شده مسی و فولادی هستند که هر دو یک زمان به‌مدت ۱۵ ماه در آب دریا قرار گرفته‌اند. در سمت چپ، صفحات فولادی با میخ پرچ‌های مسی، و در طرف راست صفحات مسی با میخ پرچ‌های فولادی قرار دارند. مس نسبت به فولاد در آب دریا، فلز نجیب‌تر یا مقاوم‌تر در برابر خوردگی است. صفحات فولادی در سمت چپ قدری خورده شده‌اند، لکن اتصال حاصل از میخ پرچ‌ها هنوز قوی است. نمونه سمت راست دارای نسبت سطحی نامناسبی است میخ پرچ‌های فولادی کاملاً خورده شده‌اند. واضح است که سرعت یا دانسیته خوردگی روی میخ پرچ‌های فولادی خیلی بیشتر است که در تماس با سطح بزرگ کاتدی قرار دارند.

میخ پرچهای فولادی در ورقهای مسی، کاتد بزرگ و آند کوچک



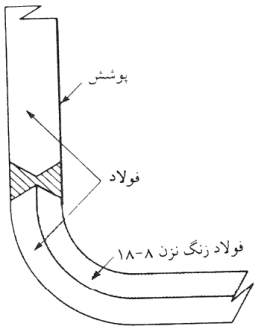
میخ پرچهای مسی در ورقهای فولادی، آند بزرگ و کاتد کوچک

شکل ۲-۲۲ تأثیر نسبت سطحی بر خوردگی گالوانیکی در کوپل فولاد – مس (محیط دریا، زمان آزمایش ۱۵ ماه)

تخلف از اصل ساده فوق غالباً منجر به خسارات زیادی می‌گردد. به‌عنوان مثال: در یک کارخانه در طی یک برنامه عظیم توسعه چندصد تانک بزرگ نصب گردید. اکثر تانک‌های قدیمی را از فولاد معمولی می‌ساختند و با یک رنگ فنلی پخته شده قسمت داخلی را پوشش می‌دادند. محلولی که در تانک قرار داشت، اثر خوردگی کمی روی فولاد داشت. لکن آلوده شدن محصول مسئله مهمی بود. این پوشش در قسمت کف خساراتی متحمل می‌شد که اکثراً در اثر ضربات مکانیکی بود و لذا هرچند وقت یک‌بار بایستی پوشش کف تعمیر می‌شد. برای غلبه بر این مسئله کف تانک‌های جدید از فولاد کم کربن معمولی که با فولاد زنگ نزن ۸ - ۱۸ روکش شده بود ساخته شد. دیواره‌ها و سقف تانک از فولاد معمولی ساخته شده و به‌وسیله همان زنگ فنلی پوشش داده شده، شکل ۲-۲۳، و پوشش را تا اندکی روی فولاد زنگ نزن در قسمت زیر خط جوش ادامه دادند.

چند ماه بعد از آغاز به کار کارخانه جدید، تانک‌ها یکی بعد از دیگری شروع به سوراخ شدن در قسمت دیواره‌ها نمودند. اکثر سوراخ‌ها در یک باند به پهنای ۲ اینچ در بالای خط جوش واقع می‌شدند. بعضی از تانک‌های تمام فولادی قدیمی از نقطه نظر سوراخ شدن دیواره‌ها، ۱۰ تا ۲۰ سال بدون کوچک‌ترین دردسر عمر کرده بودند.

توجیه و علت مسئله فوق به قرار زیر است: به طور کلی کلیه پوشش‌های رنگی قابل نفوذ بوده و ممکن است دارای نواقصی باشند. مثلاً این رنگ فنلی پخته شده حتی در مقابل آب دریا که دو بار تقطیر شده از بین می‌رود.



شکل ۲-۲۳ جزئیات ساختمان تانک فولادی که در یک قسمت آن روکش فولاد زنگ نزن بکار رفته است.

سوراخ شدن تانک‌های جدید ناشی از نسبت سطح کاتد به آند نامناسب می‌باشد. آندهای کوچکی که روی ورقه‌ای فولادی دیواره به وجود آمده بود، در تماس الکتریکی با سطح بزرگ فولاد زنگ نزن بوده و باعث ایجاد سرعت‌های بالای خوردگی در حدود mpy ۱۰۰ شده است.

یک موضوع جنبی در این رابطه ادعای کارخانه بود، مبنی‌بر اینکه سوراخ شدن تانک‌ها در اثر پوشش ضعیف در نزدیکی محل جوش بوده است. آنها از شرکت مزبور درخواست کردند که تانک‌ها را دوباره پوشش دهند، خرج این کار بیشتر از مخارج کار اولیه می‌شد زیرا در حالت اول تمیز کردن سطح زنگ زده فولاد با ماسه پاشی[۱۱۸] بسیار راحت‌تر از تمیز کردن سطح از پوشش فنلی چسبنده می‌باشد. لکن هنوز هم اتفاق قبلی تکرار می‌شد.

کارخانه ثابت نمود که خوردگی گالوانیکی فاکتور مهمی نبوده است. این کار را با قرار دادن نمونه‌هایی از فولاد و فولاد زنگ نزن با سطوح یکسان، در تماس با یکدیگر در محلول جوشان انجام دادند. برای تسریع خوردگی آزمایش در درجه حرارت جوش انجام شد. لکن این کار باعث خارج شدن گازهای حل شده در محلول شده و عملاً خوردگی محیط مربوطه را کم کرده بودند. این مسئله با پوشش دادن کف تانک (قسمت فولاد زنگ نزن) حل شد که سطح کاتدی را کم می‌نمود.

در یک کارخانه دیگر که از همان محلول‌ها استفاده می‌نمودند، در اثر استفاده از دریچه برنزی روی تانک‌ها[۱۱۹] که فاقد پوشش بودند، خوردگی قسمت‌های پوشش داده شده تسریع شد. علت استفاده از دریچه‌های برنزی این بود که سریع‌تر از دریچه‌هایی از جنس فولاد ریختگی قابل تهیه بودند. در این کارخانه، خوردگی دو تانک مجاور همدیگر را که یکی هم دارای دریچه

1 [illegible] 1 8
1 [illegible] 1 9

برنزی بدون پوشش و دیگری با پوشش بود، با یکدیگر مقایسه شد، درحالی‌که، کلیه فاکتورهای دیگر ثابت بود. این آزمایش به وضوح سوراخ شدن تانک‌ها را در اثر دریچه‌های برنزی بدون پوشش اثبات نمود.

این مثال‌ها وجود یک اصل مهم را درباره پوشش‌ها نشان می‌دهد. اگر فقط یکی از دو فلز غیرهمجنس که در تماس با یکدیگر قرار دارند بایستی پوشش داده شوند، فلز نجیب‌تر یا فلزی که در مقابل خوردگی مقاوم‌تر است را بایستی پوشش داد. این موضوع به نظر افراد نامطلع ممکن است عجیب بیاید، لکن اطلاعات فوق برای روشن کردن این مطلب کافی خواهد بود.

جلوگیری

روش‌هایی برای مبارزه یا حداقل نمودن خوردگی گالوانیکی وجود دارد. بعضی وقت‌ها یکی از این روش‌ها کافی است، لکن بعضی مواقع ممکن است یک یا چند تا از این روش‌ها لازم باشد. این روش‌ها به شرح زیر می‌باشند:

در صورت نیاز به کاربرد فلزات غیرهمجنس حتی الامکان سعی کنید که موقعیت آنها در جدول گالوانیکی به یکدیگر نزدیک‌تر باشد.

از نسبت سطحی نامطلوب، آند کوچک و کاتد بزرگ، بپرهیزید. قطعات کوچک مثل پیچ و مهره‌ها یا میخ پرچ‌ها برای نگهداشتن فلزات فعال‌تر به یکدیگر مناسب هستند.

فلزات غیرهمجنس هرجا که ممکن است از یکدیگر عایق سازید و در صورت امکان بایستی اجزاء را کاملاً عایق‌بندی کرد. یک اشتباه متداول در این زمینه در اتصالات پیچی همچون فلانج‌ها می‌باشد. به‌عنوان مثال می‌توان به اتصال لوله و والو به یکدیگر اشاره کرد. به‌طوری‌که لوله از جنس فولاد یا سرب و والو از مواد دیگری انتخاب گردد.

در این حالت برای عایق کردن دو قسمت از واشر باکلیتی در زیر پیچ و مهره‌ها استفاده می‌گردد ولی باز هنوز بدنه پیچ‌ها با فلانج در تماس است. برای حل این مسئله همواره باید از تیوب‌های پلاستیکی بر روی بدنه پیچ‌ها استفاده می‌گردد. به‌طوری‌که پیچ‌ها کاملاً از فلانج‌ها مجزا گردند. شکل ۲-۲۵ نحوه صحیح عایق کردن در یک اتصال با پیچ را نشان می‌دهد. نوارپیچ و رنگ، مقاومت الکتریکی مدار را زیاد می‌کنند و راه‌های دیگری می‌باشند.

۱- پوشش‌ها را البته با احتیاط به کار ببرید. از حالات شبیه آنچه که در رابطه با شکل ۲-۲۳ گفته شد، پرهیز نمایید. پوشش را به‌خوبی تعمیر کنید، مخصوصاً پوشش روی نواحی آندی.

۲- درصورتی‌که ممکن باشد برای کم کردن خورندگی محیط، از ممانعت‌کننده[۱] استفاده کنید.

۳- درباره موادی که در جدول گالوانیکی دور از یکدیگر قرار دارند، از اتصالات پیچ و مهره‌ای پرهیز نمایید. همان‌طور که در شکل ۲-۲۴ نشان داده شده است، قسمتی از ضخامت مؤثر جداره فلز در مرحله پیچ‌سازی برداشته می‌شود. به‌علاوه، مایعات کندانس شده یا رطوبت کندانس شده، می‌تواند در شیارهای پیچ تجمع پیدا کند و همان جا باقی بماند.

اتصال زرد جوش[۱] با[۲] استفاده از یک آلیاژی که حداقل نسبت به یکی از دو فلز تحت اتصال نجیب‌تر باشد، ارجحیت دارد. استفاده از الکترود همجنس با فلز زمینه‌ای مطلوب‌تر است که جوشکاری در آن صورت می‌گیرد.

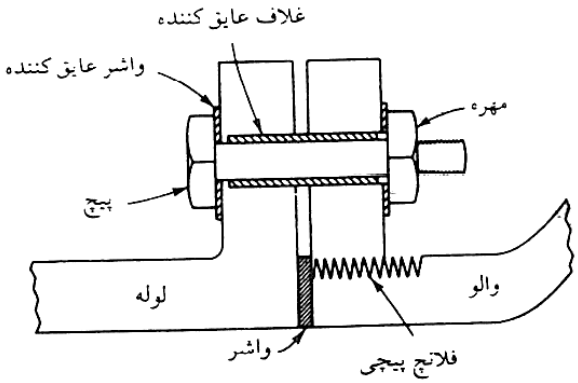
---

1 [illegible] 2 0

1 [illegible] 2 1

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

۵- به اتصال‌های گالوانیکی، فلز سومی که نسبت به دو فلز قبلی آند باشد متصل نمایید.



شکل ۲-۲۴ نحوه صحیح عایق کردن یک اتصال فلانجی

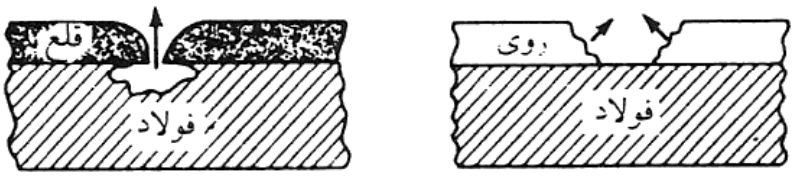
کاربردهای مفید

خوردگی گالوانیکی دارای چند کاربرد مفید می‌باشد. همان‌طور که قبلاً اشاره گردید باتری‌های خشک و باتری‌های دیگر انرژی الکتریکی خود را از خوردگی گالوانیکی یک الکترود به دست می‌آورند. جالب توجه است که اگر این‌گونه باتری‌ها تا آنجا استفاده شوند که جداره روی (Zn) سوراخ شود و الکترولیت خورنده به بیرون نشت نماید، دراین‌صورت، یک مسئله خوردگی گالوانیکی خواهیم داشت.

بعضی کاربردهای مفید این نوع خوردگی به طور خلاصه در زیر آمده‌است:

حفاظت کاتدی: مبحث حفاظت کاتدی را در اینجا بررسی می‌کنیم زیرا بر اساس خوردگی گالوانیکی قرار دارد. حفاظت کاتدی عبارتست از حفاظت یک ساختمان فلزی با کاتد ساختن آن در یک پیل گالوانیکی. فولاد گالوانیزه شده (پوشش روی) مثال کلاسیک حفاظت کاتدی فولاد است. پوشش روی را روی فولاد می‌دهند نه به خاطر این که روی در مقابل خوردگی مقاوم است بلکه به خاطر اینکه مقاوم نیست. در خراش‌ها یا سوراخ‌های سطحی، روی خورده خواهد شد و فولاد را حفاظت خواهد نمود. (جدول ۲-۵ و شکل ۲-۲۵). روی به‌عنوان یک آند قربانی‌شونده[۱۲۲] عمل می‌کند. برعکس، قلع، که از روی مقاوم‌تر است، گاهی اوقات پوشش مناسبی برای فولاد نیست زیرا معمولاً نسبت به فولاد کاتد است. در خراش‌ها یا سوراخ‌های پوشش قلع، خوردگی فولاد به واسطه عامل گالوانیکی تسریع می‌گردد. منیزیم را غالباً به لوله‌های فولادی زیرزمینی متصل می‌کنند تا خوردگی آنها متوقف گردد (در ازای خورده شدن منیزیم). حفاظت کاتدی را همچنین با اعمال جریان توسط یک منبع برق خارجی از طریق یک الکترود خنثی نیز به دست می‌آورند.

1 [illegible] 2 2



شکل ۲-۲۵ خوردگی گالوانیکی در محل‌های آسیب دیده در پوشش روی و قلع روی فولاد

تمیز کردن نقره: یکی از موارد استفاده خوردگی گالوانیکی تمیز کردن ظروف نقره‌ای خانگی است. بیشتر ظروف نقره‌ای توسط مالش یک جسم ساینده تمیز می‌گردند. این کار علاوه بر به هدر دادن نقره در مورد پوشش‌های نقره‌ای زیان‌آور است، چون باعث از بین رفتن پوشش می‌گردد.

بیشتر لکه‌های موجود در روی ظروف نقره‌ای به واسطه سولفید نقره است. یک روش الکتروشیمیایی ساده مشتمل بر قرار دادن نقره در ظروف آلومینیمی محتوی آب و جوش شیرین (از کلرید سدیم استفاده نکنید) می‌باشد. جریان الکتریکی به وجود آمده در اثر تماس نقره و آلومینیم باعث احیا سولفید نقره به نقره می‌گردد. در این حالت نقره جدا نمی‌گردد. در انتها ظرف را در آبگرم و صابون می‌شویند و آب‌کشی می‌کنند. سطح به دست آمده در این حالت به‌خوبی سطح پولیش شده نیست ولی از سایش و خراشیدن نقره و نیز آسیب رسیدن به اپراتورها جلوگیری می‌کند. استفاده هم‌زمان از تمیزکننده‌های اولتراسونیک باعث افزایش کیفیت و سرعت کار می‌گردد ولی تجهیزات مذکور همواره در دسترس نمی‌باشند.

گاهی اوقات، در فروشگاه‌ها، یک فلز جادویی عرضه می‌شود که همین کار را می‌کند، طبق دستورالعمل داده شده، فلز جادویی را بایستی به ظروف نقره‌ای متصل نموده و در یک ظروف لعابی حاوی محلول جوش شیرین قرار داد. فلز جادویی در حقیقت یک قطعه آلومینیم یا منیزیم است.

خوردگی‌های مهم در مبحث کاتدی

خوردگی یکنواخت

ماهیت این نوع خوردگی، شیمیایی یا الکتروشیمیایی است. به هر حال سطوح آند یا کاتد جداگانه وجود ندارد. این نوع خوردگی بر روی سطحی از فلز که در مجاورت محیط قرار دارد به‌صورت یکنواخت ایجاد می‌شود. فلز به تدریج نازک‌تر شده و در نهایت می‌شکند.

اصولاً سطح انرژی فلز است که باعث ایجاد این واکنش می‌شود. در فرایندی که به آن عنوان «غبار به غبار» اطلاق می‌شود، سطوح بالای انرژی به ماده خام افزوده می‌شوند تا فلز تولید شود. این سطح بالای انرژی باعث ایجاد پتانسیل الکتریکی بالا و غیرمعمول می‌گردد. بر اساس قانونی در شیمی، تمامی مواد تمایل دارند به پایین‌ترین سطح انرژی یا حالت طبیعی خود برگردند. پس از افزوده شدن سطوح بالای انرژی به فلز، هنگامی که این فلز در مجاورت محیط (یک الکترولیت) قرار گیرد، تمایل خواهد داشت به حالت طبیعی خود برگردد. این فرایند معمولاً بسیار کند صورت می‌گیرد و به غلظت یون الکترولیتی که در

مجاورت آن قرار گرفته است بستگی دارد. فقط در شرایط بسیار خاص (الکترولیت اسیدی) این نوع خوردگی اهمیت پیدا می‌کند. در pH زیر 4 نرخ خوردگی فولاد بسیار افزایش یافته و در pH حدود 3 فولاد تجزیه خواهد شد. با گذشت زمان پتانسیل فلز به تدریج کمتر می‌شود و بنابراین سرعت خوردگی عمومی کاهش می‌یابد. تخریب خطوط لوله یا مخازن در اثر این نوع خوردگی به سرعت رخ نمی‌دهد، زیرا سازه متخلخل نشده یا نفوذ در داخل آن رخ نمی‌دهد و فقط یک خوردگی عمومی بر روی کل سطح ایجاد می‌شود. (به‌جز تحت شرایط بسیار خاصی که فلز می‌تواند در داخل یک الکترولیت اسیدی حل شود). به هرحال طبیعتاً فلز کاملاً یکنواخت نیست و الکترولیت نیز کاملاً همگن نمی‌باشد، ازاین‌رو، پیل‌های خوردگی الکتروشیمیایی تشکیل شده و تا حد زیادی این نوع خوردگی ملایم را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند.

خوردگی غلظتی

این نوع خوردگی توسط یک پیل خوردگی الکتروشیمیایی ایجاد می‌شود. اختلاف پتانسیل (نیروی محرکه الکتریکی) در اثر اختلاف غلظت بعضی عناصر تشکیل‌دهنده در الکترولیت به وجود می‌آید. هرگونه اختلاف در الکترولیت مجاور فلز باعث ایجاد نواحی آند و کاتد جداگانه در فلز می‌شود. هر فلزی که در مجاورت یک الکترولیت باشد، پتانسیل یا ولتاژی قابل اندازه‌گیری خواهد داشت. همین فلز در الکترولیت‌های مختلف یا الکترولیت‌های با غلظت متفاوت عناصر، پتانسیل الکتریکی متفاوتی دارد. این اختلاف پتانسیل در فلز نواحی آندی و کاتدی به وجود می‌آورد. زمانی‌که الکترولیت و مسیر فلزی نیز وجود داشته باشند، مدار کامل شده، جریان برقرار می‌شود و خوردگی الکتروشیمیایی رخ خواهد داد.

خاک ترکیبی از مواد بسیار مختلفی می‌باشد. همچنین انواع بسیاری خاک وجود دارد و حتی غلظت‌های مواد تشکیل‌دهنده یک نوع خاک هم می‌تواند بسیار متغیر باشند. بنابراین چیزی به‌عنوان خاک کاملاً همگن وجود ندارد.

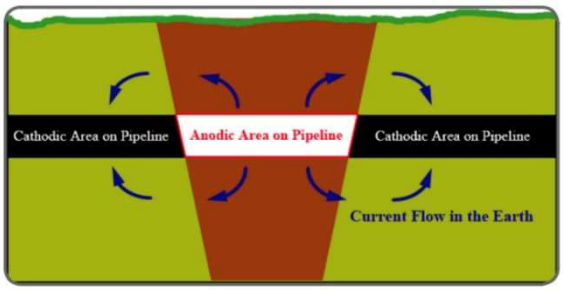
این تغییرات خاک سبب ایجاد اختلاف پتانسیل (نیروی محرکه الکتریکی) بر روی سطح فلزی شده و منجر به تشکیل پیل‌های خوردگی الکتروشیمیایی می‌شود. مایعات یکنواختی بیشتری دارند، اما غلظت بعضی ترکیبات آنها نظیر اکسیژن می‌تواند با عمق و سرعت جریان تغییر کند. ارگانیسم‌های زیستی در محیط‌های آبی طبیعی وجود دارند. این ارگانیسم‌ها به سطح مواد سازه چسبیده و بر روی آنها رشد می‌کنند و در نتیجه باعث شکل‌گیری یک لایه زیستی یا بیوفیلم می‌شوند. این لایه با الکترولیت اطراف تفاوت داشته و تأثیرات نامطلوب بسیاری دارند. در ادامه مثال‌هایی از اشکال متداول خوردگی پیل غلظتی ارائه شده است.

خوردگی پیل غلظتی

خطوط لوله از میان خاک‌های متفاوتی عبور می‌کند. فلز در خاک‌های مختلف پتانسیل‌های الکتریکی متفاوتی از خود نشان می‌دهد. پتانسیل الکتریکی فلز در این خاک‌ها تعیین می‌کند که کدام سطوح آندی و کدام کاتدی می‌شوند. ازآنجاکه، آند و کاتد هر دو پیوستگی الکتریکی داشته و الکترولیت با هر دو در تماس است، جریان برقرار شده و منجر به ایجاد واکنش‌های اکسیداسیون و کاهش (خوردگی و حفاظت) می‌گردد. بنابراین سطح خط لوله یا مخزن، که آند است، خورده می‌شود.

به دلیل آنکه زمین از لایه‌های افقی با خاک‌های متفاوت تشکیل شده است، خطوط لوله که از چندین لایه خاک می‌گذرند، اغلب تحت تأثیر این نوع خوردگی قرار می‌گیرند. بدنه چاه‌های آب و نفت مثال‌های اولیه از این نوع پیل خوردگی الکتروشیمیایی هستند. مثال دیگر خطوط لوله‌ای است که از مناطقی با مواد مختلف نظیر سنگ، سنگ ریزه، ماسه، خاک رس و شن یا ترکیبات مختلف این مواد عبور می‌کند.

بیش از ۵۰ نوع کلی خاک وجود دارد که ویژگی‌های خوردگی آنها شناسایی شده است. هر نوع از این خاک‌ها مقاومت خاک متفاوتی دارد. در مناطقی که مقادیر مقاومت خاک در فواصل نسبتاً کوتاه تغییرات بسیار شدیدی دارد، پیل‌های خوردگی



محیط ناهمسان تشکیل می‌شوند. زمانی‌که آند این پیل‌های خوردگی الکتروشیمیایی نسبتاً کوچک، مقاومت خاک حداقل و اختلاف پتانسیل الکتریکی حداکثر باشد، شدیدترین خوردگی ایجاد می‌شود. نمونه‌هایی از خاک‌های خورنده عبارتند از خاک رس و شن مرطوب (قلیایی)، خاک رس خشتی (قلیایی) مونتزوما، کود و خاک گلدانی رسی فارگو.

پتانسیل الکتریکی فلز در این خاک ها تعیین می‌کند که کدام سطوح آندی و کدام کاتدی میشوند.

غلظت اکسیژن:

معمولاً خطوط لوله یا مخازنی که در مجاورت الکترولیت با غلظت اکسیژن کم قرار دارند نسبت به ماده همجنس در مجاورت الکترولیت با اکسیژن زیاد، نقش آند پیدا می‌کنند. زمانی‌که خط لوله یا مخزن درکف محل حفاری شده قرار گرفته و سپس اطراف آن با خاک پر می‌شود، این اثر شدیدتر است. خاک پرکننده حاوی مقدار نسبتاً زیادی اکسیژن در طی عملیات حفاری و خاکریزی است. زمانی‌که فلز در مجاورت مناطقی قرار بگیرد که سطوح اکسیژن متفاوتی دارند نیز ممکن است همین اتفاق رخ دهد.

الکترولیت مرطوب/خشک:

خطوط لوله یا مخازن مجاور با نواحی کم‌آب و پرآب در الکترولیت، نیز پتانسیل‌های مختلفی در این نواحی از خود نشان می‌دهند. معمولاً نواحی مرطوب‌تر در این پیل خوردگی الکتروشیمیایی نقش آند را ایفا می‌کنند. شدیدترین حالت زمانی است که خط لوله از منطقه باتلاقی مجاور با مناطق خشک عبور می‌کند یا مخزن در خاک خشک قرار دارد اما سطح آب خاک کف مخزن را اشباع کرده است.

خاک ناهمگن:

خطوط لوله یا مخازنی که در مجاورت الکترولیت ناهمگن قرار دارند، در قسمت‌های مختلف خاک پتانسیل‌های الکتریکی مختلفی از خود نشان می‌دهند. این حالت در هر خاک مخلوط که متشکل از ترکیبات دارای ابعاد میکروسکوپی تا ابعاد نسبتاً بزرگ است، می‌تواند رخ دهد. ناحیه (نواحی) با پتانسیل بیشتر در این پیل خوردگی الکتروشیمیایی آند می‌شود. زمانی‌که یک خط لوله یا مخزن در الکترولیتی قرار گیرد که اجزایی دارد که اختلاف پتانسیل‌های بزرگ به وجود می‌آورند، یا در آن نواحی آندی کوچک و نواحی کاتدی بزرگ است، این حالت شدیدتر خواهد بود.

سطح مشترک بتن/خاک:

خطوط لوله یا مخازنی که در تماس با سیمان و نیز در مجاورت الکترولیت دیگری هم قرار دارند، در هر ناحیه پتانسیل متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در این پیل خوردگی الکتروشیمیایی، سطحی که در تماس با سیمان قرار ندارد آند خواهد بود. خط لوله یا مخزنی که در تماس با بتن و خاک (یا آب) قرار دارد به دلیل اختلاف پتانسیل زیاد فلز در دو الکترولیت مختلف می‌تواند پیل خوردگی بسیار شدیدی را به وجود آورد.

ناخالصی‌های خاکریزی:

این مورد شبیه به پیل‌های غلظتی خاک ناهمگن است، به‌جز آنکه«ناخالصی‌های خاکریزی» موادی هستند که به طور معمول در خاک وجود ندارند و موادی خارجی هستند که در طول یا بین فرایندهای حفاری و خاکریزی با الکترولیت مخلوط شده‌اند. این ناخالصی‌ها می‌توانند موادی باشند که سطوح آندی یا کاتدی را بر روی سازه تشکیل می‌دهند. همچنین می‌توانند مواد ایزوله‌کننده‌ای باشند که شرایط مختلفی را در الکترولیت ایجاد می‌کند یا یک ماده فلزی باشد که با تماس با سازه به آند یا کاتد تبدیل می‌شود (خوردگی گالوانیک).

اثرات بیولوژیکی:

ارگانیسم‌های زیستی می‌توانند به سطح فلز چسبیده و با رشد بر روی آن محیط متفاوتی را به وجود آورند که در بعضی موارد برای فلز بسیار خورنده است. اکثر باکتری‌های مرتبط با خوردگی، در دماهای 15° C تا 45°C (60° F تا 115° F) بیشترین رشد را دارند. این باکتری‌ها معمولاً با میزان اکسیژن مورد نیازشان، که در گونه‌های مختلف بسیار متفاوت است، طبقه‌بندی می‌شوند و می‌توانند هوازی یا بی‌هوازی باشند. محصولات سوخت‌وساز آنها با ایجاد مواد یا لایه‌هایی (لجن) که به‌عنوان سد نفوذ عمل می‌کنند، یا تغییر غلظت یون‌ها و pH بر واکنش الکتروشیمیایی تأثیر می‌گذارند. بعضی از باکتری‌ها می‌توانند مستقیماً در اکسید یا کاهش یون‌های فلزی شرکت کرده و تعادل شیمیایی را برهم بزنند، که این فرایند بر روی سرعت خوردگی تأثیر می‌گذارد. باکتری‌های هوازی، پیل‌های غلظتی اکسیژنی و شیمیایی را به وجود آورده در حضور باکتری‌های قادر به اکسید کردن یون‌های آهن، فرایند خوردگی را تسریع می‌کنند. بسیاری از این باکتری‌ها، اسیدهای آلی یا معدنی تولید می‌کنند که می‌توانند پوشش‌های قطعه را نیز تجزیه کنند. گاهی اوقات محصولات این تجزیه، به‌عنوان مواد غذایی استفاده شده و منجر به تشدید خوردگی می‌گردند.

خوردگی گالوانیک

این نوع خوردگی به واسطه یک پیل خوردگی الکتروشیمیایی به وجود می‌آید. این پیل ناشی از وجود یک اختلاف پتانسیل در فلز است که یک بخش از پیل را به آند و بخش دیگر پیل را به کاتد تبدیل می‌کند.

فلزات مختلف در یک الکترولیت یکسان پتانسیل‌های متفاوتی دارند. این اختلاف پتانسیل، نیروی محرکه یا ولتاژ پیل می‌باشد. همانند هر پیل خوردگی الکتروشیمیایی، درصورتی‌که الکترولیت از آند تا کاتد پیوسته بوده و یک مسیر فلزی برای الکترون وجود داشته باشد، مدار کامل شده و جریان برقرار خواهد شد و خوردگی الکتروشیمیایی رخ خواهد داد.

فلزات ناهمسان:

بارزترین شکل این نوع خوردگی زمانی است که دو نوع فلز مختلف در الکترولیت بوده و به طریقی اتصال فلزی برقرار کنند. تمامی فلزات پتانسیل الکتریکی دارند و هر فلز پتانسیل یا ولتاژ مخصوص به خود را دارد. در هنگام اتصال دو فلز مختلف، فلزی که پتانسیل منفی‌تری دارد، آند و فلزی که پتانسیل مثبت‌تری دارد کاتد می‌شود. فلز «فعال»، فلزی با اندازه پتانسیل منفی زیاد است، که به این معنی نیز هست که در مقایسه با اکثر فلزات دیگر آند می‌شود. فلز «نجیب» فلزی با اندازه پتانسیل منفی کم است، یعنی در مقایسه با اکثر فلزهای دیگر کاتد می‌شود. هنگامی‌که اختلاف پتانسیل بین دو فلز یا «ولتاژ محرک» در بیشترین حد خود باشد، خوردگی فلزات ناهمسان شدیدتر است.

فولاد نو، آلومینیم، فولاد ضدزنگ (در حالت فعال)، روی و منیزیم نمونه‌هایی از فلزات فعال می‌باشند. فولاد خورده شده، فولاد ضدزنگ (در حالت غیرفعال)، مس، برنز، کربن، طلا و پلاتین نمونه‌هایی از فلزات نجیب هستند.

همرفت فلز کهنه به نو:

این نوع خوردگی نیز می‌تواند نسبتاً شدید باشد. به دلیل انرژی زیاد به کار گرفته شده در فرایند تولید فولاد، این فلز در بین فلزات منحصربه‌فرد می‌باشد. فولاد نو فعال‌تر از فولاد خورده شده است. اختلاف پتانسیل بین پتانسیل منفی فولاد نو و پتانسیل مثبت‌تر فولاد کهنه، نیروی محرکه یا ولتاژ این پیل خوردگی الکتروشیمیایی است. نمونه شدید و رایج این نوع خوردگی زمانی رخ می‌دهد که یک لوله فولادی قدیمی بدون پوشش شکسته شده و بخش کوچکی از خط لوله با یک قطعه فولاد پوشش‌دار نو تعویض می‌شود. این قطعه جدید نقش آند پیدا کرده و برای حفاظت از کاتد بزرگ‌تر خورده می‌شود که در نهایت منجر به تخریب قطعه جدید می‌گردد.

آلیاژهای ناهمسان:

بارزترین نمونه این نوع خوردگی در آلیاژهای فلزی متفاوت دیده می‌شود. به‌عنوان مثال، بیش از ۲۰۰ نوع آلیاژ مختلف از فولاد ضدزنگ وجود دارد. فلزات نیز صددرصد خالص نیستند. معمولاً درصد اندکی از انواع فلزات دیگر در آنها وجود دارد. تفاوت سری‌های مختلف یک فلز در نسبت همین ناخالصی‌ها است. تولیدکنندگان مختلف از مواد اولیه متفاوت و حتی با منابع متفاوت استفاده می‌کنند. پتانسیل الکتریکی آلیاژهای یک فلز اندکی باهم تفاوت دارند. حتی در یک آلیاژ هم، غلظت

ناخالصی‌ها، در سرتاسر محصول یکسان نبوده و اندکی تغییرات خواهد داشت. تمام این تغییرات منجر به تولید نیروی محرک الکتریکی در جهت رخداد این نوع خوردگی خواهد شد.

ناخالصی‌ها در فلز:

هیچ فرایند تولیدی کامل نیست. ممکن است در حین تولید یا خنک شدن فلز، ناخالصی‌های اندکی با آن مخلوط شوند. ممکن است ناخالصی‌ها در سطح فلز به بخشی از الکترولیت تبدیل شده و خوردگی پیل غلظتی را به وجود آورند یا درصورت فلزی بودن، ممکن است به آند (که خورده شده) و حفره‌ای بر جای می‌گذارد یا کاتد (که فلز پیرامون را می‌خورد) تبدیل شوند.

بخش فلزی تحت فشار:

فلز تحت فشار نسبت به فلزات دیگر حالت آندی دارد. مهره‌ها، خم‌ها، تنش‌های ساختاری یا مکانیکی و حرکت خاک نمونه‌های متداولی از این شرایط بشمار می‌آیند. این شرایط قبل از نفوذ خوردگی به کل ضخامت قطعه، باعث برش یا ترک خوردگی فلز در اثر فشار می‌شود.

منابع خوردگی هم‌زمان:

هریک از انواع پیل‌های خوردگی الکتروشیمیایی ذکر شده می‌توانند خوردگی قابل توجهی را ایجاد کنند. اما در بسیاری از موارد، ترکیبی از انواع مختلف خوردگی به طور هم‌زمان دست به کار شده و خوردگی در سطح فلز را تشدید می‌کنند. آگاهی از دلیل واقعی خوردگی، اهمیت زیادی در نگهداری یک قطعه فلزی مغروق یا مدفون نظیر خط لوله یا مخزن دارد.

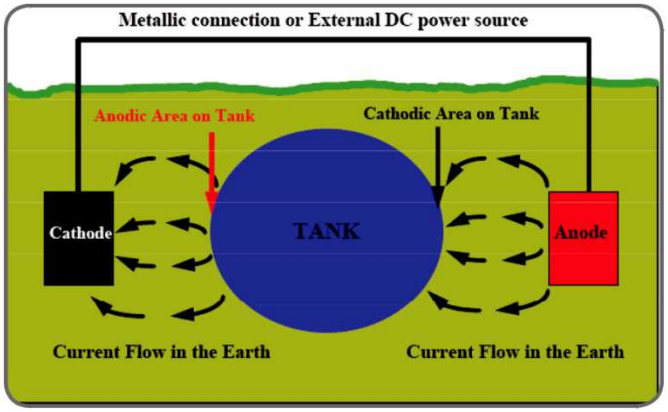
با اطلاع یافتن از وجود خوردگی یا نشتی ناشی خوردگی، لازم است که علت خوردگی مشخص شود تا بتوان اقدام اصلاحی را انجام داد. با شناخت نوع خوردگی، می‌توان روش اصلاح مسبب خوردگی را به سادگی تعیین کرد و از نشتی‌های آتی جلوگیری کرد. در بسیاری موارد می‌توان با درک فرایند خوردگی محل سطوح آندی را پیش‌بینی کرد. اغلب این سطوح در بدترین مکان‌های ممکن قرار دارند، مثلاً در خطوط لوله عبوری از رودخانه یا باتلاق، لوله‌هایی که وارد گودال‌ها یا پی‌ها می‌شوند. لوله‌های تحت فشار و لوله‌هایی که در دماهای بالا قرار دارند.

در اکثر موارد نشتی، اولویت اول تعمیر سوراخ لوله یا مخزن است. بدون آگاهی از خوردگی و کنترل آن، وضعیت می‌تواند بدتر هم بشود. حتی با ملاحظه لزوم توقف نشتی، بازهم لازم است که علت نشتی برطرف شود؛ یعنی اقدامی در جهت شناسایی و کنترل دلیل نشتی صورت گیرد. گاهی اوقات، عایق آسیب دیده یا قطعی سیم اتصال علت نشتی می‌باشد. می‌توان گفت که متداول‌ترین علت نشتی‌های ناشی از خوردگی، روش‌ها یا مواد به کارگرفته شده در تعمیرات نشتی‌های قبلی هستندکه یکنواختی ساختار را بهم زده یا آن را ناقص کرده‌اند.

خوردگی جریان سرگردان

این نوع پیل خوردگی الکتروشیمیایی در اثر نیروی محرکه الکتریکی ناشی از یک منبع خارجی ایجاد می‌شود که با ایجاد گرادیان پتانسیل در الکترولیت یا با القای یک جریان در فلز، بر سازه تأثیر می‌گذارد. با اعمال این نیرو، بخشی از سازه به آند و بخش دیگر به کاتد تبدیل می‌شود. این جذب و تخلیه بار الکتریکی زمانی رخ می‌دهد که یک ساختار فلزی مسیری را با

مقاومت کمتر برای برقراری جریان داخل الکترولیت فراهم کند. از آنجا که ممکن است ولتاژهای بسیار بالایی توسط منابع مختلف به سطح زمین اعمال شود، این نوع خوردگی می تواند بسیار شدید باشد. گرادیان پتانسیل در الکترولیت باعث می‌شود که بخشی از سازه جریان را جذب کرده (کاتد شود) و بخش دیگری جریان را تخلیه کند (آند شود).خوردگی جریان سرگردان در محلی اتفاق می‌افتد که جریان منبع خارجی از قطعه فلزی خارج شده و به الکترولیت، که معمولاً در نزدیکی سر کاتد منبع خارجی است، وارد می‌شود. منبع خارجی، نیروی محرکه یا ولتاژ پیل می‌باشد. خوردگی جریان سرگردان با خوردگی عادی تفاوت دارد، زیرا توسط جریان الکتریکی القایی به وجود آمده و اصولاً مستقل از فاکتورهای محیطی پیل‌های غلظتی، مقاومتی، pH پیل‌های گالوانیکی می‌باشد. مقدار جریان (خوردگی) به منبع خارجی و نسبت مقاومت مسیر داخل قطعه فلزی به مقاومت مسیر بین آند و کاتد منبع خارجی بستگی دارد.

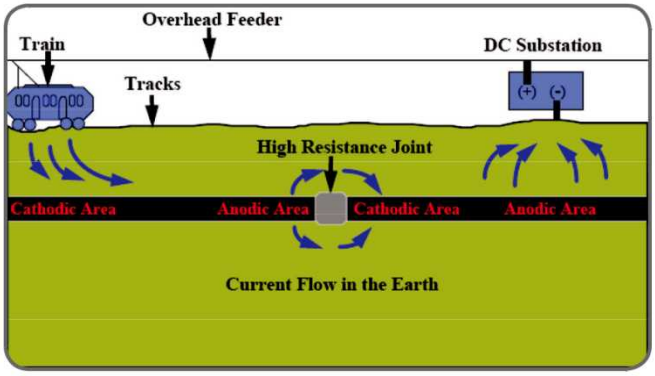


پیل خوردگی جریان سرگردان ناشی از آند و کاتد خارجی:

نمونه‌ای از خوردگی جریان سرگردان توسط سیستم‌های حفاظت کاتدی نوع جریان اعمالی ایجاد می‌شود. که در آن یک سازه «خارجی» با پتانسیل الکتریکی یکنواخت از نزدیکی آندها گذشته و سپس به‌سمت دیگر سازه حفاظت شده (کاتد) می‌رود. این خوردگی معمولاً پس از تخریب سازه خارجی کشف می‌شود. خوردگی جریان سرگردان شدیدترین نوع خوردگی محسوب می‌شود. زیرا قطعه فلزی به اجبار آند شده و مقدار جریان با تخریب فلز رابطه مستقیم دارد. اگر بتوان مقدار جریانی که از سازه خارج شده و وارد الکترولیت می‌شود را اندازه‌گیری نمود، این مقدار را می توان مستقیماً به کاهش وزن فلز تبدیل کرد. فلزات مختلف هنگامی که در معرض تخلیه جریان قرار گیرند مقدار کاهش وزن مشخصی از خود نشان می‌دهند. معمولاً این کاهش وزن برحسب پوند (کیلوگرم) بر آمپر در بازه زمانی یک سال (یک آمپر–سال) اندازه‌گیری می‌شود. به‌عنوان مثال اگر جریان سرگردان دو آمپری بر روی یک لوله فولادی وجود داشته باشد، نتیجه‌اش از دست دادن ۱۸/۲ کیلوگرم(۴۰/۲ پوند) فولاد در عرض یک سال می‌باشد. برای یک خط لوله پوشش‌دهی شده، این امر منجر به نفوذ خوردگی در قسمت معیوب پوشش در مدت زمانی بسیار کوتاه، گاهی تنها چند روز، می گردد.

سیستم‌های انتقال مستقیم (DC):

ریل‌های راه‌آهن برقی، شبکه‌های مترو، شبکه‌های تراموا، سیستم‌های استخراج معدن و واگن‌های برقی که با جریان مستقیم کار می‌کنند، منابع اصلی خوردگی جریان سرگردان محسوب می‌شوند. این سیستم‌ها می‌توانند با جریان بار چند هزار آمپری و در پتانسیل کاری معمول ۶۰۰ ولت کارکنند.ریل‌ها بر روی سطح زمین قرار گرفته‌اند و کاملاً از زمین عایق نشده‌اند. ممکن است قسمتی از جریان بار از داخل زمین عبور کند و درصورت بروز نقصی در ریل‌های آهنی، این جریان‌ها به‌شدت افزایش می‌یابند. ممکن است سازه‌های فلزی مدفون یا مستغرق در مجاورت (چند مایلی) این ریل‌ها در معرض اثرات جریان سرگردان قرار گیرند. خطوط لوله موازی که از زیر ریل‌ها می‌گذرند یا در نزدیکی ایستگاه فرعی DC قرار دارند تا حد زیادی مستعد این جریان‌ها هستند.



در صورت وجود اتصالات با مقاومت بالا در خط لوله، این جریان از کنار اتصال گذشته، در یک طرف اتصال خط لوله را ترک کرده و از طرف دیگر دوباره به آن وارد می‌شود. ازآنجاکه، منبع جریان سرگردان متحرک است، ممکن است لازم باشد که سازه فلزی در طول یک بازه بیست‌وچهار ساعته بازرسی شود تا تأثیرگذاری این جریان‌ها بر روی آن مشخص گردد.

خطوط انتقال برق با جریان مستقیم ولتاژ بالا:

شبکه‌های توزیع برق منبع دیگری از جریان‌های سرگردان محسوب می‌شوند. اکثر سیستم‌های قدرت از نوع AC هستند، درحالی‌که گاهی از سیستم‌های DC همراه با اتصال زمین استفاده می‌شود.

در شرایط وجود نقص، ممکن است این خطوط انتقال از زمین به‌عنوان مسیر برگشتی برای جریان DC استفاده کنند. ازآنجاکه، انتقال جریان DC تنها به دو سیم نیاز دارد و نه سه سیم، گاهی اوقات در هنگام انتقال توان‌های زیاد به مسافت‌های دور، از آن استفاده می‌شود. واحدهای تبدیل در هر دو انتهای خطوط انتقال قرارداده شده‌اند. هریک از این واحدهای تبدیل به یک شبکه زمین بزرگ متصل است. هرگونه بار نامتعادل باعث ایجاد جریانی داخل زمین و بین این دو شبکه می‌شود. این جریان‌های نامتعادل به طور طبیعی ثابت نیستند جهت و اندازه آنها تغییر می‌کند. ممکن است ولتاژهای خط HVDC، 750000 ولت یا بیشتر باشد.

عملیات جوشکاری:

دستگاه‌های جوش الکتریکی DC، از جمله منابع جریان DC بشمار می‌آیند. یک نمونه از این نوع پیل خوردگی الکتروشیمیایی زمانی تشکیل می‌شود که دستگاه جوش الکتریکی روی کشتی فلزی، که خط DC زمین آن در ساحل قرار دارد، جریان را از کف کشتی خارج کرده (آند) و به سیستم اتصال به زمین (کاتد) بازگرداند.

سیستم‌های حفاظت کاتدی:

سیستم‌های حفاظت کاتدی منبع اصلی جریان سرگردان در سایر قطعات فلزی به حساب می‌آیند. نمونه‌ای از این پیل خوردگی الکتروشیمیایی زمانی به وجود می‌آید که یک خط لوله خارجی از نزدیکی یک آند گذشته سپس به‌سمت دیگر سازه حفاظت شده (کاتد) می‌رود.

جریان‌های تلوریک:

گاهی اوقات بی‌نظمی در میدان مغناطیسی زمین باعث ایجاد جریان القایی در قطعات فلزی می‌شود. بعضی مناطق به دلیل رسوبات معدنی یا سایر ویژگی‌های فیزیکی یا محیطی، مستعد این اثرات می‌باشند. این جریان‌ها می‌توانند در پی اثرات موضعی شدید خورشید نیز ایجاد گردند. میدان مغناطیسی متغیر زمین که خط لوله فلزی را قطع می‌کند، ولتاژی را در سازه به وجود می‌آورد و در جایی خوردگی اتفاق می‌افتد که این جریان سازه را ترک کرده و وارد زمین می‌شود.

ترمودینامیک خوردگی

در هنگام بررسی حساسیت فلزات به خوردگی معمولاً به پارامترهای ترمودینامیکی مانند نیروهای الکتروموتور فلزات لیست شده در سری گالونیک و emf استاندارد مراجعه می‌شود. سری گالوانیک و emf استاندارد شامل لیست پتانسیل‌های احیا الکترودها بوده و مواد فلزی را بر اساس تمایل آنها به خورده شدن در تماس با فلزات دیگر رتبه‌بندی می‌کند. رتبه‌بندی در سری emf استاندارد، بر اساس اندازه ولتاژ تولید شده در هنگام اتصال سل استاندارد فلز به الکترود استاندارد هیدروژن در ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. فلزات و آلیاژهای نزدیک به بالای سری، کاتدی، غیرواکنشگر، نجیب یا خنثی هستند (برای مثال طلا یا پلاتین)، درحالی‌که فلزات قرار گرفته در انتهای سری، آندی، فعال و حساس‌تر به اکسیداسیون و خوردگی می‌باشند (برای مثال سدیم و پتاسیم).

اما باید یادآور شد که اگرچه می‌توان از این پتانسیل‌ها برای تعبیر جهت واکنش‌های لحظه‌ای استفاده کرد، ولی این سری اطلاعات نرخ خوردگی را ارائه نمی‌دهد. یعنی حتی اگر اختلاف پتانسیل محاسبه شده برای یک موقعیت خاص خوردگی، عدد مثبت نسبتاً بزرگی باشد، اما واکنش می‌تواند با نرخ خوردگی آهسته رخ دهد.

علاوه بر آن، پتانسیل‌های نیم پیل، پارامترهای ترمودینامیکی هستند که می‌توان آنها را فقط در حالت تعادل به سیستم‌ها مربوط ساخت. اما سیستم‌های واقعی خوردگی، در تعادل نیستند؛ همیشه جریانی از الکترون‌ها از آند به کاتد وجود دارد. علاوه بر آن، این پتانسیل‌های نیم‌پیل، فقط بیانگر اندازه یک نیروی محرکه یا تمایل برای وقوع واکنش نیم پیل خاص و نه کل فرایند می‌باشند. رتبه‌بندی عملی و واقعی‌تر، توسط سری گالوانیک انجام شده است که بیانگر واکنش‌پذیری نسبی تعدادی از فلزات و آلیاژها (مانند فولاد زنگ نزن 316، فولاد زنگ نزن 304، اینکونل، مونل، برنزها، آلیاژهای آلومینیم و غیره) در آب دریا بدون اشاره به مقدار ولتاژها می‌باشد.

انرژی آزاد گیبس (ΔG)

اگرچه سری emf تحت شرایط بسیار ایده‌آل ایجاد شده و محدودیت کاربرد دارد، اما با این وجود نشان‌دهنده واکنش‌پذیری نسبی فلزات می‌باشد و معمولاً از فرمول انرژی گیبس و نیروی الکتروموتور برای ارزیابی خودبه‌خودی بودن وقوع یک واکنش شیمیایی استفاده می‌شود:

$$\Delta G=-nFE$$

که n تعداد گرم‌ها یا مول‌های الکترون‌های عبوری از پیل خوردگی، F (ثابت فارادی) بار ۱ گرم یا مول الکترون و معادل با ۹۶۴۹۴ کولون و E نیروی الکتروموتور پیل خوردگی است که می‌توان آن را با استفاده از معادله نرنست محاسبه کرد:

$$E=E^0-\frac{RT}{nF}\ln\left(\frac{\text{activities of products}}{\text{activities of reac tan ts}}\right)$$

که R ثابت گاز برابر با ۷/۳۱۴ ژول بر درجه سانتی‌گراد. مول، T دما برحسب کلوین و E^0 نیروی الکتروموتور در شرایط استاندارد است، درحالی‌که اکتیویته‌ها، غلظت‌های مؤثر واکنش‌دهنده‌ها و محصولات می‌باشند که از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شوند:

$$a=\gamma.c$$

که c غلظت واقعی و γ ضریب اکتیویته است.

ضریب اکتیویته جامدات، الکترون‌ها و ترکیباتی که غلظتشان تغییر نمی‌کند (برای مثال حلال‌هایی مانند آب)، برابر با ۱ می‌باشد. برای گازها، از مقادیر فشار جزئی به‌جای ضریب اکتیویته استفاده می‌شود و سپس کسر RT/nF به ۰/۰۵۹۲ لیتر. اتمسفر بر مول. کلوین در شرایط استاندارد تبدیل می‌گردد.

برای مثال در مورد خوردگی گالوانیک، واکنش‌نهایی پیل بدین صورت است:

$$Zn+Cu^{2+}\rightarrow Zn^{+2}+Cu$$

اکتیویته واکنشگر روی جامد (a_{Zu}) و محصول مس جامد (a_{Cu}) برابر با ۱ می‌باشد. پتانسیل‌های الکترود نیم پیل از طریق نرنست محاسبه می‌شود:

$$Zn\rightarrow Zn^{+2}+2e^-$$ (واکنش اکسیداسیون)

E^0 واکنش اکسیداسیون روی و تعداد الکترون‌های مبادله شده، به ترتیب برابر با ۰/۷۶۳ ولت و ۲ می‌باشند. بنابراین:

$$E_{(Zn)}=0.763-\frac{0.0592}{2}\log a_{Zn}^{2+}$$

$$Zn+Cu^{2+}\rightarrow Zn^{+2}+Cu$$

E^0 واکنش احیا مس و تعداد الکترون‌های مبادله شده، به ترتیب برابر با ۰/۳۶۳ ولت می‌باشند. بنابراین:

$$E_{(Cu^{2+})}=0.363-\frac{0.0592}{2}\log\left(\frac{1}{a_{Cu}^{2+}}\right)$$

در نهایت پتانسیل کلی پیل برابر است با:

$$E_{(Cu/Zn)}=0.763+0.363-\frac{0.0592}{2}\log\left(\frac{a_{Zn}^{2+}}{a_{Cu}^{2+}}\right)$$

و اگر اکتیویته یون‌های مس و روی یکسان باشد، یکدیگر را خنثی کره و عبارت آخر معادله، برابر با صفر می‌شود؛ در نتیجه $E_{(Cu/Zn)}$، برابر با ۱/۱۲۶ ولت می‌شود که مقداری مثبت بوده و بنابراین وقتی وارد معادله می‌شود، برای انرژی آزاد گیبس، مقداری منفی به دست می‌آید که نشان‌دهنده این روی غوطه‌ور شده در داخل محلول سولفات مس، تمایل به خورده شدن تحت شرایط استاندارد را دارد

پسیو شدن

فلزاتی مانند کروم، نیکل، تیتانیم، آلومینیم، منیزیم و آهن که در سری گالوانیک یا الکتروشیمیایی در بالای هیدروژن قرار داشته و بنابراین انتظار می‌رود که خورده شوند، به دلیل لایه‌های اکسیدی تشکیل شده بر روی سطحشان که منجر به پسیو شدن آنها می‌گردد، دچار خوردگی نخواهند شد. این فلزات، بدون نیاز به اعمال جریان خارجی و تحت شرایط مناسب به‌صورت خودبه‌خودی پسیو می‌گردند. پسیو شدن خودبه‌خودی وقتی رخ می‌دهد که جریان خوردگی (i_{corr})، بیشتر از جریان مورد نیاز برای پسیو شدن فلز باشد. بنابراین با استفاده از آلیاژهایی که جریان‌های پسیو شدن بسیار پایینی داشته یا توسط افزودن عوامل اکسیدکننده که به آسانی احیا می‌شوند (که پسیوکننده یا بازدارنده نیز نامیده می‌شود) می‌توان از خوردگی جلوگیری کرد. پسیوکننده‌ها یا بازدارنده‌ها، احیا شده و تولید جریان خوردگی (i_{corr}) کافی می‌کنند که از جریان مورد نیاز برای پسیو شدن فلز بیشتر بوده و مانع از خوردگی آن می‌شوند.

نمونه‌هایی از این آلیاژها که امکان پسیو شدن دارند، فولادهای کروم یا نیکل- کروم، آلیاژهای نیکل- کروم، مس- نیکل و آلیاژهای تیتانیمی هستند که بازدارنده‌ها یا پسیوکننده‌های موجود در آنها، کرومات، نیترات‌ها، مولیبدات‌ها، ولفرامات‌ها، فرات‌ها و غیره می‌باشند. در مورد استفاده از این آلیاژها که جریان‌های پسیو شدن بسیار پایینی دارند، ترکیب شیمیایی اهمیت زیادی دارد؛ مقدار کروم در آلیاژهای کروم- آهن برای اینکه مشخصه‌های پسیو شدن آنها بسیار شبیه به کروم خالص باشد، نباید پایین‌تر از ۱۳٪ باشد؛ آلیاژهای مس- نیکل باید بین ۵۰ تا ۶۰٪ نیکل داشته باشند و برای آلیاژهای سیلیکا- آهن، مقدار سیلیکا نباید کمتر از ۱۴/۵٪ باشد.

اگر محصولات خوردگی، تشکیل فیلمی محافظ بر روی سطح فلز بدهند، نرخ خوردگی کاهش پیدا می‌کند. کارایی این فیلم به حلالیت محصولات خوردگی، چسبندگی این محصولات بر روی سطح فلز، نفوذپذیری، مقاومت الکتریکی و استحکام مکانیکی فیلم حاصل بستگی دارد. بهترین پوشش وقتی تشکیل می‌شود که ساختار کریستالی فلز و فیلم اکسیدی تطابق داشته باشند. از آنجایی که فلزات معمولاً در واحدهای مکعبی متبلور می‌شوند، اکسیدهایی که ساختار کریستالی مکعبی داشته باشند

(مانند Al_2O_3 و Fe_3O_4)، بهتر هستند. تشکیل مگنتیت دارای کریستال مکعبی (Fe_3O_4) که حلالیت و مقاومت الکتریکی پایینی نیز دارد، به جلوگیری در مخازن بویلر کمک می کند.

مگنت (Fe_3O_4)، ساده‌ترین اکسید اسپیل می‌باشد که فرمول $RO.R'_2O_3$ دارند (که جزء R با ۲ بار مثبت می‌تواند نیکل یا کبالت باشد و جزء R' با ۳ بار مثبت می‌تواند آلومینیم، کروم یا آهن باشد). R در فولادهای زنگ نزن، Fe^{2+} است، درحالی که R'، Cr^{3+} می‌باشد. فیلم اکسیدی محافظ در فولادهای زنگ نزن کروم- نیکل سری 300، شامل یک اکسید اسپینل است که R در آن، جزئی مختلط از Ni^{2+} و Fe^{2+} و در واقع $(NiO.FeO)$ می‌باشد، درحالی که، R'، Cr^{3+} است. R در آلیاژ آهن- آلومینیم حاوی ۱۸٪ آلومینیم، Fe^{2+} می‌باشد، درحالی که R'، Al^{3+} است. اگرچه این آلیاژ مقاوم به خوردگی است. اما ساخت آن دشوار بوده و در دماهای بالا نیز بسیار ضعیف می‌باشد. اکسیدها می‌توانند پوشش‌های محافظ خوبی مانند Al_2O_3 و BeO نیز تشکیل دهند.

از آنجایی که فولادهای زنگ نزن به دلیل پسیو شدن، مقاوم به خوردگی هستند، در محیط‌های بدون اکسیژن (مانند مخازن بویلر و راکتورها)، استفاده از آلیاژهای فولادی معمول ارزان‌تر، مناسب‌تر خواهد بود، زیرا فولادهای زنگ نزن در این محیط‌ها به خوردگی حساس‌تر هستند.

وقتی که پتانسیل در جهت آندی افزایش پیدا می‌کند، در ابتدا دانسیته جریان خوردگی افزایش می‌یابد که منجر به ایجاد یون‌هایی می‌گردد که محصولات خوردگی بوده و پوشش اکسیدی محافظ را تشکیل می‌دهند. پتانسیل در زمانی که فیلم اکسید آندی محافظ تشکیل می‌شود، پتانسیل فیلد[۳] نامیده می‌شود که در این پتانسیل، دانسیته جریان بلافاصله کاهش پیدا می‌کند. برای پسیو نگه داشتن ماده، پتانسیل باید همیشه بالای پتانسیل فیلد نگه داشته شود؛ به همین دلیل یا باید آند را توسط یک اکسیدکننده، به پتانسیل فیلد پلاریزه کرد یا باید از ماده‌ای که خاصیت پسیو شدن بالایی دارد (مانند فولاد زنگ نزن) استفاده کرد□

دیاگرام‌های پوربه

روش ترمودینامیکی برای تعیین وقوع فرایند ترمودینامیکی، با نمودارهای پتانسیل برحسب pH ایجاد شده توسط مارسل پوربه[۴] بهبود پیدا کرده است. این نمودار نشان‌دهنده نواحی شبیه به دیاگرام‌های فلزی هستند که در آنها، فلزات، یون‌ها و اکسیدها، در دو حالت پایدار و ناپایدار وجود داشته و توسط ویژگی‌های شیمیایی (pH) و الکتروشیمیایی (V) از یکدیگر جدا شده‌اند. اگرچه این نمودارها مربوط به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد هستند، اما می‌توان از آنها در دمای بالاتر مانند ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با مقداری خطا استفاده کرد. غلظت 10^{-6} مول بر لیتر یا بیشتر برای یون فلزی، به‌عنوان نقطه اولیه خوردگی در این دیاگرام‌ها فلز شده است. اگرچه نواحی که در آنها فلز پایدار خواهد بود و نواحی که در آنها خوردگی رخ می‌دهد از طریق این نمودارها مشخص شده‌اند، اما با استفاده از دیاگرام‌های پوربه نمی‌توان نرخ خوردگی را تخمین زد.

---

1 □□□□□□□□ 2 3

1 □□□ □□□□□□□□□□□□□□□□ 2 4

در دیاگرام‌های پوربه، اگر یک مرز موازی با محور pH باشد، بیانگر این موضوع است که تعادل شامل یون‌های H^+ یا CH^- نیست، برای مثال در مورد واکنش اکسیداسیون آهن:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+}+2e^-$$

از طرف دیگر، مرزهای موازی با محور پتانسیل بیانگر این است که تعادل شامل جدایش بار نیست، برای مثال در مورد واکنش زیر که در آن هیچ ترکیبی احیا یا اکسید نمی‌گردد:

$$Fe_2O_3+H^+ \rightarrow Fe^{3+}+3H_2O$$

نواحی پتانسیل- pH برای تعادل‌هایی که شامل یون‌های H^+ یا CH^- و جدایش بار هستند، مرزهایی دارند که موازی با محورهای pH یا پتانسیل نمی‌باشند، مانند:

$$Fe_2O_3+6H^++2e^- \rightarrow 2Fe^{3+}+3H_2O$$

بخش دیگر از اطلاعات قابل دستیابی از دیاگرام‌های پتانسیل- pH اطلاعات حلالیت است که به ارزیابی تمایل به خوردگی کمک می‌کند. برای مثال در دیاگرام پوربه سیستم $Fe\text{-}H_2O$، نواحی که در آنها محصولات خوردگی نامحلول مانند Fe_2O_3 پایدار هستند، نشان‌دهنده نواحی تشکیل لایه پسیو می‌باشند، زیرا Fe_2O_3می‌تواند با پوشاندن سطح باعث کاهش سرعت خوردگی شود، درحالی‌که نواحی که در آنها محصولات خوردگی محلول مانند Fe^{2+}، Fe^{3+} و $HFeO_2^-$ پایدار هستند، نشان‌دهنده وجود شرایط مناسب برای خوردگی می‌باشند.

دیاگرام‌های پتانسیل- pH، سه ناحیه اصلی دارند؛ ناحیه اول که در آن، فلز آهن به شکل فلز باقی می‌ماند، ΔG بزرگ‌تر از صفر داشته و بنابراین خوردگی در آن رخ نمی‌دهد. این ناحیه به نام «ناحیه ایمن» شناخته می‌شود. روش حفاظت کاتدی نیز بر این اساس است که شرایط پتانسیل به‌نحوی نگه داشته شود که فلز در ناحیه ایمن باقی بماند. ناحیه دوم که در آن، فلز آهن تحت خوردگی قرار گرفته و ΔG کوچک‌تر از صفر دارد و بنابراین خوردگی در آن رخ می‌دهد. این ناحیه «ناحیه خوردگی» نامیده می‌شود. ناحیه سوم که در آن، محصولات خوردگی آهن، از خوردگی بیشتر جلوگیری کرده و ΔG کوچک‌تر از صفر دارد، «ناحیه پسیو» می‌شود. به ناحیه دیگری که بالای ناحیه پسیو قرار دارد، ناحیه «فراپسیو» گفته می‌شود، اما در این ناحیه مجدداً خوردگی آغاز می‌شود.

خوردگی با افزایش پتانسیل از پتانسیل تعادلی تا پتانسیل پسیو، افزایش پیدا می‌کند و سپس با رسیدن به پتانسیل پسیو، با افزایش کوچک پتانسیل، جریان خوردگی به میزان یک هزارم یا کمتر کاهش پیدا می‌کند. وقتی پتانسیل در جهت مثبت افزایش می‌یابد، پسیو شدن تخریب شده و منجر به آسیب دیدن لایه محافظ پسیو می‌گردد که عمدتاً با خوردگی حفره‌ای همراه است، این منطقه، ناحیه فراپسیو نامیده می‌شود. برای پسیو شدن نیاز به اکسیژن وجود دارد؛ بنابراین در آب‌های نمکی راکد با غلظت اکسیژن کم، لایه پسیو فولاد می‌تواند تخریب شود، یا به‌عبارت‌دیگر، تا زمانی که نرخ واکنش کاتدی بیشتر از دانسیته جریان بحرانی آندی باشد، فلز در ناحیه پسیو باقی می‌ماند. با افزایش اسیدیته و دما، ناحیه پسیو باریک شده و منجر به افزایش مقدار i_{corr} نیز می‌گردد.

سیستم آهن (Fe) و آب (H_2O)، سیستمی بسیار متداول و مثالی خوب از دیاگرام‌های پوربه می‌باشد. یون‌های سیستم Fe-H_2O ، Fe^{2+}، Fe^{3+} و $HFeO_2^-$ هستند و جامدهای آن FeO ، Fe_2O_3، $Fe(OH)_2$و $Fe(OH)_3$ می‌باشند

ناحیه ایمن

آهن در پتانسیل‌های منفی‌تر از ۰/۶۲- ولت نسبت به الکترود استاندارد هیدروژن (SHE)، از نظر ترمودینامیکی پایدار است و در برابر خوردگی محافظت می‌شود؛ این منطقه، ناحیه ایمن نامیده می‌شود. پتانسیل ۰/۶۲- ولت معادل با ۰/۸۵۰- ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس اشباع است که نقطه مرجعی برای حفاظت کاتدی آهن و فولادها می‌باشد

نواحی خوردگی

وقتی که پتانسیل بالاتر از ۰/۶۲- ولت و pH کمتر از ۹ باشد، آهن خورده شده و تشکیل یون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} می‌دهد؛ یون‌های Fe^{2+} در مناطق پایین‌تر از ناحیه خوردگی، پایدار بوده و یون‌های Fe^{3+} در نواحی بالاتر از ناحیه خوردگی در دیاگرام، پایدار هستند. دیگر ناحیه خوردگی آهن در دیاگرام، وقتی است که پتانسیل بین ۰/۸ ولت و ۱/۲- ولت بوده و pH بیشتر از ۱۳ باشد:

$$Fe+2H_2O \rightarrow HFeO_2^-+3H^++2e^-$$

ناحیه پسیو

ناحیه قرار گرفته در بالای دو ناحیه خوردگی و ناحیه ایمن، ناحیه پسیو می‌باشد که در آنجا آهن به دلیل تشکیل Fe_2O_3 و Fe_3O_4 که منجر به پسیو شدن سطح فلز شده، در برابر خوردگی محافظت می‌شود

تعادل خوردگی و جذب‌ها

فرایند خوردگی، پدیده‌ای سطحی می‌باشد؛ بنابراین با بررسی شیمی فیزیک سطوح، اطلاعات مهمی درباره واکنش اتم‌های فلز در سطح زمینه با مولکول‌های دیگر به دست می‌آید (برای مثال استحکام و نوع واکنش با بازدارنده‌ها). این بخش از اطلاعات را می‌توان از معادله آرنیوس که برای اندازه‌گیری جریان خوردگی نسبت به دما به کار می‌رود، به دست آورد:

$$i_{\text{corrosian}}=k\left(e^{\frac{E_a}{RT}}\right)$$

که E_a انرژی اکتیواسیون می‌باشد. از آنجایی که i_{corr} و T ، مقادیر قابل اندازه‌گیری هستند، E_a را می‌توان از شیب نمودار $1/T$ و $In\ ic_{orr}$- محاسبه کرد. اگر E_a در حضور بازدارنده، بزرگ‌تر باشد، نشان می‌دهد که مولکول‌های بازدارنده بر روی سطح فلز، جذب فیزیکی شده و تشکیل یک لایه محافظ می‌دهند. از طرف دیگر اگر E_a در حضور بازدارنده، کوچک‌تر باشد، نشان خواهد داد که مولکول‌های بازدارنده بر روی سطح فلز، جذب شیمیایی شده‌اند.

اگرچه بر روی یک سطح در حال خوره شدن، هیچ‌گاه جذب در تعادل نیست، وقتی که نرخ خوردگی به اندازه کافی کوچک باشد می‌تواند آن را در تعادل در نظر گرفت و انرژی آزاد گیبس برای جذب، از طریق فرمول‌های زیر محاسبه می‌گردد:

$$K_{ads} = \frac{1}{555.5} e^{\frac{\Delta G^0_{ads}}{RT}} \qquad \text{یا} \qquad \Delta G^0_{ads} = -RT\ln(55.5K_{ads})$$

اگر ΔG^0_{ads} منفی شود، بدین معنی خواهد بود که جذب، لحظه‌ای می‌باشد. علاوه بر آن اگر مقدار عددی آن بزرگ باشد، بدین معنی خواهد بود که برهم‌کنش قوی بین مولکول‌های بازدارنده و سطح فلز وجود دارد. از طرف دیگر اگر مقدار عددی ΔG^0_{ads} کمتر از ۴۰ کیلو ژول بر مول باشد، گفته می‌شود که جذب به‌صورت فیزیکی رخ داده است. همچنین آنتالپی جذب و آنتروپی آن از طریق معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$\log\left(\frac{Q}{I} - Q\right) = \log A + \log C - \frac{\Delta H_{ads}}{2.303RT}$$

$$\Delta G^0_{ads} = \Delta H_{ads} - T\Delta S_{ads}$$

اگر ΔH_{ads} منفی باشد، جذب گرمازا خواهد بود و اگر ΔG^0_{ads} مثبت باشد (علاوه بر ΔG^0_{ads} منفی)، جذب به‌صورت لحظه‌ای بوده و در حال رسیدن به تعادل است.

با فرض اینکه نرخ خوردگی به اندازه کافی کاهش یافته است (بنابراین با فرض اینکه جذب در تعادل است). برهمکنش‌های بازدارنده- فلز را می‌توان از طریق ایزوترم‌های جذب بررسی کرد. برای این منظور لازم است که رابطه بین $C_{inhibitor}$ (غلظت بازدارنده) و Q (نسبت سطح پوشیده شده توسط بازدارنده) تشخیص باشد تا بتوان ایزوترمی که با جذب مطابقت دارد را تعیین کرد. رابطه زیر بین غلظت بازدارنده و نسبت سطح پوشیده شده، علامتی از ایزوترم فرندلیخ[۱۲۴] است:

$$\ln Q = \ln K_{ads} + n \ln C_{inhibitor}$$

که K_{ads}، ثابت تعادل برای جذب می‌باشد.

از طرف دیگر اگر نمودار $C_{inhibitor}$ برحسب $C_{inhibitor}/Q$ ، خطی باشد، گفته می‌شود که جذب مرتبط با ایزوترم لانگمیر است:

$$\frac{C_{inhibitor}}{Q} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{inhibitor}$$

اگر K_{ads} به اندازه کافی بزرگ باشد، نشان می‌دهد که بازدارنده بر روی سطح فلز، شدیداً جذب شده است.

پتانسیل بار صفر تعیین شده توسط طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) نیز در تعیین رفتار جذب بازدارنده‌ها بر روی سطوح کمک می‌کند. بار سطح فلز، ناشی از میدان الکتریکی در فصل مشترک فلز/محلول است و می‌توان آن را از طریق مقایسه پتانسیل خوردگی (E_{corr}) با پتانسیل بارهای صفر (E_{PZC})اندازه‌گیری کرد. آنتروپف[۱۲۶] اختلاف بین این دو پتانسیل را پتانسیل خوردگی نسبی (E_r) نامید که از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_r = E_{corr} - E_{PZC}$$

1 [illegible] 2 5

1 [illegible] 2 6

اگر E_r منفی باشد، نشان می‌دهد که سطح دارای بار منفی بوده و منجر به جذب کاتیون‌ها خواهد شد و برعکس

پیل‌های خوردگی غلظتی

حامل‌های جریان الکتریکی در پیل‌های خوردگی، الکترون‌ها در فاز جامد و یون‌های در محلول الکترولیت می‌باشند. بنابراین مقاومت کل مدار خوردگی، برابر با مجموع مقاومت خارجی فاز جامد و مقاومت داخلی فاز محلول است. از آنجایی که الکترون‌های موجود بر روی سطح فلز، به دلیل رسانایی فلزی به یکدیگر متصل هستند، مقاومت خارجی یا مقاومت الکترونی، قابل صرف‌نظر می‌باشد. جهت جریان الکتریکی در فاز جامد، از کاتد به آند است که برخلاف جهت جریان الکترون‌ها می‌باشد. نرخ خوردگی یا نرخ انحلال آند، بر اساس اصل دوم فارادی، متناسب با دانسیته جریان خوردگی است. اما گاهی اوقات مقاومت داخلی، تبدیل به عامل اصلی شده و مانع از شارش جریان خوردگی می‌گردد. برقراری جریان در داخل الکترولیت، نیاز به جابه‌جایی یون‌های مثبت و منفی دارد. یون‌های مثبت، به‌سمت کاتد حرکت کرده و یون‌های منفی، به‌سمت آند می‌روند. لایه‌های تشکیل شده توسط محصولات خوردگی می‌توانند از جابه‌جایی یون‌های جلوگیری کرده و در نتیجه نرخ خوردگی را کنترل کنند.

منابع پیل‌های خوردگی، نواحی میکروسکوپی هستند که مشخصه‌های الکتروشیمیایی مختلفی از لحاظ داخلی و خارجی دارند. مثال‌هایی از عوامل داخلی، نوع فلز و ساختار آن می‌باشد. برای مثال خواص الکتروشیمیایی مرزدانه در مواد بسیار کریستالی، با خواص داخل دانه متفاوت است، زیرا مرزدانه‌ها به دلایل زیادی انرژی بیشتری دارند (برای مثال مقادیر بیشتر عناصر آلیاژی در مرزدانه‌ها منجر به تشکیل پیل‌های خوردگی میکروسکوپی شده و مرزدانه‌ها را تبدیل به آند می‌کنند که این امر باعث ایجاد خوردگی مرزدانه می‌گردد). مثال‌هایی از عوامل خارجی، مقادیر مختلف اکسیژن در تماس با رسوبات خوردگی موجود بر روی سطح، تفاوت‌های غلظتی به طور کلی و تغییرات دمایی می‌باشند که منجر به تشکیل پیل‌های خوردگی میکروسکوپی خواهند شد. در پیلی مانند پیل دانیل[۳۷] که شامل یک الکترود روی غوطه‌ور شده در محلول سولفات روی و یک الکترود مس غوطه‌ور شده در محلول سولفات مس است، پتانسیل مدار باز برابر با اختلاف بین پتانسیل‌های احیا دو الکترود در جریان صفر است. وقتی که الکترودها اتصال کوتاه می‌شوند، هر دو پلاریزه شده و به پتانسیل تعادلی E_{corr} می‌رسند و جریان عبوری از پیل در E_{corr} برابر با i_{corr} خواهد بود. از آنجایی که الکترودهای پیل دانیل، مقادیر پلاریزاسیون پایینی دارند، مقدار i_{corr} زیاد است. مقادیر i_{corr} در پیل‌های خوردگی واقعی در مقایسه با باتری‌ها، بسیار پایین هستند. این حالت وقتی رخ می‌دهد که فلزات مس و آهن به یکدیگر متصل شده باشند. برای مثال پمپ‌های ساخته شده از فولاد به منظور پمپ کردن آب دریا، به دلیل اثر کاتدی پروانه‌های برنزی، با سرعت بسیار زیادی خورده خواهند شد مگر اینکه پروانه‌ها با قلع پوشش داده شوند که در مقایسه با مس، بسیار آسان‌تر پلاریزه شده و بنابراین منجر به کاهش پتانسیل خوردگی و همچنین جریان خوردگی می‌گردد. موارد مشابهی در ریل‌های دارای جریان برق، در خطوط برق حاوی جریان مستقیم ولتاژ بالا، در جریان‌های سرگردان ناشی از

1 2 7

ماشین‌های جوشکاری و در سیستم‌های آب داغ مشاهده می‌شود که در آنها، لوله‌هایی از جنس فولاد با قطرهای بالاتر از ۵۰ میلی‌متر و لوله‌های از جنس مس با قطر کمتر از ۵۰ میلی‌متر وجود داشتند.

انرژی آزاد گیبس پیل‌های غلظتی را می‌توان با روشی مشابه برای یک پیل خوردگی گالونیک در فرمول‌های زیر محاسبه کرد. انرژی آزاد گیبس اکسیداسیون نیم پیل یا آند (که انحلال فلز در آن رخ داده و منجر به افزایش یون‌های فلزی می‌گردد) برابر است با:

$$-\Delta G = nFe = RT \ln\left(\frac{c_1}{c_2}\right)$$

و انرژی آزاد گیبس نیم پیل احیا یا کاتد (که در محیط‌های خنثی و بازی شامل احیا اکسیژن می‌باشد) برابر است با:

$$-\Delta G = nFe = RT \ln\left(\frac{P_{O_2}}{P^{\bullet}_{O_2}}\right)$$

که n حالت اکسیداسیون یون‌های فلزی می‌باشد، F ثابت فارادی برابر با ۹۶۵۰۰ کولن است، E اختلاف پتانسیل می‌باشد، R ثابت گازها برابر با ۸/۳۱۴ ژول بر کلوین. مول است، T دمای مطلق برحسب کلوین است، c_1 غلظت یون فلزی بالاتر و c_2 غلظت یون فلزی پایین‌تر می‌باشد، P_{O_2} فشار اکسیژن در کاتد و $P^{\bullet}_{O_2}$ فشار اکسیژن در آند است.

پیل‌های غلظتی به دلیل اختلاف غلظت اکسیژن در خطوط لوله زیرزمینی تشکیل شده و منجر به ایجاد خوردگی حفره‌ای و ترک خوردگی تنشی می‌گردند. جریان (i_0) در تعادل، برابر با هر دو جریان آندی و کاتدی می‌باشد:

$$i_0 = i_a = i_c$$

اگر پتانسیل تعادل در جهت کاتدی تغییر کند، جریان خالص عبوری از پیل برابر خواهد بود با:

$$i_0 = i_c - i_a$$

و اگر در جهت آند تغییر کند:

$$i_0 = i_a - i_c$$

بنابراین اگر i_0 خیلی بزرگ باشد (برای مثال برای پلاتین غوطه‌ور شده در محلول‌های آبی)، هیدروژن به جای پلاتین واکنش می‌دهد، زیرا جریان تعادل برای پلاتین بسیار بالا بوده و نمی‌تواند زیاد تغییر کند و این پیل، الکترود استاندارد هیدروژن نامیده می‌شود و پذیرفته شده که پتانسیل آن در ۲۹۸ درجه کلوین، برابر با صفر است. برعکس اگر جریان تعادل یک پیل، خیلی بزرگ نباشد، با اعمال یک جریان خارجی کوچک می‌توان آن را تغییر داد یا به‌عبارت‌دیگر، به آسانی پلاریزه می‌شود. رابطه جریان خارجی اعمال و تغییر پتانسیل، در معادله باتلر- والمر آمده است که برابر بررسی خوردگی در مطالعات خوردگی بسیار مهم می‌باشد.

$$i = i_0 \left\{ \exp\frac{(1-\beta)F\eta}{RT} - \exp\frac{(-\beta F\eta)}{RT} \right\}$$

پلاریزاسیون

اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند، نیروی محرکه فرایندهای الکتروشیمیایی می‌باشد. اما اگر آند و کاتد به یکدیگر متصل شده باشند و جریانی از پیل عبور کند، پتانسیل‌های آنها یکسان شده و برابر با E_{corr} می‌شود که پتانسیل حالت پایدار است؛ در این حالت، دانسیته جریان آندی برابر با دانسیته جریان کاتدی می‌باشد. پتانسیل حالت پایدار (E_{corr}) ، پتانسیل خوردگی نیز نامیده می‌شود و به جریان مربوط به آن، جریان خوردگی (i_{corr}) گفته می‌شود. جریان خوردگی عمدتاً به پتانسیل خوردگی، نفوذ ترکیبات خورنده الکترولیت، دما و نسبت مساحت آند به کاتد بستگی دارد. نفوذ ترکیبات خورنده الکترولیت، شرط اولیه برای ادامه خوردگی است. سرعت فرایند نفوذ غالباً به دلیل رسوب دادن محصولات در صفحات کاتد و آند کاهش پیدا کرده و بنابراین نرخ خوردگی کم می‌شود. با افزایش دما، نرخ خوردگی به دلیل افزایش نرخ نفوذ افزایش پیدا می‌کند. جریان خوردگی (i_0) برابر است با $i_a - i_c$ و i_a و i_c به ترتیب دانسیته جریان‌های آندی و کاتدی هستند. بنابراین اگر مساحت ناحیه کاتدی بزرگ‌تر باشد، دانسیته جریان آندی به طور قابل توجه بالا بوده و بنابراین نرخ خوردگی افزایش می‌یابد (زیرا i_a بسیار بیشتر از i_c می‌باشد).

حفاظت کاتدی به پلاریزه شدن پتانسیل فلز کمک کرده و باعث می‌شود که فلز به پتانسیل مدار باز آند رسیده و جریان‌های آندی صفر شوند که این کار توسط اعمال یک جریان خارجی به فلز در جهت کاتدی صورت می‌گیرد.

علی‌رغم اینکه پتانسیل تعادلی، اطلاعات خوبی درباره چگونگی پیشرفت خوردگی ارائه می‌دهند، اما با استفاده از آن نمی‌توان داده‌های سینتیکی مربوط به‌سرعت پیشرفت واکنش را به دست آورد. برای اندازه‌گیری نرخ خوردگی باید یک جریان خارجی اعمال شده و تغییر پتانسیل الکترود اندازه‌گیری شود. پلاریزاسیون، تغییر پتانسیل الکترود در اثر این جریان اعمالی خارجی بوده و مقدار پلاریزاسیون، برابر با اختلاف بین پتانسیل تعادلی و پتانسیل اندازه‌گیری شده تحت جریان اعمالی خارجی می‌باشد. معادله باتلر- والمر را می‌توان برای مقادیر پلاریزاسیون بسیار کوچک یا بسیار بزرگ ساده کرد. اولاً اگر مقدار پلاریزاسیون (η) بزرگ‌تر از ۵۰ میلی‌ولت باشد، می‌توان عبارت دوم در معادله باتلر- والمر را نادیده گرفت.

برای η بزرگ‌تر از ۵۰ میلی‌ولت:

$$i=i_0\left\{\exp\frac{(1-\beta)F\eta}{RT}\right\}$$

برای η بزرگ‌تر از ۵۰ میلی‌ولت:

$$i=i_0\left\{\exp\frac{(-\beta F\eta)}{RT}\right\}$$

و با گرفتن لگاریتم طبیعی از معادله اول داریم:

$$\ln i=\ln i_0+\frac{(1-\beta)F\eta}{RT}$$

از آنجایی که η و i، تنها متغیرهای معادله هستند. فرمول زیر به دست می‌آید که معادل تافل نامیده می‌شود:

$$\eta=a+b\ln i$$

بنابراین در مورد پلاریزاسیون‌های بالا، لگاریتم طبیعی جریان اعمالی خارجی و پلاریزاسیون، رابطه مستقیم با یکدیگر دارند.

بنابراین در مورد پلاریزاسیون‌های بالا، لگاریتم طبیعی جریان اعمالی خارجی و پلاریزاسیون، رابطه مستقیم با یکدیگر دارند.

ثانیاً، اگر $|\eta|$ کوچک‌تر از ۵ میلی‌ولت باشد، بر اساس سری مک لارن می‌توان توان‌ها را مجدداً نوشت و فقط دو عبارت اول را می‌توان در نظر گرفت:

$$i=i_0\left\{1+\frac{(1-\beta)F\eta}{RT}-1+\frac{(-\beta F\eta)}{RT}\right\}$$

در نتیجه:

$$i=i_0\frac{F\eta}{RT}$$

و

$$\eta=\frac{RT}{i_0F}i$$

بنابراین پلاریزاسیون، بسته به دانسیته جریان تغییر می‌کند. این روش به کار رفته برای مطالعات خوردگی، روش پلاریزاسیون خطی نامیده می‌شود. اطلاعات مربوط به اثرات پلاریزاسیون، ایده‌ای درباره این ارائه می‌دهد که چه واکنشی در الکترودها اتفاق می‌افتد. چند نوع پلاریزاسیون وجود دارد که در ادامه به آنها اشاره شده است.

پلاریزاسیون اکتیواسیون

پلاریزاسیون اکتیواسیون وقتی رخ می‌دهد که واکنش‌های خوردگی در فصل مشترک فلز- الکترولیت انجام شوند و نرخ خوردگی را فقط می‌توان از طریق پلاریزاسیون اکتیواسیون اندازه‌گیری کرد.

پلاریزاسیون غلظتی

پلاریزاسیون غلظتی به دلیل تغییرات غلظت با زمان در اطراف الکترولیت رخ می‌دهد. وقتی جریان از سل خوردگی عبور می‌کند، بعضی از یون‌ها، مصرف شده و غلظت آنها کاهش پیدا می‌کند که این امر منجر به افزایش پتانسیل الکترود می‌گردد. یون‌های مصرف شده باید با یون‌های جدید از الکترولیت جایگزین شوند، اما این فرایند توسط نرخ نفوذ، محدود می‌گردد. برای مثال واکنش اصلی کاتدی در آب چشمه و آب دریا، احیا اکسیژن است و حلالیت اکسیژن در آب، بسیار پایین می‌باشد. بنابراین از آنجایی که اکسیژن مصرف شده در اطراف کاتد در آب‌های راکد نمی‌تواند سریعاً جایگزین شود، غلظت آن به سرعت کاهش پیدا کرده و منجر به پلاریزاسیون کاتدی سریع می‌گردد.

پلاریزاسیون اهمی

پلاریزاسیون اهمی، به دلیل مقاومت در مدار است که افت پتانسیل اهمی نیز نامیده می‌شود. پلاریزاسیون اهمی، رابطه مستقیم با شدت جریان دارد. اگر جریان قطع شود، کاهش پتانسیل به میزان IR نیز بلافاصله ظاهر شود، درحالی‌که دیگر اثرات پلاریزاسیون، به آهستگی کاهش پیدا می‌کنند.

نمودارهای پلاریزاسیون

وقتی که جریان از یک پیل گالوانیک عبور می‌کند، پتانسیل کاتدی به‌سمت مقادیر منفی‌تر جابه‌جا می‌گردد، درحالی‌که، پتانسیل آندی به‌سمت مقادیر مثبت‌تر می‌رود و در نهایت به یک پتانسیل تعادلی رسیده و دو پتانسیل، یکسان می‌شوند. اگر جریان خارجی به این پیل خوردگی در تعادل اعمال شود، پتانسیل خوردگی (E_{corr}) در جهت منفی جابه‌جا شده و اختلاف پتانسیل‌های تحت اعمال جریان و بدون آن، برابر با مقدار زیر می‌شود:

$$\eta = E_i - E_0$$

مفهوم تمایل به خوردگی (که توسط ترمودینامیک تعیین می‌شود)، شرایط خوردگی فلزات را مشخص می‌کند؛ اما اطلاعات نرخ خوردگی که اهمیت بیشتری دارد را ارائه نمی‌دهد. برای اکتیویته‌های یکسان و تحت شرایط استاندارد $\varepsilon_{(\mathrm{Cu/Zn})}$ برابر با ۱/۱۲۶ ولت بود؛ بنابراین اگر این دو الکترود از طریق ولت‌متری که مقاومت داخلی بالایی دارد به یکدیگر متصل شوند، پتانسیلی بسیار نزدیک به ۱/۱۲۶ ولت مشاهده خواهد شد؛ اما اگر توسط یک مقاومت محدود به یکدیگر متصل شوند، جریان قابل توجهی از پیل خوردگی عبور خواهد کرد و منجر به کاهش پتانسیل قرائت شده توسط ولت‌متر می‌گردد. این مقادیر را می‌توان با علامت پریم در معادله زیر نشان داد:

$$\varepsilon' = i'(R+r)$$

که در این رابطه، R مقاومت خارجی و r مقاومت داخلی محلول یا الکترولیت است، درحالی‌که، $(\varepsilon - \varepsilon')$ بین پتانسیل‌های آند و کاتد تقسیم می‌شود که منجر به ایجاد انحراف از مقادیر پتانسیل اندازه‌گیری شده به‌صورت جداگانه شده و در نتیجه دو مقدار پتانسیل، به یکدیگر نزدیک می‌گردند، بنابراین با فرض اینکه پتانسیل‌های تقسیم شده بین آند و کاتد به ترتیب با $\eta_{A'}$ و $\eta_{C'}$ نشان داده می‌شوند:

$$\varepsilon = i'(R+r) + \eta_{A'} + \eta_{C'}$$

یا

$$\varepsilon - \varepsilon' = \eta_{A'} + \eta_{C'}$$

با افزایش جریان (i')، $\eta_{A'}$ و $\eta_{C'}$ افزایش پیدا می‌کنند، درحالی‌که بدون حضور جریان، این دو پارامتر حذف خواهند شد. انحراف از پتانسیل‌های مدار باز آند و کاتد، پلاریزاسیون نامیده می‌شود. درحالی‌که، مقاومت خارجی ناچیز و صفر در نظر گرفته می‌شود، بنابراین جریان به مقدار ماکزیمم خود خواهد رسید، درحالی‌که، ولت‌متر مقدار زیر را نشان خواهد داد:

$$\varepsilon'' = i''.r$$

مقاومت خارجی در محیط‌های واقعی در طول خوردگی فلزات در محلول‌های آبی، قابل صرف‌نظر شده و باعث می‌شود که الکترودهای میکرو آند و کاتد، از طریق فلز در وضعیت اتصال کوتاه قرار گرفته و پلاریزاسیون ایجاد شود:

$$\varepsilon'' = i''.r + \eta_{A'} + \eta_{C'}$$

که در اینجا، i'' جریان خوردگی واقعی بوده و $\varepsilon''(i_{\text{corr}})$ پتانسیل خوردگی است که بین پتانسیل‌های آندی $(\varepsilon_{A'})$و کاتدی $(\varepsilon_{C'})$ قرار داشته و مقادیر آنها به دلیل پلاریزاسیون، بسیار نزدیک به هم می‌باشد؛ بنابراین نمودار پلاریزاسیون، خطی و ± 10 میلی ولت در اطراف پتانسیل خوردگی است که در نتیجه امکان ایجاد معادلات خطی مانند روش اشترن و گری[۳۸]که برای تعیین نرخ خوردگی در محیط‌های اسیدی و خنثی به‌خوبی کار می‌کند، وجود دارد:

$$i_{\text{corr}} = \frac{1}{2.3}\left(\frac{\beta_A.\beta_C}{\beta_A+\beta_C}\right)\left(\frac{\text{di}}{\text{dE}}\right)_{\text{i=0}}$$

در نتیجه در مورد آهن در معرض خوردگی، اگر پتانسیل خوردگی به میزان ۱۰ میلی‌ولت در جهت آندی یا کاتدی تغییر داده شود، جریانی به اندازه $0/9 \times 10^{-5}$ آمپر بر سانتی‌مترمربع ایجاد شده و با فرض اینکه هر دو پارامتر β_A و β_C برابر با ۰/۱ هستند (زیرا مقادیر تئوری در دسترس β_A و β_C معمولاً بین ۰/۰۶ ولت و ۰/۱۲ ولت می‌باشند)، جریان خوردگی برابر خواهد بود با:

$$i_{\text{corr}} = \frac{1}{2.3}\left(\frac{0.1 \times 0.1}{0.1+0.1}\right)\left(\frac{\text{di}}{\text{dE}}\right)_{\text{i=0}}$$

و

$$\left(\frac{\text{di}}{\text{dE}}\right)_{\text{i=0}} = \frac{0.9\times10^{-5}\text{Amp/cm}^2}{0.01\text{V}} = 0.9\times10^{-3}\text{Amp/cm}^2 V_0$$

بنابراین جریان خوردگی برابر با $1/956 \times 10^{-5}$ آمپر بر سانتی‌مترمربع و معادل با حدود mdd ۵۰ (میلی‌گرم بر دسی‌مترمربع در روز) است که با استفاده از قانون دوم فارادی محاسبه می‌گردد:

$$(\text{mdd}) = \text{c(mg/coulomb)}.\text{i}_{\text{corr}}(\text{Amp/dm}^2).\text{t(sec onds/day)}$$

نرخ خوردگی

نرخ پلاریزاسیون، مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده نرخ خوردگی می‌باشد، زیرا نرخ خوردگی با افزایش پلاریزاسیون، کاهش پیدا می‌کند و بنابراین یکی از روش‌های کنترل‌کننده خوردگی، تغییر محیط خورنده و افزایش تمایل به پلاریزاسیون می‌باشد. عبارت $i''\times \text{r}$ ، معمولاً در مقایسه با عبارت $\eta_{A'}+\eta_{C'}$ قابل صرف‌نظر است. همچنین در بین دو الکترود معمولاً کاتد است که تمایل به پلاریزاسیون بیشتری داشته و بنابراین نرخ خوردگی را تعیین می‌کند.

در واکنش کاتدی بسیار متداول در واکنش‌های خوردگی واقعی، احیا گاز اکسیژن به یون‌های هیدروکسید و احیا یون‌های هیدروژن به گاز هیدروژن می‌باشند. برای مثال احیا یون هیدروژن که می‌تواند برای فلزات غوطه‌ور شده در محلول‌های اسیدی رخ دهد، با واکنش زیر نشان داده می‌شود:

$$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow H_2$$

1 2 8

و ε_H=0.0592 pH درحالی‌که، که در اینجا ε پتانسیل مشاهده شده در اثر جریان عبوری است و η_H را می‌توان از رابطه تافل به دست آورد:

$$\eta_H = \beta_H \log\left(\frac{i}{i_{0.\mathrm{H}}}\right)$$

که i دانسیته الکترون در واحد سطح بر روی الکترون هیدروژن و فلز می‌باشد، β_H شیب تافل بوده و $i_{0.\mathrm{H}}$دانسیته جریان تبادلی است. بر اساس این معادله، وابستگی زیادی به نوع ماده الکترود و ترکیب شیمیایی آن دارد. برای مثال اگرچه پتانسیل‌های نیم پیل هیدروژن برای پلاتین، آهن و سرب یکسان هستند، اما مقادیر η_H آنها بسیار متفاوت است. در میان این فلزات، پلاتین به دلیل فعالیت کاتالیستی بالایش، تمایل به پلاریزاسیون محدودی دارد، درحالی‌که، احیا هیدروژن بر روی فلزاتی که فعالیت پایینی دارند (مانند سرب و جیوه). بسیار آهسته می‌باشد و این فلزات مقادیر η_H بالایی دارند. بنابراین برای pHهای کوچک‌تر از ۴ که واکنش کاتدی آنها، احیا یون‌های هیدروژن است:

$$\varepsilon_{\mathrm{corr}}=\varepsilon_H+\eta_H=0.0592\ \mathrm{pH}+\beta_H \log\left(\frac{i}{i_{0.\mathrm{H}}}\right)$$

که در اینجا $\varepsilon_{\mathrm{corr}}$ و pH قابل اندازه‌گیری بوده و ثابت‌های β_H و $i_{0.\mathrm{H}}$، متغیرهای تئوری برحسب ولت و آمپر بر سانتی‌مترمربع هستند، فقط i یا i_{corr} که برحسب آمپر بر سانتی‌مترمربع است باید محاسبه شود که در نهایت می‌توان آن را با استفاده از قانون دوم فارادی به واحدهای دیگر مانند mdd (میلی‌گرم کاهش وزن در دسی‌مترمربع در روز) تبدیل کرد. درحالی‌که حالتی که واکنش کاتدی آن، احیا اکسیژن می‌باشد:

$$O_2+2\mathrm{H_2O}+4\mathrm{e}^- \rightarrow 4\mathrm{OH}^-$$

$$\varepsilon_0=-1.23+0.0592\mathrm{pH}$$

که فشار اکسیژن برابر با ۱ اتمسفر بوده و ε پتانسیل مشاهده شده در اثر عبور جریان است و:

$$\eta_0=\varepsilon+1.23-0.0592\mathrm{pH}$$

وقتی که دو عبارت (E_H=0.0592pH و E_0=-1.23+0.0592pH) مقایسه می‌شوند، مشاهده می‌گردد که E_0 به میزان ۱/۲۳ ولت نجیب‌تر است. به‌عبارت‌دیگر، بر اساس این مقایسه، نرخ خوردگی یک فلز در شرایط خنثی هوادار باید بیشتر از خوردگی در محیط‌های اسیدی بدون هوا باشد؛ اما این گفته به چندین دلیل درست نیست: ۱- تمایل به پلاریزاسیون اکسیژن، بسیار بالا می‌باشد؛ ۲- غلظت اکسیژن محلول معمولاً در محیط‌های واقعی، بسیار پایین بوده و منجر به محدود شدن نرخ خوردگی می‌گردد؛ ۳- نرخ نفوذ اکسیژن در سطوح فلزی که خوردگی در آنها رخ می‌دهد، بسیار آهسته بوده و بنابراین اکسیژن نمی‌تواند با همان نرخی که مصرف می‌شود، در سطوح فلزی نفوذ کند، در نتیجه پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده، بسیار متفاوت از پتانسیل‌های مدار باز می‌شود که این فرایند پلاریزاسیون غلظتی نامیده می‌شود. نزدیک شدن غلظت اکسیژن به صفر

در سطح فلز، منجر به افزایش شدید مقدار η_0 می‌گردد که در اثر حضور دیگر واکنش‌های در حال وقوع در آن محیط محدود می‌شود.

اگر pH ۷ باشد، E_0 برابر با ۰/۸۴- ولت می‌گردد که بسیار نزدیک به پتانسیل احیا نقره (E_{Ag} برابر با ۰/۸۰- ولت) می‌باشد و بنابراین می‌توان انتظار داشت که نقره در شرایط هوادار، اندکی دچار خوردگی شود، درحالی‌که، مس که پتانسیل احیا ۰/۳۳۷- ولت دارد، بیشتر دچار خوردگی می‌گردد. علی‌رغم این واقعیت که پتانسیل‌های مدار باز روی و آهن، متفاوت هستند. اما از آنجایی که الکترود اکسیژن، به‌شدت پلاریزه می‌کند، نرخ‌های خوردگی روی و آهن بسیار مشابه است. عامل دیگر مؤثر بر نرخ خوردگی این است که اگر pH کوچک‌تر از ۴ باشد، هر دو واکنش احیا هیدروژن و اکسیژن روی داده و منجر به افزایش نرخ خوردگی می‌گردد.

به دلیل اینکه خوردگی در واحد سطح و زمان رخ می‌دهد می‌توان نرخ خوردگی را به‌صورت کاهش وزن اندازه‌گیری کرد. تست محفظه مه نمکی، روشی رایج است که از دو طریق انجام می‌گیرد: تست‌های خوردگی استاتیک، تحت رطوبت و دمای ثابت انجام می‌شوند (برای مثال تست‌های ASTM B117 و DIN 50021)، درحالی‌که تست‌های دورانی، تحت محیط‌های الکترولیت، رطوبت و دمای متغیر برای زمان‌های مختلف انجام می‌شوند (برای مثال ASTM G85، ASTM B605 و DIN 50018). اما زمان این تست‌ها بسیار طولانی است و به خصوص وقتی که نرخ خوردگی پایین باشد، نتایج موثق نخواهند بود. همچنین هرگز نمی‌توان شرایط واقعی را در محیط آزمایشگاه به‌صورت کامل شبیه‌سازی کرد. علاوه بر آن اگر نوع خوردگی، یکنواخت نباشد، مقادیر کاهش وزن بی‌معنی خواهند بود. تشکیل لایه‌ها بر روی سطح فلز در طول آزمایش می‌تواند منجر به ایجاد مسائل مشابهی از لحاظ معتبر بودن تست‌های کاهش وزن برای تعیین نرخ خوردگی شود. بنابراین مهندسانی که در فرایند انتخاب مواد مناسب برای پروژه‌هایشان یا تعیین روش‌های پیشگیری از خوردگی فعالیت می‌کنند، در خواهند یافت که تست-های کاهش وزن بسیار طولانی مدت می‌باشند و آنها باید از روش‌های دیگری برای تعیین نرخ خوردگی استفاده کنند. همانند روش‌های الکتروشیمیایی سنتی، وقتی که یک جریان خارجی برای اندازه‌گیری خوردگی اعمال می‌گردد، مشکلاتی ایجاد می‌شود، زیرا این جریان اعمالی خارجی منجر به ایجاد انحراف در پتانسیل خوردگی واقعی می‌شود. روش‌هایی مانند نویز الکتروشیمیایی، به حذف این معایب تست‌های کاهش وزن و تست‌های الکتروشیمیایی سنتی کمک می‌کند.

در اکثر موارد از آنجایی که نمی‌تواند محصولات خوردگی را از آندها دور کرد و همچنین امکان تجدید غلظت اکسیژن در کاتدها با سرعت کافی وجود ندارد، نرخ خوردگی بیشتر از یک محدوده خاص افزایش پیدا نمی‌کند. بنابراین در این موارد با افزایش جریان، نرخ خوردگی تنها تا یک مقدار خاص افزایش می‌یابد. افزایش پتانسیل منجر به ایجاد واکنش‌های دیگری نیز در الکترودها می‌شود. در نتیجه نرخ خوردگی علاوه بر پلاریزاسیون واکنش‌های الکترود، به اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند نیز بستگی دارد. از خوردگی در الکترودهایی که دانسیته جریان تعادلی پایینی دارند (که از نتیجه با یک ولتاژ کم نیز به سادگی پلاریزه می‌گردند) می‌تواند به طور مؤثر پیشگیری کرد.

سرعت خوردگی

ازآنجاکه، تقریباً کل خوردگی یک واکنش الکتروشیمیایی محسوب می‌شود، هر آنچه که بر سرعت واکنش شیمیایی یا مقدار جریان تأثیر بگذارد، بر سرعت خوردگی نیز تأثیر خواهد گذاشت. قانون اُهم را می‌توان در مورد بخش الکتریکی پیل خوردگی به کار برد. سرعت خوردگی نسبت مستقیمی با مقدار جریان برقرار شده در پیل خوردگی الکتروشیمیایی دارد. اگر بتوان این جریان را اندازه‌گیری نمود، میزان تخریب فلز را می‌توان به طور دقیق محاسبه کرد. این به آن معناست که اندازه‌گیری برحسب آمپر یا میلی‌آمپر را می‌توان با محاسبات ریاضی به مقادیر کیلوگرم (پوند) بر آمپر سال تبدیل نمود. یک آمپر سال، شارش جریان یک آمپر برای مدت زمان یک سال می‌باشد. فلزات مختلف سرعت‌های خوردگی متفاوتی دارند.

تأثیرات الکتریکی بر سرعت خوردگی

هر فاکتوری که بر مقدار جریان عبوری در یک مدار تأثیر بگذارد، بر سرعت قسمت الکتریکی در واکنش الکتروشیمیایی (خوردگی) نیز تأثیر خواهد گذاشت. در ادامه توضیح و نمونه‌ای از فاکتورهای تأثیرگذار بر سرعت قسمت الکتریکی خوردگی آمده است.

مقاومت ویژه الکترولیت

مقاومت ویژه الکترولیت معمولاً فاکتور مهمی در تعیین سرعت خوردگی و یک ویژگی غیرقابل‌کنترل خاک یا آب (الکترولیت) است. طبق تعریف، الکترولیت ماده‌ای است که به یون‌ها اجازه عبور می‌دهد و مقاومت ویژه، سرعت عبور مجاز برای یون‌ها می‌باشد. مقاومت ویژه عکس هدایت بوده و با واحد اهم – سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت ویژه در یک پیل الکتروشیمیایی با جریان و بنابراین با خوردگی نسبت عکس دارد. در صورت دو برابر شدن مقاومت ویژه و ثابت ماندن سایر فاکتورها، مقدار خوردگی به نصف کاهش می‌یابد.

مقاومت تماسی

مقاومت تماسی آند و کاتد نسبت به الکترولیت تأثیر مشابهی همانند مقاومت دارد زیرا از جنس مقاومت است. هرچه مقاومت کمتر باشد، جریان (خوردگی) بیشتر می‌شود. در صورت دو برابر شدن مقاومت تماسی آند یا کاتد و ثابت ماندن سایر فاکتورها، مقدار خوردگی به نصف تقلیل می‌یابد. توجه داشته باشید که اگر مقاومت تماسی آند و کاتد دو برابر شوند، مقدار خوردگی تنها یک چهارم مقدار اولیه آن می‌شود.

پوشش سازه

پوشش سازه معمولاً باعث افزایش مقاومت تماسی آند و کاتد می‌شود زیرا اکثر پوشش‌ها ذاتاً دی‌الکتریک (نارسانا) هستند.

قطبی‌شدن سازه

قطبی شدن (پلاریزاسیون)، تغییر پتانسیل الکترود در اثر برقراری جریان الکتروشیمیایی است و معمولاً منجر به تشکیل لایه‌ای به نام «لایه پلاریزاسیون» بر روی سطح الکترود می‌شود. لایه پلاریزاسیون شامل یک لایه نازک هیدروژن بر روی سطح کاتد است. این لایه و سایر تغییرات، آثار مثبتی بر روی کاتد دارند. لایه هیدروژن به‌عنوان یک پوشش اضافی عمل کرده، آب از سطح کاتد دور می‌شود. غلظت یون در الکترولیت کاهش یافته، مقاومت تماسی الکترود نسبت به الکترولیت افزایش می‌یابد.

مقدار جریان

مقدار جریان مستقیماً بر روی سرعت خوردگی تأثیر می‌گذارد. خوردگی را می‌توان از روی میزان جریان مشخص کرد. هر فلز مشخصاتی از جمله تعداد الکترون‌هایی که در فرایند اکسیداسیون از دست می‌دهد و تعداد اتم‌ها در یک کیلوگرم (پوند) از فلز دارد. این مشخصات را می‌توان به کیلوگرم (پوند) بر آمپر تبدیل کرد. واحد اندازه‌گیری طبیعی، مقدار کیلوگرم (پوند) بر آمپر سال را در یک دوره یک ساله محاسبه می‌کند.

دما

دما متغیر خارجی پیچیده‌ای محسوب می‌شود. به طور کلی با افزایش دما خوردگی افزایش می‌یابد. بااین‌حال، این موضوع به میزان اکسیژن در دسترس نیز بستگی دارد. نشان داده شده که سرعت خوردگی آهن در یک سیستم بسته، از دمای حدود ^{o}C ۴۰ تا ^{o}C ۱۶۰ (^{o}F ۱۰۵ تا ^{o}F ۳۲۰)تقریباً

به طور خطی با دما افزایش می‌یابد. بااین‌حال، در یک سیستم باز، سرعت خوردگی تا حدود^{o}C ۸۰ (^{o}F ۱۷۵) افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. همچنین باید توجه داشته باشید که با افزایش دما، pH مایع اسیدی‌تر شده و بر روی سرعت خوردگی نیز تأثیر خواهد گذاشت. به‌عنوان مثال، آب قلیایی ۲۵ قسمت در میلیون با pH معادل ۹/۴ در دمای ^{o}C ۲۶/۷ ، در pH ^{o}C ۹۳/۳ برابر با ۸/۰ خواهد داشت.

غلظت یون

غلظت یون اثری مشابه PH دارد، به‌جز آنکه سرعت خوردگی برخی از فلزات تحت تأثیر یون‌های خاصی قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال، آلومینیم نه تنها توسط مواد قلیایی بلکه در صورت وجود یون‌های مس در محیط آبی نیز خورده می‌شود و از طرفی با جیوه، یون‌های جیوه و حلال‌های کلردار خشک نیز به‌سرعت تخریب می‌شود. در مورد آهن، کلرید و یون‌های کلرید می‌توانند باعث افزایش سرعت خوردگی آن در بعضی از الکترولیت‌ها شوند. بااین‌حال، یون‌های برومید و یدید می‌توانند مانع خوردگی شوند (سرعت خوردگی را کاهش دهند). اثر غلظت یکی از ترکیبات بر خوردگی، اغلب به سایر متغیرهای محیطی نظیر وجود املاح، میزان اکسیژن در دسترس و تفاوت در قابلیت حل شدن اکسیژن، pH و دما بستگی دارد.

غلظت الکترون

غلظت بالای الکترون‌های آزاد در الکترولیت پیرامون کاتد می‌تواند با رسیدن به اشباع حداکثر سرعت انتقال یون از محیط، از خوردگی جلوگیری کند. غلظت ناچیز الکترون‌های آزاد در الکترولیت پیرامون کاتد، به دلیل ماهیت شیمیایی تعادل که در آن الکترون‌ها به محیط منتقل می‌شوند، می‌تواند باعث افزایش سرعت خوردگی شود.

الکترولیت

در یک پیل خوردگی الکتروشیمیایی، pH الکترولیت خاک یا آب با افزایش یا کاهش سرعت واکنش‌های شیمیایی در آند و یا کاتد و یا هر دو، بر سرعت خوردگی تأثیر می‌گذارد. اصولاً pH یک الکترولیت غلظت یون‌های هیدروژن را نشان می‌دهد. مقدار pH کمتر از 4 سرعت خوردگی فولاد نرم را افزایش می‌دهد. در pH برابر ۳، سرعت خوردگی به‌شدت افزایش می‌یابد. سرعت خوردگی فلزات آمفوتر نیز در محیط‌های قلیایی افزایش می‌یابد. آلومینیم و سرب نمونه‌هایی از فلزات آمفوتر هستند.

پلاریزاسیون سازه

پالریزاسیون به‌عنوان یک پوشش اضافه عمل کرده و بر میزان pH و غلظت یون در الکترولیت مجاور سازه تأثیر می‌گذارد.

عوامل مؤثر بر خوردگی

خوردگی سطح فلز، عمدتاً به ماهیت فلز و ماهیت محیط خورنده بستگی دارد.

ماهیت فلز

موقعیت فلز در سری گالوانیک

وقتی دو فلز در تماس الکتریکی با یکدیگر قرار دارند، فلز فعال‌تر (بالاتر در سری گالوانیک) که پتانسیل اکسیداسیون بالاتر دارد، نقش آند را در الکترولیت ایفا کرده و دچار خوردگی می‌شود. نرخ و شدت خوردگی، به اختلاف موقعیت آنها در سری گالوانیک بستگی دارد. با افزایش این اختلاف، خوردگی فلز آندی سریع‌تر خواهد شد.

مساحت‌های نسبی آند و کاتد

اگر مساحت کاتد بزرگ‌تر باشد، نرخ بیشتر خواهد بود. وقتی که مساحت قسمت کاتدی بزرگ‌تر باشد، تقاضا برای دریافت الکترون‌ها بیشتر خواهد بود و این امر منجر به افزایش نرخ انحلال فلزات در نواحی آندی خواهد شد. خوردگی آند، رابطه مستقیم با نسبت مساحت کاتد به آند دارد. اگر ناحیه آندی کوچک باشد، به دلیل دانسیته جریان بالا در این ناحیه، خوردگی شدید و سریع مشاهده می‌شود.

خلوص فلز

وجود ناخالصی‌ها منجر به تشکیل پیل‌های الکتروشیمیایی موضعی می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، ناخالصی‌های موجود در یک فلز، ایجاد ناهمگنی کرده و بنابراین در اثر حضور نواحی آندی و کاتدی متمایز در فلز، پیل‌های گالوانیک تشکیل می‌شوند. با افزایش میزان ناخالصی در یک فلز، نرخ خوردگی افزایش می‌یابد. برای مثال حضور ناخالصی‌هایی مانند سرب و آهن در روی، منجر به تشکیل پیل‌های الکتروشیمیایی ریز در قسمت ناخالصی‌ها شده و به دلیل عملکرد موضعی، خوردگی روی در اطراف ناخالصی رخ می‌دهد. می‌توان با افزایش خلوص فلز، مقاومت به خوردگی آن را افزایش داد.

حالت فیزیکی فلز

قطعات فلزی قرار گرفته در معرض تنش‌های غیریکنواخت، به آسانی خورده می‌شوند. حتی در یک فلز خالص نیز نواحی تحت تنش، تمایل به آندی و خورده شدن دارند. به‌عنوان یک مثال، خوردگی تردی کاستیک در نواحی تحت تنش فلزی مانند خم‌ها، اتصالات و پرچ‌ها در بویلرها رخ می‌دهد.

پسیو شدن

پدیده‌ای که در آن، فلز یا آلیاژ مقاومت به خوردگی بیشتری از مقدار مورد انتظار در سری الکتروشیمیایی از خود نشان می‌دهد، به‌عنوان پسیو شدن شناخته می‌شود. در واقع پسیو شدن، تشکیل فیلم بسیار نازک محافظ و نامرئی به ضخامت در حدود ۰/۰۰۰۴ میلی‌متر بر روی سطح فلز یا آلیاژ است. نمونه‌ای از این فلزات، فولاد حاوی نیکل و کروم می‌باشد. کروم، تشکیل یک لایه محافظ Cr_2O_3 بر روی سطح فولاد داده و آن را در محیط‌های اکسیدکننده، پسیو می‌کند. طلا و پلاتین، از لحاظ شیمیایی خنثی بوده و بنابراین مقاومت به خوردگی بسیار خوبی دارند. عناصر یا آلیاژها را می‌توان بر اساس تمایل به خوردگی به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد.

سدیم، منیزیم و آلیاژهای منیزیم؛ روی، آلومینیم، کادمیم، آهن، فولاد و چدن؛ سرب، قلع، مس، نیکل، کروم، فولاد زنگ نزن؛ نقره، تیتانیم، طلا، پلاتین.

ماهیت محصول خوردگی

اگر محصول خوردگی در محیط خورنده، محلول یا تبخیر شدنی باشد، سطح فلز در زیر محلول خوردگی به سادگی در معرض محیط قرار خواهد گرفت و خوردگی با نرخ بیشتری رخ خواهد داد؛ اما اگر محصول خوردگی در محیط خورنده، نامحلول باشد، فیلمی در سطح تشکیل می‌گردد که این فیلم محافظ خوردگی بیشتر را متوقف خواهد کرد. اگر محصول خوردگی، اکسید باشد، نرخ خوردگی عمدتاً به نسبت حجم ویژه بستگی دارد با افزایش نسبت حجم ویژه، نرخ خوردگی اکسید کاهش می‌یابد.

ماهیت فیلم اکسیدی

فلزاتی مانند منیزیم، کلسیم و باریم، اکسیدهایی با حجم کمتر از حجم فلز تشکیل می‌دهند. بنابراین فیلم اکسیدی تشکیل شده، متخلخل است و اکسیژن می‌تواند از طریق آن نفوذ کرده و منجر به افزایش خوردگی شود. از طرف دیگر، فلزاتی مانند آلومینیم، کروم و نیکل، اکسیدهایی با حجم بیشتر از حجم زمینه تشکیل می‌دهند و بنابراین فیلم اکسیدی غیرمتخلخل تشکیل شده، از فلز زمینه در برابر خوردگی بیشتر، محافظت می‌کند.

ماهیت محیط خورنده

اثر دما

نرخ خوردگی با افزایش دما، افزایش پیدا می‌کند، زیرا نرخ واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی و سرعت یون‌ها افزایش می‌یابد. به همین دلیل خوردگی تنشی و خوردگی مرزدانه‌ای معمولاً در دماهای بالا مشاهده می‌شوند. علاوه بر آن فلزات پسیو ممکن است در دماهای بالاتر، فعال شوند.

غلظت اکسیژن محلول و تشکیل پیل‌های غلظتی اکسیژن

نرخ خوردگی با افزایش میزان اکسیژن در دسترس افزایش پیدا می‌کند، به همین دلیل خورندگی آب با افزایش دما کم می‌شود، زیرا با افزایش دما، میزان اکسیژن محلول نیز کاهش می‌یابد.

نواحی که در آنها غلظت اکسیژن کمتر است، آندی شده و دچار خوردگی می‌شوند. خوردگی اغلب در زیر واشرهای فلزی رخ می‌دهد، زیرا اکسیژن نمی‌تواند به آسانی در این مناطق نفوذ کند. همچنین خطوط لوله و کابل‌های عبوری از یک نوع خاک به نوع دیگر (برای مثال خط لوله عبوری از خاک رس و از ماسه)، به دلیل اختلاف غلظت اکسیژن دچار خوردگی می‌شوند. در این مثال، قسمتی از خط لوله که از خاک رس عبور می‌کند، خورده می‌شوند، زیرا میزان اکسیژن موجود در خاک رس کمتر از ماسه است.

ماهیت الکترولیت

ماهیت الکترولیت نیز بر نرخ خوردگی تأثیرگذار است. برای مثال اگر هدایت الکتریکی الکترولیت بالا باشد، جریان خوردگی به آسانی هدایت شده و بنابراین نرخ خوردگی افزایش می‌یابد. همچنین اگر الکترولیت شامل یون‌های سیلیکات باشد، سیلیکات نامحلول تشکیل شده و از خوردگی بیشتر ممانعت به عمل خواهد آورد.

حضور یون‌های خورنده

اگر آنیون‌های خورنده مانند کلریدها یا سولفات‌ها در محیط وجود داشته باشند، خوردگی شتاب پیدا می‌کند، زیرا این آنیون‌ها منجر به تخریب فیلم محافظ شده و سطح فلز را در معرض الکترولیت قرار می‌دهند، در نتیجه خوردگی شدت پیدا خواهد کرد.

خوردگی مواد

منشأ کلمه خوردگی (Corrosion)، واژه لاتین (Corrodere) به معنای سایش است. پلاتو[۱۲۹] اولین بار در طول عمرش (۴۲۷ – ۳۴۷ قبل از میلاد) درباره خوردگی می‌گوید و زنگ[۱۳۰] را به‌عنوان ترکیبی مشابه خاک جدا شده از فلز تعریف می‌کند. حدود ۲۰۰۰ سال بعد، جورجیوس اگریکولا[۱۳۱] در کتابش با عنوان کانی شناسی[۱۳۲] تعریف مشابهی از زنگ ارائه می‌دهد و بیان می‌کند که زنگ تراوشی از فلز است و به کمک پوششی از قیر محافظت می‌شود. دوباره در سال ۱۶۶۷ فرایند خوردگی در یک ترجمه فرانسه – آلمانی و در سال ۱۸۳۶ در ترجمه‌ای دیگر از فرانسه به انگلیسی به‌وسیله سر همفری دیوی[۱۳۳] در جایی ذکر می‌گردد که از حفاظت کاتدی آهن فلزی در آب دریا بحث می‌شود. حدود همین زمان، میکائیل فارادی[۱۳۴] تولید جریان الکتریکی ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی را فرمول‌بندی کرد.

به یک بیان، بیشتر مواد انواع بر هم‌کنش‌ها را با تعداد زیادی از محیط‌های مختلف دارند. اغلب چنین بر هم‌کنش‌هایی، سودمند مواد را به‌عنوان نتیجه‌ای از تخریب[۱۳۵] (زوال) خواص مکانیکی‌شان، به‌عنوان نمونه شکل‌پذیری، استحکام، دیگر خواص فیزیکی و شکل ظاهری، از بین می‌برد. مکانیسم‌های فرسودگی برای سه نوع از مواد، سرامیک‌ها پلیمرها و فلزات متفاوت است. مواد سرامیکی به فرسودگی نسبتاً مقاوم هستند و فرسودگی آنها معمولاً در دماهای بالا یا در محیط‌های حدی[۱۳۶] در فرایند رخ می‌دهد که آن هم خوردگی نامیده می‌شود. در مورد پلیمرها، مکانیسم‌ها و پیامدها از آنچه که برای فلز و سرامیک رخ می‌دهد، متفاوت است و غالباً از عبارت پوسیدگی[۱۳۷] استفاده می‌شود. پلیمرها ممکن است هنگامی که در معرض حلال‌های مایع قرار می‌گیرند، تجزیه شوند یا ممکن است حلال را جذب و متورم شوند. افزون بر این تابش الکترومغناطیسی مانند پرتوی ماورای‌بنفش[۱۳۸] و گرما ممکن است سبب تغییرات در ساختار مولکولی آنها شود. سرانجام، در فلزات به دو صورت به‌وسیله تجزیه یا خوردگی یا به‌وسیله تشکیل یک فیلم یا پوسته‌های غیرفلزی به‌وسیله اکسایش، فرایندی که باز هم خوردگی نامیده می‌شود، اتلاف واقعی مواد وجود دارد.

فرسودگی یا خوردگی مواد سرامیکی

ممکن است تصور شود که مواد سرامیکی، یک طبقه ترکیباتی که حد واسط بین عناصر فلزی و غیرفلزی هستند، قبلاً دچار خوردگی شده‌اند. بنابراین، آنها در همه محیط‌ها به‌ویژه در دمای اتاق نسبت به خوردگی ایمن هستند و این دلیل استفاده مکرر از آنهاست. به همین دلیل اغلب شیشه به‌عنوان ظرف مایعات استفاده می‌شود.

1	[illegible]	2	9
1	[illegible]	3	0
1	[illegible]	3	1
1	[illegible]	3	2
1	[illegible]	3	3
1	[illegible]	3	4
1	[illegible]	3	5
1	[illegible]	3	6
1	[illegible]	3	7
1	[illegible]	3	8

به طور کلی، خوردگی مواد سرامیکی برخلاف فرایندهای الکتروشیمیایی مربوط به فلزات، شامل انحلال[۱۳۹]شیمیایی ساده است. سرامیک‌های نسوز نه فقط باید در برابر دماهای بالا مقاوم بوده و عایق حرارت باشند، بلکه در خیلی از موارد نیز باید نسبت به خوردگی دمای بالای به‌وسیله شیشه‌ها، سرباره‌ها، نمک‌ها و فلزات مذاب نیز مقاوم باشند. خیلی از طرح‌های فناوری‌های نوین مفیدتر، برای تبدیل انرژی از شکلی به شکل دیگر نیازمند دماهای نسبتاً بالا، اتمسفر خورنده و فشار بالای محیط هستند. مواد سرامیکی برای این محیط‌ها و برای دوره‌های زمانی معقول مناسب‌تر از فلزات هستند.

فرسودگی یا پوسیدگی پلیمرها

مواد پلیمری با فرایندهای غیرخورنده فرسوده می‌شوند. آنها وقتی در معرض مایعات قرار می‌گیرند، ممکن است با تورم یا انحلال، پوسیده شوند. با تورم، مولکول‌های حلال واقعاً در ساختار مولکولی قرار می‌گیرند. برش یا جدایی پیوندهای زنجیر مولکولی ممکن است با تابش، واکنش‌های شیمیایی یا گرما القا گردد. این موضوع به کاهش وزن مولکولی و زوال خواص شیمیایی و فیزیکی پلیمر منتهی می‌شود.

همچنین، مواد پلیمری به‌وسیله برهم‌کنش‌های محیطی متحمل پوسیدگی می‌شوند. به هر حال، یک برهم‌کنش ناخواسته به جای خوردگی، به‌عنوان پوسیدگی تبیین شود، زیرا این فرایندها اساساً نامشابه‌اند. ازآنجاکه، بیشتر واکنش‌های خوردگی فلزات الکتروشیمیایی هستند، در مقابل پوسیدگی پلیمرها فرایندی شیمی فیزیکی است، یعنی شامل پدیده‌های فیزیکی و همچنین شیمیایی است. به‌علاوه، طیف گسترده‌ای از واکنش‌ها و پیامدهای گوناگون برای پوسیدگی پلیمرها محتمل است. همچنین، ممکن است گسستگی پیوند کووالانسی، معمولاً همراه با کاهش یکپارچگی مکانیکی، به‌عنوان نتیجه‌ای از انرژی گرمای، واکنش‌های شیمیایی و تابش باشد. همچنین، باید خاطر نشان شود که به دلیل پیچیدگی شیمیایی پلیمرها، مکانیسم‌های پوسیدگی آنها به‌خوبی درک نمی‌شود.

برای مثال پلی‌اتیلن[۱۴۰](PE)، وقتی در جوی از اکسیژن در معرض دماهای بالا قرار می‌گیرد، متحمل نقص در خواص مکانیکی شده و دچار تردی می‌شود. در مثال دیگر، سودمندی پلی ونیل کلراید[۱۴۱](PVC) ممکن است محدود شود، زیرا وقتی در معرض دماهای بالا قرار می‌گیرد، رنگی می‌شود، حتی اگر چنین محیط‌هایی به ویژگی‌های مکانیکی آنها تأثیر نگذارد.

خوردگی یا فرسودگی فلزات

در میان سه نوع مواد که فرسوده می‌شوند، خوردگی معمولاً به تخریب و زوال ناخواسته یک فلز منتسب می‌شود، که فرایندی الکتروشیمیایی و معمولاً از سطح فلز آغاز می‌شود. خوردگی یک فلز یا یک آلیاژ را می‌توان با هر دو روش مستقیم، تغییر در وزن در محیط داده شده یا به کمک تغییرات و در خواص فیزیکی، الکتریکی، الکتروشیمیایی با زمان تعیین کرد.

1 [redacted] 3 9
1 [redacted] 4 0
1 [redacted] 4 1

در طبیعت، بیشتر فلزات در حالت ترکیب شیمیایی یافت می‌شوند که به‌عنوان سنگ‌معدن[۱۴۲] شناخته می‌شود. همه فلزات (به‌جز فلزات نجیب مانند طلا، پلاتین و نقره) در طبیعت به شکل اکسیدها، هیدروکسیدها، کربنات‌ها، سیلیکات‌ها، سولفیدها، سولفات‌ها و غیره وجود دارند که به لحاظ ترمودینامیکی در حالت‌های انرژی پایین پایدارتری هستند. با دادن مقادیر زیاد انرژی، فلزات از یک سنگ‌های معدنی استخراج می‌شوند و فلز خالص در شکل‌های عنصری‌شان به دست می‌آید.

به لحاظ ترمودینامیکی، به‌عنوان نتیجه‌ای از این فرایند متالوژی، فلزات به سطح انرژی بالاتری می‌روند، آنتروپی‌هایشان کاهش می‌یابد و نسبتاً ناپایدارتر می‌شوند که همین نیروی محرکه خوردگی می‌باشد. برگشت به حالت‌های انرژی پایین‌تر اکسیدشان، به حالت‌های ترکیب‌شان، با ترکیب مجدد آنها با عناصر موجود در محیط که منتج به کاهش در انرژی آزاد می‌شود، روندی طبیعی است. ازآنجاکه، موضوع اصلی این کتاب حفاظت کاتدی است، که یک اقدام پیشگیرانه در مقابل خوردگی فلزات است، قبل از ورود به جزئیات حفاظت کاتدی، باقی این فصل به فرایندهای خوردگی مربوط با فلزات پرکاربرد متمرکز می‌شویم. با داشتن تصوری کامل از فرایند خوردگی، امکان فهم جامع‌تری از فرایند حفاظت کاتدی میسر است.

بنابراین، ابتدا فلزات مورد استفاده رایج به لحاظ تمایلات خوردگی‌شان مرور می‌شوند و با آهن و فولاد که مرسوم‌ترین فلزات ساختمانی مورد استفاده هستند، شروع می‌کنیم و سپس به آنهایی که اغلب با لحاظ کاتدی محافظت می‌شوند، می‌پردازیم.

آهن، فولاد و فولاد ضدزنگ

آهن[۱۴۳] و فولاد[۱۴۴] نود درصد همه فلزات تولید شده در کره زمین را تشکیل می‌دهند، که بیشتر آن فولاد کم کربن[۱۴۵] است. به دلیل خواص مکانیکی و هزینه پایین، بیشترین فلز مورد استفاده برای تولید ماشین‌آلات و تجهیزات فولاد کم کربن است. به‌عنوان مثال، مخازن تحت فشار از فولاد کم کربن ساخته می‌شوند که ۰/۱ تا ۰/۳۵ درصد کربن دارند. هزینه‌های فولاد کم کربن معادل یک‌سوم سرب و روی، یک‌ششم مس و آلومینیم و یک‌بیستم آلیاژهای نیکل است. به هر حال، بزرگ‌ترین عیب فولاد کم کربن، مقاومت پایین در برابر خوردگی است.

هماتیت (Fe_2O_3) متعارف‌ترین سنگ‌معدن آهن در طبیعت است که برای به دست آوردن آهن فلزی با خاک زغال‌سنگ در کوره‌های دمای بالا واکنش داده می‌شود. برای تولید یک تن آهن، یک تن زغال سنگ مصرف می‌شود. همچنین، واکنش برگشت طبیعی، که خوردگی آهن و برگشت به شکل معدنی‌اش است، شامل محصولات مشابه هماتیت مانند اکسیدهای آهن و هیدروکسیدهای آهن است. انرژی آزاد شده طی واکنش خوردگی، نیروی محرکه خودبه‌خودی بودن واکنش است؛ به هر حال، در خیلی از موارد، اگرچه انرژی آزاد گیبس واکنش منفی است، به دلیل سرعت خیلی پایین واکنش، خوردگی یک واکنش ناچیز است، مانند مورد غیرفعال (رویین) شدن و تشکیل فیلم‌های اکسید محافظ طبیعی.

واکنش‌های آندی در حین خوردگی آهن تحت شرایط متفاوت، یکسان هستند و آن اکسید شدن آهن و تولید کاتیون Fe^{2+} و الکترون‌ها است. در هر حال، واکنش کاتدی به شرایطی بستگی دارد که آهن قرار دارد. برای مثال، هنگام نبود یا مقدار کم

---

1 . □□ 4 2
1 □□□□□□□ 4 3
1 □□□□□□□ 4 4
1 □□□□□ □□□□□□□□□□□□□ 4 5

اکسیژن، مانند لوله آهنی مدفون در خاک، کاهش H^+و آب رخ می‌دهد و به تولید گاز هیدروژن و یون‌های هیدروکسید منجر می‌شود، زیرا هیدروکسید آهن (II) که کمتر محلول است، در سطح فلز رسوب می‌کند و تا حدی مانع اکسید شدن بیشتر آهن می‌شود.

$$\mathrm{Fe} \rightarrow \mathrm{Fe}^{2+} + 2e^-$$

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow 2\mathrm{OH}^- + H_2$$

$$\mathrm{Fe} + 2H_2O \rightarrow \underbrace{\mathrm{Fe}^{2+} + 2H^-}_{\mathrm{Fe(OH)_2}} + H_2$$

بنابراین، خوردگی آهن در غیاب اکسیژن آهسته است. محصول هیدروکسید آهن (II)، بیشتر اکسید شده و به اکسید آهن مگنتیت $\mathrm{Fe_2}O_4$ که اکسیده ترکیبی از FeO و $\mathrm{Fe_2}O_3$ است، تبدیل می‌شود. ازاین‌رو، یک شیء آهنی مدفون در خاک، به دلیل تشکیل مگنتیت سیاه بر سطح آن خورده می‌شود.

$$6\mathrm{Fe(OH)_2} + O_2 \rightarrow 2\mathrm{Fe_3}O_4.H_2O + 4H_2O$$

$$\mathrm{Fe_3}O_4.H_2O \rightarrow \underbrace{H_2O + \mathrm{Fe_3}O_4}_{\text{سیاه مگنت}}$$

اگر اکسیژن و آب موجود داشته باشد، واکنش‌های کاتدی خوردگی متفاوت هستند. در این حالت خوردگی صد برابر سریع‌تر از حالت نبود اکسیژن رخ می‌دهد. این واکنش‌ها شامل:

$$2 \times (\mathrm{Fe} \rightarrow \mathrm{Fe}^{2+} + 2e^-)$$

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4\mathrm{OH}^-$$

$$2\mathrm{Fe} + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2\mathrm{Fe(OH)_2}$$

چنانچه اکسیژن به اندازه کافی در دسترس باشد، محصول، هیدروکسید آهن (II)، وارد واکنش بیشتر با اکسیژن شده و اکسید آهن قهوه‌ای – قرمز می‌دهد:

$$4\mathrm{Fe(OH)_2} + O_2 \rightarrow \underbrace{2\mathrm{Fe_2}O_3.H_2O}_{\text{قرمز ای قهوه}} + 2H_2O$$

زنگ به رنگ قهوه‌ای – قرمز و شناخته شده‌ترین شکل زنگ است، که بر روی اشیا آهنی، ماشین‌ها و اغلب اوقات در شیر آب مشاهده می‌شود. ازآنجاکه، کلرید می‌تواند در پوشش‌های اکسید فلز نفوذ کرده و کلریدهای فلزی تشکیل دهد که از اکسیدها و هیدروکسیدها محلول‌تر هستند، سرعت فرایند زنگ زدن به دلیل کلریدهای حمل شده با بادهای سمت دریا، افزایش می‌یابد. کلریدهای فلزی تشکیل شده سطح را شسته و بنابراین مسیر را برای حمله بیشتر آب و اکسیژن به آهن باز می‌کند. وجود آلودگی‌ها در هوا بر سرعت خوردگی مؤثر است. گاز $\mathrm{SO_2}$ یک آلاینده هوای معروف است و معمولاً با سوختن زغال‌سنگ

در نیروگاه‌ها یا منازل تولید می‌شود. قابلیت حل شدن SO_2 در آب هزار برابر بیشتر از اکسیژن می‌باشد و این موضوع دلیل تشکیل اسیدسولفوریک یا اصطلاحاً باران اسیدی است که به واکنش‌های خوردگی زیر منجر می‌شود:

$$Fe+SO_2 + O_2 \rightarrow FeSO_4$$

$$4FeSO_4 + O_2 + 6H_2O \rightarrow 2Fe_2O_3.H_2O + 4H_2SO_4$$

$$4H_2SO_4 + 4Fe + 2O_2 \rightarrow 4FeSO_2 + 4H_2O$$

حذف اسیدسولفوریک تشکیل شده در این واکنش‌ها، مشکل است، به همین دلیل، حتی بعد از تمیز کردن سطح شیء آهنی به‌دقت، خوردگی تا زمانی ادامه می‌یابد که سولفات‌ها در محیط وجود داشته باشند. به هر حال، یافته شده است که اثر یون‌های سولفات بر خوردگی آهن در محلول‌های کلریدی تا $pH = 5/5$ ضعیف است، درحالی‌که، یون‌های سولفات در pH بالاتر از ۵/۵ به‌عنوان بازدارنده‌های ضعیف عمل می‌کنند. واکنش‌های آندی آهن در محلول سولفات در دامنه pH بین ۰ تا ۶ به‌صورت زیر است:

$$Fe+H_2O \rightarrow Fe(H_2O)_{ads}$$
$$Fe(H_2O)_{ads} \rightarrow Fe+(OH^-)_{ads}+H^+$$
$$Fe+(OH^-)_{ads} \rightarrow Fe(OH)_{ads} + e^-$$
$$Fe+(OH)_{ads} \rightarrow FeOH^+ + e^-$$
$$FeOH^+ + H^+ \rightarrow Fe^{2+} + H_2O$$

ازآنجاکه، آهن خالص نسبتاً نرم‌تر است، برای سخت‌تر و محکم‌تر شدن، با عناصری مانند Cr، Ni، Mn، Co، Si، Al، Ti، V، W و Zn آلیاژ می‌شود. فولاد آلیاژی با عناصر C، Mn، Si، S و P است.

فولادهای ضدزنگ[۴۶] عناصر آلیاژی معینی را به مقدار کافی در ترکیب‌شان دارند، به‌طوری‌که یک لایه غیرفعال (رویین) می‌تواند در سطح‌شان تشکیل شود که از خوردگی آنها جلوگیری می‌کند و خواص مکانیکی‌شان بهبود می‌یابد. این عناصر در درجه اول کروم با مقدار کمتر از ۱۰/۵ درصد و کربن با مقدار کمتر از ۱/۲ درصد هستند. فولادهای ضدزنگ اغلب در صنایع شیمیایی مصرف می‌شوند.

رایج‌ترین فولاد ضدزنگ، فولاد آستینیتی[۴۷] است که مغناطیسی نیست و بیشتر از ۶۵ درصد همه فولادهای ضدزنگ مصرفی در جهان است، کمتر از ۰/۱ درصد کربن دارد و در درجه اول از آهن، کروم و نیکل به‌عنوان عناصر آلیاژی ساخته می‌شود. دیگر فولاد ضدزنگ مصرفی رایج، فولاد فریتی[۴۸] است که ماهیت مغناطیسی دارد و اساساً آهن و کروم همراه با کمتر از ۰/۱ درصد کربن است، فولاد مارتنزیتی[۴۹] که می‌تواند سخت شود، مغناطیسی است و عمدتاً آهن و کروم همراه با بیشتر از ۰/۱ درصد کربن و فولاد دو فازی یا دوبلکس[۵۰] که مغناطیسی است و از آهن، کروم و نیکل ساخته شده و در اساس ترکیبی از فولادهای آستینی و فریتی است.

1 [illegible] 4 6
1 [illegible] 4 7
1 [illegible] 4 8
1 [illegible] 4 9
1 [illegible] 5 0

در آب دریا که مقدار فراوانی اکسیژن و کلرید دارد، بسیاری از فولادهای ضدزنگ به‌شدت در معرض خوردگی حفره‌ای و ترک ناشی از خوردگی تنشی[۱۵۱] قرار دارند. برای غیرفعال (رویین) شدن فولاد ضدزنگ، درصد کروم در آلیاژ باید بیشتر از ۱۲ درصد باشد؛ به هر حال، به علت رسوب کروم به شکل $Cr_{23}C_6$ با کربن موجود در فولاد، ممکن است درصد بالاتری از کروم نیاز باشد. مولیبدن عنصر آلیاژی دیگر غیر از کربن، کروم و نیکل است که به‌عنوان فریت‌ساز شناخته می‌شود و به مقدار ۲ تا ۳ درصد به فولادهای آستینی افزوده می‌شود و مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای در حضور کلریدها را افزایش می‌دهد. بااین‌حال، افزودن مولیبدن همچنین مقاومت خوردگی $15Cr - 10Ni$ در اسید نیتریک را کاهش می‌دهد. تیتانیم ۳۲۱ و نیوبیم ۳۴۷ را می‌توان برای کاهش میزان حساسیت در برابر برخی انواع خوردگی به فولادها آسیتینی افزود. علاوه بر این، برای افزایش مقاومت خوردگی در برابر اسیدهای اکسنده و به طور کلی محیط‌های اسیدی و کلریدها می‌توان مس را اضافه کرد. سلینم و گوگرد خواص مکانیکی فولادهای ضدزنگ مانند انعطاف‌پذیری[۱۵۲] را بهبود می‌بخشند، درحالی‌که، سیلیسیم تمایل فولادهای ضدزنگ به اکسایش در دماهای بالا را کاهش می‌دهد.

فولادهای ضدزنگ مارتنزیتی ۱۲ تا ۲۰ درصد کروم و مقدار اندکی کربن دارند. آنها می‌توانند با عملیات حرارتی[۱۵۳] سخت شوند، مقاومت خوردگی‌شان بیشتر از فولاد نرم اما از فولادهای آستینیتی کمتر است. آنها را می‌توان با اطمینان در محیط‌های خورنده متوسط مانند اتمسفر یا آب شیرین و دماهای تا $650\,°C$ استفاده کرد.

فولادهای ضد زنگ فریتی ۱۵ تا ۳۰ درصد کروم دارند که بیشتر از فولادهای مارتنزیتی است و همین دلیل مقاومت بیشترشان نسبت به خوردگی است. آنها را می‌توان در تجهیزات شیمیایی، مخازن ذخیره و وسایل آشپزخانه مورد استفاده قرار داد.

فولادهای ضدزنگ آستینیتی آلیاژ از کروم و نیکل هستند. برای مثال، سری ۳۰۰ فولادهای آستینیتی، ۱۶ تا ۲۶ درصد کروم و ۷ تا ۲۲ درصد نیکل در ترکیب‌شان دارند. آنها به آسانی شکل پذیرند، نسبت به خوردگی خیلی مقاومند و می‌توانند مانند فولاد ۸ – ۱۸ AISI ۳۰۴ پر مصرف، جوشکاری شوند. سری ۲۰۰ فولادهای ضدزنگ آستینیتی در ترکیب‌شان منگنز و نیتروژن را هم دارند. آنها به لحاظ مکانیکی در مقایسه با سری‌های ۳۰۰ عالی هستند، اما به لحاظ مقاومت خوردگی‌شان رتبه پایین‌تری دارند.

فولادهای ضدزنگ دو فازی یا دوبلکس هم آلیاژی از نیکل و کروم‌اند، اما با فازی از فولاد آستینیتی و فازی دیگر از فولاد فریتی که ترکیبی از ۲۸ درصد کروم و ۶ درصد نیکل می‌باشد، به لحاظ خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی، بین فولادهای آستینیتی و فریتی قرار می‌گیرند. آنها به خوردگی تنشی[۱۵۴] و خوردگی مرزدانه‌ای[۱۵۵] خیلی مقاوم هستند.

فولادهای ضدزنگی که با رسوب‌زایی سخت می‌شوند، نوع خاصی از فولادها هستند که نسبت استحکام به وزن[۱۵۶] بالا و مقاومت خوردگی بالایی دارند، بنابراین، در هواپیما و صنایع فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنها در سه نوع تولید می‌شوند: مارتنزیتی، نیمه‌آستینیتی و آستینیتی.

---

1 [illegible] 5 1
1 [illegible] 5 2
1 [illegible] 5 3
1 [illegible] 5 4
1 [illegible] 5 5
1 [illegible] 5 6

آلومینیم و آلیاژهای آن

آلومینیم به دلیل چگالی[۱۵۷]کم، $2/7g/cm^3$، هدایت الکتریکی و گرمایی زیاد داشتن استحکام مکانیکی بالای آلیاژهای ساخته شده با عملیات حرارتی، مقاومت به خوردگی زیاد در مقایسه با دیگر فلزات خالص، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. آلومینیم به طور طبیعی فعال‌تر از همه فلزات است، اما در سری الکتروشیمیایی پایین‌تر از فلزات قلیایی[۱۵۸]وقلیایی خاکی[۱۵۹]است و بنابراین می‌بایست نسبت به سایر عناصر جدول تناوبی به‌عنوان آند عمل کند؛ بااین‌حال، به دلیل لایه اکسیدی که سطح آن را غیرفعال (رویین) می‌کند، کاملاً نسبت به خوردگی مقاوم است. آلومینیم نسبت به آب، اسیدهای آلی و برخی اسیدهای اکسنده خیلی مقاوم است. بنابراین، اغلب در ساخت ظروف واکنش، ماشین‌آلات و باتری‌های شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌عنوان مثال، مخازن آلومینیمی برای نگهداری اسید استیک استفاده می‌شوند.

لایه Al_2O_3 که آلومینیم را از خوردگی محافظت می‌کند، به دلیل ماهیت خیلی واکنش‌پذیر آلومینیم، خیلی سریع تشکیل می‌شود و این لایه می‌تواند به کمک جریان الکتریکی در شرایط آزمایشگاهی نیز تولید شود. خوردگی آلومینیم را برای اولین بار چاتالوف[۱۶۰]بر اساس مقدار pH در سال ۱۹۵۲ مورد مطالعه قرار داد؛ درحالی‌که، پوربه[۱۶۱]وهمکارانش دریافتند که میزان خوردگی به‌صورت لگاریتمی به pH بستگی دارد و اینکه حداقل خوردگی در pH برابر ۶ رخ می‌دهد، زیرا هیدرات‌های آلومینیمی که به‌عنوان محصولات خوردگی تشکیل می‌شوند، حداقل مقدار قابلیت حل شدن را در این pH دارند. بینگر[۱۶۲]و مارستیلر[۱۶۳]بستگی لگاریتمی مشابهی برای pH بین ۷ تا ۱۰ را کشف کردند. ویوجیکیک[۱۶۴]و لورکک[۱۶۵]ادعا کردند که بستگی میزان خوردگی به pH ، پنجاه درصد بیشتر از آن مقدار است که چاتالوف پیشنهاد داد. تبریز[۱۶۶]لیون[۱۶۷]وهمکارانش دریافتند که با افزایش pH از ۸ به ۱۱ میزان خوردگی افزایش می‌یابد، درحالی‌که، در pH برابر ۱۱ کم می‌شود و مجدداً در pH برابر ۱۲ زیاد می‌شود. آنها همچنین دریافتند که با افزایش دما، میزان خوردگی هم افزایش می‌یابد.

به‌عنوان نتیجه‌ای از این مطالعات، به طور کلی پذیرفته شده است که آلومینیم در دامنه pH بین ۴ تا ۹ غیرفعال (رویین) است و یک فیلم اکسید عایق و نفوذناپذیر تشکیل می‌دهد. سطح فلز آلومینیم در pH برابر ۹/۱، بار الکتریکی صفر دارد. وقتی آلومینیم در خارج از دامنه غیرفعال (رویین) شدنش قرار می‌گیرد، تخریب یا خورده می‌شود؛ بااین‌حال، در محیط‌های اسیدی کمتر از محیط‌های بازی تخریب می‌شود. در محیط‌های قلیایی به‌ویژه در pH های بالاتر از ۱۰، آلومینیم و آلیاژهایش به آسانی خورده می‌شوند. بنابراین، ازآنجاکه، حفاظت کاتدی بیش از حد[۱۶۸]منجر به افزایش pH می‌شود، در زمان اعمال حفاظت کاتدی

1	5	7
1	5	8
1	5	9
1	6	0
1	6	1
1	6	2
1	6	3
1	6	4
1	6	5
1	6	6
1	6	7
1	6	8

می‌بایست از حفاظت بیش از حد اجتناب کرد. در محیط‌های بازی، مطابق واکنش زیر به لایه محافظ Al_2O_3 آسیب وارد می‌شود:

$$Al_2O_3 + 2OH^- + 3H_2O \rightarrow 2Al(OH)_4^-$$

در محلول‌های آمونیاک با pH بیشتر از ۱۱/۵، NH_3در این سیستم بافر به‌صورت اسید کونژوگهNH_3^{+}است و مقاومت سیستم به خوردگی افزایش می‌یابد، زیرا NH_3 نسبت به OH^- لیگاند قوی‌تر است، پس OH^- نمی‌تواند به آلومینیم متصل شود و آن را تجزیه کند، ازاین‌رو، تجزیه آهسته و جریان خوردگی کم می‌شود، برخلاف آنچه در محلول‌های KOH و در همین دامنه pH مشاهده می‌شود.

هنگام مطالعه اثر یون‌های سولفات بر خوردگی آلومینیم، مشخص شد که خوردگی در غلظت‌های کم محلول‌های Na_3SO_4و H_2SO_4 با مقادیر pH برابر ۱/۵ معادل $10^{-4}mA.cm^{-2}$ است. بنابراین، آلومینیم در محلول‌های رقیق اسید سولفوریک پایدار است، اما در محلول‌های غلیظ این طور نیست.

وقتی Na_2SO_4به این سیستم اضافه می‌شود یا در حضور SO_2 در شرایط جوی، خوردگی آلومینیم به دلیل افزایش رسانایی محلول، به‌صورت قابل توجهی در$pH = 12$ افزایش می‌یابد. ازآنجاکه، یون‌های سولفات به‌صورت رقابتی به سطح آلومینیم جذب می‌شوند، با کاهش یون‌های OH^- تا پنجاه درصد، رخداد معکوس در KOH اتفاق می‌افتد. در محیط اسیدی در محلول HCl، آلومینیم به‌صورت زیر تجزیه می‌شود:

$$Al + Cl^- \rightarrow AlCl_{ads}^-$$

$$AlCl_{ads}^- + Cl^- \rightarrow AlCl_2^+ + 3e^- \left(\text{آهسته}\right)$$

هنگامی که برای جلوگیری از خوردگی آلومینیم از بازدارنده‌های آلی استفاده می‌شود، بازدارنده‌های آلی پروتونه شده از طریق $AlCl_{ads}^-$ به سطح فلز جذب می‌شوند و مانع از اکسید شدن $AlCl_{ads}^-$ به $AlCl_2^+$می‌شوند. همچنین، بازدارنده‌های آلی پروتونه شده ممکن است کلرید را پایدار کنند، بنابراین، مانع از واکنش کلریدها می‌شوند، درحالی‌که، تصاعد گاز هیدروژن در کاتد اتفاق می‌افتد:

$$H^+ + e^- \rightarrow H_{ads} \left(\text{سریع}\right)$$

$$H^+ + H_{ads} \rightarrow H_2 \left(\text{آهسته}\right)$$

بازدارنده‌های آلی پروتونه شده ممکن است به‌صورت رقابتی نسبت به هیدروژن به سطح فلز جذب شوند و بنابراین، ممکن است مانع تصاعد هیدروژن کاتدی نیز شوند.

1 6 9

آلیاژهای آلومینیم که محتوی آلومینیم بالایی دارند، مستعد خوردگی تنشی هستند؛ بنابراین، آنها با آلومینیم خالص، پوشش داده می‌شود، که آلومینیم پوش[۱۷]امیده می‌شود. آلیاژهای آلومینیم با استحکام بالا، حاوی منیزیم (Mg) و سیلیسم (Si) هستند. ترکیبات آلی هالوژن‌دار، طی واکنش با آلومینیم در طول زمان به آن آسیب می‌زنند. آلومینیم و آلیاژهایش به دلیل مصرف گسترده در حوزه‌های مختلف صنعت، بسیار گران‌بها هستند. در سال ۲۰۰۸ بهای آن در مرکز تبادل فلز لندن[۱۷۱] ۳۳۸۰ دلار در هر تن افزایش یافت. به دلیل این افزایش قیمت آلومینیم و همچنین به علت افزایش هزینه‌های به کارگیری قطعات آلومینیمی، پیشگیری از خوردگی آلومینیم و آلیاژهای آن مهم‌تر شده است.

یکی از شیوه‌های جلوگیری از خوردگی، اکسایش آندی یا آندی کردن سطح آلومینیم برای ایجاد لایه اکسید آلومینیم طبیعی روی سطح آلومینیم می‌باشد که به‌صورت طبیعی یک لایه با ضخامت 25 A° تشکیل می‌شود. لایه اکسید آلومینیم ایجاد شده به‌صورت مصنوعی، بسته به شرایط فرایند آندی کردن مانند نوع الکترولیت، پتانسیل اعمالی، مدت زمان اعمال، دمای استعمال و غیره میزان متفاوتی از مقاومت خوردگی را داراست. محلول‌های اسید سولفوریک، اسید بوریک، اگسالیک، فسفریک یا کرومیک بیشترین الکترولیت یا محلول‌های آندی کردن مورد استفاده هستند. در میان آنها، اسید کرومیک به‌صورت خودکار لایه‌های اکسید آلومینیم محافظ تشکیل می‌دهد، اما سمی است و ازآنجاکه، اگسالیک اسید یک اسید آلی است، در دمای بالا تجزیه می‌شود، اسید فسفریک نیازمند پتانسیل‌های اکسایش بالا است که هزینه‌ها را افزایش می‌دهد و ازآنجاکه، اسید سولفوریک و اسید بوریک سمی نیستند، به نظر می‌رسد اقتصادی و مقرون‌به‌صرفه هستند و به آسانی تهیه می‌شود و به طور کلی مناسب‌تر هستند.

منیزیم و آلیاژهای آن

آلیاژهای منیزیم در صنایع اتومبیل‌سازی و دیگر صنایع استفاده می‌شوند، زیرا آنها سبک هستند، اما مقاومت خوردگی پایین مصرف‌شان را محدود می‌کند. همچنین، آنها به طور گسترده‌ای به‌عنوان آند در سامانه‌های حفاظت کاتدی استفاده می‌شوند. فیلم اکسید منیزیم که بر سطح منیزیم تشکیل می‌شود، به آسانی به‌وسیله کلریدها و اسیدها متأثر می‌شود، بنابراین، سطوح منیزیم باید به‌وسیله یون‌های غیرفعال (رویین) کننده مانند فلوریدها، فسفات‌ها و کرومات‌ها برای تشکیل یک فیلم محافظ سخت، روسازی شود. سپس، آنها می‌توانند در صنایع اتومبیل‌سازی و هواپیما مورد استفاده قرار گیرند. همراه با پوشش‌های کرومات همچنین پوشش‌هایی از تنگستات‌ها، مولیبدات‌ها، سیلیکات‌ها و لانتایندها برای حفاظت آلیاژهای منیزیم استفاده می‌شوند. این فلزات با کاتیون‌های منیزیم ترکیبات کم محلول تشکیل می‌دهند؛ به هر حال، برخی از آنها به‌ویژه کرومات‌ها خیلی سمی هستند. حتی آلیاژهای منیزیم پوشش‌دار هنوز در حضور کلریدها مستعد ترک خوردگی تنشی هستند. به دلیل تجزیه هیدروکسیدهای منیزیم که محصول خوردگی منیزیم هستند، pH افزایش می‌یابد و نگهداری pH خنثی مشکل است.

1 7 0
1 7 1

مس و آلیاژهای آن

مس و آلیاژهایش به طور گسترده‌ای در صنعت به‌ویژه سیستم‌های سرمایش و گرمایش به کار می‌روند، به دلیل هدایت گرمایی و الکتریکی خیلی زیادشان و خواص مکانیکی مناسب، آنها را مواد ایدئال برای انتقال حرارت می‌سازد. در سیستم‌های گرمایش آب، آنها به‌صورت مس خالص یا به‌صورت آلیاژ با روی، قلع و نیکل مصرف می‌شوند. برنج[۱۷۲] آلیاژی شامل حدود ۷۰ درصد مس و حدود ۳۰ درصد روی است و آلیاژ مس - قلع، برنز[۱۷۳] نامیده می‌شود. خواص هر دو آلیاژ برنج و برنز با افزودن سیلیسیم و برلیم بهبود می‌یابد. آلیاژهای مس - برلیم می‌توانند تا MPa ۱۳۰۰ استحکام مکانیکی داشته باشند و برای استفاده همراه با مواد منفجره ایمن هستند. آلیاژهای مس در حضور آمونیاک و آمین‌ها، مستعد خوردگی تنشی هستند. به‌علاوه، برنج مستعد خوردگی انتخابی[۱۷۴] در اصطلاح روی‌زدایی[۱۷۵] هستند. مگر اینکه با کمک فلزات گروه پنج مانع از آن شود.

هدایت گرمایی مس به علت تشکیل لایه‌های از محصولات خوردگی در سطح فلز کاهش می‌یابد. محلول‌های اسید شویی[۱۷۶] برای تمیز کاری سطح از رسوبات خوردگی به کار می‌روند. برای مثال، مس در اسید سولفوریک به‌صورت زیر تجزیه می‌شود:

$$2\mathrm{Cu} + H_2O \rightarrow \mathrm{Cu}_2O + 2H^+ + 2e^-$$

$$\mathrm{Cu}\ {}_2O + 2H^+ \rightarrow 2\mathrm{Cu}^{+2} + H_2O + 2e^-$$

مقادیر pH خنثی یا نزدیک به محدوده خنثی به تشکیل اکسیدهای مس و هیدروکسیدهای مس روی سطح فلز منجر می‌شوند. در حضور کلریدها، مس به‌صورت زیر تجزیه می‌شود:

$$\mathrm{Cu}+\mathrm{Cl}^- \rightarrow \mathrm{CuCl} + e^-$$

$$\mathrm{CuCl}+\mathrm{Cl}^- \rightarrow \mathrm{CuCl}_2^-$$

ضمن اینکه، هیدروکسیدها و اکسیدهای مس همچنین می‌توانند در حضور کلریدها تشکیل شوند. واکنش کاتدی مربوطه، واکنش کاهش اکسیژن است:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4\mathrm{OH}^-$$

نیکل و آلیاژهای آن

آلیاژهای نیکل بهترین مواد برای محیط‌های قلیایی هستند. آلیاژهایشان با فولادهای ضدزنگ و دیگران در دماهای بالا به کار می‌روند. همچنین، آلیاژهای نیکل به اثرات شیمیایی مقاوم هستند. در موارد قرارگیری در معرض فلورید هیدروژن (HF)،

1	[illegible]	2
1	[illegible]	3
1	[illegible]	4
1	[illegible]	5
1	[illegible]	6

آلیاژهای مونل[۱۷۷] و در دیگر موارد آلیاژ هیست[۱۷۸] به کار می‌رود. آلیاژهای نیکل برای جوشکاری هم مناسب هستند، مگر اینکه سرب و گوگرد در آنها باشد، که در هنگام جوشکاری باعث ترک خوردگی می‌شوند.

تیتانیم و آلیاژهای آن

تیتانیم مناسب‌ترین فلز برای صنایع هواپیماسازی و شیمیایی است. مشابه اکسید آلومینیم، لایه اکسید تیتانیم (TiO_2) که به‌صورت طبیعی بر سطح تیتانیم تشکیل می‌شود، در مقابل خوردگی بسیار محافظت کننده است. تیتانیم سبک است، با چگالی $4/5gr/cm^3$ ازاین‌رو، نسبت به فولادهای ضدزنگ هم‌وزن، ۸۰ درصد حجم بیشتر را اشغال می‌کند. به علت خواص مکانیکی عالی، لوله‌های تیتانیمی خیلی نازک می‌توانند به اندازه لوله‌های ساخته شده از دیگر مواد محکم باشند، اگرچه ممکن است الاسیتسته پایین مشکلاتی ایجاد کند، به‌ویژه درصورتی‌که ارتعاش وجود داشته باشد. ازآنجاکه، تیتانیم گران‌قیمت است، فقط درصورتی‌که در تجهیزات مصالحی به کار روند که برای عمر بالا طراحی شده باشد، اقتصادی و مقرون‌به‌صرفه است. ناخالصی‌هایی مانند نیتروژن و اکسیژن در ساختار بلوری تیتانیم، مقاومت را در برابر خوردگی کاهش می‌دهند و به‌ویژه، در دماهای بالا باعث شکست آنها به طرز مهلکی می‌شوند.

سرب و آلیاژهای آن

به دلیل مقاومت سرب به اثرات شیمیایی، از سرب در صنعت اسید سولفوریک استفاده می‌شود. به هر حال، سرب نرم است و چگالی برابر $11/3g/cm^3$ دارد که آن را خیلی سنگین می‌کند. آلیاژ شدن سرب با آنتیموان، وقتی به یک اندازه استفاده شوند، استحکام مکانیکی‌اش را افزایش می‌دهد. همچنین آلیاژ آن با قلع، تلوریم و کلسیم مقاومت خوردگی خیلی خوبی دارد. به هر حال، بخارهای تولیدی هنگام جوشکاری خطرناک هستند و باید به‌خوبی تهویه شوند. ازآنجاکه، سرب نسبت به مس آند است، ظروف آب و لوله‌های ساخته شده از مس نباید با مواد جوشکاری بر پایه سرب جوشکاری شوند، در عوض جوش نقره می‌تواند استفاده شود.

خوردگی آلیاژهای کامپوزیتی (برای مثال قوطی قلع)

خوردگی قوطی‌های قلع وقتی برای اهداف متفاوتی استفاده می‌شوند، مثال خوبی از خوردگی آلیاژهای کامپوزیتی در محیط‌های مختلف است. قوطی‌ها از فولاد کربنی با ضخامت ۰/۱۱ تا ۰/۳ میلی‌متر هستند که با قلع در هر دو طرف پوشش داده شده‌اند، که ظاهر درخشانی به آن می‌دهد. آنها را می‌توان به آسانی شکل داد، جوشکاری و لحیم کرد. نود درصد وزن قوطی‌های قلعی از فولاد است. لایه قلع کمتر از ۰/۰۰۲۵ میلی‌متر و معمولاً بین ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۱۵ میلی‌متر ضخامت دارد. ازآنجاکه، این ضخامت خیلی کم است، مقدار قلع قوطی‌ها به‌صورت g/m^2 داده می‌شود نه به‌صورت ضخامت، که بین g

---

[۱۷۷]. آلیاژ مونل (□□□□)، گروهی از آلیاژهای نیکل که در اصل شامل نیکل و مس و مقادیر کمی آهن، منگنز، کربن و سیلیکون می‌باشد.

[۱۷۸]. آلیاژ هیست (□□□□□□□□) سوپرآلیاژی بر پایه نیکل و شامل نیکل، کروم و مولیبدن است.

۲/۸ تا g ۱۱/۲در هر مترمربع است، و با توجه به دو لایه قلع در دو طرف، این مقدار، دو برابر می‌شود. قوطی‌های فولادی کروماته شده به‌صورت الکتریکی یا قوطی‌های فولادی عاری از قلع برای اولین بار در ژاپن تولید شد.

پیشگیری و محافظت از خوردگی

در کل تمرکز روش‌های پیشگیری از خوردگی، بر روی فصل مشترک سطح فلز و محلول می‌باشد، زیرا خوردگی عمدتاً در این مکان رخ می‌دهد. با انتخاب فلز مناسب علاوه بر طراحی مناسب می‌توان از ایجاد بخش عمده‌ای از خوردگی پیشگیری کرد. اگر بتوان برهمکنش فلز با محلول را به طور کامل قطع کرد می‌توان کاملاً از ایجاد خوردگی پیشگیری کرد. روش‌های اصلی پیشگیری از خوردگی شامل طراحی مناسب، انتخاب مواد مناسب و اصلاح ترکیب آلیاژ، اصلاح محیط و تبدیل آن به محیطی غیرخورنده، استفاده از بازدارنده‌ها، استفاده از پوشش‌های فلزی، آلی یا غیرآلی، حفاظت کاتدی و آندی و غیره می‌باشند.

روش‌های حفاظت از خوردگی، بسته به ماهیت ماده، محیط و شرایط سرویس دارند. فولادهای زنگ نزن که از طریق کاهش میزان کربن تولید می‌گردند، در تجهیزات دارویی، فرآوری غذا و صنایع شیمیایی به کار می‌روند که در معرض شرایط دریایی و اتمسفری قرار دارند. بنابراین پوشش‌هایی که برای فولادهای زنگ نزن و مواد مشابه با آنها به کار می‌روند، در معرض شرایط اتمسفری و دریایی متفاوتی قرار می‌گیرند. در میان این پوشش‌ها، پوشش‌های فلزی برای سیستم‌های اسیدی، اتمسفری و تقریباً آبی مناسب‌تر هستند، درحالی‌که، در شرایط اتمسفری و محلول‌های آبی، استفاده از رنگ‌ها ترجیح داده می‌شود. پوشش‌هایی مانند اپوکسی، پلی‌اورتان و رنگ‌های پلیمری کلر - لاستیک می‌توانند حتی در محیط‌های بسیار خورنده نیز به‌مدت ۱۵ تا ۲۰ سال دوام داشته باشند. آماده‌سازی سطح فلز، اولین گام برای فرایند پوشش‌دهی فلزات می‌باشد. در این مرحله، سطح فلز باید به طور کامل تمیز، اکسیدزدایی و چربی‌زدایی شود. چربی‌زدایی از طریق قرار دادن سطح در تری‌کلرواتیلن یا حلال‌های آلی فرار دیگر انجام می‌پذیرد. اکسیدزدایی به‌وسیله روش اسپری ماسه (سندبلاست) یا روش اسیدشویی یا روش‌های شیمیایی دیگر صورت می‌گیرد. اگر امکان تعویض فلز وجود نداشته باشد (برای مثال در سیستم‌های آب خنک کننده بسته)، از بازدارنده‌های استفاده می‌شود. حفاظت آندی، بر اساس پسیو کردن یک فلز از طریق پلاریزه کردن آن در جهت آندی است که باعث کاهش نرخ خوردگی به میزان هزار برابر می‌شود. حفاظت آندی، عمدتاً در محیط‌های آبی و اسیدی مانند مخازن اسید سولفوریک به کار می‌رود. به نظر می‌رسد که حفاظت کاتدی، مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش برای جلوگیری از خوردگی در سیستم‌های آبی و زیرزمینی به طور کلی و در سیستم‌های خط لوله نفت و گاز به طور خاص، کشتی‌ها، مخازن ذخیره آب و نفت، محفظه‌های حاوی مواد شیمیایی، مبدل‌های حرارتی، آرماتورهای داخل بتن و غیره باشد. در این فصل، چندین روش عملی برای جلوگیری از خوردگی مرور خواهد شد.

طراحی مناسب

خوردگی فلزات، به طراحی تجهیزات بستگی دارد. هندسه سازه نباید باعث تجمع محصولات خوردگی گردد. طراحی یک سازه باید به گونه‌ای باشد که نگهداری رطوبت در آن، تا حد ممکن حداقل باشد، زیرا خوردگی در حضور رطوبت رخ می‌دهد. طراحی باید امکان خروجی کامل سیال در هنگام شات‌داون یا شست‌وشوی آن را فراهم کند. تجمع آب در سطوح بالایی سازه، عدم امکان تخلیه کامل سطوح پایینی به‌ویژه در بویلرها و توزیع غیریکسان پتانسیل در هنگام حفاظت کاتدی، عوامل ریسک در ایجاد خوردگی بوده و باید در طول مرحله طراحی آنها را در نظر گرفت. برای مثال باکس‌های الکتریکی قرار گرفته در معرض اتمسفر باید به گونه‌ای طراحی شوند که آب در بالای آنها جمع نشود. تانک‌ها و مخازن دیگر باید به‌نحوی طراحی شوند که تمام مایع را بتوان به‌صورت کامل تخلیه کرد. از اتصالات پرچی نباید استفاده کرد و به جای آنها می‌بایست از اتصالات جوشی استفاده کرد، در نتیجه از خوردگی شیاری و تردی کاستیک جلوگیری به عمل آورد می‌شود. از طرف دیگر حتی اگر در طراحی امکان تجمع آب وجود نداشته باشد، اما اگر گازهای گرم در تماس با سطوح فلزی سرد باشند، در اثر کندانسه شدن می‌تواند رطوبت تشکیل شود. بنابراین استفاده از عایق‌های حرارتی مناسب یا تهویه به خصوص در مناطقی که در آنها امکان کندانس شدن وجود دارد نیز دارای اهمیت است. نکته قابل توجه این است که تفاوت تهویه در سازه نیز می‌تواند منجر به توزیع غیرهمگن اکسیژن و در نتیجه خوردگی شود. مکان‌های اتصال، نواحی جوشکاری شده، شکاف‌های باریک و غیره نیز ممکن است هوای ناکافی داشته باشند و از طریق تجمع مایعات استاتیک در این نواحی، امکان ایجاد خوردگی موضعی وجود دارد. بنابراین طراحی در صورت امکان باید به نحوی باشد که ملزومات جلوگیری از هوا در آن فراهم شده باشد. به‌علاوه، در طول طراحی مواد باید از ایجاد اتصالات گالوانیک از طریق عایق کردن آنها یا عدم استفاده از مواد مختلف پیشگیری کرد. مسئله مهم دیگر که باید در نظر گرفته شود این است که تجهیزات و مواد به کار رفته برای متصل کردن اجزا سازه مانند پیچ‌ها و جوش‌ها، باید شامل مواد نجیب‌تر از اجزا سازه بوده و می‌بایست به نحوه عایق شوند که هیچ مایعی نتواند از آنها عبور کند. تنش‌های ایجاد شده در اثر دماهای بالا در طول جوشکاری و سرمایش پس از آن، به همراه خوردگی منجر به ایجاد ترک خوردگی تنشی می‌گردد. برای محدود کردن این مشکلات، نیاز به کاهش زمان قرار گرفتن نواحی جوشکاری در معرض دماهای بالا می‌باشد که این امر به ساختار و ترکیب شیمیایی اجزائی بستگی دارد که باید جوشکاری شوند.

مهندسان سازه و معماری باید خوردگی را در مرحله طراحی در نظر بگیرند. معمولاً ساده‌سازی طراحی به پیشگیری از خوردگی کمک می‌کند. طراحی اشکالی که زوایا، گوشه‌ها، وجوه و سطوح داخلی کمتری دارند، با روشی آسان و ارزان منجر به کاهش خوردگی می‌گردد. بنابراین قطعه‌ای شامل یک‌جزء مجزا، بهتر از پروفیلی شامل بیشتر از یک‌جزء می‌باشد. همچنین سطوح بسته و اجزا گرد بهتر از گوشه‌های تیز و سطوح باز می‌باشند (برای مثال پروفیل‌های گرد به جای پروفیل‌های به شکل L، T و U). علاوه بر آن طراحی سازه باید به گونه‌ای باشد که امکان تعمیر و رنگ‌آمیزی مجدد آن وجود داشته باشد. در نتیجه طراحی‌ها باید شامل ملزومات مقدماتی زیر باشد:

۱- سازه‌ها نباید امکان تجمع آب‌های راکد را در داخل‌شان داشته باشند؛

۲- مکان‌هایی که برای عبور مایعات طراحی شده‌اند نباید زبر و دارای حفره باشند.

۳- باید از طراحی شکل‌ها هندسه‌هایی که تمیزکاری و رنگ‌آمیزی سطوح را دشوار می‌کنند، اجتناب کرد.
۴- اثرات خوردگی اتمسفری باید در طراحی‌ها در نظر گرفته شوند (به خصوص در نواحی که در آنها آلودگی اتمسفری وجود دارد).
۵- مواد به کار رفته برای ایجاد عایق‌های الکتریکی و حرارتی نباید آب را جذب کنند.
۶- برای جلوگیری از ایجاد خوردگی گالوانیک باید از تماس فلزات و آلیاژهای غیرهمجنس در مرحله طراحی اجتناب کرد.
۷- پروژه باید به گونه‌ای طراحی شود که تنش ساختاری سازه را کاهش دهد تا منجر به ایجاد ترک خوردگی تنشی و سایر خوردگی‌های مربوط به تنش نشود.

انتخاب مواد

شاید متداول‌ترین و آسان‌ترین روش پیشگیری از خوردگی، انتخاب صحیح مواد پس از مشخص شدن محیط خورنده می‌باشد. در اینجا هزینه‌ها می‌تواند عامل مهمی باشد. همیشه استفاده از مواد بسیار مقاوم در برابر خوردگی، از لحاظ اقتصادی امکان‌پذیر نیست؛ گاهی اوقات باید از آلیاژها یا روش‌های دیگری استفاده کرد.

مواد باید به دقت و بر اساس کاربرد، موقعیت جغرافیایی، مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی محیط، دما و فشار، سایر مواد در تماس با آنها و غیره انتخاب شوند. در طول انتخاب مواد، مقاومت به خوردگی، سهولت تولید، فراوانی و قیمت نیز می‌بایست در نظر گرفته شوند. فلزات نجیب معمولاً برای تجهیزات جراحی و زیورآلات استفاده می‌شوند، زیرا بیشترین مقاومت را در برابر خوردگی دارند. اگر محیط خشک باشد، می‌توان از بسیاری از فلزات و آلیاژها مانند فولاد زنگ نزن یا آلومینیم بدون کاربرد روش‌های حفاظتی استفاده کرد. از طرف دیگر در محیط‌های مرطوب، می‌توان از مواد ارزان قیمتی مانند فولاد کربنی دارای پوشش‌های حفاظتی استفاده نمود. برای شرایط دارای دماها و فشارهای بالا، بهتر است که به‌جای کاربرد پوشش‌های حفاظتی، ماهیت مقاومت در برابر خوردگی ماده را افزایش داد. علاوه بر آن اختلاف‌های ساختاری و گالوانیک مواد مختلف که در یک پروژه به کار می‌روند، اهمیت بسیار زیادی دارند، زیرا کاربرد یک ماده در سازه‌ها، معمولاً اقتصادی نیست. عواملی که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد، جزئیات قابل توجه مشخصه‌های محیط خورنده در هنگام انتخاب مواد می‌باشند.

خلوص مواد شیمیایی در محیط

خلوص مواد شیمیایی باید بررسی شود، زیرا حتی مقادیر جزئی از ناخالص‌ها می‌توانند منجر به تسریع خوردگی شوند، برای مثال وجود مقادیر بسیار کم وانادیم یا کروم در اسید نیتریک، باعث تشدید خوردگی می‌گردد. سدیم و وانادیم اغلب به فیلم‌های پسیو محافظ حمله کرده و منجر به تشکیل ترکیبات دارای نقطه ذوب پایین مانند V_2O_5 (۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) و سولفات سدیم می‌شوند که در نهایت باعث ایجاد تخریب‌های بین کریستالی می‌گردند. گاهی اوقات تشکیل کاربیدها منجر به ایجاد تغییراتی در ترکیب آلیاژ شده و تشکیل ترک در داخل زمین را به دنبال دارند، برای مثال رسوب دادن

کاربیدها کروم در آلیاژهای نیکل - کروم در یک اتمسفر احیاکننده پس از اکسیداسیون که منجر به ایجاد خوردگی «زوال سبز»[۱۷۹] می گردد.

غلظت الکترولیت

غلظت پایین (رقیق بودن محلول‌ها) همیشه مانع از ایجاد خوردگی نمی‌شود، برای مثال محلول اسید سولفوریک ٪۱۰، خورنده‌تر از محلول اسید سولفوریک ٪۹۰ است.

ماهیت الکترولیت

اثرات تلاطم و حضور ذرات جامد در سیال و همچنین وجود نواحی راکد در مسیر جریان مایع، عواملی هستند که باید در طول انتخاب مواد در نظر گرفته شوند.

اثر محصولات خوردگی

محصولات خوردگی نیز باید در نظر گرفته شوند، برای مثال یون‌های مس می‌توانند از ظروف مسی به درون غذا نفوذ کرده و یون‌های سرب می‌توانند از لوله‌های سربی به درون آب نفوذ کنند، که هر دو ماده سمی هستند.

تغییرات دمایی

به طور کلی، افزایش دما باعث افزایش خوردگی می‌شود، البته استثنائاتی نیز وجود دارد.

حضور اکسیژن

حضور و گاهی اوقات عدم حضور اکسیژن باعث خوردگی می‌شود، برای مثال محلول اسید سولفوریک ٪۲ منجر به ایجاد خوردگی در فولادهای زنگ نزن آستنیتی حتی در صورت عدم حضور اکسیژن می گردد، زیرا در حضور اکسیژن، سطح فولاد پسیو خواهد شد؛ اما در مورد آلیاژهای مس - نیکل، برعکس این موضوع مشاهده می‌شود. همچنین حضور اکسیژن زمینه ایجاد خوردگی فرسایشی است که عمدتاً از طریق تشکیل رسوبات اکسیدی (مانند زنگ آهن) در اثر سایش دو سطح فلز نزدیک به هم در معرض لرزش ایجاد می گردد. با افزایش رطوبت، کاهش میزان لرزش و بار یا استفاده از یک پوشش پیوندی مانند MoS_2 می‌توان از ایجاد خوردگی فرسایشی جلوگیری کرد.

پیل‌های غلظتی اکسیژن

در طول مرحله طراحی باید به نقاط کور توجه کرد تا غلظت اکسیژن در سرتاسر سازه یکسان بوده و به‌واسطه تفاوت غلظت، پیل‌های خوردگی ایجاد نشود.

1 □□ □□□□□□□□□□ 7 9

اثرات تداخل

جریان‌های سرگردان در زمین نیز منجر به ایجاد خوردگی می‌گردند؛ بنابراین منشأ آنها باید مشخص شده و روش‌های مناسب برای پیشگیری از این نوع خوردگی به کار رود.

در مورد عوامل فوق‌الذکر، سه روش اصلی برای به کارگیری فلزات در پروژه‌های ساختمانی وجود دارد:

الف) فلزات خالص

فلزات خالص، مقاومت به خوردگی بالاتری دارند. حتی مقادیر جزئی از ناخالصی‌ها می‌توانند منجر به تشدید خوردگی گردند، برای مثال ۰/۰۲درصد آهن در آلومینیم باعث کاهش مقاومت به خوردگی آن می‌شود.

ب) آلیاژها

مقاومت به خوردگی و همچنین استحکام بسیاری از فلزات را می‌توان از طریق آلیاژسازی بهبود داد، برای مثال فولادهای زنگ نزن حاوی ۱۲تا ٪۱۸ کروم هستند که با ایجاد یک فیلم اکسیدی پیوسته بر روی سطح، از خوردگی بیشتر فولاد جلوگیری کرده و امکان استفاده از آن در بسیاری از قطعات و تجهیزات شامل پایه توربین‌ها، اجزا مقاوم در برابر حرارت و غیره را فراهم می‌کند. فولادهای زنگ نزن در بعضی از محیط‌ها حساس به خوردگی بوده و بنابراین همیشه زنگ نزن نیستند. عناصر آلیاژی دیگر مانند آلومینیم، نیکل، تیتانیم، مولیبدن و غیره نیز تشکیل یک فیلم اکسیدی محافظ می‌دهند و تنگستن، تانتالوم، نیوبیوم، تیتانیم و غیره، تشکیل کاربیدهای محافظ می‌دهند، درحالی‌که، آلومینیم، بریلیم، سیلیسیم و غیره، بر روی سطح مس تشکیل اکسیدهای پایدار داده و از خوردگی بیشتر زمینه جلوگیری می‌کنند. مثال دیگر سیم نیکل - کروم است که افزودن ۰/۰۱درصد سریم، طول عمر آن را از طریق قفل کردن اکسید با لایه رویی ۱۰ برابر افزایش می‌دهد؛ مقادیر جزئی بریلیم و کلسیم در آلیاژ مگنوکس[۱]از احتراق جلوگیری می‌کند؛ بعضی از عناصر آلیاژی، تشکیل اکسیدهای با نقطه ذوب پایین می‌دهند.

ج) توسط آنیل کردن

عملیات حرارتی مانند آنیل کردن، به کاهش تنش‌های داخلی کمک کرده و خوردگی را کاهش می‌دهد.

پوشش‌های حفاظتی

سدهای فیزیکی در برابر خوردگی، به شکل فیلم یا پوشش بر روی سطوح فلزی اعمال می‌شوند. لازم است که پوشش‌ها، چسبندگی زیادی به سطح داشته باشند که برای دستیابی به این چسبندگی، نیاز به عملیات آماده‌سازی اولیه مناسب سطح وجود دارد. در اکثر موارد، پوشش باید در محیط خورنده، واکنش نداده و مقاوم به تخریب‌های مکانیکی باشد. میزان حفاظت پوشش، رابطه عکس با تخلخل یا نفوذپذیری آن دارد. روش‌های عمومی اعمال پوشش‌ها، استفاده از رنگ‌های آلی یا غیرآلی، الکترولیز و غوطه‌وری گرم، پسیو کردن سطح از طریق تشکیل یک فیلم مولکولی محافظ از اکسیدهای آندی یا به کار گرفتن بازدارنده‌ها و غیره می‌باشد.

1 □□□ □□□□□□□ 8 0

فیلم‌های اکسیدی محافظ و پسیو شدن

اعمال جریان خارجی یا فراهم کردن یک محیط اکسیدکننده به منظور افزایش ضخامت فیلم‌های اکسیدی طبیعی، یکی از روش‌های اصلی یک سطح مقاوم‌تر در برابر خوردگی است که پسیو شدن نامیده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، پسیو شدن، تبدیل یک سطح فعال فلز به یک سطح پسیو از طریق تشکیل فیلم نازک محافظ، چسبنده و غیرمتخلخل بر روی سطح می‌باشد.
بعضی از فلزات و آلیاژهای فعال در محیط‌های خاصی، واکنش‌پذیری شیمیایی خود را از دست داده و تبدیل به مواد بی‌نهایت خنثی می‌گردند، برای مثال سطوح آلومینیم، قلع، کروم، آهن، نیکل، تیتانیم و بسیاری از آلیاژهای آنها وقتی که در معرض اتمسفر یا محیط‌های اکسیدکننده قرار می‌گیرند، تبدیل به اکسید می‌شوند. ماهیت غیرمتخلخل این لایه‌های اکسیدی، مانع از خوردگی بیشتر آنها شده و در صورت صدمه دیدن، بسیار سریع ترمیم می‌شوند. اما تغییر ماهیت محیط (برای مثال تغییر در غلظت ترکیبات خورنده فعال مانند یون‌های کلرید و سولفات) باعث تبدیل حالت پسیو به حالت فعال شده و فرایند شکست فیلم پسیو را تسریع می‌کند، درحالی‌که، کرومات‌ها و فسفات‌ها، عملکرد ترمیم لایه پسیو را بهبود می‌دهند. تخریب یک فیلم پسیو از قبل موجود می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه نرخ خوردگی (تا حدود ۱۰۰۰۰۰ برابر) شود. خواص مقاومت به خوردگی فیلم اکسیدی، به خواص فیلم بستگی دارد، برای مثال:

الف) ضخامت و نفوذپذیری در برابر محیط
ب) چسبندگی به فلز پایه
ج) مقاومت در برابر حمله شیمیایی
د) استحکام مکانیکی
ه) توانایی ترمیم عیوب ایجاد شده در فیلم

فلزات حساس به خوردگی را می‌توان از طریق آلیاژسازی آنها با یک یا چند فلز پسیو و مقاوم به خوردگی، پسیو کرد، برای مثال آهن توسط آلیاژسازی با فلزاتی مانند نیکل، کروم و مولیبدن، پسیو خواهد شد. غوطه‌ور کردن فلزات به درون محلول‌های شیمیایی یا اسپری کردن این مواد بر روی سطوح فلزی به منظور تشکیل یک پوشش عایق (مانند استفاده از این فسفات‌ها و کرومات‌ها برای تشکیل پوشش‌های تبدیلی کروماتی)، روشی متداول برای پسیو کردن است. ضخامت پوشش‌های فسفاتی، از ۱ تا ۱۰ میکرومتر متغیر می‌باشد؛ این پوشش‌ها، پایه مناسبی برای رنگ‌ها و کاهش اصطکاک به‌ویژه در طول کار سرد می‌باشند. فلزاتی مانند آلومینیم، روی، کادمیم و فلزات یا پوشش‌هایی مانند مس، نقره، قلع یا حتی پوشش‌های فسفاتی، در درون اسید کرومیک یا محلول‌های کرومات غوطه‌ور شده تا تحت حفاظت بیشتری در برابر خوردگی قرار بگیرند. کرومات‌ها نیز پایه مناسبی برای رنگ‌ها هستند، برای مثال روی، کادمیوم و آلومینیم پس از اینکه با کرومات پوشش داده شدند، نیاز به آماده‌سازی سطحی بیشتری دارند. ضخامت لایه کرومات، معمولاً ۰/۵ میکرومتر بوده و توانایی خود ترمیمی در مناطق آسیب دیده از پوشش را دارند؛ اما سمی، خطرناک و سرطان‌زا می‌باشد، بنابراین برای سلامت عمومی و محیط زیست مضر است.
فولاد می‌تواند از طریق قرار گرفتن در اسید نیتریک پسیو شود؛ اما افزودن کروم، نیکل، مولیبدن در محیط‌های حاوی کلر، هنوز مورد نیاز خواهد بود، زیرا این عناصر در برابر حمله کلریدها مقاوم هستند. آلومینیم و آلیاژهایش می‌توانند از طریق قرار گرفتن به‌عنوان آند در محلول‌های اسید سولفوریک، اسید کرومیک یا اسید اگزالیک، بیشتر اکسید شوند. پوشش اکسید

آلومینیم تولید شده می‌تواند با بخار آب یا با آب جوش یا محلول‌های دیگر، عایق‌بندی شده و تخلخل‌هایش بسته شود که در نتیجه تبدیل به پوششی بسیار محافظ و عایق می گردد. ضخامت این پوشش باید ۱۰ میکرومتر در داخل ساختمان‌ها، ۲۰ میکرومتر در شرایط اتمسفری و ۲۵ میکرومتر در شرایط اتمسفر خورنده باشد، درحالی‌که، وقتی این پوشش‌ها رنگ می‌شوند، ضخامت آنها از ۲۰ تا ۴۰ میکرومتر متغیر خواهد بود.

پوشش‌های حاوی فلزات، آلیاژها یا مواد رسانا

فلزات به کار رفته برای پوشش‌دهی فلزات دیگر، یا نجیب‌تر از فلز پایه هستند یا فعال‌تر از آن.

الف) استفاده از فلزات نجیب‌تر در پوشش‌های فلزی

مثال‌هایی از فلزات نجیب‌تر، آبکاری طلا یا نقره بر روی مس یا قلع، سرب، کروم یا نیکل - کروم بر روی فولاد می‌باشند. در این نوع پوشش‌ها، وقتی که عیبی در پوشش وجود داشته باشد (مانند تخلخل، ترک و غیره)، فلز زمینه خورده شده و می‌تواند به دلیل تخریب‌های مکانیکی ناگهانی خطرناک شود؛ بنابراین پوشش باید پیوسته و دارای کیفیت بالا باشد.

ب) استفاده از فلزات فعال‌تر در پوشش‌های فلزی

در استفاده از فلزات فعال‌تر برای پوشش دادن زمینه‌های فلزی، این تخریب‌ها منجر به ایجاد مشکل نمی‌شود، زیرا فلز به کار رفته در پوشش، به‌صورت تدریجی خورده می‌شوند. سطوح فلزات فعال‌تر نیز می‌توانند اکسید شده و تبدیل به یک لایه کروماتی یا فسفاتی شوند که در نتیجه پوششی دو لایه با مقاومت به خوردگی بیشتر ایجاد می گردد.

پتانسیل اکسیداسیون آهن ۲ بار مثبت (Fe^{2+}) به آهن ۳ بار مثبت (Fe^{3+})، ۰/۷۷- ولت است. روی، آلومینیم، قلع و سرب در موقعیت‌های بالاتری در سری الکتروشیمیایی قرار دارند و بنابراین نسبت به خوردگی توسط اکسیژن حساس‌تر بوده و به‌عنوان آند عمل می کنند. بنابراین آهن در اثر خورده شدن فلز رویی، سالم باقی می‌ماند. این مورد، نمونه از حفاظت فداشونده است. چند فرایند برای اعمال پوشش‌های فلزی بر روی سطح فولاد وجود دارد.

۱) غوطه‌وری گرم

فلز پایه در این فرایند، در درون حمام فلز مذاب غوطه‌ور شده و به‌مدت زمان کافی در آن نگه داشته می‌شود. پس از آن، فلز پایه از حمام فلز مذاب بیرون کشیده شده و تا دمای اتاق سرد می‌شود. فیلم نازکی از فلز محافظ، محکم به سطح فلز پایه می‌چسبد. معمولاً پوشش‌های روی، قلع و سرب توسط این روش ایجاد می‌شوند. فرایند پوشش‌دهی روی، گالوانیک کردن و فرایند پوشش‌دهی قلع، قلع اندود نامیده می‌شود.

۲) آبکاری

فلز پایه در این روش، در محلول نمکی که حاوی یون‌های فلزی پوشش است غوطه‌ور می‌شود. صفحه فلزی پایه، به‌عنوان کاتد عمل کرده و یون‌های فلز در محلول نمکی را جذب می کند. معمولاً گرافیت نقش آند را دارد. وقتی که جریان از محلول عبور

می‌کند، یون‌های فلزی بر روی سطح کاتد نشانده می‌شوند و تشکیل فیلمی محافظ بر روی سطح می‌دهند. چندین فلز مانند نیکل، کادمیم، قلع، طلا، مس، کروم و غیره را می‌توان با این روش بر روی فلز پایه پوشش داد.

۳) اسپری فلز

در این روش، مذاب فلزی که باید پوشش داده شود، بر روی سطح فلز پایه اسپری شده و در ادامه خشک می‌شود. بنابراین فیلمی نازک از فلز پوشش داده شده، بر روی سطح فلز پایه تشکیل می‌گردد. یکی از مهم‌ترین مزایای روش اسپری فلزی این است که با این روش می‌توان بر روی اجسام دارای سطح نهایی نیز فیلم محافظی اعمال کرد. عمدتاً پوشش‌های آلومینیم و روی با این روش ایجاد می‌شوند.

٤) کلدینگ فلز[۱۸۱]

گاهی اوقات فلزات یا آلیاژهای گران‌قیمت، از طریق پوشش‌دهی با فیلمی ضخیم از فلزات محافظ (توسط روش پرس یا روش نورد گرم) حفاظت می‌شوند. روکش ضخیم اغلب کلد نامیده شده و به این روش، کلدینگ گفته می‌شود. ماده کلد شده، علاوه بر مقاومت به خوردگی کلد، دارای استحکام آن نیز می‌شوند. یکی از مثال‌های این روش، دورالومین[۱۸۲]حاوی ٪۴ مس، ٪۰/۵ منیزیم و ٪۰/۵ منگنز با مقادیر کم سیلیکون و آهن می‌باشد. ماده کلدینگ، آلومینیم است.

۵) سمنتاسیون

در این روش، فلز پایه و فلز پودر شده که باید بر روی آن پوشش داده شود. تا دماهای بالا حرارت داده شده و به مدت زمانی طولانی در آن دما نگه داشته شوند تا ماده پودر شده، به درون فلز پایه نفوذ کند. در نتیجه این روش، یک لایه آلیاژ بر روی سطح فلز پایه تشکیل می‌شود. از روی، آلومینیم، سیلیکون، کروم و غیره برای تشکیل لایه‌های آلیاژی محافظ بر روی سطح فلز پایه استفاده می‌گردد.

پوشش‌های آلومینیمی عمدتاً برای حفاظت از سطح فولاد و دورالومین در اتمسفرهای گوگردی به کار می‌روند. به طور کلی، پوشش‌های آلومینیمی مانند می‌توانند از چندین فلز مانند مس، نیکل، سرب، کروم و غیره حفاظت کنند، اما خوردگی منیزیم را تشدید می‌نمایند. پوشش‌های آلومینیمی، در برابر کربنات‌ها، کرومات‌ها، استات‌ها، نیترات‌ها و سولفات‌ها در محدوده pH ۶/۴ تا ۷/۲ مقاوم هستند، اما توسط محلول‌های اسید سولفوریک (H_2SO_4)، اسید فسفریک (H_3PO_4) و اسید هیدروکلریک (HCl) و اسید نیتریک (HNO_3) رقیق به سادگی خورده می‌شوند. آلیاژهای آلومینیم نیز توسط محلول‌های قلیایی خورده می‌شوند و بنابراین معمولاً بازدارنده‌هایی مانند Na_2SiO_3و $Na_2Sr_3O_7$ برای حفاظت از ماشین‌ها و مخازن در صنایع صابون‌سازی به کار می‌روند. نرخ تخریب آلومینیم در اتمسفرهای صنعتی، در محدوده ۰ تا ۰/۵ میلی‌گرم بر دسی‌مترمربع بر روز (برای مثال در مورد محصولات غذایی) می‌باشد.

1 [illegible] 8 1
1 [illegible] 8 2

پوشش‌های روی، کاربرد گسترده‌ای در حفاظت از فولادها در شرایط اتمسفری، در برابر آب، اسیدها و غیره در بویلرهای دریایی، پروانه‌ها و سکان‌ها دارند. پسیو شدن روی معمولاً به تشکیل فیلم پیوسته بر روی سطح آن بستگی دارد. عمدتاً فیلم‌های اکسیدی، فیلم‌های کروماتی، فیلم‌های کربناتی و فیلم‌های هیدروکسیدی، به‌عنوان فیلم‌های محافظ بر سطح روی به نظر می‌رسند. اما طول عمر این پوشش‌های محافظ، به ضخامت فیلم بستگی دارد که با نرخ بسیار کمی کاهش پیدا می‌کند (۰/۰۰۰۲ اینچ در سال).

پوشش‌های قلع، چند مزیت متمایز نسبت به پوشش‌های فلزی دیگر دارند، از آنجایی که این پوشش‌ها از لحاظ ساختاری غیرفعال هستند، توسط محصولات غذایی در صورت عدم حضور اکسیدکننده‌ها خورده نمی‌شوند و آهن، نسبت به قلع تحت این شرایط کاتدی می‌باشد. قلع در برابر محلول‌های اسیدی در حضور هوا، تقریباً مقاوم است، درحالی‌که، در صورت عدم وجود هوا، هیدروژن که بر روی سطح ایجاد می‌شود، مقاومت در برابر عبور جریان را افزایش داده و خوردگی را متوقف می‌کند. پوشش قلع در مخازن حمل شیر به کار می‌رود، درحالی‌که، آب میوه‌ها، خورندگی بیشتری بر روی قلع دارند. قلع، محافظت قابل توجهی از خوردگی فولاد در برابر آب مقطر و اتمسفر ایجاد می‌کند.

مقاومت به خوردگی پوشش‌های سرب، عمدتاً به تشکیل یک لایه محافظ که در محدوده pH ۳ تا ۱۱ مؤثر است، بستگی دارد. بنابراین سرب در برابر اسید سولفوریک، اسید کرومیک و اسید فسفریک و همچنین در برابر اتمسفر مقاوم است. اما در اسیدهای هیدروکلریک، هیدروفلوئوریک، نیتریک و فرمیک و همچنین محلول‌های نیترات به آسانی خورده می‌شود.

ج) استفاده از فلزات نجیب‌تر و فعال‌تر در پوشش‌های فلزی

مثالی از ترکیب دو نوع پوشش نجیب‌تر و فعال‌تر برای ایجاد حداکثر حفاظت، پوشش به کار رفته برای سپر ماشین‌ها می‌باشد که دارای چهار لایه است: ۱- مس که در تماس با سطح فلز قرار دارد، ۲- نیکل نیمه براق، ۳- نیکل براق و ۴- کرومات دارای تخلخل‌های میکرو. این پوشش، در اثر لایه کرومات میکرو متخلخل (که حالت تزئینی دارد) به‌صورت عمدی در لایه نیکل براق خورده می‌شود.

د) استفاده از پلیمرهای هادی در پوشش‌های فلزی

اخیراً پوشش‌هایی از پلیمرهای هادی مانند پلی آنیلن، پلی پیرول، پلی تیوفن و پلی استیلن برای حفاظت از سطوح فلزی به کار رفته‌اند. پیشنهاد می‌شود که پلیمرهای هادی در سطح فلز، ایجاد حفاظت آندی کرده و باعث می‌شوند که لایه‌های اکسید آهن ضخیم‌تری تشکیل گردد و همچنین مکان‌های فعال برای وقوع خوردگی را از طریق ایجاد سد محافظ محدود می‌کنند. پلیمرهای هادی، پوشش‌های مناسبی هستند، زیرا اقتصادی و سازگار با محیط زیست بوده، حالت اکسید شده آنها پایدار است و می‌توانند به‌صورت الکتروشیمیایی سنتز شوند، بنابراین می‌توان از این پوشش‌ها برای حفاظت از پوشش‌های رنگ فسفاته و کروماته به کار رفته بر روی آهن، فولاد، روی، آلومینیم و فلزات دیگر استفاده کرد. راندمان بازدارندگی پلیمرهای هادی، نه تنها به دلیل حضور الکترون‌های π است که منجر به ایجاد جذب قوی بر روی سطوح فلزی شده و اجازه جذب شدن مواد خورنده در سطح را نمی‌دهند، بلکه حجم‌های مولکولی بزرگ آنها نیز اکثر سطح فلز را پوشش داده و منجر به ایجاد خاصیت

سد فیزیکی می‌گردد. راندمان بازدارندگی این پلیمرها، متناسب با تعداد مونومرهای موجود در یک مولکول پلیمر می‌باشد. پوشش دادن سطوح فلزی با پلیمرهای هادی، از طریق الکتروپلیمریزاسیون انجام می‌شود. پتانسیل به کار رفته برای الکتروپلیمریزاسیون باید پایین‌تر از پتانسیل انحلال فلز یا آلیاژ باشد تا فلز در ناحیه پسیو قرار گرفته و خورده نشود. پوشش‌های تک لایه، در جلوگیری از خوردگی مؤثر می‌باشند، درحالی‌که، پوشش‌های چند لایه، مؤثرتر هستند. پلیمرهایی که پیوندهای π و پیوندهای مزدوج دارند، رساناتر می‌باشند. پوشش‌های حاوی مواد غیرآلی نارسانا (برای مثال بتن، انامل شیشه‌ای، شیشه یا آجر)، نوع دیگری از پوشش‌های حفاظتی هستند. در میان این مواد، انامل‌های شیشه‌ای از خمیر شیشه (frit) ساخته می‌شوند که ترکیب یک فلز قلیایی کامپوزیتی (آلومین - ابروسیلیکات)[۱۸۲]می‌باشد. انامل‌های شیشه‌ای از فلز پایه در برابر اسیدها، قلیاها، آب، خراش و سایش و تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد محافظت می‌کنند و با تغییر فرمولاسیون آنها می‌توان حفاظت بهتری ایجاد کرد. اما در برابر اسید هیدروفلوئوریک و هیدروکسیدهای پتاسیم و سدیم که به شکل محلول داغ یا مذاب هستند، حفاظت ایجاد نمی‌کند. این پوشش‌ها تحت تنش‌های مکانیکی و حرارتی نیز دچار ترک می‌گردند.

از شیشه‌های صنعتی حاوی دی‌اکسید سیلیکون برای پوشش دادن سطوح مخازن ذخیره، راکتورها، سیستم‌های گرمایش آب، خط لوله‌ها و ولوهایی که از فولاد ساخته می‌شوند (پس از آنکه سطح زمینه، تمیز شده و تنش‌های ساختاری توسط عملیات حرارتی در دماهای بالا، حذف شده) استفاده می‌شود. شیشه‌ها، مقدار آب بسیار ناچیز جذب می‌کنند و در برابر تمام اسیدها به‌جزء اسید هیدروفلوئوریک غلیظ مقاوم هستند. شیشه‌ها در برابر محلول‌های قلیایی در دمای اتاق نیز مقاوم می‌باشند، اما مقاومت آنها با افزایش دما، کاهش پیدا می‌کند. یکی از معایب پوشش‌های شیشه‌ای، دشوار بودن تعمیر آنها می‌باشد.

پوشش‌های بتنی، سطح فلز را به دلیل قلیایی بودن زیاد، پسیو کرده و در برابر مواد شیمیایی خورنده، نفوذناپذیر هستند. پوشش‌های بتنی به واسطه قلیایی بودن بالا، سطح فلز را پسیو می‌کنند و در برابر مواد شیمیایی، نفوذناپذیر می‌باشند. پوشش‌های بتنی به دلیل وزن بالایی که دارند، به دفن خطوط لوله در زیر دریا کمک می‌کنند.

پوشش‌های حاوی مواد غیرآلی نارسانا

استفاده از پوشش‌های دارای مواد آلی نارسانا، مانند رنگ‌ها، پلاستیک‌ها، لاستیک‌ها، روشی متداول و مؤثر برای پوشش‌دهی مخازن نفت، سازه‌ها فولادی و خطوط لوله انتقال می‌باشند. پوشش‌های آلی، دو مزیت دارند: ۱- اجازه رسیدن رسوب رطوبت یا هوا به سطوح فلزی را نمی‌دهند، ۲- رنگ‌دانه‌های موجود در پوشش، به‌عنوان بازدارنده عمل کرده و بنابراین مانع از خوردگی می‌گردند. رنگ‌ها، شامل سه جزء اصلی هستند: ۱- ترکیبات آلی که عمدتاً پلیمرهای سنتزی می‌باشند که خواص شیمیایی و مکانیکی رنگ را تعیین کرده و مسئول چسبندگی رنگ به زمینه هستند، ۲- رنگ‌دانه‌ها که ایجادکننده رنگ و مقاومت به خوردگی می‌باشند، ۳- حلال‌ها که خشک شده و رنگ را جامد می‌کنند. رنگ‌دانه‌ها بر اساس خواص مقاومت به خوردگی‌شان، به سه دسته تقسیم می‌شوند: رنگ‌دانه‌های خنثی، مانند پوسته‌های اکسید آلومینیم و اکسید آهن میکایی، از رنگ در برابر عوامل خارجی مانند نور خورشید یا اشعه UV، رطوبت و غیره محافظت می‌کنند؛ رنگ‌دانه‌های بازدارنده مانند رنگ‌دانه‌های پایه سرب و کرومات‌ها، سطح فلز را پسیو کرده یا pH محیط را افزایش می‌دهند یا سطح را از اکسیژن جدا

1 [illegible] 8 3

می‌نمایند؛ و متداول‌ترین رنگ‌دانه‌ای که مکانیزم آن حفاظت کاتدی است، گرد روی می‌باشد. انتخاب صحیح رنگ با توجه به نوع فلز پایه، تمیزکاری و آماده‌سازی مناسب سطح، استفاده از روش مناسب برای اعمال رنگ و رنگ‌آمیزی تحت شرایط جوی مناسب مانند دما، رطوبت، آلودگی و غیره، برای موفقیت‌آمیز بودن عملیات اعمال رنگ دارای اهمیت زیادی می‌باشد. پوشش‌دهی سطح فلز توسط رنگ‌ها، انامل‌ها یا لاک‌ها حفاظت خوبی ایجاد کرده و از سطح فلز یا آلیاژ در برابر خوردگی محافظت به عمل می‌آورد. اما قبل از اعمال این پوشش‌ها، سطح فلز باید کاملاً تمیز شده تا روغن، گرد و خاک، ماسه، پوسته‌های اکسیدی و غیره از سطح برداشته شوند، زیرا این عوامل بر روی چسبندگی پوشش تأثیرگذار هستند. به‌علاوه، کارایی رنگ‌ها یا انامل‌ها به‌عنوان پوشش محافظ در برابر خوردگی، به روش اعمال آنها بستگی دارد. اندکی سهل‌انگاری در هرکدام از مراحل اعمال رنگ می‌تواند باعث تخریب کامل آن شود، زیرا ممکن است منجر به ایجاد ترک شود. در اعمال پوشش‌های آلی، انجام مراحل زیر ضروری می‌باشد:

الف) آماده‌سازی سطح
ب) پاشش ماسه
ج) اعمال لایه پرایمر
د) اعمال لایه نهایی
ه) پر کردن

پوشش رنگ در مرحله نهایی باید پیوسته باعث باشد تا هیچ تخلخلی در آن ایجاد نشده و در برابر نفوذ گاز و آب، نفوذناپذیر باشد. رنگ باید از نظر شیمیایی نیز پایدار باشد.

در بعضی از نواحی گرمسیری مانند خاورمیانه و آفریقا، دمای بالای محیط علاوه بر تابش شدید امواج ماورای‌بنفش (UV) می‌توانند اثرات منفی بر روی فرایند اعمال و ساخت پوشش‌های آلی داشته باشند، زیرا حلال‌ها یا اجزا فرار دیگر در پوشش‌ها، سریع‌تر از بقیه اجزا رنگ تبخیر شده و باعث ایجاد حباب‌های زیادی بر روی سطح و لایه‌های داخلی فیلم پوشش می‌شوند که در نهایت منجر به کاهش چسبندگی پوشش‌ها و کاهش قابل توجه طول عمر آنها می‌گردد. در میان این عوامل، اشعه ماورای‌بنفش، مهم‌ترین عامل در زوال پوشش‌ها می‌باشد، به خصوص اشعه UV - B در محدوده طول موج‌های ۲۹۰ تا ۳۲۰ نانومتر باعث تجزیه چسب در پوشش‌ها می‌گردد. به‌واسطه این اثر زوال اشعه ماورای‌بنفش به‌ویژه به روی چسب پوشش‌ها، باید ترکیبات با انرژی پیوندی بالا به‌عنوان چسب پوشش ایجاد شوند تا عمر پوشش‌های رویی افزایش پیدا کند. این ترکیبات آلی، ترکیباتی دارای پیوندهای F-C، Si-O یا H-O در زنجیره‌شان هستند (مانند رزین‌های فلوئوروکربن، پلی سیلوکسان و پلی اورتان‌های اکریلیک). روش دیگر اعمال لعاب‌ها جاذب اشعه UV به‌صورت یک لایه نازک بر روی لایه رویی است که از نفوذ اشعه ماورای‌بنفش به درون لایه‌های دیگر جلوگیری کرده و حساسیت چسب پوشش را در برابر تخریب کاهش می‌دهد. تثبیت‌کننده‌های نور شامل جاذب‌های اشعه ماورای‌بنفش و رادیکال‌ها، بخش‌های اصلی لعاب‌ها جذب‌کننده اشعه ماورای‌بنفش می‌باشند. بنابراین یک سیستم چند لایه برای مثال پرایمری اپوکسی و پوشش رویی پلی‌اورتان اکریلیک و یک لعاب جاذب اشعه ماورای‌بنفش بر روی آن، در جلوگیری از اثرات مخرب این اشعه مؤثرتر خواهد بود. پرایمر اپوکسی باید شامل یک رزین اپوکسی مناسب، یک ماده عمل آورنده و همچنین یک حلال با نقطه جوش بالا باشد و با استفاده از یک سیستم کف‌زدا با کیفیت بالا می‌توان آن را بر روی سطوح فولادی در دماهای بالا نیز اعمال کرد، علاوه بر آن یک لعاب جذب‌کننده اشعه

ماورای‌بنفش اعمال می‌گردد که متشکل از رزین هیدروکسیل اکریلیک، جاذب ماورای‌بنفش، حلال و افزودنی‌های دیگر نیز است که تا ٪۹۵ از نفوذ اشعه ماورای‌بنفش جلوگیری کرده و باعث می‌شود پوشش به مدت ۲۰۰۰ ساعت در تست زوال در هوا دوام داشته باشد.

پوشش‌های حاوی مواد آلی نارسانا

گاهی اوقات، محیط، خورنده به نظر می‌رسد و ممکن است برای حفاظت از فلز و کاهش نرخ خوردگی نیاز به تغییر محیط باشد. پایین آوردن دما و یا سرعت سیال معمولاً باعث کاهش نرخ خوردگی می‌گردد. در بسیاری از مواقع، افزایش یا کاهش غلظت بعضی از ترکیبات در محلول، تأثیر مثبتی خواهد داشت؛ برای مثال با این کار احتمال پسیو شدن فلز ایجاد خواهد شد. شرایط محیطی، ایجادکننده خوردگی هستند و بنابراین با تغییر این شرایط می‌توان خوردگی را کنترل کرد. به‌عنوان مثال اگر دما کاهش پیدا کند، نرخ خوردگی نیز کاهش پیدا خواهد کرد. در چند مورد، نتیجه برعکس می‌شود؛ برای مثال جوشیدن آب تازه یا آب دریا منجر به کاهش حلالیت اکسیژن در آنها می‌شود و بنابراین نرخ خوردگی در این حالت، کاهش می‌یابد. حضور گازهایی مانند دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن و غیره در اتمسفر نیز نرخ خوردگی فلزات را افزایش می‌دهد، زیرا این گازها در آب حل شده و تشکیل اسیدهای خورنده می‌دهند. تغییر در pH محلول هم بر نرخ خوردگی تأثیرگذار است، زیرا با کاهش pH، آزاد شدن گاز هیدروژن می‌تواند جایگزین یونیزاسیون اکسیژن در واکنش کاتدی باشد. افرودن مواد بازدارند یا کندکننده خوردگی در مقادیر کم نیز بر نرخ خوردگی تأثیرگذار است. برای جلوگیری از وقوع خوردگی می‌توان محیط را از طریق چندین روش اصلاح کرد.

تغییر عوامل محیطی تسریع‌کننده خوردگی

واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی در حال وقوع در فصل مشترک محلول/فلز، از طریق یون‌ها یا مولکول‌های جذب شده بر روی سطح انجام می‌شوند. این یون‌ها یا مولکول‌های جذب شده، پتانسیل فلز را تغییر داده و به انحلال آن کمک می‌کنند، بنابراین بازدارنده‌ها با جذب بر روی سطح، مانع از جذب آنها شده و پتانسیل فلز را تغییر می‌دهند و با جلوگیری از ایجاد شرایط پایدار برای انحلال فلز، منجر به کاهش نرخ خوردگی می‌گردند. پارامترهای دیگر نرخ خوردگی، دما، فشار، نرخ سیال و غیره هستند. حذف مواد شیمیایی از محیط، مؤثرترین روش است. درحالی‌که، واکنش آندی، انحلال فلز است، واکنش کاتدی، یک یا چند واکنش احیا هیدروژن، اکسیژن و یا ترکیبات دیگر می‌باشد. واکنش احیا هیدروژن را می‌توان با افزایش pH میزان کنترل کرد و اگر pH به دلیل ملزومات سیستم، قابل تنظیم نباشد، می‌توان بازدارنده‌هایی که باعث افزایش پتانسیل شده و مانع از احیا هیدروژن می‌گردند را به سیستم اضافه کرد. با این روش، رسیدن یون‌های هیدروژن به سطح دشوار شده و نرخ واکنش آندی نیز به دنبال آن کاهش پیدا می‌کند. برای حذف اکسیژن به منظور جلوگیری از احیا اکسیژن می‌توان از حرارت دادن، خلاء استفاده از مواد شیمیایی یا کاربرد کاتالیست‌ها استفاده کرد. اما لازم به ذکر است که محدود کردن میزان اکسیژن، پسیو شدن فلزات را نیز محدود می‌کند. علاوه بر آن، حضور دی‌اکسید کربن نیز از طریق کاهش pH در اثر تشکیل اسید کربنیک و همچنین از طریق رسوب دادن کربنات، منجر به ایجاد خوردگی می‌گردد. از طریق حذف گازهای دی‌اکسید کربن یا

رسوبات کربنات می‌توان خوردگی را کنترل کرد. در هر دو مورد حذف اکسیژن و دی‌اکسید کربن، استفاده از بازدارنده‌ها، هدایت محیط را نیز افزایش داده و ممکن است که منجر به ایجاد خوردگی شوند، در نتیجه این کار باید با دقت انجام شود. گاهی اوقات حذف مواد شیمیایی خورنده به دلیل ماهیت فرایند، امکان‌پذیر نیست، برای مثال اگر باید از محلول نمکی استفاده شود، تمام روش‌های پیشگیری از خوردگی باید حضور کلرید در محیط را پیش‌بینی کنند. تنظیم فصل مشترک فلز/محلول را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های اکتیو یا پسیو انجام داد. در تکنیک پسیو، از رنگ یا پوشش‌دهی یا پسیو کردن سطح از طریق تشکیل فیلم مولکولی نازک تولید بازدارنده‌ها و تغییر پتانسیل فلز استفاده می‌شود. اگر این تغییر پتانسیل از طریق اعمال یک جریان خارجی به جای استفاده از بازدارنده‌ها انجام شود، روش به کار رفته اکتیو خواهد بود.

الف) خارج کردن هوا

حضور مقادیر زیاد اکسیژن، خطرناک است، زیرا منجر به افزایش نرخ خوردگی خواهد شد. هدف از خارج کردن هوا، حذف اکسیژن محلول می‌باشد. برای حذف اکسیژن از محیط، از عوامل احیاکننده مانند سولفیت سدیم (Na_2SO_3) هیدرازین و غیره استفاده می‌گردد.

$$2Na_2SO_3 + O_2 \rightarrow 2Na_2SO_4$$

$$N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$$

ب) رطوبت‌زدایی

در این روش، رطوبت هوا از طریق پایین آوردن رطوبت نسبی محیط حذف می‌شود. این کار را می‌توان با افزودن ژل سیلیکا که جاذب رطوبت است، انجام داد.

ج) حذف اسیدها یا نمک‌ها

اگر محیط به اندازه کافی اسیدی باشد، از طریق فراورش سطح فلز با آهک می‌توان از خوردگی جلوگیری کرد. علاوه بر آن، نمک‌های محیط اطراف با استفاده از رزین‌های تبادل یونی حذف می‌گردند.

بازدارنده‌ها

یکی از راه‌های ممانعت از خوردگی فلزات، افزودن بازدارنده‌های شیمیایی است. بازدارنده‌ها موادی هستند که وقتی در غلظت‌های نسبتاً کم به محیط اضافه می‌شوند، خورندگی آن را کاهش می‌دهند. نوع بازدارنده به کار رفته، به فلز یا آلیاژ و همچنین محیط بستگی دارد. بازدارنده‌ها به حمام‌های تمیزکاری، بویلرهای بخار، تجهیزات پالایشگاه، عملیات شیمیایی، دیگ‌های بخار، سیستم‌های سرمایش مانند رادیاتور اتومبیل‌ها و غیره افزوده می‌گردند. چندین مکانیزم محتمل برای عملکرد بازدارنده‌ها پیشنهاد شده است. بعضی از بازدارنده‌ها، با چسباندن خودشان به سطح در حال خورده شدن، فقط پوششی بر روی سطح ایجاد کرده و در واکنش‌های اکسیداسیون یا احیا تداخل به وجود می‌آورند. به‌عبارت‌دیگر، این بازدارنده‌ها بر روی مکان‌های آندی و کاتدی جذب شده و از جذب ترکیبات خورنده و انحلال یون‌های فلزی جلوگیری می‌کنند. دیگر

بازدارنده‌ها، به تشکیل یک فیلم محافظ کمک می‌کنند که سطح را می‌پوشاند، یا پوشش محافظ موجود بر سطح را پسیو می‌کنند و بعضی دیگر از بازدارنده‌ها از طریق واکنش دادن با ترکیبات خورنده (مانند اکسیژن محلول) و حذف آنها از محلول، فقط فعالیت این ترکیبات خورنده در سطح را کاهش می‌دهند. بازدارنده‌های آندی، با یون‌های آند واکنش داده و رسوبات نامحلولی ایجاد می‌کنند که به فرایند پسیو شدن کمک می‌نمایند. رسوبات تشکیل شده، بر روی فلز آندی جذب شده و تشکیل فیلمی محافظ می‌دهند که در نتیجه نرخ خوردگی کاهش پیدا می‌کند. افزودن بازدارنده‌های آندی تا یک حد خاص به دلیل افزایش هدایت محلول، باعث افزایش نرخ خوردگی می‌گردد، درحالی‌که، پس از این حد، فلز پسیو شده و خوردگی کاهش می‌یابد. نمونه‌های بازدارنده‌های آندی، قلیاها، مولیبدات‌ها، فسفات‌ها، کرومات‌ها و غیره هستند. بازدارنده‌های کاتدی، در واکنش‌های کاتدی تداخل ایجاد می‌کنند که بسته به محیط، دو نوع دارند. احیا یون هیدروژن در محلول‌های اسیدی را می‌توان با کند کردن نفوذ یون‌های H^+ در کاتد کنترل کرد. این کار را می‌توان با افزودن بازدارنده‌های آلی مانند آمین‌ها و پیریدین انجام داد. این ترکیبات بر روی سطح فلز کاتد جذب شده و به‌عنوان لایه محافظ عمل می‌کنند. واکنش کاتدی در محلول‌های خنثی، تشکیل یون‌های هیدروکسید به‌وسیله احیا اکسیژن است که با حذف کردن اکسیژن از محیط از طریق افزودن ترکیبات احیاکننده مانند Na_2SO_3 یا از طریق تخلیه هوا می‌توان مانع از انجام آن شد. بازدارنده‌های فلز بخار، بازدارنده‌های آلی هستند که به آسانی کندانس شده و تشکیل یک لایه محافظ بر روی سطح فلز می‌دهند (مانند دی‌سایکلو هگزیل آمونیوم نیتریت). این بازدارنده‌ها برای حفاظت از تجهیزاتی به کار می‌روند که توسط کشتی‌ها حمل می‌شوند. بازدارنده کندانس شده را می‌توان به سادگی از روش روی سطح فلز پاک کرد.

برای ایجاد حفاظت مناسب با استفاده از بازدارنده‌ها به‌ویژه در سیستم‌های بسته باید به چندین پارامتر مهم توجه کرد: نوع فلز به کار رفته، ترکیب شیمیایی محیط خورنده، pH محلول، دسترسی محلول به اکسیژن، حضور میکروارگانیسم‌ها، دمای محلول و طراحی سازه.

محلول‌های اسیدی، کاربرد گسترده‌ای در تمیزکاری فولاد نرم (اسیدشویی فولاد) دارند و فولاد نرم نیز معمولاً در ساخت مخازن ذخیره و محفظه‌های واکنش به کار می‌رود. معمولاً لایه اکسیدی یا هیدروکسی بر روی سطح فلز در محلول‌های اسیدی وجود ندارد که در نتیجه مواد خورنده و همچنین بازدارنده‌ها به آسانی به سطح می‌رسند. اکثر بازدارنده‌های اسیدی، ترکیبات آلی و شامل اتم‌های مختلف هستند که راندمان بازدارندگی آنها به ترتیب صعودی $P>S>N>O$ می‌باشد. بازدارنده‌ها بسته به دانسیته الکترونی الکترون‌دهنده، قطر اتم، آروماتیک بودن، اثرات استقرار فضایی اتم‌ها، طول زنجیره آکلیل و غیره یا بر روی مکان‌هایی از سطح که در آنها اتم‌های فلزی در حال انحلال هستند، یا در مکان‌های کاتدی یا در هر دو مکان جذب می‌شوند. مولکول‌های بازدارنده در محیط‌های اسیدی، پروتون‌دار شده و از طریق سولفات‌های (برای مثال) جذب شده از قبل، بر روی سطح فلز دارای بار مثبت جذب می‌شوند. لایه حافظتی که بازدارنده‌های اسیدی ایجاد می‌کنند، مانع از رسیدن مواد خورنده به سطح شده و انرژی اکتیواسیون برای انجام واکنش‌های شیمیایی بین سطح فلز و مواد خورنده‌ای که به سطح می‌رسند را افزایش می‌دهد. وقتی که فلز در معرض محلول اسید هیدروکلریک قرار می‌گیرد، سه گزینه وجود دارد:

۱- اگر فلز دارای بار نسبی مثبت باشد، آنیون‌هایی مانند کلر بر روی سطح جذب می‌شود و بازدارنده و مولکول‌های آب که در محیط اسیدی، پروتون‌دار هستند، از طریق یون‌های کلر به سطح فلز متصل می‌گردند.

۲- اگر فلز دارای بار نسبی منفی باشد، مولکول‌های آب و بازدارنده که در محیط اسیدی، پروتون‌دار هستند، مستقیماً بر روی سطح فلز جذب می‌شوند.

۳- اگر فلز از لحاظ بار، خنثی باشد، جذبی بر روی سطح اتفاق نمی‌افتد.

در محیط‌های بازی یا خنثی، علاوه بر یون‌های هیدروکسید، بازدارنده‌ها نیز بر سطح فلز جذب می‌شوند. یون‌های هیدروکسید با یون‌های فلز، تشکیل رسوب می‌دهند که سطح فلز را به‌صورت جزئی می‌پوشاند. وظیفه بازدارنده‌های به کار رفته پر کردن تخلخل‌ها و سوراخ‌های داخل رسوبات هیدروکسید فلزی است و بنابراین بازدارنده‌های فلز اکسید نامیده می‌شوند، مانند فسفات‌ها که از طریق تشکیل فسفات‌های فلزی، در فیلم رسوبی شرکت می‌کنند.

از طرف دیگر، بعضی از بازدارنده‌ها مانند کرومات‌ها یا نیترات‌ها، مستقیماً در تشکیل فیلم شرکت نمی‌کنند، بلکه به ایجاد خاصیت پیوستگی و حفاظت در فیلم کمک می‌کنند. کرومات‌ها، نیترات‌ها، بنزوات‌ها، برات‌ها و فسفات‌ها، بازدارنده‌های مؤثری برای جلوگیری از خوردگی فولاد آنیل شده هستند، درحالی‌که، کرومات‌ها، نیترات‌ها و فسفات‌ها، در جلوگیری از خوردگی چدن مؤثرتر می‌باشند؛ بنابراین در سیستمی شامل هر دو فلز چدن و فولاد آنیل شده، نمی‌توان از بنزوات‌ها و برات‌ها استفاده کرد.

آلودگی‌ها، روغن‌ها و حتی فیلم‌های اکسیدی و هیدروکسیدی، جذب بازدارنده‌ها بر روی سطح را دشوار می‌کنند؛ بنابراین قبل از اعمال بازدارنده‌ها باید سطوح فلز را به طور کامل تمیز کرد. همچنین نوع ترکیبات خورنده در تعیین نوع بازدارنده به کار رفته اهمیت دارد. برای مثال اگر کلریدها در محیط حضور داشته باشند، بازدارنده‌ها باید پتانسیل فلز را در محدوده ایمن در برابر خوردگی حفره‌ای یا در محدوده پسیو نگه داشته شود که در نتیجه این بازدارنده‌ها، بازدارنده‌های آندی یا پسیوکننده نامیده می‌شوند (مانند کرومات‌ها و نیتریت‌ها). اگر غلظت یون‌های دیگر در محیط مانند سولفات‌ها که بسیار خورنده هستند، در pH ۲، ۳ برابر غلظت کلریدها، در pH ۷، ۱۰ برابر غلظت کلریدها و در pH ۱۲ نیز ۲ برابر غلظت کلریدها باشد، می‌تواند به کاهش خوردگی حفره‌ای ناشی از کلریدها کمک کند. همچنین در pH ۷، اگر غلظت کرومات‌ها، ۷ برابر غلظت کلریدها باشد، یا غلظت نیترات‌ها، ۰/۴ برابر غلظت کلریدها باشد و غلظت کلرات‌ها، نصف غلظت کلریدها باشد، موارد مشابه با سولفات‌ها مشاهده می‌شود. پارامتر غلظت مهم است، به نحوی که غلظت بازدارنده آلی در شرایط اسیدی، رابطه مستقیم با پوشش‌دهی سطح آنها دارد، درحالی‌که، غلظت بازدارنده‌های آندی برای پسیو کردن سطح و جلوگیری از خوردگی، باید بیشتر از یک محدوده مشخص باشد، در غیر این صورت نرخ خوردگی افزایش پیدا خواهد کرد.

بازدارنده‌ها وقتی اقتصادی هستند که در مقادیر کم مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای پایین نگه داشتن مقدار بازدارنده، لازم است به نوع بازدارنده به کار رفته و همچنین روش اعمال آن توجه شود. همچنین ضروری است که مکانیزم‌های محتمل خوردگی در غیاب بازدارنده‌ها و مکانیزم‌های پیشگیری از خوردگی در حضور بازدارنده‌ها برای به دست آوردن حداکثر راندمان مشخص شوند. راندمان بازدارنده، به ساختار مولکولی و حضور گروه‌های قطبی در مولکول‌ها بستگی دارد.

اما راندمان یک بازدارنده، به ویژگی‌های محیط به کار رفته در آن، نوع و ساختار فلز، دما، غلظت بازدارنده، زمان غوطه‌وری و غیره نیز وابسته است. اگر راندمان بازدارندگی با بالا رفتن دما، افزایش پیدا کند، انرژی اکتیواسیون در حضور بازدارنده‌ها کم می‌شود و برعکس. همچنین مستقل از دما، اگر انرژی اکتیواسیون در حضور بازدارنده‌ها افزایش پیدا کند، این موضوع بدین معنی است که بازدارنده‌ها بر روی سطح، جذب فیزیکی شده‌اند، درحالی‌که، کاهش انرژی اکتیواسیون در حضور بازدارنده‌ها، به معنی انجام فرایند جذب، به‌صورت شیمیایی می‌باشد.

جذب فیزیکی به دلیل برهمکنش الکترواستاتیک بین سطح باردار فلز و یون‌های موجود در محلول رخ می‌دهد. اگر سطح فلز، بار مثبت داشته باشد، جذب آنیون‌ها آسان‌تر خواهد بود. اما کاتیون‌ها می‌توانند از طریق آنیون‌های اسید نیز به سطح متصل شوند. از طرف دیگر، جذب شیمیایی از طریق انتقال بار یا اشتراک بار بین سطح فلز و مولکول‌های بازدارنده رُخ می‌دهد. انتقال الکترون‌ها بین سطح فلزاتی که اربیتال‌های خالی یا با انرژی کم دارند با مولکول‌های بازدارنده اتفاق می‌افتد که شامل اتم‌های دارای الکترون آزاد هستند. اگر جذب شیمیایی به پیوند درون مولکولی مانند پیوند یونی یا کووالانس تشبیه شود، جذب فیزیکی را می‌توان به پیوند بین مولکولی مانند بر همکنش‌های دو قطبی – دو قطبی یا نیروهای لندن شباهت داد. بازدارنده‌ها معمولاً از طریق جذب بر روی سطح فلزات، مانع از خوردگی می‌گردند. اگر راندمان بازدارنده با افزایش غلظت آن، زیاد شود، بازدارنده، به‌صورت جذبی عمل کرده و مکان‌های فعال بر روی سطح فلز را مسدود می‌نماید. مکانیزم‌های پیشگیری از خوردگی توسط بازدارنده‌ها را می‌توان از طریق روش‌هایی مانند پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، پلاریزاسیون خطی و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار داد. فرایند جذب، به موارد زیر بستگی دارد:

۱- ماهیت و مشخصه بار سطح فلز
۲- ساختار شیمیایی بازدارنده
۳- توزیع بار بر روی مولکول بازدارنده
۴- عوامل ایجاد کننده خوردگی

یکی از راه‌های پیشگیری از خوردگی، استفاده از روغن‌هایی است که بر روی سطوح فلزی جذب می‌شوند. این روغن‌ها، سطوح سخت را از یکدیگر جدا می‌کنند، مانع از انحلال و آسیب‌های حرارتی ناشی از اصطکاک می‌شوند، سطوح را عایق کرده و انتقال نیرو را آسان‌تر می‌سازند. جذب بازدارنده‌های آلی یا غیرآلی بر روی سطوح فلزات، به گروه‌های عاملی در ساختار بازدارنده، اثرات ساختار فضایی، ماهیت آروماتیک بازدارنده و در مجموع ساختار الکترونی آن بستگی دارد. ترکیبات آلی هتروسیکلی شامل اتم‌های نیتروژن یا گوگرد، از طریق تشکیل چلت‌هایی[۱۸۴] یون‌های مس یا توسط تشکیل یک سد فیزیکی، مانع از خوردگی مس می‌گردند. مشخص شده است که بازدارنده‌هایی که ویژگی آروماتیک داشته و شامل هترو اتم‌های دارای جفت الکترون آزاد برای دادن هستند (مانند نیتروژن، گوگرد و اکسیژن)، در پیشگیری از خوردگی اسیدی مؤثر می‌باشند. آهن تمایل به تشکیل پیوندهای کووالانت همپایه با هترو اتم‌های دارای جفت الکترون آزاد دارد. جذب بر روی سطح فلز، از طریق جفت الکترون آزاد هترو اتم مانند نیتروژن و الکترون‌های غیرپیوندی گروه آروماتیک با سطح فلز رخ

1 [illegible] 8 4

می‌دهد. بنابراین بازدارنده‌های آلی نیز بازدارنده‌های جذبی نامیده می‌شوند و عمدتاً در محلول‌های اسیدی به کار می‌روند. وقتی که از مشتقات دیامین به‌عنوان بازدارنده استفاده می‌شود، با افزایش طول زنجیره آلکیل در بازدارنده، راندمان بازدارندگی نیز به دلیل زیاد شدن بخشی از سطح که توسط مولکول‌های بازدارنده پوشانده و مسدود می‌شود، افزایش پیدا می‌کند. بر اساس تئوری که به طور کلی پذیرفته شده است، مولکول‌های بازدارنده آلی، جایگزین مولکول‌های آب که بر روی سطح فلز جذب شده‌اند، می‌گردد:

$$\mathrm{Org(sol)+xH_2}O\mathrm{(ads)} \leftrightarrow \mathrm{Org(ads)+xH_2}O\mathrm{(sol)}$$

حذف رفتار گالوانیک

اگر دو فلز در تماس با یکدیگر باشند، باید به گونه‌ای انتخاب شوند که پتانسیل‌های اکسیداسیون آنها تا حد ممکن نزدیک به یکدیگر باشد. علاوه بر آن، مساحت کاتد باید کوچک‌تر از مساحت آند باشد، برای مثال پیچ و مهره‌های مسی بر روی ورق بزرگ فولادی. این نوع خوردگی را می‌توان با قرار دادن ماده‌ای عایق بین دو فلز نیز کنترل کرد.

تغییر دادن مشخصه‌های الکتروشیمیایی سطح فلز

پتانسیل یک فلز را می‌توان با استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی، به آسانی تغییر داد. از آنجایی که خوردگی در محیط‌های آبی، فرایندی الکتروشیمیایی است، حفاظت آندی یا کاتدی، روش‌هایی برای کنترل خوردگی می‌باشند. در بین این دو روش، حفاظت کاتدی متداول‌تر بوده و کاربرد گسترده‌ای در جلوگیری از خوردگی آب گرمکن‌ها، مخازن و لوله‌های زیرزمینی و تجهیزات دریایی دارد.

حفاظت کاتدی

یکی از مؤثرترین روش‌های پیشگیری از خوردگی، حفاظت کاتدی است که توسط تبدیل سازه فلزی از حالت آندی به کاتدی، مانع از خوردگی آن می‌گردد. جزئیات روش حفاظت کاتدی که موضوع اصلی این کتاب است، در فصل‌های بعد به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

حفاظت آندی

حفاظت آندی از لحاظ این که یک جریان خارجی به فلز اعمال می‌شود، مشابه با روش حفاظت کاتدی است؛ اما اصول آنها کاملاً متفاوت می‌باشد. جریان خارجی در حفاظت آندی، برای پسیو کردن سطح فلز به کار می‌رود و بنابراین از این روش می‌توان فقط برای فلزاتی که قابلیت پسیو شدن دارند، استفاده کرد. حفاظت آندی بر اساس نگه داشتن پتانسیل فلز در مقادیر آندی‌تر از پتانسیل خوردگی می‌باشد. بنابراین فلز از طریق عبور جریان‌های کاملاً کنترل شده، پسیو می‌گردد و سپس در پتانسیلی مناسب نگه داشته می‌شود. قبل از اعمال حفاظت آندی باید پارامترهایی مانند دانسیته جریان بحرانی مورد نیاز برای

پسیو شدن، جریان پسیو و پتانسیل مورد نیاز برای پسیو شدن کامل تعیین شوند. جریان و پتانسیل اعمالی باید با کمک یک الکترود مرجع، به دقت کنترل شود، زیرا در غیر این صورت، ممکن است که فلز با سرعت بسیار زیادی، خورده شود.

در عمل، قطب مثبت جریان DC به مخزن ذخیره که باید تحت حفاظت آندی قرار بگیرد، متصل می‌گردد و قطب منفی آن، به کاتد غوطه‌ور در محلول متصل می‌شود. جریان اعمالی، پتانسیل فلز را تا زمانی که به محدوده پسیو شدن برسد، در جهت آندی افزایش می‌دهد. برای جلوگیری از برگشتن پتانسیل فلز به محدوده اکتیو، سعی می‌شود که پتانسیل اعمالی چندصد میلی‌ولت بالای پتانسیل فلید[۴۸۵](که حداقل پتانسیل مورد نیاز برای پسیو شدن فلز است) نگه داشته شود و یک آمپلی‌فایر، به منبع جریان مستقیم اضافه می‌گردد که جریان فلز را در محدوده پسیو نگه می‌دارد. معمولاً برای نگه داشتن فلز در محدوده پسیو، نیاز به جریان بسیار کمی است، بنابراین هزینه‌های مربوط به اعمال جریان در حفاظت آندی نسبت به حفاظت کاتدی، بسیار پایین‌تر خواهد بود؛ اما حفاظت کاتدی برای تمام فلزات قابل انجام است. تفاوت دیگر این دو فلز روش این است که حفاظت آندی برای محلول‌های بسیار خورنده، مناسب‌تر است، اما حفاظت کاتدی برای محیط‌ها و محلول‌هایی که خورندگی کم یا متوسط دارند، مناسب‌تر است. درحالی‌که، هزینه اولیه برقراری سیستم حفاظت آندی، بالا است، اما هزینه‌های نگه‌داری سیستم حفاظت کاتدی زیاد می‌باشد. در حفاظت آندی، پتانسیل کنترل می‌شود، درحالی‌که، در حفاظت کاتدی می‌توان جریان یا پتانسیل را کنترل کرد.

از حفاظت آندی می‌توان برای تجهیزات ساخته شده از فولاد معمولی به منظور نگه‌داری اسید سولفوریک، فولاد زنگ نزن به منظور نگه‌داری اسید فسفریک، نیکل به منظور اسید نیتریک و تیتانیم به منظور آمونیاک، اسیدهای آلی و محلول‌های قلیایی استفاده کرد. بنابراین اگر مشخص شود که امکان اعمال حفاظت آندی وجود دارد، می‌توان مخازن اسید سولفوریک و مبدل‌های حرارتی را به جای فولاد زنگ نزن، از فولاد کربنی ساخت. نباید از حفاظت آندی در محلول‌های حاوی کلریدها و در اسید هیدروکلریک استفاده کرد، زیرا یون‌های کلر مانع از پسیو شدن سطح می‌گردند.

اگر هیچ‌گونه حفاظتی برقرار نشود، مخزن فولاد کربنی حاوی اسید سولفوریک، به‌سرعت خورده خواهد شد و منجر به ایجاد یون‌های آهن محلول به غلظت ppm ۵ تا ppm ۲۰ در روز (بسته به دمای اسید و اندازه مخزن) می‌شود. اگر حفاظت آندی اعمال شود، غلظت آهن محلول در روز، فقط ppm ۱ افزایش پیدا می‌کند. با این روش می‌توان طول عمر مخزن را افزایش داد و از آلوده شدن اسید سولفوریک، جلوگیری به عمل آورد.

اعمال حفاظت آندی را می‌توان علاوه بر اعمال یک جریان خارجی، از طریق یک روش شیمیایی نیز انجام داد. با متصل کردن فلز تحت حفاظت به یک فلز نجیب‌تر که پتانسیل کاتدی بالایی دارد (مانند پلاتین یا پالادیم) یا استفاده از بازدارنده‌های آندی که می‌توانند پتانسیل فلز را به‌سمت محدوده پسیو جابه‌جا کنند، نمونه‌هایی از این روش‌های شیمیایی هستند. مقادیر بسیار جزئی پلاتین یا پالادیوم در فولادهای زنگ نزن را تیتانیم، برای نگه داشتن فلز زمینه در محدوده پسیو کافی خواهد بود.

بزرگ‌ترین مشکل عملی، مقادیر بسیار بالای جریان اولیه مورد نیاز برای حفاظت آندی می‌باشد (که معمولاً ۱۰۰ برابر بیشتر از جریان مورد نیاز برای نگه داشتن فلز در محدوده پسیو است). برای رفع این مشکل، یا فلز به‌صورت بسیار آهسته، به محدوده

1 □□□□□□□□ 8 5

پسیو برده می‌شود، در نتیجه نرخ خوردگی نسبتاً پایین نگه داشته شده و جریان مورد نیاز کاهش پیدا می‌کند، با اینکه دمای محلول کاهش داده می‌شود، یا بازدارنده‌ای به محلول افزوده می‌شود که فرایند پسیو شدن را تسریع می‌کند. برای مثال تانک‌ها و مخازن ساخته شده از فولاد زنگ نزن، ابتدا با اسید نیتریک فرآوری می‌شوند تا فرایند پسیو شدن آنها تصحیح گردد. روش دیگر، پر کردن تدریجی تانک با محلول است، بنابراین سطح داخلی تانک به‌تدریج پسیو می‌شود.

برای کاهش بیشتر جریان مورد نیاز در حفاظت آندی، از یک قطع کننده جریان استفاده می‌گردد؛ بنابراین جریان مصرفی را می‌توان تا ۱٪ کاهش داد، برای مثال می‌توان جریان را به‌مدت ۶ ثانیه اعمال کرد و سپس در ۶۰۰ ثانیه بعدی، جریان را قطع کرده و این سیکل را دوباره تکرار نمود. جریان ایجاد شده در ۶ ثانیه، برای پسیو کردن نواحی که در مدت زمان ۶۰۰ ثانیه قطع جریان، در حال خورده شدن هستند، کافی می‌باشد؛ بنابراین بسیاری از قطعات یک تجهیز را می‌توان با استفاده از یک رکتیفایر – ترانسفورمر تحت حفاظت آندی قرار داد.

فصل سوم

مبانی الکتروشیمیایی خوردگی در حفاظت کاتدی

فرایند خوردگی در حفاظت کاتدی

درک اصول سیستم‌های حفاظت کاتدی بر پایه درک ماهیت فرایند خوردگی است. خوردگی فلزات یک فرایند الکتروشیمیایی است. در این فرایند، یک مدار الکتریکی وجود دارد که جابه‌جایی الکترون‌ها از طریق واکنش‌های شیمیایی در قسمتی از آن انجام می‌شود. این واکنش‌های شیمیایی در سطحی از فلز که در مجاورت الکترولیت است رخ می‌دهد. واکنش‌های اکسیداسیون (خوردگی) در سطح آند و واکنش‌های کاهشی در سطح کاتد انجام می‌شوند. سیستم‌های کنترل خوردگی با تبدیل سازه حفاظت شده به کاتد در یک پیل خوردگی بزرگ‌تر، این واکنش‌های اکسیداسیون را جابه‌جا کرده و «سیستم حفاظت کاتدی» نامیده می‌شوند. آندها در سیستم حفاظت کاتدی برای ایفای نقش آند در این پیل خوردگی بزرگ‌تر نصب می‌شوند و مکانی را برای انجام تمامی واکنش‌های اکسیداسیون در پیل فراهم می‌آورند. برای توصیف دقیق اصول حفاظت کاتدی، لازم است که ماهیت دقیق فرایند خوردگی با جزئیات کامل شرح داده شود.

پیل خوردگی در حفاظت کاتدی

خوردگی تخریب یک ماده در اثر واکنش آن با محیط اطراف می‌باشد. در یک فلز، این تخریب اصولاً طی یک فرایند الکتروشیمیایی صورت می‌گیرد. این فرایند طی چهار مسیر مجزای آند، کاتد، الکترولیت و فلز رخ می‌دهد. این چهار جزء «پیل خوردگی» را تشکیل می‌دهند و خوردگی الکتروشیمیایی فقط زمانی اتفاق می‌افتد، که هر چهار عامل حاضر باشند. برای درک عملکرد سیستم حفاظت کاتدی، شناخت این چهار جزء پیل خوردگی الکتروشیمیایی بسیار مهم است.

آند

واضح‌ترین بخش پیل خوردگی آند می‌باشد. خوردگی در این قسمت رخ می‌دهد. در یک پیل خوردگی آند جایی است که در آن جریان الکتریسیته به طریق شیمیایی از سطح فلز وارد الکترولیت می‌شود. این واکنش شیمیایی یک واکنش اکسیداسیون است، که مشخصه آن از دست دادن یک الکترون توسط فلز و ترکیب شدن آن با یک عنصر دیگر، معمولاً اکسیژن، می‌باشد. در مورد فولاد، ماده حاصل اکسید آهن (زنگ آهن) است.

کاتد

دومین قسمت از پیل خوردگی کاتد می‌باشد. کاتد جایی است که حفاظت می‌شود. در یک پیل خوردگی کاتد جایی است که در آن جریان الکتریسیته به طریق شیمیایی از الکترولیت به سطح فلز وارد می‌شود. این واکنش شیمیایی یک واکنش کاهشی است که مشخصه آن فلز رسانای الکترون‌ها تا الکترولیت می‌باشد.

رابطه آند/کاتد

یک الکترود در پیل خوردگی الکتروشیمیایی با توجه به پتانسیل الکتریکی آن در مقایسه با الکترود دیگر، به آند یا کاتد تبدیل می‌شود. این اختلاف پتانسیل الکتریکی که نیروی محرکه الکتریکی پیل است، اختلاف ولتاژ بین آند و کاتد می‌باشد. الکترود فعال‌تر، یا با ولتاژ منفی‌تر، خورده شده و طبق تعریف آند محسوب می‌شود. الکترود نجیب‌تر یا با ولتاژ مثبت‌تر، الکترون‌ها را از الکترولیت عبور می‌دهد (واکنش‌های کاهش) و طبق تعریف کاتد محسوب شده و دچار خوردگی (واکنش‌های اکسیداسیون) نمی‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، در پیل خوردگی الکتروشیمیایی چهار عامل مجزا وجود دارند که همه آنها باید برای ایجاد یک مدار کامل و برقرار شدن جریان (انجام خوردگی) موجود باشند.

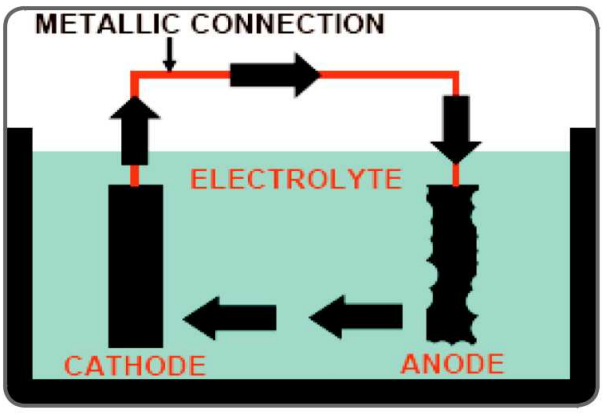
الکترولیت

سومین بخش پیل خوردگی الکترولیت است. الکترولیت محلی است که در آن یون‌ها جریان می‌یابند. هر ماده‌ای که در تماس با آند و کاتد باشد.

مسیر فلزی

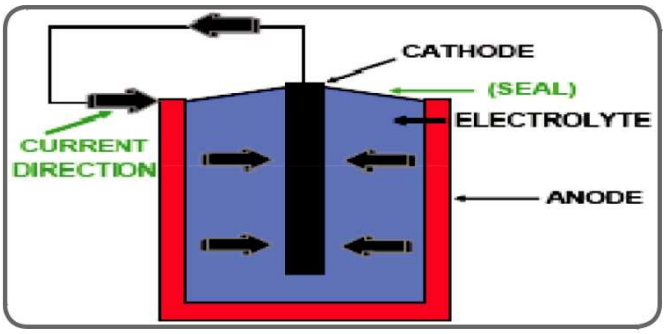
چهارمین بخش پیل خوردگی مسیر فلزی می‌باشد. مسیر فلزی مدار را کامل کرده و اجازه می‌دهد که الکترون‌ها جریان پیدا کنند. هر فلزی که هم با آند و هم با کاتد در تماس بوده و جریان یافتن الکترون‌ها را امکان‌پذیر سازد همان مسیر فلزی است. این جریان الکترونی باید وجود داشته باشد تا خوردگی الکتروشیمیایی رخ دهد. در مورد مخزن یا خط لوله، مسیر فلزی می‌تواند خود مخزن یا لوله یا اتصال فلزی آن به یک سازه فلزی دیگر باشد.

مجدداً تکرار می‌کنیم که هر چهار قسمت پیل خوردگی باید حاضر باشند تا خوردگی الکتروشیمیایی رخ دهد. زمانی که هر چهار قسمت وجود داشته باشند، شرایط یک مدار بسته به وجود آمده و جریان درون این مدار برقرار می‌شود. خوردگی صرفاً در آند پیل اتفاق می‌افتد که در آن واکنش‌های اکسیداسیون روی می‌دهند. یک نمونه آشنا از پیل خوردگی، باتری پیل خشک معمولی است. در این باتری دو فلز مختلف که یکی از آنها آند و دیگری کاتد می‌باشد در تماس با یک الکترولیت پیوسته قرار دارند که با فراهم شدن مسیر فلزی در مدار، جریان برقرار می‌شود.



پیل خوردگی

واکنش خوردگی به‌صورت چرخ‌هایی عمل می‌کند و در آن لازم است هر چهار عنصر پیل وجود داشته و در جهت پیشرفت واکنش خوردگی الکتروشیمیایی عمل کنند. حذف هر یک از مؤلفه‌های پیل الکتروشیمیایی یا جلوگیری از رخداد واکنش‌های مجزای آند یا کاتد، می‌تواند مانع از انجام کل فرایند خوردگی شود.



واکنش آندی

در آند، اتم‌های فلز یک یا چند الکترون از دست داده و به‌صورت یون‌های فلزی در می‌آیند. فرمول کلی این واکنش با استفاده ار نمادهای شیمیایی به‌صورت زیر است:

$$M_0 \rightarrow M_+^{n+} + ne^-$$

نماد M_0 نشان‌دهنده یک اتم فلز مانند آهن یا مس در یک قطعه فلزی، فلش نشان‌دهنده جهت پیشرفت واکنش و نماد M^+ مربوط به یون فلزی می‌باشد. یون‌های فلزی تشکیل شده در واکنش خوردگی قطعه فلزی را ترک کرده و وارد محیط (الکترولیت) می‌شوند. نماد e^- مربوط به الکترون با بار منفی است که با تشکیل یون فلزی آزاد می‌شود. الکترون آزادی که در واکنش خوردگی ایجاد می‌شود، در داخل قطعه فلز باقی می‌ماند. فرمول واکنش برای یک واکنش آندی خالص تغییر واکنش $Cu_0 \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$ خوردگی مس به‌صورت زیر بیان می‌شود.

واکنش کاتدی

واکنش‌های زیادی ممکن است در کاتد رخ دهند. ساده‌ترین واکنش کاتدی واکنش یون‌های هیدروژن، که در محلول‌های آبی وجود دارند، با الکترون‌ها و تشکیل گاز هیدروژن می‌باشد. فرمول شیمیایی این واکنش چنین نوشته می‌شود:

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

این فرمول نشان‌دهنده واکنش دو یون هیدروژن $(2H^+)$ با دو الکترون (e^-) و تشکیل دو اتم هیدروژن می‌باشد. که بعداً این دو باهم ترکیب شده و یک ملکول گاز هیدروژن (H_2) را به وجود می‌آورند. همانند واکنش‌های آندی، تغییری در بار کل این واکنش به وجود نمی‌آید. $(+2 + -2 = 0)$

واکنش معمول دیگر در کاتد، واکنش الکترون‌ها با اکسیژن حل شده و تجزیه آب به یون‌های هیدروکسیل می‌باشد. فرمول شیمیایی این واکنش چنین نوشته می‌شود:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$$

این فرمول نشان‌دهنده کاهش اکسیژن حل شده (O_2) در الکترولیت‌های قلیایی است که در آن اکسیژن و تجزیه دو ملکول آب ($2H_2O$) منجر به تشکیل چهار یون هیدروکسیل می‌شود ($4OH^-$).

سایر واکنش‌های کاتدی

در دیگر واکنش‌های کاتدی، ممکن است یون‌های متفاوتی با الکترون‌ها واکنش دهند، اما مشخصه مهم هر واکنش کاتدی کسب الکترون‌ها می‌باشد، که این ویژگی اصلی یک واکنش کاهشی است. ممکن است کاهش یون فلز و رسوب فلز نیز رخ دهد. توجه داشته باشید که خود فلز در واکنش کاتدی دخالت مستقیمی ندارد، مگر آنکه در صورت وجود یون‌های فلزی، ممکن است این یون‌ها کاهش یافته (الکترون‌های خود را پس بگیرند) یا رسوب شوند. فلز به‌صورت یون در نمی‌آید، الکترونی از دست نمی‌دهد و نمی‌تواند با اتم یا عنصر دیگری ترکیب شود (اکسید شده یا زنگ بزند). علی‌رغم اینکه برای پیشرفت خوردگی باید واکنش کاتدی رخ دهد، هیچ‌گونه خوردگی در کاتد رخ نمی‌دهد. این واکنش کاهش معمولاً حفاظت نامیده می‌شود.

فلز در برابر یونیزه شدن محافظت شده و بنابراین از خوردگی نیز محافظت می‌شود. این فرایند عوامل زیادی را نیز به وجود می‌آورد که سرعت خوردگی را کاهش می‌دهند. از جمله کاهش یون‌های هیدروژن (که منجر به تغییر pH در جهت قلیایی شدن محیط می‌گردد)؛ تشکیل یون‌های هیدروکسیل (که این نیز منجر به تغییر pH در جهت قلیایی شدن محیط می‌گردد)؛ تجزیه آب (که سبب افزایش مقاومت الکترولیت می‌شود)؛ و تشکیل یک لایه هیدروژن بر روی کاتد (که سبب افزایش مقاومت کاتد تا الکترولیت می‌شود).

الکترون‌های آزاد شده در آند در درون مسیر فلزی جریان یافته و در کاتد مجدداً ترکیب می‌شوند. الکترولیت یون‌های لازم برای واکنش کاتدی را فراهم آورده و یون‌های فلزی تشکیل شده در آند را در خود حل می‌کند. متداول‌ترین الکترولیت آب یا محلول آبی می‌باشد. این آب می‌تواند آب شهری، آب دریا، آب جمع شده در منافذ خاک یا آب نظیر بارندگی یا شبنم باشد. ذکر این نکته مهم است که جریان حفاظت کاتدی و خوردگی بحث شده در این کتاب، جریان قراردادی است و با شارش جریان مثبت در نظر گرفته می‌شود.

سری‌های گالوانیکی

دو فاکتور اصلی تأثیرگذار بر سرعت خوردگی در یک پیل خوردگی الکتروشیمیایی، مشخصات الکتریکی الکترولیت (مقاومت ویژه) و اختلاف ولتاژ بین آند و کاتد هستند. مقاومت ویژه الکترولیت معمولاً قابل کنترل نیست اما می‌توان آن را اندازه‌گیری کرد. ولتاژ یا پتانسیل آند و کاتد فلزی نیز قابل اندازه‌گیری می‌باشد. ولتاژ اندازه‌گیری شده همان اختلاف ولتاژ بین دو الکترود است. از آنجا که این پتانسیل فقط به یک اختلاف ولتاژ وابسته است، باید مرجعی وجود داشته باشد که تمامی

الکترودهای دیگر را بتوان نسبت به آن اندازه‌گیری کرد تا یک جدول یا سری نسبی از پتانسیل الکترودهای مشخصی تهیه شود. همان‌طورکه قبلاً ذکر شد، فلزات پتانسیل‌های متفاوتی دارند و همچنین هر فلز در الکترولیت‌های متفاوت پتانسیل‌های مختلفی دارد.

برای اینکه الکترودی به‌عنوان مبنای اندازه‌گیری سایر الکترودها به کار رود، باید فلز و الکترولیت در تماس با آن مشخص شوند. با انجام این کار، الکترود به‌صورت الکترود مبنا در می‌آید.

تا کنون انواع بسیاری از الکترودهای مبنا مورد استفاده قرار گرفته است. در آزمایشگاه، استفاده از نوع هیدروژن/هیدروژن (الکترود هیدروژن، الکترولیت هیدروژن) متداول است. در کاربرد میدانی، مس/سولفات مس (الکترود مس، الکترولیت سولفات مس کاملاً اشباع) به کار می‌رود. مگر در آب شور که از نقره/کلرید نقره (الکترود نقره، الکترولیت کلرید نقره) استفاده می‌شود و باید با فاکتور الکترولیت یا میزان کلرید موجود در الکترولیت تنظیم شود. این الکترودهای مبنا صرفاً الکترودهای پایدار با پتانسیل مشخصی می‌باشند که برای اندازه‌گیری پتانسیل الکترودهای نامشخص به کار می‌روند. با استفاده از الکترودهای مبنا می‌توان مقدار پتانسیل هر فلز در هر الکترولیت را ثبت کرد و آن را با دیگر الکترودها مقایسه نمود.

جدولی که از چنین مقادیری تشکیل شده است را سری گالوانیکی اندازه‌گیری‌ها می‌نامند. در هر جدول باید الکترود مبنای مورد استفاده در اندازه‌گیری و الکترولیت حاوی الکترودهای نامشخص، مشخص گردد تا کارشناسان خوردگی بتوانند آن را تفسیر کنند. سپس می‌توان از این سری برای تعیین الکترود آند (که خورده می‌شود) در یک پیل خوردگی الکتروشیمیایی استفاده کرد.

مقدمه‌ای بر حفاظت کاتدی

حفاظت کاتدی با تبدیل فلزی که معمولاً مانند آند رفتار کرده و خورده می‌شود به آنچه که شبیه به کاتد رفتار می‌کند و در معرض حملات خورنده قرار ندارد، مانع خوردگی می‌شود. اصولاً حفاظت کاتدی آند پیل خوردگی را از پیش تعیین می‌کند یا باعث می‌شود که پیل خوردگی بزرگ بر سایر پیل‌های خوردگی کوچک‌تر غلبه کند. در حفاظت کاتدی این کار به یکی از دو روش اصلی انجام می‌شود.

اولین روش، استفاده از سری گالوانیک برای انتخاب یک فلز فعال‌تر، نصب آن در الکترولیت و تأمین یک مسیر فلزی می‌باشد. این روش حفاظت کاتدی فداشونده یا حفاظت کاتدی گالوانیک نامیده می‌شود. فلزی که از لحاظ گالوانیکی فعال‌تر است (آند) نصب می‌شود تا خودش را برای حفاظت از سازه (کاتد) فداکند. ولتاژ (و جریان حاصل) صرفاً اختلاف پتانسیل بین دو نوع فلز متفاوت می‌باشد. دومین روش اصلی حفاظت کاتدی استفاده از یک منبع جریان DC است، که باعث برقراری اجباری جریان از یک آند(های) نصب شده به سازه شده و کل سازه را به کاتد تبدیل می‌کند. این روش، حفاظت کاتدی جریان اعمالی نام دارد. یک‌یکسوکننده، سلول خورشیدی، باتری، ژنراتور یا هر منبع تغذیه DC دیگری در مدار نصب می‌شود. ماده آند صرف‌نظر از ملاحظات سری گالوانیک و مقرون‌به‌صرفه انتخاب می‌شود، یا فلزاتی انتخاب می‌شوند که به ازای هر آمپر-سال جریان، کاهش وزن کمی داشته باشند.

میزان جریانی که برای حفاظت کاتدی مورد نیاز است به فلز حفاظت شده و محیط بستگی دارد. برای دستیابی به پتانسیل‌های حفاظت‌کننده، باید جریان از آند به‌سمت سازه حفاظت شده برقرار شود. مقدار جریان مورد نیاز برای حفاظت از یک سازه مشخص با مساحت سطحی از سازه متناسب است که در مجاورت الکترولیت قرار دارد. بنابراین جریان‌های مورد نیاز معمولاً به‌صورت چگالی جریان و برحسب آمپر یا میلی‌آمپر (۰/۰۰۱ آمپر) بر متر (فوت)مربع سطح در معرض الکترولیت بیان می‌شود. پوشش‌ها ذاتاً دی‌الکتریک هستند و تا حدودی سازه را از الکترولیت ایزوله می‌کنند. مقدار جریان مورد نیاز سازه‌های عایق شده بسیار کمتر از سازه‌های بدون عایق است، زیرا صرفاً آن سطوحی که پوشش آنها آسیب دیده یا از بین رفته نیازمند جریان هستند یا آن را دریافت می‌کنند. راندمان عایق، درصدی از سازه است که به طور مؤثر نسبت به الکترولیت ایزوله شده است. راندمان عایق‌ها می‌تواند بسته به نوع پوشش، کیفیت آماده‌سازی سطح، چگونگی به کار بردن پوشش، جابه‌جا کردن سازه، نصب سازه، روش‌های خاکریزی و مواد خاکریزی مورد استفاده، بسیار متفاوت باشد. این راندمان معمولاً از حدود ۸۰ تا ۹۹/۷ درصد متغیر است. بهترین راه تعیین جریان مورد نیاز در سازه‌های عایق شده، انجام آزمایش عملی پس از نصب سازه می‌باشد. چگالی‌های جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی به فلز حفاظت شده و محیط بستگی دارند.

فصل چهارم

حفاظت کاتدی

یکی از مؤثرترین راه‌های پیشگیری از خوردگی حفاظت کاتدی است که می‌تواند برای همه انواع خوردگی استفاده شود و ممکن است در برخی شرایط به طور کامل خوردگی را متوقف کند. فن حفاظت کاتدی در صنعت برای سازه‌های فلزی مانند خطوط لوله زیرزمینی، اسکله‌ها، لنگرگاه‌ها، کشتی‌ها، مخازن ذخیره نفت و غیره که در الکترولیت‌هایی مانند آب، خاک، بتن و غیره قرار گرفته‌اند، به طور گسترده اجرا می‌شود.

حفاظت کاتدی ابتدا برای یک کشتی نظامی به نام سمارنگ[۱۸۶] توسط سر همفری دیوی[۱۸۷] در سال ۱۸۲۴ انجام شد. بدنه کشتی، که از مس ساخته شده بود، با استفاده از آندهای روی محافظت شد؛ به هر حال، به‌عنوان نتیجه‌ای از پیشگیری خوردگی موفق، یون‌های مس از سیستم جدا می‌شدند که به پوشیده شدن بدنه کشتی به‌وسیله موجودات زنده‌ای مانند خزه‌ها منجر می‌شد و این به‌نوبه خود تصور ناموفق بودن حفاظت کاتدی را القا می‌کرد. حفاظت کاتدی پیش‌تر در سال ۱۸۳۶، با فرو بردن صفحات آهنی در روی (Zn) مذاب به منظور حفاظت کشتی‌های جنگی از خوردگی، نیز استفاده شده بود. بعد از حدود یک قرن، حفاظت کاتدی مجدد استفاده شد، این بار برای حفاظت خطوط لوله زیرزمینی و حدود سال ۱۹۵۰ و این آغازی بود برای استفاده رایج از آن در مخازن ذخیره آب و نفت، کشتی‌ها، سدها، پایه اسکله‌ها و میله‌های فولادی داخل بتن مسلح.

به طور ساده، حفاظت کاتدی شامل تأمین الکترون‌ها از یک منبع خارجی برای فلزی است که باید حفاظت شود و فلز را کاتد می‌کند. به طور معمول الکترون‌ها در آند تولید می‌شوند و به‌سمت کاتد جریان می‌یابند، جایی که در واکنش‌های کاتدی مصرف می‌شوند. اگر این الکترون‌ها به‌صورت خارجی تأمین شوند، پس واکنش‌های آندی نمی‌توانند الکترون‌های بیشتری تولید کنند، درحالی‌که، سرعت واکنش‌های کاتدی افزایش می‌یابد و واکنش‌های آندی در سطح فلزی رخ نمی‌دهند که محافظت می‌شود، اما در سطح آند دیگر در سامانه حفاظت کاتدی اتفاق می‌افتد.

لازم نیست کل یک سازه فولادی مانند یک خط لوله طویل با حفاظت کاتدی محافظت شود. به هر حال، برای اینکه حفاظت کاتدی یک اقدام مؤثر پیشگیرانه خوردگی باشد، نواحی در معرض خورده شدن خط لوله، باید محافظ شوند. اگرچه یک پیکره فلزی کامل یا بخش‌هایی از آن حفاظت شود، حفاظت کاتدی مؤثر در شرایط زیر اجرا می‌شود:

۱. مقاومت زمینی که خط لوله بتن مسطح در آن قرار دارد، کمتر از ۱۳۰۰ ohm.cm می‌باشد.
۲. محتوی کلرید خاکی که خط بتن مسطح در آن قرار دارد، بیشتر از ۵۰۰ ppm باشد؛
۳. نواحی با ویژگی‌های مشابه مرداب یا بیابان، که ماسه و گِل با نفوذپذیری بالا دارد؛

1 [illegible] 8 6
1 [illegible] 8 7

۴. نواحی که جریان‌های سرگردان دارند.

سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده

حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده، یک فن حفاظت کاتدی است که از یک زوج گالوانیک استفاده می‌کند. فلزی که باید محافظت شود به لحاظ الکتریکی به فلز دیگری متصل می‌شود که در محیط فعال‌تر است. فلز فعال‌تر اکسید می‌شود، الکترون از آن خارج شده و فلز اولی را از خوردگی محافظت می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، فلز فعال‌تر به سازه فلزی متصل می‌شود که باید محافظت شود، به‌طوری‌که همه خوردگی در فلز فعال‌تر متمرکز می‌شود و بنابراین، سازه فلزی از خوردگی در امان می‌ماند. بر شار یافتن جریان از این پیل حفاظت کاتدی گالوانیکی، باید اختلاف پتانسیل کافی بین آند و کاتد برای غلبه بر مقاومت مدار، وجود داشته باشد. جریان گرفته شده از آند به پتانسیل مدار باز آند و مقاومت مدار بستگی دارد.

این روش برای حفاظت وسائل دریاپیما مانند کشتی و قایق استفاده می‌شود. صفحاتی از روی یا منیزیم به اطراف بدنه کشتی آویخته می‌شوند که نسبت به آهن آند بوده و خورده می‌شوند. روی و منیزیم به طور مرسوم استفاده می‌شود، زیرا آنها در انتهای سری گالوانیکی قرار می‌گیرند. از آنجا که آنها در فرایند حفظ آهن فدا می‌شوند، آندهای فداشونده نامیده می‌شوند. وقتی آند فداشونده به طور کامل مصرف شود، آند خورده شده با یک آند تازه جایگزین می‌شود. حفاظت کابل‌ها و خطوط لوله زیرزمینی از خوردگی در اثر خاک، پیشگیری از تشکیل زنگ به کمک صفحات منیزیمی که در دیگ‌های بخار آب قرار داده می‌شوند، از دیگر کاربردهای حفاظت آندی به روش فداشونده است.

فرایند گالوانیزه کردن به طور ساده، اعمال یک لایه روی (Zn) بر سطح فولاد به کمک اندود کردن[۸](غوطه‌وری گرم) است. در بیشتر محیط‌های آبی و اتمسفر، روی (Zn) نسبت به فولاد آند است و بنابراین، اگر سطح آسیب ببیند، فولاد را محافظت خواهد کرد. به دلیل نسبت مساحت سطح آند و کاتد خیلی زیاد، هرگونه خوردگی روی با سرعت بسیار آهسته پیش می‌رود. واکنش آندی، اکسایش آند گالوانیکی فداشونده و واکنش کاتدی عمدتاً احیا یا کاهش اکسیژن می‌باشد. به‌عنوان نتیجه‌ای از این واکنش‌ها، ناحیه آندی ممکن است اسیدی شود و هیدروکسید فلزی می‌تواند سطح آند را بپوشاند و سبب ایجاد مسائلی شود. ظرفیت جریان آندهای گالوانیکی و بازده جریان آنها ثابت است. تعداد و وزن آندها بر اساس سطح کاتدی که باید محاظت شود و زمان حفاظت، تعیین می‌شود.

سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان

در حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، منبع الکترون‌ها، جریان اعمال شده از یک منبع قدرت DC خارج است. جریان اعمالی در جهت عکس جریان خوردگی و به منظور بی‌اثر کردن آن و تبدیل فلز از آند به کاتد، به کار می‌رود. قطب منفی منبع قدرت به سازه‌ای متصل می‌شود که باید محافظت شود. قطب دیگر به یک آند بی‌اثر، اغلب گرافیت، متصل می‌شود که در خاک دفن شده است و مصالح پشت‌بند[۹]با قابلیت رسانایی بالا، یک ارتباط الکتریکی خوب بین آند و خاک اطراف

1 [illegible] 8 8
1 [illegible] 8 9

ایجاد می‌کند. مسیر جریان بین کاتد و آند از طریق خاک کانال وجود دارد که مدار الکتریکی را کامل می‌کند. از آنجا که در این روش جریان از یک منبع خارجی بر سیستم اعمال می‌شود، آن را روش اعمال جریان می‌نامند و این نوع حفاظت معمولاً در مورد سازه‌های مدفون، مانند مخازن یا خطوط لوله، استفاده می‌شود.

اگر آلیاژهایی مانند آهن و آلومینیم که بی‌اثر نیستند، به جای فلزات نجیبی مانند پلاتین و پالادیم یا گرافیت بی‌اثر، استفاده شوند، آنها به‌سرعت تجزیه خواهند شد. بنابراین، قطبش کاتدی برای آند اولیه با کاربرد آندهای بی‌اثر که قطب منفی پیل را تشکیل می‌دهند به انجام می‌رسد و جریان مورد نیاز برای سیستم به‌صورت خارجی تأمین می‌شود. با این روش، واکنش آندی به جای انحلال فلز به واکنش‌های تصاعد گاز تغییر می‌یابد؛ مانند تصاعد اکسیژن در آب شیرین و زیرزمین که به محیط‌های اسیدی منجر می‌شود و تصاعد گاز کلر در آب دریا گاهی همراه با اکسیژن یا منو اکسیدکربن و دی اکسیدکربن در مورد گرافیت یا بستر آندی زغالی:

$$H_2O \rightarrow 1/2O_2 + 2H^+ + 2e$$

در آب دریا یا در آب‌هایی که غلظت بالایی از کلرید دارند، در آند گاز کلر به تنهایی و یا همراه با اکسیژن متصاعد می‌شود:

$$2Cl^- + Cl_2 + 2e$$

و کلر با آب واکنش می‌دهد و اسیدهیدروکلرید که اسید ضعیفی است تشکیل می‌شود و بنابراین pH خیلی کاهش نمی‌یابد:

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow 2HClO$$

اینکه در آند کدام‌یک از این دو گاز، کلر یا اکسیژن متصاعد می‌شود، به غلظت کلر و مقادیر اضافه پتانسیل این گازها در آند بستگی دارد. پتانسیل الکترود استاندارد کلر ۱/۳۶ V- و برای اکسیژن ۰/۴ V- است، درحالی‌که، در آب دریا پتانسیل تجزیه کلر ۱/۳۹ V- و برای اکسیژن ۰/۸۱ V- می‌باشد؛ به هر حال، دلیل مقادیر بالای اضافه ولتاژ اکسیژن، که برابر ۰/۷ V در سطح فولاد و در چگالی جریان $1mA/cm^2$ است، فقط گاز کلر برای چگالی جریان‌هایی متصاعد می‌شود که خیلی بالا نیستند.

معمولاً، آندهای گالوانیکی در بستر حاوی زغال به‌عنوان پشت‌بند آندی، استفاده می‌شوند و این زغال به گازهای مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن اکسید تبدیل می‌شود. برای وقوع واکنش‌های زیر، زغال باید خیس باشد و به‌عنوان نتیجه‌ای از این واکنش‌ها، آند اسیدی می‌شود:

$$C + H_2O \rightarrow CO + 2H^+ + 2e$$
$$C + H_2O \rightarrow CO_2 + 4H^+ + 4e$$

آندهای مورد استفاده در هر دو سیستم اعمال جریان و فداشونده، می‌بایست اقتصادی و مقرون‌به‌صرفه باشند، زیرا تقریباً نیمی از هزینه اولیه احداث یک سامانه حفاظت کاتدی صرف آندها می‌شود. دوم، جریان گرفته شده از مساحت سطح واحد آند بایستی تا آنجا که امکان دارد بالا باشد و مقاومت آندی با گذشت زمان افزایش نیابد. به منظور تولید جریان با شدت و مدت برنامه‌ریزی شده، کاهش وزن آند با جریان خروجی در یک سال، باید تا آنجایی کم باشد که امکان دارد.

انتظار می‌رود عمر آندهای بی‌اثر در این فن نسبتاً طولانی باشد، مگر اینکه واکنش‌های شیمیایی با گونه‌های دیگر و قطبش اتفاق بیافتد؛ به هر حال، آندهای بی‌اثر به دلیل عبور جریان، حتی در مقادیر کم نیز دچار کاهش وزن شوند.

جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی

در منابع، مقادیر برآورده مقدار جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی، براساس نوع فلز، مساحت سطح فلزی که باید محافظت شود، نوع و کیفیت پوشش و همچنین خورندگی محیطی که سیستم در آن قرار دارد، برای مثال، مقاومت محیط، pH، اکسیژن محلول و غیره می‌باشد. به هر حال، معمولاً این مقادیر جریان در گستره‌های وسیعی ارائه می‌شوند و این در حالی است که حد پایین‌تر از این دامنه ممکن است ایمن نباشد، حد بالای دامنه نیز اقتصادی نباشد. دوم، کیفیت پوشش فقط بر اساس مقاومت پوشش به ضخامت مورد توجه قرار می‌گیرد، نه بر اساس خطاهای انسانی رایج مثل آسیب‌های پوشش در طی حمل و نقل، انبارداری، نصب لوله و عایق کاری نواحی جوش.

به لحاظ نظری، حداقل جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی یک سازه فلزی، از منحنی‌های قطبش واکنش‌های آند و کاتد محاسبه می‌شود. برای مثال، خوردگی فولاد در یک محیط اسیدی، شامل واکنش کاتدی تصاعد گاز هیدروژن و واکنش آندی انحلال آهن برای تولید یون‌های آهن است. در تعادل یک سیستم خوردگی فلزی، مثل سیستم خوردگی فولاد، پتانسیل E_{corr}و جریان i_{corr}، نقطه تلاقی منحنی‌های قطبش کاتدی و آندی است، برای مثال، E_{corr} برابر ۲۵۰ mV- و i_{corr} برابر $10^3 \mu A/cm^2 (1mA/cm^2)$است. اگر جریان کاتدی به این سیستم خوردگی فولادی اعمال شود، جابه‌جایی پتانسیل در جهت منفی از ۲۵۰ mV- به۳۷۰ mV - خواهد بود، سرعت خوردگی به یک هزارم مقدار اولیه $1mA/cm^2$ تقلیل می‌یابد و شدت جریان مورد نیاز برای انجام این کار برابر $10^4 \mu A/cm^2$ می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، جریان مورد نیاز برای حفاظت $1m^2$ سطح فولادی لخت در یک محیط اسیدی به اندازه ۱۰۰ A است. به هر حال، حفاظت کاتدی با چنین شدت جریان بالایی اقتصادی نیست و بنابراین، در محلول‌های اسیدی، حفاظت آندی به حفاظت کاتدی ترجیح داده می‌شود. به هر حال، اگر حفاظت کاتدی باید اجرا شود، برای کاهش شدت جریان مورد نیاز بایستی سطح فلز به‌خوبی پوشش داده شود.

صرف‌نظر از روش حفاظت کاتدی مورد استفاده، هدف نگهداری، برای مثال، پتانسیل مواد آهنی در کمتر از ۰/۸۵ V- در مقایسه با الکترود استاندارد $Cu/CuSO_4(CSE)$ و ۰/۵۵ V- در مقایسه با الکترود استاندارد هیدروژن (SHE) است. اگر باکتری کاهش سولفات (SRB) در محیط موجود باشد، حد پایین‌تر به جای ۰/۸۵ V- مقدار ۰/۹۵ V- در مقایسه با CSE است. پتانسیل‌های منفی‌تر از این مقدار سبب بروز آسیب‌های هیدروژنی می‌شود و بنابراین خطرناک هستند. در نتیجه، نباید چنین خطری کرد و کاهش سرعت خوردگی به حد معینی کفایت می‌کند و جلوگیری کامل از خوردگی انجام نمی‌شود. برای مثال، وقتی پتانسیل فلز به اندازه ۱۰۰ mV در جهت منفی جابه‌جا شود، سرعت خوردگی ٪۹۰ کاهش می‌یابد، درحالی‌که، جابه‌جایی به اندازه ۲۰۰ mV، سرعت خوردگی را ٪۹۹ کاهش می‌دهد. به طور کلی، لازم نیست سرعت خوردگی را بیشتر از ٪۹۹ کاهش دهیم. جریان مورد نیاز برای تأمین چنین تغییر پتانسیلی به‌ویژگی‌های سیستم بستگی دارد. برای یک خط لوله

پوشش‌دار با طول ۲۴۰ km، جریان کل می‌تواند ۲ A باشد، که برای مقایسه، یک خط لوله لخت با همان طول، ۱۰۰۰ A جریان نیاز است.

بنابراین، کنترل پتانسیل معمولاً به جای تنظیم جریان ترجیح داده می‌شود، زیرا متغیرهای زیادی در این فرایند دخالت دارند. به هر حال، تعیین جریان حفاظت کاتدی کل در سامانه حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده برای تعیین تعداد، جرم و اندازه آندهایی لازم است که باید نصب شوند.

جریان حفاظت کاتدی مورد نیاز در واحد سطح برای حفاظت کاتدی فولاد، بر اساس محیط و کیفیت پوشش در دامنه‌های زیر قرار می‌گیرد:

۱. برای سازه فولادی لخت در آب دریای سیلان، مواج و ناهمگون، ۱۰۰ تا $160mA/m^2$.
۲. برای سازه فولادی لخت در آب دریای راکد، ۵۵ تا $85mA/m^2$.
۳. برای سازه فولادی لخت در لجن کف دریا، ۲۰ تا $30mA/m^2$.
۴. برای سازه فولادی لخت در خاک‌های مرطوب و زیرزمین ۱۰ تا $20mA/m^2$.
۵. برای سازه فولادی پوشش داده شده به طور ضعیف در آب یا زیرزمین ۱ تا $2mA/m^2$.
۶. برای سازه فولادی خوب پوشش داده شده در آب یا زیرزمین $0/05mA/m^2$.
۷. برای سازه فولادی پوشش داده شده با پلی‌اتیلن (PE) در آب یا زیرزمین $0/005mA/m^2$. این مقادیر.

جریان‌های اولیه مورد نیاز برای حفاظت کاتدی است، زیرا بعد از قطبش سطح فلز، جریان مورد نیاز کاهش می‌یابد. به هر حال، مقاومت پوشش نیز با گذشت زمان کاهش می‌یابد و به افزایش در مقدار جریان مورد نیاز منجر می‌شود که با اثر قطبش تعدیل می‌گردد.

اثر پوشش بر حفاظت کاتدی

پوشش دادن سطح فلزی که باید به‌صورت کاتدی محافظت شود، مقدار جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی را کاهش می‌دهد. این موضوع میسر است، زیرا با پوشش دادن فلز، سرعت نفوذ اکسیژن به نواحی کاتدی روی فلز کاهش می‌یابد و بنابراین جریان کمتری برای قطبش فلز به‌صورت کاتدی مورد نیاز است. پوشش دادن فلز هزینه‌های اجرای اولیه و بهره‌برداری سامانه‌های حفاظت کاتدی را کاهش می‌دهد. ازاین‌رو، حفاظت کاتدی پوشش باهم استفاده می‌شوند.

اثر غیر فعال شدن بر حفاظت کاتدی

واکنش‌های کاتدی روی سطح آندهای تحت جریان حفاظت کاتدی به شکل تصاعد گاز هیدروژن و اکسیژن رخ می‌دهد. این واکنش‌ها، یون‌های هیدروکسید تولید می‌کنند که همراه با یون‌های سختی آب، Ca^{2+}و Mg^{2+} روی سطح رسوب می‌کنند. مشابه اثر پوشش بر حفاظت کاتدی، این رسوب‌ها هیدروکسید کلسیم و منیزیم از نفوذ اکسیژن به نواحی کاتدی روی فلز جلوگیری می‌کنند که نتیجه آن حفاظت کاتدی با جریان محدود کمتری برای قطبش فلز می‌باشد. این موضوع، دلیل حفاظت کاتدی سازه فولادی لخت در آب دریا را توضیح می‌دهد، زیرا سختی آب دریا و محصولات خوردگی یک لایه

محافظ روی سطح فلز تشکیل می‌دهند که مشابه یک پوشش عمل می‌کند. بنابراین، اگرچه جریان حفاظت کاتدی اعمالی در ابتدا خیلی زیاد است، درست در چند ماه اول این جریان به یک پنجم مقدار اولیه کاهش می‌یابد.

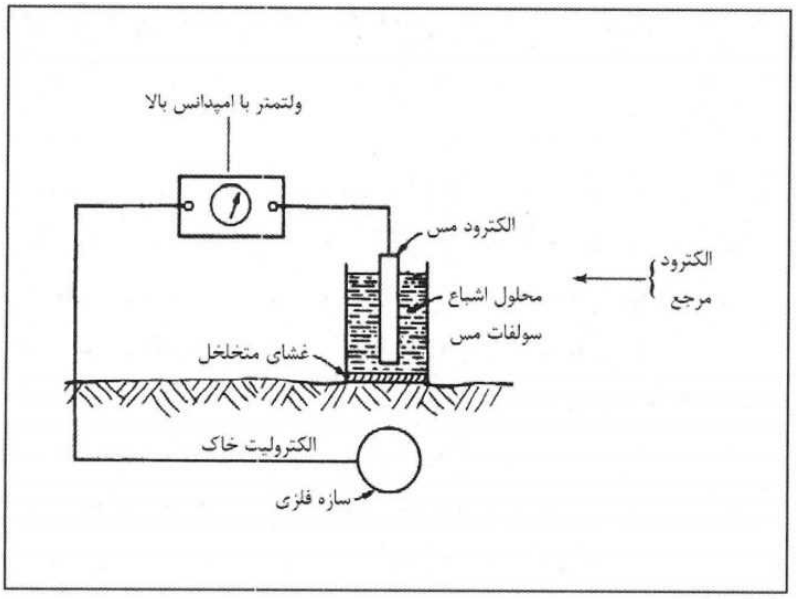
معیارهای حفاظت کاتدی

مقدمه

روش‌های مختلفی وجود دارد که بر اساس آنها می‌توان تشخیص داد که سازه تحت حفاظت کاتدی به طور مؤثر و کامل تحت حفاظت خوردگی قرار دارد. ازآنجاکه، خوردگی و حفاظت کاتدی دارای اصول الکتروشیمیایی هستند، بنابراین از روش‌های الکتروشیمیایی به‌عنوان رایج‌ترین روش‌ها و معیارها برای تعیین میزان حفاظت از خوردگی استفاده می‌شود. علاوه بر روش‌های الکتروشیمیایی، از انجام بازرسی‌ها نیز برای تعیین شرایط واقعی سازه تحت حفاظت استفاده می‌شود تا مشخص گردد که آیا سازه در تمام مدت از حفاظت مؤثر و کافی برخوردار بوده است یا نه؟ اگر هیچ‌گونه حمله خوردگی بر سازه تحت حفاظت در محیط خورنده به وقوع نپیوسته باشد می‌توان نتیجه گرفت که سیستم حفاظت اعمال شده به طور صحیح و مؤثر کار می‌کند. برای سازه‌های مدفون در زمین و غوطه‌ور در آب در دسترسی به سازه‌ها به آسانی مقدور نیست، معمولاً از معیارهای الکتروشیمیایی برای تعیین میزان حفاظت از خوردگی استفاده می‌شود.

معیار الکتریکی

برای سازه‌های مدفون و غوطه‌ور، معیارهای ارائه شده براساس پتانسیل الکتروشیمیایی سطوح سازه تحت حفاظت، رایج‌ترین معیار برای تعیین میزان حفاظت از خوردگی است. برای اندازه‌گیری پتانسیل الکتروشیمیایی، از یک ولت‌متر با امپدانس بالا استفاده می‌شود. در این روش اختلاف پتانسیل بین سازه و الکترود مرجعی که در تماس با الکترولیت است طبق شکل ۴-۱، اندازه‌گیری می‌شود. برای سازه‌های مدفون در خاک، از الکترود مرجع مس - سولفات مس استفاده می‌شود. از الکترودهای مرجع دیگر نیز در شرایط خاص استفاده می‌شود. مقدار پتانسیل خوانده شده توسط هر الکترود مرجع قابل تبدیل به الکترود مرجع دیگر است. برای اطمینان از اینکه پتانسیل اعلام شده بر اساس کدام الکترود مرجع است باید همواره نوع الکترود، به دنبال میزان عددی پتانسیل قید شود. ازآنجاکه، اندازه‌گیری‌های پتانسیل بیشتر برای خطوط لوله مدفون است، بنابراین معمولاً به آن لفظ پتانسیل لوله به خاک اطلاق می‌شود، حتی اگر منظور اندازه‌گیری پتانسیل دیواره مخزن نگهدارنده آب در تماس با آب شیرین باشد. اما بهترین و دقیق‌ترین عنوان برای آن، عنوان پتانسیل سازه به الکترولیت است.



شکل ۴-۱ ساختار مورد استفاده برای اندازه‌گیری پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت

معیار پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت

به منظور مشخص نمودن آنکه سازه‌ای تحت حفاظت کافی می‌باشد، اندازه‌گیری‌های پتانسیل سازه، به الکترولیت در نواحی مختلف در اطراف سازه انجام می‌شود. براساس تئوری‌های خوردگی، آزمایش‌های آزمایشگاهی و مخصوصاً بر اساس تجربیات میدانی بر روی تعدادی زیادی از سازه‌های تحت حفاظت کاتدی، معیار پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت توسعه یافته است.

استاندارد انجمن ملی مهندسین آمریکا (NACE) شماره RP-01-69

اطلاعات ذیل از این استاندارد تحت عنوان «کنترل خوردگی سطوح خارجی خطوط لوله مدفون در زمین و غوطه‌ور در آب» اقتباس گردیده است.

اندازه‌گیری‌های پتانسیل بر روی خطوط لوله باید در شرایطی انجام پذیرد که الکترود مرجع در تماس با الکترولیت و در نزدیک‌ترین فاصله ممکن از خط لوله قرار داشته باشد. چنین اندازه‌گیری‌هایی برای تمام سازه‌ها و در تمام الکترولیت‌ها باید به همین صورت انجام پذیرد. قابل ذکر است که در این مورد باید به افت ولتاژ در مناطقی غیر از منطقه فصل مشترک بین سازه و الکترولیت، حضور فلزات غیرهمجنس و اثر سازه‌های غریبه در محیط اطراف سازه در اندازه‌گیری‌های ولتاژ توجه شود. هیچ معیاری به تنهایی برای ارزیابی مؤثر بودن حفاظت کاتدی برای تمام شرایط رضایت‌بخش نیست. معمولاً مجموعه‌ای از معیارها برای سازه‌های مشخص باید به کار گرفته شوند.

معیار برای حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی و چدنی

معیارهای برای حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی و چدنی در خاک و آب به شرح ذیل است:

۱) سازه پس از اعمال جریان دارای پتانسیلی معادل با ۸۵۰- میلی‌ولت با منفی‌تر نسبت به الکترود مرجع مس – سولفات مس باشد. ازآنجاکه، این پتانسیل موقعی اندازه‌گیری می‌شود که جریان حفاظتی به سازه اعمال شده است، در نتیجه این اندازه‌گیری صحیح پتانسیل سازه باید میزان افت ولتاژ که در اثر عبور جریان از داخل الکترولیت حاصل می‌گردد در پتانسیل قرائت شده اصلاح گردد.
۲) ۱۰۰ میلی‌ولت یا شیفت پلاریزاسیون منفی‌تر بین سطح خط لوله و الکترود مرجع پایدار که در تماس با الکترولیت باشد تشکیل و یا زوال این پلاریزاسیون در این معیار قابل ارزیابی است.
۳) یک پتانسیل که حداقل به اندازه پتانسیل حاصل از منحنی E - Logi منفی باشد.
۴) عبور جریان حفاظتی خالص از الکترولیت به سطح فلز که توسط تکنیک ارزیابی جریان زمین تعیین می‌شود.

معیار حفاظت برای آلومینیم

شیفت پتانسیل ۱۰۰ میلی‌ولت یا منفی‌تر که در قسمت قبل ارائه گردیده است.

توصیه احتیاطی

اعمال ولتاژهای زیاد: اگر پتانسل اعمالی برای حفاظت کاتدی سازه که براساس اندازه‌گیری پتانسیل بین سطح سازه و یک الکترود مرجع مس – سولفات مس اشباع انجام گرفته، منفی‌تر از ۱/۲۰- ولت باشد، در این صورت سازه خورده می‌شود. قابل ذکر است که مقدار افت ولتاژ در محیط الکترولیت اطراف سازه باید جبران شده باشد. بنابراین اعمال ولتاژ منفی‌تر از ۱/۲۰- ولت هنگامی مجاز است که نتایج آزمایشات قبلی برای آن محیط خاص نشان داده است که هیچ‌گونه خوردگی رخ نمی‌دهد.
شرایط خاک قلیائی: آلومینیم در محیط‌های قلیائی دچار خوردگی می‌شود. ازآنجاکه، اعمال حفاظت کاتدی باعث افزایش pH در سطح سازه‌های آلومینومی می‌شود، بنابراین انجام آزمایش‌های لازم بر سطح سازه‌های آلومینیمی قبل از اعمال حفاظت کاتدی ضروری است تا از به وجود آمدن خوردگی حفره‌ای بر سطح آلومینیم در محیط‌های با pH بیش از ۸ جلوگیری شود.

معیار حفاظت برای مس

تغییر پتانسیل در جهت منفی‌تر معادل ۱۰۰ میلی‌ولت یا بیشتر

معیار حفاظت برای سازه‌های تشکیل شده از فلزات غیرهمجنس

اعمال پتانسیل منفی معادل با پتانسیل مورد نیاز برای حفاظت فلزی از سازه که در جدول پتانسیل آندی‌تر است. این پتانسیل نباید از حداکثر پتانسیل مجاز برای هر یک از فلزات تشکیل‌دهنده آن سازه تجاوز نماید. رعایت این مطلب به خصوص زمانی ضروری است که از آلومینیم در ساخت سازه استفاده شده باشد.

معیار حفاظت برای سرب

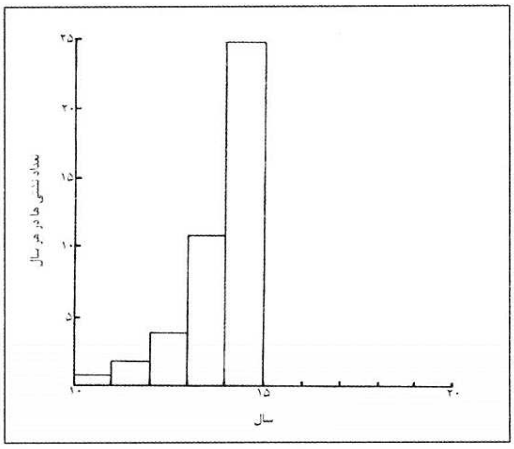
معیار برای سرب به شرح ذیل است:

۱) اعمال پتانسیل ۷۵۰- میلی‌ولت یا منفی‌تر از آن نسبت به الکترود مرجع مس – سولفات مس، البته اندازه‌گیری این میزان پتانسیل باید در خلال مدت زمانی انجام شود که جریان حفاظتی بر سطح سازه اعمال می‌شود.
۲) تغییر پتانسیل در جهت منفی شدن معادل ۱۰۰ میلی‌ولت یا بیشتر

توجه: در مورد سرب نیز موارد احتیاطی گفته شده برای آلومینیم، درباره دقت در جلوگیری از اعمال پتانسیل‌های منفی‌تر از ۱/۲- ولت و تماس با خاک‌های قلیایی صادق است.

آنالیز نرخ تخریب

آسیب‌های خوردگی که توسط منحنی فرکانس آسیب‌های سیستم برحسب زمان نشان داده می‌شود، معمولاً پس از ایجاد اولین آسیب خوردگی به‌صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد. هنگامی که به سازه‌ای که تحت آسیب‌های خوردگی قرار گرفته است، حفاظت کاتدی اعمال شود، فرکانس آسیب‌های خوردگی فوراً به صفر کاهش نمی‌یابند. آسیب‌های مکانیکی و خوردگی قبلی ممکن است همچنان باعث آسیب شوند. اما اگر حفاظت کاتدی به طور اصولی و مؤثر اعمال شود، آسیب‌های خوردگی باید در مدت زمان ۱ تا ۲ سال متوقف شود. باید سوابق دقیق آسیب‌ها برای سیستم‌های حفاظت شده و حفاظت نشده نگهداری شوند تا توسط آنها بتوان نیاز به حفاظت کاتدی و میزان مؤثر بودن سیستم‌های حفاظت کاتدی نصب شده را بررسی نمود. یک نمونه آنالیز نرخ تخریب در شکل ۴-۲ نشان داده است.



شکل ۴-۲ نرخ تخریب برحسب زمان

تجهیزات آزمایشگاهی غیرمخرب

ارزیابی ادواری شرایط سیستم‌های حفاظت شده باید به منظور تعیین میزان کافی بودن حفاظت کاتدی بر روی سازه‌ها انجام شود.

آنالیزهای چشمی

اگر سطح سازه قابل دسترس است یا اینکه این سازه برای انجام تعمیرات و احیاناً انجام تغییرات بیرون آورده شده است، توسط بازرسی‌های چشمی می‌توان میزان نیاز آن را به حفاظت کاتدی و یا میزان مؤثر بودن حفاظت کاتدی اعمال شده بر روی آن را بررسی نمود. در این مورد علائمی همچون وجود محصولات خوردگی، حفره‌ها، ترک‌ها و کاهش ابعاد فیزیکی می‌توانند دلیلی بر وجود خوردگی بر سطح سازه باشند. یک نوع از بازرسی‌های چشمی عبارت از نصب نمونه‌های فلزی کوچک یا

کوپن‌ها به سطح سازه در نقاط مختلف و حساس است. این نمونه‌ها و کوپن‌ها باید اتصال الکتریکی به سطح سازه داشته باشند. جدا کردن این نمونه‌ها و کوپن‌ها به طور ادواری و بازرسی آنها به طور چشمی و همچنین انجام آزمایش‌های کاهش وزن بر روی آنها می‌تواند بیانگر وضعیت خوردگی سازه باشد.

عواقب حفاظت ناکافی و زیر حد مجاز

اگر پتانسیل اندازه‌گیری شده سازه، مثبت‌تر از حد مجاز پتانسیل حفاظتی که توسط معیارهای حفاظت ارائه شده است باشد، سازه تحت حفاظت کامل کاتدی نیست و در نتیجه خورده خواهد شد. البته خوردگی سازه در این حالت کمتر از خوردگی سازه بدون حفاظت است. قابل ذکر است که خوردگی سازه، به نسبت مقدار جریان اعمالی به آن کاهش می‌یابد. درصورتی‌که جریان حفاظتی به طور کامل قطع شود، خوردگی سازه پس از گذشت مدت زمان کوتاهی به حالت اولیه قبل از اعمال حفاظت برمی‌گردد.

عواقب اعمال حفاظت اضافی

همان‌طور که اعمال پتانسیل منفی‌تر از حد مجاز پتانسیل حفاظتی بر سازه‌های آلومینیمی و سربی باعث ایجاد خوردگی در آنها می‌شود، اعمال این میزان پتانسیل بر دیگر سازه‌ها نیز مشکل آفرین خواهد بود. مثلاً اعمال پتانسیل اضافی بر سازه‌های فولادی به‌ویژه فولادهای با استحکام بالا، باعث مشکلاتی همچون به هدر رفتن انرژی الکتریکی، کنده شدن و آسیب دیدن پوشش‌های محافظ و تردی هیدروژنی در آنها می‌شود.

کنده شدن پوشش‌های محافظ

اعمال پتانسیل حفاظتی اضافی می‌تواند منجر به تولید گاز هیدروژن شود. هنگامی که پتانسیل حفاظت کاتدی بر سازه‌های فولادی به عدد ۱/۱۲- ولت نسبت به الکترود مرجع مس - سولفات مس (با قطع جریان لحظه‌ای) برسد، گاز هیدروژن بر سطح فولاد متصاعد و بین سطح فولاد و پوشش محافظ حبس می‌شود. در نتیجه باعث کنده شدن و آسیب به پوشش محافظ می‌گردد. پس از آن الکترولیت به فضای بین پوشش و سطح و فلز نفوذ می‌کند و در آنجا تجمع می‌یابد. حال ازآنجاکه، پوشش‌ها مانند عایقی در مقابل عبور جریان عمل می‌کنند، مانع از رسیدن جریان محافظ به سطح فلز در نقاط آسیب دیده می‌شوند که این امر منجر به وقوع خوردگی در آن نقاط می‌شود. برای سازه‌های مدفون با پوشش خوب، عمل کنده شدن پوشش به‌ندرت در پتانسیل مثبت‌تر از ۱/۶- ولت (در حالت اعمال جریان) و با ۱/۱۲- ولت (در حالت قطع جریان) رخ می‌دهد. پتانسیل‌های اخیر نسبت به الکترود مرجع مس - سولفات مس است.

تردی هیدروژنی

هیدروژن حاصل از اعمال پتانسیل‌های اضافی به سازه‌های فولادی همچنین می‌تواند باعث افت نرمی فولاد شود. این حالت به‌ویژه برای فولادهای با استحکام بالا (با استحکام تسلیم بیش از ۱۳۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) محتمل‌تر است.

سامانه‌های حفاظت کاتدی خودکار، معیارهای حفاظت کاتدی آهن

تغییر وضعیت‌ها، مثل تغییر در سطح آب زیرزمین، تغییرات در سرعت جریان سیال و غیره، جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی را تغییر می‌دهد و بنابراین آن را باید به‌صورت دوره‌ای تنظیم کرد. یک دستگاه ترانسفورماتور - رکتیفایر (T/R) خودکار با یک الکترود مرجع قرار داده شده در زیر زمین همراه با یک دستگاه تقویت‌کننده، می‌تواند این تنظیم را انجام دهد. وقتی پتانسیل اندازه‌گیری شده با الکترود مرجع از حد معینی کمتر باشد، جریان اعمالی به‌صورت خودکار افزایش می‌یابد و بالعکس.

معیارهای حفاظت کاتدی آهن

برای سازه‌های فولادی که باید به‌صورت کاتدی محافظت شوند، پتانسیل آنها باید به اندازه کافی قطبیده شود. معیارهای زیر به‌صورت رایج برای بررسی انجام این قطبش کافی، استفاده می‌شوند:

معیار ۸۵۰ mV−

بر اساس این معیار، پتانسیل سازه فولادی که تحت جریان اعمالی خارجی محافظت می‌شود، در مقایسه با پتانسیل الکترود مرجع مس/سولفات مس (CSE) باید حداقل ۸۵۰ mV- یا منفی‌تر باشد. برای مثال اگر زمین فاقد اکسیژن یا هوا باشد و حاوی باکتری کاهش سولفات (SRB) باشد، این پتانسیل باید ۹۵۰ mV- یا کمتر باشد. پتانسیل لوله/زمین باید در موقعیت «خاموش» بعد از اینکه جریان برای مدت زمان کوتاهی کافی حداقل چهار ساعت اعمال شد و همچنین در موقعیت «روشن» اندازه‌گیری شود که جریان هنوز در حال اعمال است. مسئله‌ای که وجود دارد این است که الکترود مرجع را نمی‌توان مستقیماً روی سیستم خط لوله زیرزمینی قرار داد و بنابراین پتانسیل اندازه‌گیری شده باید ۲۰۰ تا ۳۰۰ mV بیشتر در جهت منفی باشد به‌ویژه در زمین‌هایی با خورندگی بالا برای رسیدن به معیار ۸۵۰ mV- این اختلاف پتانسیل را ایجاد می‌کند. این اختلاف به فاصله الکترود مرجع از خط لوله و مقاومت زمین بستگی دارد. برای مثال، در زمینی با مقاومت (ρ) برابر ۵۰۰۰ ohm.cm و در جایی که فاصله بین الکترود مرجع و خط لوله ۵۰ cm است، پتانسیل اندازه‌گیری شده باید ۱/۲ V- در سطح باشد؛ درحالی‌که، برای فاصله ۱۰۰ cm باید ۱/۵ V- باشد.

معیار جابه‌جایی پتانسیل ۳۰۰ mV

بر اساس این معیار، وقتی جریان کاتدی بر سطح فولادی اعمال می‌شود که باید محافظت شود، پتانسیل اندازه‌گیری شده باید در مقایسه با پتانسیل ایستای سیستم[۱۹۰] که قبل از اعمال جریان حفاظت کاتدی اندازه‌گیری می‌شود، به اندازه ۳۰۰ mV در

---

[۱۹۰]. منظور از پتانسیل ایستا، پتانسیل طبیعی ([illegible]) سازه فلزی در محیط الکترولیت قبل از اتصال هرگونه سامانه حفاظت کاتدی به سازه است.

جهت منفی جابه‌جا شود. به هر حال، ازآنجاکه، پتانسیل سیستم تحت اعمال جریان اندازه‌گیری می‌شود، افت پتانسیل اُهمی IRباید مدنظر قرار گیرد. تفاوت این معیار با معیار ۸۵۰ mV- این است که پتانسیل‌های کمتر از ۸۵۰ mV- ممکن است قابل قبول باشد، اگر پتانسیل ایستای اولیه کمتر از ۵۵۰ mV- باشد، زیرا نتیجه جابه‌جایی ۳۰۰ mV، پتانسیل کمتر از ۸۵۰ mV- خواهد بود.

معیار جابه‌جایی قطبش پتانسیل ۱۰۰ mV

علاوه بر معیار اختلاف پتانسیل ۳۰۰ mV بین پتانسیل ایستا و پتانسیل اندازه‌گیری شده تحت جریان حفاظت کاتدی، جابه‌جایی قطبش ۱۰۰ mV بین پتانسیل ایستایی اولیه و پتانسیل ایستای اندازه‌گیری شده بعد از اعمال جریان حفاظت کاتدی برای حداقل چهار ساعت و سپس توقف آن با هدف اندازه‌گیری پتانسیل، نیز باید وجود داشته باشد. از آنجا که این هر دو اندازه‌گیری در موقعیت خاموش، یعنی یعنی وقتی جریان اعمال نمی‌شود، انجام می‌شود افت پتانسیل اُهمی IR مشاهده نمی‌شود و بنابراین، به لحاظ نظری این معیار قابل اطمینان‌ترین معیار است.

نقطه آغاز ناحیه تافل

مقادیر پتانسیل در مقابل لگاریتم طبیعی جریان $(\log i)$ ترسیم می‌شوند و پتانسیلی که منطبق با نقطه آغاز ناحیه تافل است تعیین می‌شود. اگرچه این معیار پایه علمی خیلی قوی دارد، انجام آن در شرایط واقعی کاری دشوار است.

قابلیت اطمینان معیار حفاظت کاتدی

در عمل، معیار ۸۵۰ mV- معمولاً ترجیح داده می‌شود، زیرا اجرای آن ساده است. به هر حال، این معیار فقط در مقادیر pH نزدیک به شرایط pH طبیعی و در دماهای پایین قابل اطمینان است و افت پتانسیل اُهمی IR هم بایستی مدنظر قرار گیرد. معیار جابه‌جایی قطبش ۱۰۰ mV- به دلیل اینکه شامل افت IR اُهمی نیست، معیار خوبی است، درحالی‌که، معیار نقطه آغاز ناحیه تافل هر دو حداقل پتانسیل و همچنین حداقل جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی را نشان می‌دهد، زیرا E در مقابل $\log i$ رسم می‌شود.

در نتیجه، معیار حفاظت کاتدی معمولاً قابل اطمینان است، اگر افت IR اُهمی در مقادیر مقبولی باشد. برای مثال، برای یک خط لوله فولادی که پتانسیل ایستای ۵۰۰ mV- در مقایسه با الکترود مرجع مس/سولفات مس (CSE) دارد، جریان حفاظت کاتدی اعمالی، پتانسیل لوله/زمین زیر ۷۵۰ mV- را در ابتدا نتیجه می‌دهد و سپس بعد از قطبش به ۸۵۰ mV- می‌رسد که به معیار اول دست یافته است. به معیار دوم هم رسیده‌ایم، زیرا اختلاف بین پتانسیل‌های «روشن» و «خاموش» برابر $-850\text{mV} - (-500\text{mV}) = 350\text{mV}$ است. بعد از اینکه جریان قطع شد، مقدار پتانسیل برابر ۷۰۰ mV- اندازه‌گیری می‌شود و بنابراین $-700\text{mV} - (-500\text{mV}) = 200\text{mV}$ که بیشتر ۱۰۰ mV است، و ازاین‌رو، به معیار سوم که معیار جابه‌جایی قطبش است هم دست یافته‌ایم. پتانسیل ۷۰۰ mV- به اندازه ۱۵۰ mV بیشتر از ۸۵۰ mV- است و بنابراین با توجه به مقادیر

جابه‌جایی قطبش، این نشان می‌دهد که افت IR اُهمی حدود ۱۰۰ mV است و پتانسیل به این مقدار کاهش می‌یابد؛ بنابراین، تا زمانی که افت IR اُهمی در مقابل مقدار پتانسیل کاهش می‌یابد، پتانسیل می‌تواند حداقل مقادیر ۱۰۰ mV باقی بماندو سپس هرکدام از این معیارها قابل اطمینان هستند، معیار اولیه به دلیل سادگی تعیین ترجیح داده می‌شود؛ به هر حال، برای افت پتانسیل اُهمی بزرگ‌تر، معیار جابه‌جایی قطبش ۱۰۰ mV تنها معیار قابل اطمینان خواهد بود.

اثرات تداخل سامانه‌های حفاظت کاتدی

به طور کلی، در محل‌های نزدیک به بستر آندی، جایی که جریان اعمال می‌شود، یک افزایش مثبت در پتانسیل زمین رخ می‌دهد و سیستم‌های خطوط لوله دیگر و سازه‌های فلزی در این ناحیه تحت تأثیر قرار می‌گیرند. این افزایش، به مقاومت خاک، جریان گرفته شده از آند و فاصله از بستر آندی بستگی دارد و بر طبق فرمول فوق محاسبه می‌شود.

انواع مهم اثرات تداخل که سامانه‌های حفاظت کاتدی به سازه‌های فلزی بیگانه تحمیل می‌کنند که در نزدیک سامانه حفاظت کاتدی قرار دارند و شامل اثرات تداخل آندی و کاتدی هستند، درحالی‌که، اثرات تداخل ناشی از خطوط انتقال ولتاژ بالا، وسایل نقلیه ریلی، جوشکاری روی کشتی، تداخل فلنج‌های عایقی و تداخل کشتی - اسکله هم رایج هستند. صرف‌نظر از نوع تداخل، اگر اقدامات پیشگیرانه انجام نشود، اثرات تداخل ممکن است سبب خوردگی تداخلی شدید به دلیل جریان‌های سرگردان شوند.

تداخل آندی

تداخل آندی به‌وسیله جریان‌های سرگردان، نشأت گرفته از بستر آندی سامانه حفاظت کاتدی، ایجاد می‌شود و به سازه‌های فلزی اطراف وارد می‌شود و در جایی که وارد می‌شوند سبب خوردگی نمی‌شوند، اما در محلی که سازه فلزی خارج می‌شوند، جایی که کمترین مقاومت را دارد، خوردگی ایجاد می‌کنند.

در مورد سیستم‌های خطوط لوله زیرزمینی، وقتی جریان حفاظت کاتدی از بستر آندی که در فاصله معینی از خط لوله قرار دارد، اعمال می‌شود، یک شیب پتانسیل در جهت مثبت اطراف بستر آندی شکل می‌گیرد، درحالی‌که، یک کاهش در پتانسیل در جهت منفی در نواحی نزدیک خط لوله مشاهده می‌شود. با رفتن از آند به‌سمت کاتد و نزدیک آند، بسته به ظرفیت جریان تولیدی بستر آندی، کاهش پتانسیل می‌تواند بین ۱۰ V تا ۵۰ V باشد، درحالی‌که، کاهش پتانسیل در نواحی بین آند و کاتد و دورتر از هر دو می‌تواند قابل صرف‌نظر کردن باشد؛ بالاخره، کاهش پتانسیل درست اطراف کاتد در یک ناحیه کوچک، بسته به کیفیت پوشش خط لوله بین ۱ تا ۲ V است. این نواحی پتانسیل اطراف آند و کاتد ممکن است سبب تداخل در سازه‌های دیگری که نزدیک هستند شده و به خوردگی تداخل منجر شود.

وقتی یک جریان بالا از دستگاه ترانسفورماتور - رکتیفایر (T/R) سامانه حفاظت کاتدی به بستر آندی اعمال می‌شود، پتانسیل زمین در جهت مثبت افزایش می‌یابد. این افزایش با جریان منتشره از آند به زمین و همچنین با مقاومت زمین تناسب مستقیم دارد. اختلاف پتانسیل ایجاد شده در سطح با فرمول زیر اندازه‌گیری می‌شود:

$$\Delta E = \frac{i\rho}{2\pi r}$$

برای مثال، اختلاف پتانسیل ایجاد شده در سطح، در زمینی با مقاومت (ρ) برابر ۳۰۰۰ ohm.cm و جریان حفاظت کاتدی (i) برابر ۱۰ آمپر، در فاصله $r = 100m$ دورتر از بستر آندی، ۴۴۷ mV است. سازه‌های فلزی پیرامون، با این اختلاف پتانسیل مثبت تحت تأثیر قرار می‌گیرند، به‌ویژه اگر آنها لخت یا به‌صورت ضعیف پوشش شده باشند، نتیجه قرار گرفتن آنها در معرض جریان‌های سرگردان، خوردگی تداخل آندی است. محل‌هایی که جریان وارد می‌شود کاتد و محل‌هایی که جریان خارج می‌شود، آندی می‌شوند. اگر محلی که جریان از سازه خارج می‌شود، یک سطح باریک داشته باشد، خوردگی می‌تواند شدید باشد. خوردگی تداخلی، به محل بستر آندی و هندسه آن بستگی دارد. اقدامات زیر برای پیشگیری از خوردگی تداخل آندی می‌تواند انجام شود:

۱. در مرحله طراحی پروژه، باید طوری طرح‌ریزی شود که بسترهای آندی حداقل در ۷۰ متری سازه‌های فلزی اطراف باشند؛
۲. بخش‌هایی از بدنه سازه فلزی بیگانه که در میدان تداخل آندی قرار می‌گیرند، خیلی خوب پوشش داده شوند؛
۳. اگر در مرحله بهره‌برداری با خوردگی تداخل مواجه شویم، آندهای گالوانیکی باید به محل‌های بحرانی سازه فلزی بیگانه، برای مثال سیستم‌های خط لوله دیگر، متصل شوند، و بنابراین جریانی که به سازه وارد می‌شود، می‌تواند از طریق آندها تخلیه شود؛
۴. لوله‌ها و صفحات فلزی در هر دو سمت بخشی از خط لوله بیگانه که در حوزه تداخل آندی باقی می‌ماند، قرار داده شود و به قطب مثبت بسترهای آندی متصل شوند که به‌عنوان سپر سیستم خط لوله بیگانه عمل می‌کنند؛
۵. بستر آندی چاهی عمیق می‌تواند به جای بسترهای آندی چاهی سازه‌ای استفاده شود. به این طریق، مرکز حوزه پتانسیل آندی ناحیه‌ای کروی خواهد بود که ۲۰ تا ۳۰ m زیر زمین است، در واقع اثر تداخل بر سازه فلزی در سطح کاهش می‌یابد.

تداخل کاتدی

تداخل کاتدی با کاهش پتانسیل استوانه‌ای حول خط لوله‌ای که محافظت می‌شود، ایجاد می‌گردد که نتیجه آن جریان سرگردان ناشی از سازه‌های فلزی پیرامونی است که به سیستم خط لوله محافظت شده وارد می‌شوند و نتیجه خوردگی شدید در محلی که جریان سرگردان از سازه فلزی خارج می‌باشد، به‌ویژه اگر این سازه‌های فلزی لخت یا به‌صورت ضعیفی پوشش شده باشد. خوردگی تداخل در سازه فلزی بیگانه به دلیل قرار گرفتن در ناحیه کاهش پتانسیل منفی خط لوله‌ای رخ می‌دهد که به‌صورت کاتدی محافظت می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، خوردگی تداخلی در سازه فلزی دیگر، برای مثال در خط لوله دیگری رخ می‌دهد که به‌صورت کاتدی محافظت نمی‌شود، زیرا این سازه به ناحیه منفی‌تر از ناحیه خودش وارد می‌شود. این اختلاف در پتانسیل دو ناحیه که خط لوله دیگر از آن عبور می‌کند، سبب می‌شود که بخشی از لوله که در حوزه پتانسیل منفی‌تر قرار دارد آند شده و خورده شود. این نوع خوردگی تداخلی با افزایش جریان کاتدی افزایش می‌یابد.

طول ناحیه‌ای که تحت تأثیر تداخل کاتدی قرار دارد به‌وسیله اندازه‌گیری‌های پتانسیل سازه فلزی بیگانه، برای مثال خط لوله دیگر، اندازه‌گیری می‌شود. اقداماتی که می‌تواند برای پیشگیری از خوردگی تداخل کاتدی در سازه فلزی بیگانه انجام شود، که هدف اصلی آن کاهش اختلاف پتانسیلی است، به شرح زیر است:

۱. خط لوله‌ای که به‌صورت کاتدی محافظت می‌شود و خط لوله یا سازه فلزی بیگانه در نزدیک‌ترین محل به هم با یک اتصال فلزی مرتبط شوند و بنابراین از این طریق خروج جریان‌های سرگردان از سازه بیگانه با یک رسانای الکتریکی انجام می‌شود. شدت جریان سرگردان باید برای رسیدن به اختلاف پتانسیل کافی باشد و بنابراین یک مقاومت با اندازه مناسب بین دو سازه فلزی بر اساس اتصال الکتریکی فلزی نصب می‌شود؛
۲. یک صفحه فلزی یا یک فلز قراضه در بین خط لوله محافظت شده به‌صورت کاتدی و خط لوله بیگانه و در نزدیک‌ترین محل به هم قرار داده می‌شود و به خط لوله بیگانه متصل می‌شود. در نتیجه، خوردگی تداخلی در این فلز قراضه رخ می‌دهد، جنس کهنه و قراضه به جای خط لوله بیگانه. به لحاظ نظری، هرچه فلز قراضه دورتر از خط لوله بیگانه باشد، می‌تواند آن را از خوردگی تداخلی بیشتر محافظت کند؛ به هر حال، در عمل، این کار به یک افزایش در مقدار جریان کاتدی تولید شده هم منجر می‌شود؛ فلز کهنه، قراضه یا صفحات فلزی باید در امتداد خط لوله بیگانه و درست جایی بین دو خط لوله خودی و بیگانه قرار داده شوند؛
۳. بخش‌هایی از خط لوله بیگانه که در ناحیه کاهش پتانسیل خط لوله محافظت شده به‌صورت کاتدی قرار می‌گیرند، باید به‌خوبی پوشش داده شده شوند؛
۴. به نواحی از خط لوله بیگانه یا سازه فلزی محافظت نشده که در ناحیه کاهش پتانسیل خط لوله محافظت شده به‌صورت کاتدی قرار دارند، به تعداد مناسب آندهای گالوانیکی متصل شوند. به این طریق، جریان‌های سرگردان از طریق این آندهای گالوانیکی از خط لوله بیگانه خارج می‌شوند. لازم نیست این آندها، پتانسیل بالایی داشته باشند، معمولاً آندهای روی کافی هستند. به‌علاوه این آندها، لازم نیست بین دو خط لوله قرار بگیرند. فقط کافی‌ست آنها تا آنجا که ممکن است در نزدیک‌ترین محل به خط لوله بیگانه قرار داده شوند.

موارد تداخل ویژه

غیر از تداخل آندی و کاتدی، انواع دیگری از تداخل‌های ترکیبی هم وجود دارد:

۱. اثر تداخل وسایل نقلیه ریلی

اغلب، جریان‌های سرگردان از وسیله نقلیه ریلی که با جریان مستقیم کار می‌کنند، به سازه‌های فلزی اطراف وارد می‌شود. وسیله نقلیه ریلی با ولتاژ بالا کار می‌کنند و جریان‌های هزار آمپری در طی حرکت‌شان خارج می‌شود. قطب مثبت جریان مستقیم به کابل تغذیه قطار متصل می‌شود، درحالی‌که، قطب منفی به ریل متصل است. با حرکت قطار، جریان از روی ریل عبور و به این ایستگاه برمی‌گردد. در جایی که قطار از آن عبور می‌کند، پتانسیل زمین در جهت مثبت افزایش می‌یابد و جریان‌های سرگردان از ریل به زمین نشت می‌کند. اگر یک سیستم خط لوله در اطراف وجود داشته باشد، این جریان‌های سرگردان ممکن است از طریق خط لوله به ایستگاه برگردند. با حرکت قطار، جاهایی که جریان سرگردان به خط لوله وارد می‌شود، تغییر می‌کند. در واقع، جاهایی مهم نیستند که جریان‌های سرگردان وارد خط لوله می‌شوند. جایی که جریان سرگردان از خط لوله خارج می‌شود، خیلی مهم است، جایی که در آنجا خوردگی رخ می‌دهد. وقتی قطار در ایستگاه است، ریل‌ها و

زمین پتانسیل منفی‌تری از حالت عادی دارند. به هر حال، با دور شدن قطار از ایستگاه، پتانسیل ریل و زمین در جهت مثبت افزایش می‌یابند.

اگر پوشش خط لوله آسیب دیده باشد یا کیفیت پایینی داشته باشد، جریان‌های سرگردان به آسانی وارد خط لوله می‌شوند. وجود فلج‌های عایقی روی خط لوله و این واقعیت که مسیر خط لوله بعد از نقطه تقاطع از ایستگاه قطار دور می‌شود، شدت خوردگی را کم نمی‌کند، اما ممکن است جایی از خط لوله تغییر کند که خوردگی در آن رخ می‌دهد. اقدامات پیشگیرانه زیر مرسوم است:

۱. آسان‌ترین اقدام، افزایش کیفیت پوشش خط لوله، حداقل در نواحی است که خط لوله به موازات ریل قطار است؛
۲. اقدام دیگر، عایق کردن زمین اطراف ریل است، که از نشت جریان سرگردان به زمین نزدیک جلوگیری می‌کند؛
۳. جلوگیری از مقاومت ریل در نقاط اتصال نیز پتانسیل زمین اطراف را کاهش می‌دهد. رسانایی ریل‌ها با کمک اتصالات کابلی انجام می‌شود و کابل‌های سست و شل پتانسیل را افزایش می‌دهند که به یک افزایش در جریان‌های سرگردان منتشره به زمین منجر می‌شود؛
۴. اجازه ندادن به خروج جریان سرگردان از خط لوله، که سعی می‌کند به ایستگاه برگردد و بنابراین معمولاً ترک خط لوله در جایی نزدیک به ایستگاه، هم از خوردگی پیشگیری خواهد کرد. این کار می‌تواند با قرار دادن یک رابط تداخلی بین قطب منفی دستگاه ترانسفورماتور و خط لوله انجام می‌شود. در مورد خط لوله‌ای که نزدیک به دستگاه ترانسفورماتور نیست، یک اتصال فلزی بین ریل و خط لوله قرار داده می‌شود که باعث می‌شود جریان سرگردان از لوله به کمک ریل به ترانسفورماتور برگردد. اینجا مسئله تعیین مقاومت این اتصال است، زیرا جریان‌های سرگردان فقط وقتی تولید می‌شوند که قطار حرکت می‌کند، و شدت این جریان‌ها با حرکت قطار تغییر می‌کند. بنابراین، مقاومت باید به‌صورت خودکار با تغییر شدت جریان تنظیم شود، در غیر این صورت، زمان‌هایی که قطار حرکت نمی‌کند، جریان غیرلازم از دستگاه ترانسفورماتور به خط لوله اعمال می‌شود.
۵. اگر خط لوله با ریل تقاطع عرضی داشته باشد، پس جایی که جریان وارد خط لوله می‌شود را می‌توان با قطعیت شناسایی کرد؛ بنابراین، از ورود جریان‌های سرگردان می‌توان به‌وسیله اعمال حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان به این ناحیه از خط جلوی لوله جلوگیری کرد. سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان باید در هر دو طرف نقطه تقاطع نصب شوند و فقط باید وقتی قطارها حرکت می‌کنند، کار کند که می‌تواند با کمک ترانسفورماتور انجام شود که کنترل پتانسیل خودکار دارند. به‌عبارت‌دیگر، وقتی پتانسیل لوله از زمین به دلیل عبور قطار به حد معینی برسد، دستگاه ترانسفورماتور شروع به کار کند و با دور شدن قطعاً متوقف شود. پتانسیل‌های خط لوله/زمین به طور مداوم با الکترود مرجع ثابت قرار داده شده در ناحیه‌ای که اثر تداخل جریان سرگردان حداکثر است، اندازه‌گیری شود که به دستگاه ترانسفورماتور متصل می‌شود و بنابراین، وقتی پتانسیل لوله/زمین به حد مورد نظر برسد، سیگنال‌ها شروع به اعمال کنند.

۲. اثر تداخل خطوط انتقال ولتاژ بالا

به دلیل جریان‌های ولتاژ بالای حمل شده به‌وسیله خطوط انتقال یک میدان پتانسیل ایجاد می‌شود که به انتشار جریان‌های سرگردان به خط لوله نزدیک تیر زمینی پایه‌های خطوط انتقال منجر می‌شود. شدت جریان‌های سرگردان به فاصله بین خط لوله و خط انتقال جریان، فاصله‌ای که آنها به موازات هم می‌باشند و کیفیت پوشش خط لوله بستگی دارد. اگر خطوط انتقال

جریان، قبل از ساخت خطوط لوله وجود داشته‌اند، پس باید مقدار نزدیکی خط لوله به خطوط انتقال جریان و طول مسیری که آنها می‌توانند به موازات هم باشند، تعیین گردد.

به طور معمول، جریان متناوب حمل شده به‌وسیله خطوط انتقال جریانی که به خطوط لوله نزدیک آنها وارد می‌شوند، سبب خوردگی نمی‌شوند؛ به هر حال، مسئله این نیست که خوردگی ایجاد می‌کنند، بلکه مسئله این است که خطوط لوله نباید پتانسیل بالا حمل کند.

در موردی که خطوط انتقال جریان بعد از نصب خطوط لوله احداث می‌شوند، اقدامات زیر برای پیشگیری از اثرات‌سوء جریان‌های سرگردان ولتاژ بالا انجام می‌شود:

۱- در نقاط ابتدایی و انتهایی خط لوله که خطوط انتقال جریان را قطع می‌کند یا به موازات آن است، محافظ برق[۹۱] نصب شود. پتانسیل کاری این محافظ‌های برق حداقل ۲/۵ kV باشد؛

۲- یک سپر فلزی یا یک لوله قراضه را می‌توان در نواحی که خط لوله با خطوط انتقال جریان موازی است و نزدیک‌تر به خط لوله قرار داد.

۳- تداخل فلنج عایقی

وقتی اختلاف پتانسیلی در محل پایان خط لوله ایجاد می‌شود، مانند نقطه نزدیک به مخزن، جایی که خط لوله به کمک فلنج عایقی به دو قسمت جدا می‌شود، تداخل فلنج عایقی رخ می‌دهد. خوردگی تداخل در نواحی نزدیک به فلنج و در بخشی از خط لوله اتفاق می‌افتد که به‌صورت کاتدی محافظت می‌شود.

۴- تداخل کشتی – اسکله

معمولاً در دریا اثرات تداخل قابل چشم‌پوشی است، زیرا آب دریا خیلی رسانا است. به هر حال، نتیجه اعمال ۲۰ A برای حفاظت کاتدی تیرهای اسکله‌ای که ۱۰۰ متر زیر دریا نصب شده است، شیب جریان ۱۰۰ mV / ۱ m است و وقتی یک کشتی به این اسکله‌ای نزدیک می‌شود که به‌صورت کاتدی محافظت می‌شود، یک اختلاف پتانسیل ۲ تا ۳ ولت می‌تواند شکل بگیرد و زمانی که کشتی در اسکله است در معرض خوردگی تداخل قرار می‌گیرد. به‌علاوه، جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی اسکله نیز اساسی افزایش می‌یابد.

۵. جریان‌های سرگردان ناشی از جوشکاری در کشتی

هنگام جوشکاری کشتی به‌وسیله ماشین جوشکاری که قطب مثبت آن در اسکله ارت[۹۲] شده است، جریان‌های سرگردان از ماشین جوشکاری به دریا می‌روند و از طریق آن وارد بدنه کشتی می‌شود که نتیجه آن خوردگی تداخلی در جایی است که از کشتی خارج می‌شود. به هر حال، اگر قطب مثبت ماشین جوشکاری به کمک یک کابل عایقی به کشتی ارت شود، هیچ

---

1 محافظ تغییر ناگهانی ولتاژ، دستگاهی که افزایش ناگهانی برق متناوب را جذب می‌کند.

خوردگی رخ نمی‌دهد، زیرا جریان‌های سرگردان ناشی از ماشین جوشکاری به دریا می‌رود و سپس به بدنه کشتی وارد می‌شود و از آنجا با کمک کابل عایقی به ماشین جوشکاری باز می‌گردد.

معیارهای پروژه‌های حفاظت کاتدی

برای نصب و اجرای موفقیت‌آمیز پروژه‌های حفاظت کاتدی، مراحل زیر باید به شکل منظم و متوالی دنبال شود:

۱. اندازه سازه‌ای تعیین گردد که باید به‌صورت کاتدی محافظت شود؛
۲. ویژگی‌های الکتروشیمیایی محیط پیرامون سازه مشخص شود؛
۳. باید مشخص گردد که حفاظت کاتدی به روش آندی فداشونده یا حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان برای سیستم مربوطه مناسب‌تر است؛
۴. سازه‌های فلزی بیکار در ناحیه سازه‌ای که باید محافظت شود، مشخص گردند؛
۵. نواحی امتداد خط لوله برای محیط زیست بی‌هوازی بررسی گردد؛
۶. عمر دستگاه حفاظت کاتدی برآورد گردد؛
۷. مقاومت پوشش یا به‌صورت نظری محاسبه یا به‌صورت تجربی تعیین گردد؛
۸. جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی محاسبه گردد؛
۹. در مورد سیستم حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده، تعداد و محل آندها تعیین شود؛
۱۰. در مورد سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، نوع بستر آندی، چاهی عمیق یا بستر آندی سطحی، تعیین گردد. اگر بستر آندی چاهی عمیق ترجیح داده شود، عمق چاه، نوع و تعداد آندهایی که باید در چاه قرار داده شود مشخص گردد؛
۱۱. مقاومت بستر آندی تعیین شود و عمر بستر آندی برآورد گردد؛
۱۲. انواع کابل‌های اتصال و سطح مقطع آنها تعیین گردد؛
۱۳. پتانسیل جریان مستقیم دستگاه ترانسفورمر/رکتیفایر (T/R) تعیین شود؛
۱۴. ظرفیت و محل دستگاه ترانسفورمر/رکتیفایر (T/R) تعیین شود؛
۱۵. باید مشخص گردد که دستگاه ترانسفومور رکتیفایر (T/R) خودکار یا دستی باشد.

هزینه‌های حفاظت کاتدی

هزینه سامانه‌های حفاظت کاتدی شامل هزینه‌های اجرای اولیه، هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه‌های تعمیر و نگهداری است. هزینه‌های اجرای اولیه شامل هزینه فاز پروژه و طراحی، هزینه مصالح و تجهیزات، هزینه نصب و سود پیمانکار است. در سامانه حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، هزینه‌های اجرای اولیه برابر هزینه‌های حدود ۱۰ تا ۱۵ سال بهره‌برداری است و بنابراین در مقایسه با سامانه حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده بیشتر است.

مهم‌ترین معیار تعیین هزینه، جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی است. جریان حفاظت کاتدی کم مساوی هزینه‌های اجرای اولیه و بهره‌برداری پایین است. به هر حال، رابطه بین این متغیرها خطی نیست. هزینه‌های اجرای اولیه در جریان یک آمپر برای دستگاه‌های T/R کوچک با ظرفیت جریان پایین از هزینه برای دستگاه T/R بزرگ با ظرفیت بالا، بیشتر است. در میان این

موارد، هزینه‌های اجرای اولیه، هزینه مصالح و تجهیزات متناسب با جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی است، درحالی‌که، بقیه ثابت هستند. هزینه شدت جریان واحد برای سامانه‌های حفاظت کاتدی برای ظرفیت جریان کمتر از A ۵ خیلی بالا است، که با افزایش ظرفیت جریان تا A ۲۰ کاهش می‌یابد. درحالی‌که، برای دستگاه‌های که ظرفیت جریان بیشتر از A ۲۰ دارند، تغییر زیادی در هزینه اتفاق نمی‌افتد. همچنین، هزینه به جریان در سال، با افزایش عمر سامانه حفاظت کاتدی کاهش می‌یابد.

توجه به این موضوع مهم است که جریان متناوب دریافتی از شبکه برق که برای استفاده در سامانه حفاظت کاتدی به جریان مستقیم تبدیل می‌شود، قیمت ثابتی ندارد. هزینه جریان متناوب دریافتی از شبکه برق به بازده دستگاه T/R ، پتانسیل جریان مستقیم تولید شده و هزینه توان برق (KW.hour) بستگی دارد.

با کاهش جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی، هزینه‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع با افزایش کیفیت پوشش انجام می‌شود که هزینه‌های اجرایی اولیه و بهره‌برداری را کاهش می‌دهد. نتیجه اعمال یک پوشش با کیفیت، ضریب میرایی[۳] کم است که به معنای طول خط لوله بیشتری است که می‌تواند از یک محل حفاظت شود، و به کاهش تعداد دستگاه‌های T/R منجر می‌شود و هزینه‌های اجرای اولیه در یک کیلومتر خط لوله را کاهش می‌دهد. به هر حال، صرف هزینه برای پوشش باید با هزینه‌های کاهش یافته به‌واسطه کاهش شدت جریان متناسب باشد، زیرا رابطه آنها خطی نیست. بنابراین، معمولاً یک پوشش با سطح کیفیت متوسط به حداکثر کاهش هزینه منجر خواهد شد.

برای سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، هزینه‌های بستر آندی با افزایش تعداد آندها افزایش می‌یابد. به هر حال، مقاومت بستر آندی نیز با افزایش تعداد آندها کاهش می‌یابد، که استفاده از دستگاه T/R با ظرفیت پایین برای تولید جریان حفاظت کاتدی با شدت برابر را اجازه می‌دهد. بنابراین، تعداد بهینه آندهایی که باید نصب شود و بیشترین صرفه اقتصادی را داشته باشد، هزینه‌های بستر آندی و دستگاه‌های T/R را متعادل می‌کند.

مقایسه سامانه‌های حفاظت کاتدی

معیار اصلی، هنگام انتخاب هریک از دو سامانه حفاظت کاتدی، جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی و مقاومت زمین است. معمولاً، اگر $i > 1A$ و $\rho < 3000\text{ohm.cm}$ باشد. سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده مناسب‌تر هستند. عوامل دیگری که بر انتخاب سامانه حفاظت کاتدی اثرگذار است، عبارتند از:

۱. وجود منبع برق: در جاهایی که منبع برق وجود ندارد، سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده تنها انتخاب هستند، زیرا به منبع جریان خارجی نیاز ندارد. آندهای گالوانیک منبع جریان مورد نیاز هستند. اگر سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان بایستی استفاده شود، پس جریان برق باید با استفاده از یک ژنراتور یا انرژی خورشیدی از طریق سلول‌های فتوولتائیک تولید شود.
۲. هزینه دستگاه: جریان تولید شده به‌وسیله سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده، گران‌تر از جریان دریافتی از شبکه برق و تبدیل آن به جریان مستقیم به‌وسیله دستگاه T/R در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان است. بنابراین، اگر جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی زیاد نباشد، سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده

[1] .

[3] (میرایی، اتلاف الکتریکی در یک هادی در[9]نتیجه شار جریان است)

معمولاً ترجیح داده می‌شوند. به‌علاوه، هزینه‌های اجرای اولیه سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان از سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده بیشتر است؛ بنابراین، اگر مدت زمان برنامه‌ریزی شده برای حفاظت کاتدی کوتاه و جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی کم باشد، سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده ترجیح داده می‌شوند.

۳. مقاومت زمین: پتانسیل مدار سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده معمولاً پایین است و بنابراین، علی‌القاعده در زمین‌هایی با مقاومت تا ۵۰۰۰ ohm.cm به کار می‌روند و نه در آب‌های شیرین یا در زمین‌هایی با مقاومت بالا، مگر اینکه آندهای گالوانیک با پتانسیل بالا استفاده شوند. از طرف دیگر، سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان را می‌توان در زمین‌هایی با مقاومت بالا استفاده کرد که با کاهش مقاومت بستر آندی با استفاده از بستر آندی چاهی عمیق در خاک‌های خشک یا با افزایش جریان حفاظت کاتدی، به این موضوع دست یافت.

۴. سهولت اجرا: اجرای سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده آسان‌تر از سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال و جریان است. اگر جریان مورد نیاز به دلیل عوامل غیرقابل پیش‌بینی به مرور زمان افزایش یابد و از ظرفیت آندهای موجود تجاوز کند، پس برای تولید شدت جریان بالاتر، باید تعداد آند بیشتری می‌توان نصب کرد، درحالی‌که، در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان دستگاه‌های T/R نمی‌توانند برای کار در بیشتر از ظرفیت‌شان تنظیم شوند و در طی بهره‌برداری نمی‌توان مقاومت بستر آندی را کاهش داد؛ بنابراین، چنین اقداماتی باید در ابتدای زمان طراحی مدنظر قرار گیرند.

۵. تنظیم جریان حفاظت کاتدی: اگر جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده افزایش یابد، پتانسیل سیستمی که باید محافظت شود کاهش می‌یابد و به اختلاف پتانسیل بیشتر بین کاتد و آند منجر می‌شود که نتیجه آن جریان خروجی بیشتر از آند است. درحالی‌که، در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، یا دستگاه T/R به‌صورت دستی تنظیم می‌شود یا یک الکترود مرجع ممکن است در سامانه حفاظت کاتدی با اتصال به دستگاه T/R نصب گردد که سبب تنظیم خودکار دستگاه T/R می‌شود. اگر تنظیم جریان مناسب به موقع انجام نشود، ممکن است حفاظت کاتدی فراهم نشود یا حفاظت بیش از حد رخ دهد.

۶. انحلال سازه فلزی حفاظت شده به‌صورت کاتدی: در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده انحلال[۴]۹ر در خطوط لوله مشاهده نمی‌شود، در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، به دلیل وجود پتانسیل‌های بالا در نواحی نزدیک به آند، این موضوع دیده می‌شود.

۷. اثرات تداخل: ازآنجاکه، پتانسیل زمین/آند در سامانه‌های حفاظت کاتدی گالوانیکی پایین است، اثرات تداخل در سازه‌های فلزی قابل چشم‌پوشی است. از طرف دیگر، ممکن است جریان‌های سرگردان از سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان تولید شود که به اثرات تداخل منجر شود؛ بنابراین، سازه‌های اطراف باید به‌صورت دوره‌ای پایش و اقدامات پیشگیری از خوردگی انجام شود.

۸. نگهداری: ازآنجاکه، دستگاه T/R معمولاً در محل‌های با دسترسی راحت قرار دارند و جریان از این محل‌ها می‌تواند تنظیم شود، کنترل‌های دوره‌ای سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان آسان‌تر است؛ بنابراین، سامانه از یک محل قابل کنترل است، درحالی‌که، در مورد سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده هر آند باید به‌صورت جداگانه بررسی شود.

1 9 4

۹. تعویض: در هنگام وجود یک مشکل در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده، آندی که مشکل دارد پیدا و تعویض می‌گردد، درحالی‌که، وقتی در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان مشکلی در بستر آندی پیش آید، ممکن است لازم شود که کل سیستم تعویض گردد.
۱۰. اتصالات الکتریکی: اتصالات کابلی در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده شبیه هم است، درحالی‌که، اتصالات کابل دستگاه T/R به آندهای در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان باید به‌خوبی عایق شوند، زیرا حتی یک شکاف کوچک ممکن است به جدایی اتصال به آند منجر شود. به‌علاوه، خطر چنین ریسکی در آندهای فداشونده وجود ندارد، درحالی‌که، سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، قطب منفی دستگاه T/R به سازه فلزی که باید حفاظت شود، متصل و قطب مثبت آن به بستر آندی متصل گردد؛ اگر چنین نباشد، سازه فلزی که باید حفاظت شود به‌سرعت خورده می‌شود.

علی‌رغم مزایای سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده، هزینه در جریان واحد بالا است و بنابراین در جایی که جریان‌های زیاد مورد نیاز است، ترجیح داده نمی‌شود. ازآنجاکه، آندهای گالوانیک پتانسیل پایینی دارند، نمی‌توانند در الکترولیت‌هایی با مقاومت بالا استفاده شوند و اگر در زمان بهره‌برداری به هر دلیلی شدت جریان حفاظت کاتدی از مقادیر بیشتر از ظرفیت جریان آندهای گالوانیک افزایش یابد، آندهای جدید باید نصب شوند.

به‌علاوه، نیمی از هزینه‌های اجرای اولیه سامانه‌های حفاظت کاتدی مربوط به آندهاست و بنابراین انتخاب آند مهم است. جریان خروجی از مساحت واحد آند باید تا آنجا که ممکن است بالا باشد و به مرور زمان مقاومت آندی نباید افزایش یابد؛ همچنین، اتلاف وزن در جریان خروجی از آند به آمپر سال (A.year) باید تا آنجا که ممکن است کم باشد. به‌علاوه، آندها باید مقاوم و نسبت به عوامل شیمیایی محیط بی‌اثر[۵]باشند. ازآنجاکه، افزایش در پتانسیل ممکن است به تصاعد گاز هیدروژن منجر شود که نتیجه آن تردی هیدروژنی و نقص پوشش خواهد بود، باید در زمان اجرای حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان خیلی دقت کرد.

نقشه‌برداری و اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک

حفاظت کاتدی لوله هم در آب و هم در خاک امکان‌پذیر است. اگر قصد بر آن باشد که از حفاظت کاتدی برای جلوگیری از خوردگی خطوط لوله فولادی استفاده شود، نخست باید یاد بگیریم که چگونه مقاومت ویژه این محیط را اندازه بگیریم.

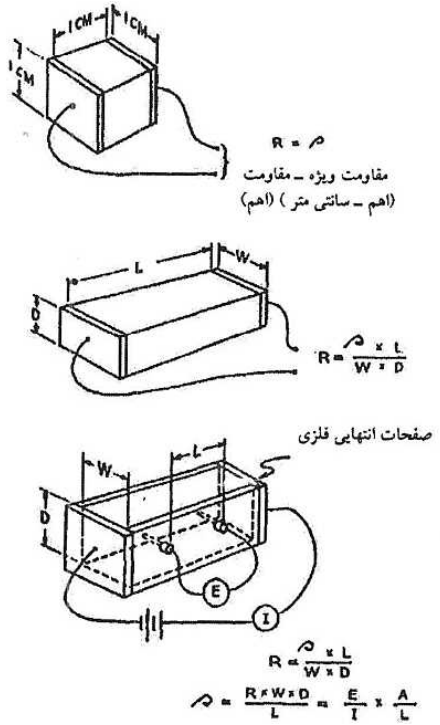
واحدهای مقاومت ویژه خاک

واحد مقاومت ویژه خاک اهم- سانتی‌متر (Ohm – Centimeter) است، که معمولاً به‌صورت ohm-cm نشان داده می‌شود؛ مقاومت ویژه خاک از لحاظ عددی برابر است با مقاومت یک مکعب از خاک با ابعاد یک سانتی‌متر، که از سطوح مقابل هم مطابق شکل ۴-۳ اندازه‌گیری شده است. مقاومت یک حجم جامد چهار ضلعی غیر از مکعب به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$R=\frac{\rho\times L}{W\times D}$$

1 [illegible] 9 5

که W، L و D ابعاد با واحد سانتی‌متر، مطابق شکل ۴-۳، ρ مقاومت ویژه است، برای اینکه رابطه برقرار باشد واحد ρ باید ohm-cm باشد. مقاومت بین هر دو محل اتصال، با هر شکل و اندازه، در تماس با توده‌ای از خاک، به هر مقدار، توسط اندازه و معادلات حجمی و همچنین توسط مقاومت ویژه خاک تعیین می‌شود. برای موارد ساده، می‌تواند محاسبه شود، ولی پیچیدگی‌های ریاضی خیلی زیاد هستند.



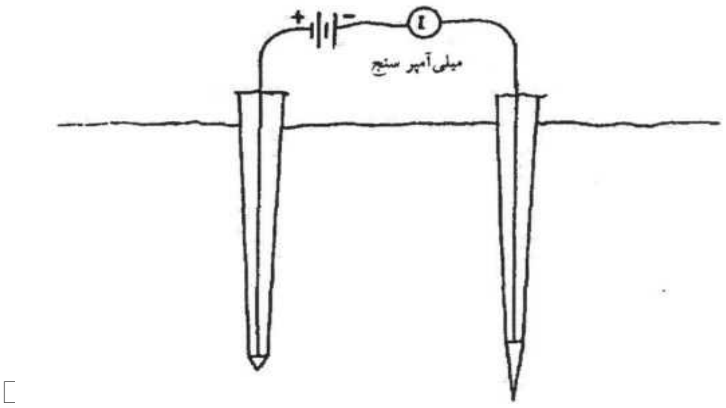
شکل ۴-۳، (الف) مقاومت ویژه (ρ) برحسب ohm-cm از لحاظ عددی با مقاومت (R) برحسب اهم بین سطوح مقابل یک مکعب یا وجوه ۱ cm برابر است. (ب) مقاومت یک جسم مکعب مستطیلی. (ج) جعبه خاک، جایی که ρ از طریق اندازه‌گیری مقاومت بین صفحات میله‌ای دو پتانسیلی به دست می‌آید.

تعیین مقاومت ویژه به‌وسیله دو میل

یک دستگاه مشابه آن چه در شکل ۴-۳ نشان داده شده است می‌تواند برای تعیین مقاومت ویژه نمونه‌های خاک به کار رود؛ در تحقیقات خوردگی، آزمایش خاک در محل بسیار مفید است.

اگر محل اتصال در خاک قرار گیرند، آن‌گاه تعیین مقاومت ویژه خاک با اندازه‌گیری مقاومت بین دو الکترود ممکن خواهد بود. اگر این دو الکترود نزدیک هم قرار گیرند حفظ فاصله معلوم و ثابت بین آنها ضروری خواهد بود؛ اما اگر آنها به اندازه کافی دور از هم باشند به طور کاملاً شکفت‌انگیزی، مقدار نشان داده شده عملاً مستقل از فاصله خواهد بود. هریک از جریان‌های AC یا DC می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند و مقاومت می‌تواند از طریق اندازه‌گیری مقدار جریان و پتانسیل و یا از طریق مدار پل تعیین شود که در آن مقاومت نامعلوم با مقاومت درون دستگاه مقایسه می‌شود.

شکل ۴- ۴ پایه‌های شیپرد[۱۹۶] نشان می‌دهد که از جریان اعمالی DC بین دو کاتد آهنی استفاده می‌کنند. این دستگاه کاربردی بسیار سریع دارد، اما تنها مقادیر مربوط به نمونه کوچکی از خاک را در نزدیک‌ترین همسایگی الکترودها، ارائه می‌کند. شکل ۴-۵ یک دستگاه از نوع پل AC را نشان می‌دهد، این وسیله نیز کاربردی بسیار سریع دارد اما فقط یک نمونه کوچک را مورد سنجش قرار می‌دهد. انواع بسیاری از نوع دوم در بازار موجود هستند.



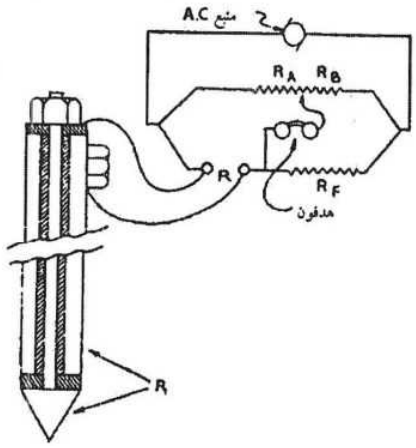
شکل ۴- ۴ پایه‌های شیپرد برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک

جریان از یک باطری سه ولتی (دو باتری چراغ قوه) از میان خاک بین دو الکترود آهنی نصب شده روی میله‌های عایق‌دار عبور می‌کند. شار جریان توسط یک مینی‌آمپرسنج و دامنه (۲۵- ۰ و ۱۰۰- ۰) مدرج شده جهت خواندن مستقیم مقاومت ویژه برحسب اهم- سانتی‌متر (۱۰۰۰۰- ۴۰۰ و ۵۰۰- ۱۰۰) اندازه‌گیری می‌شود. کاتد برای اجتناب از پلاریزه شدن، بزرگ‌تر ساخته شده؛ دقت دستگاه وقتی نوک الکترودها به اندازه ۱۸ اینچ یا بیشتر از هم فاصله دارند، در حدود ۶٪ است. سنجه[۱۹۷]باتری‌ها و سوئیچ بر روی میله آند نصب می‌شوند.

تعیین مقاومت ویژه به روش چهار میل

برای در برگرفتن یک نمونه بزرگ‌تر از خاک و اندازه‌گیری مقاومت ویژه در اعمال بیشتر از روش چهار میل یا ونر[۱۹۸]استفاده می‌شود. مدار اولیه در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. شکل‌های بعدی (شکل‌های ۴-۷، ۴-۸، ۴-۹) برخی روش‌های ویژه بر اساس این تکنیک را نشان می‌دهند. جزئیات عملکرد با توجه به ابزارهای ویژه مورد استفاده تغییر می‌کنند، اما اصول برای همه یکسان است. باید توجه کرد که مقاومت اندازه‌گیری شده، مقاومت یا پتانسیل بین دو الکترود داخلی است؛ جفت الکترود بیرونی برای ایجاد جریان داخل خاک مورد نیاز هستند. مقدار به دست آمده یک مقدار «میانگین» در عمقی تقریباً برابر بین دو الکترود است؛ در واقع این مقدار تا حدی تحت تأثیر خاکی است که در اعماق بیشتر قرار گرفته است. هیچ خط تقسیم واضحی وجود ندارد، اما تأثیر خاک در اعماق بسیار بسیار پایین‌تر، کمتر و کمتر می‌شود.

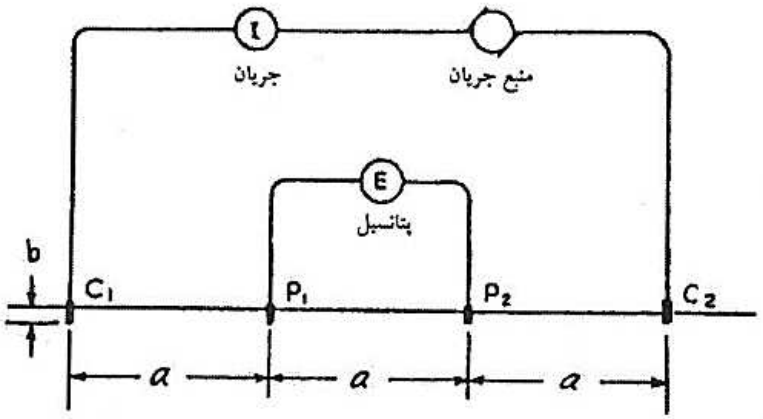
1 9 6
1 9 7
1 9 8



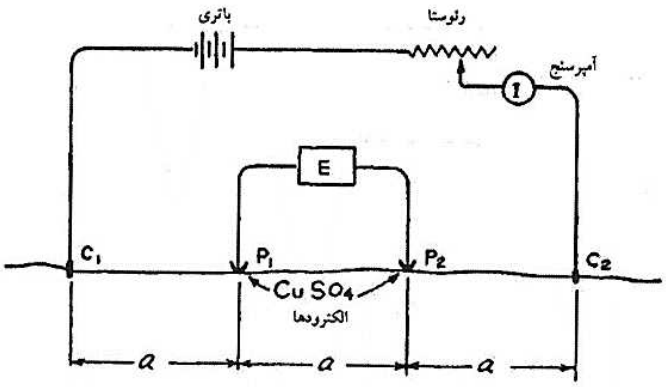
شکل ۴-۵ میله خاک AC، جریان از یک منبع AC (معمولاً یک باتری، زنگ اخبار و کندانسور) از میان خاک بین میله فولای و یک سرسوزن فولادی عایق شده می‌گذارد. سپس یک سیستم مقاومت متغیر طوری تنظیم می‌شود که در نقطه تعادل هیچ سیگنالی از هدفون شنیده نشود.

$$R=R_F \frac{R_A}{R_B} \qquad \text{یا} \qquad \frac{R}{R_F}=\frac{R_A}{R_B}$$

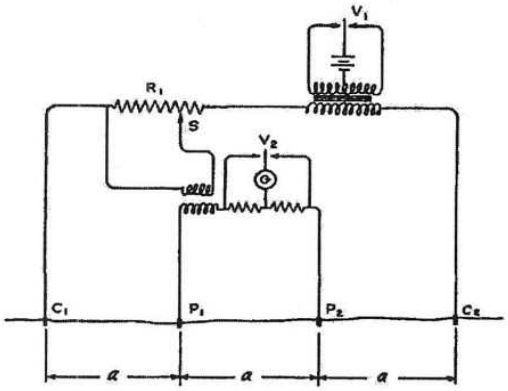
در عمل، مقاومت $R_A R_B$ برای خواندن مستقیم R درجه‌بندی می‌شود. سپس $\rho=R\text{-}C$ ، که C عدد ثابتی برای هر میله خاص است و از طریق کالیبراسیون در یک محلول با مقاومت ویژه معلوم تعیین می‌شود.



شکل ۴-۶ اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک به روش چهار میل (ونر). فاصله (b)، عمق الکترود، باید در مقایسه با (a) کوچک باشد. فرمول کلی به‌صورت $\rho=2\pi a \frac{E}{I}$ است. مقاومت ویژه، میانگین تقریباً برابر با فاصله بین دو الکترود (a) است

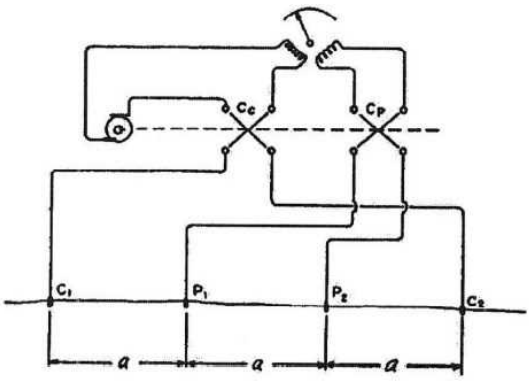


شکل ۴-۷ اندازه‌گیری مقاومت ویژه با استفاده از آمپرسنج- ولت‌سنج. یک باتری ذخیره از نرخ پیل خشک برای ایجاد جریان استفاده می‌شود. الکترودهای سولفات مس از ایجاد خطاهای پلاریزاسیون جلوگیری می‌کنند. ولت‌سنج باید دارای مقاومت بالا باشد، یا در غیر این صورت از پتانسیومتر استفاده شود. اگر فاصله (a) ۵ فوت و ۲/۵ اینچ در نظر گرفته شود فرمول به‌صورت زیر ساده می‌شود: $\rho=1000\frac{E}{I}$جهت جریان باید برعکس شود، و خوانده‌ها میانگین شوند، تا جریان خروجی یا پتانسیل‌ها در خاک را متعادل کنند.



شکل ۴-۸ لرزش‌سنج[۹](نمودار ساده شده). لرزاننده‌های V_1 و V_2 همگام شده‌اند؛ V_1 جریان DC باتری را به AC تبدیل می‌کند؛ مقاومت متغیر S تا زمانی که افت IR در عرض R_1 جریان برابر جریان مدار بیرون دهد، تنظیم می‌شود، تاجایی‌که عقربه گالوانومتر G انحرافی نشان ندهد؛ بنابراین R به طور مستقیم از روی مقاومت متغیر خوانده می‌شود و ρ از $\rho=2\pi aR$ محاسبه می‌شود.

1 9 9



شکل ۴-۹ مقاومت ویژه خاک میگر[1](نمودار ساده شده). جریان DC از ژنراتور دستی G توسط کموتاتور (سری گردان) C_C به AC تبدیل می‌شود، و از طریق C_1 و C_2 بعد از گذشتن از میان سیم‌پیچ وارد خاک می‌شود، پتانسیل AC بین P_1 و P_2 از طریق کموتاتور C_P به DC تبدیل می‌شود و سیم‌پیچ پتانسیل را تغذیه می کند. سوزن تحت نیروهای متضاد ناشی از دو سیم پیچ در نقطه‌ای که مقاومت ρ را نشان می‌دهد متوقف می‌شود. ρ از رابطه $\rho=2\pi aR$ به دست می‌آید.

روش‌های دیگر

حداقل سه روش غیرمستقیم برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک وجود دارد که به طور کلی در آنها هیچ تماسی با خاک به وجود نمی‌آید. یک مکان‌یاب لوله از نوع القایی نشانه‌ای از مقاومت ویژه زیر خود نشان می‌دهد و معمولاً برای ارائه نتایج تقریباً دقیق کالیبره می‌شود. به طور کلی، این روش می تواند برای کاوش مناطق ویژه پایین مفید باشد. پس از آن می‌توان این مناطق را از طریق یکی از روش‌های تشریح شده دقیقاً بررسی کرد.

مقدار و زاویه فاز امپدانس (فرکانس بالا) بین دو هادی[1]نوا[2]زی با سطح، تابعی از مقاومت ویژه خاک است و در نتیجه می‌توان ابزاری ساخت که از این اصل استفاده کند.

همچنین این حقیقت وجود دارد که انحراف میدان تشعشع از یک فرستنده رادیویی دور در سطح زمین تابعی از مقاومت ویژه خاک است. هر دوی این روش‌ها وعده توسعه سریع و ممکن سیستم‌های اتوماتیک برای ثبت مقاومت ویژه را می‌دهند، ولی این توسعه هنوز انجام نگرفته است.

تعیین مکان «نقاط داغ[2] بر[2] خطوط لوله بدون پوشش

خطوط بدون پوشش به‌ویژه خطوط متکثر[3]، اغلب در وضعیتی هستند که حداکثر بازده اقتصادی حفاظت کاتدی با ممانعت از همه نشتی‌ها به دست نمی‌آید، بلکه ممانعت از ۹۵- ۸۵ درصد نشتی‌ها کافی است. این کار می‌تواند اغلب با هزینه‌ای پایین‌تر از ۱۵ درصد حفاظت کامل با به کار بردن آندهای گالوانیک- معمولاً منیزیم- مربوط به نقاط داغ یا مناطق با بیشینه خورندگی انجام شود. این مسئله به‌شدت مرتبط با مقاومت ویژه نشان داده شده است، به‌طوری‌که، برای سیستمی از مناطق کم مقاومت و

2	[illegible]	0	0
2	[illegible]	0	1
2	[illegible]	0	2
2	[illegible]	0	3

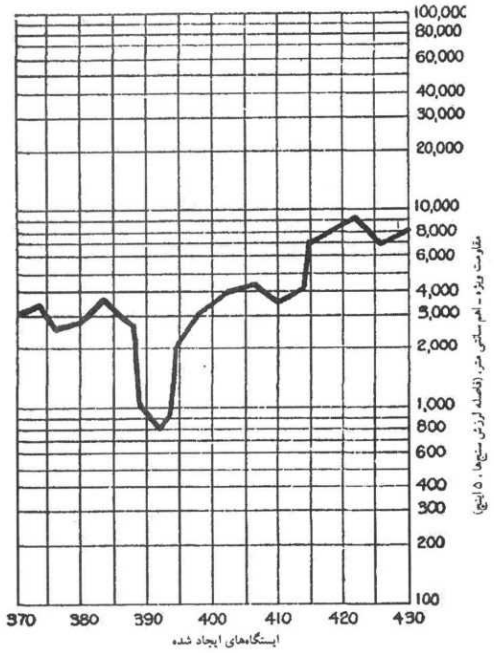
نسبتاً کم مقاومت از این روش استفاده می‌کنند. این روش به‌عنوان نقشه‌برداری مقاومت خاک شناخته می‌شود، و شامل یک سری داده‌های اندازه‌گیری شده در طول خط (یا در مسیر از پیش تعیین شده برای نصب خط لوله)، با استفاده از روش‌های تشریح شده است. روش چهار میل متداول‌ترین روش مورد استفاده است.

خوانده‌ها باید توسط یک روش سیستماتیک جمع‌آوری شوند، در اینجا برخی تضادها بین ادعاهای علمی و عملی وجود دارند. اگر خوانده‌ها در فضایی یکنواخت جمع‌آوری شوند، بررسی آماری مجموعه، نشانگر وجود شرایط خورنده در طول این خط، در مقایسه با خطوط دیگر می‌باشد. به بیان دیگر، این روش حداکثر اطلاعات کلی را خواهد داد. بیشینه اطلاعات مفید اگرچه در طراحی حفاظت نقاط داغ مفید هستند، ولی به این روش به دست نمی‌آیند، بلکه به‌وسیله برخی روش‌های ذکر شده در زیر فراهم می‌شوند:

۱. خوانده‌ها[2] باید در فواصل کمتر از ۴۰۰ فوت تهیه شوند.
۲. خوانده از جایی گرفته شود که تغییر مشهودی در مشخصات خاک وجود دارد.
۳. در خوانده متوالی نباید دارای اختلافی با نسبت بزرگ‌تر از ۲:۱ باشند (اگر یک خوانده از قبلی بیشتر از این نسبت فرق داشته باشد، ضروری است که به عقب برگردیم و یک داده دیگر داخل کنیم، این کار باید تا زمان تحقق شرط ۳ انجام گیرد).
۴. به‌عنوان یک استثناء برای قانون آخر، نیاز نیست هیچ دو خوانده‌ای نزدیک‌تر از ۲۵ فوت تهیه شوند.
۵. به‌عنوان یک استثنای دیگر برای قانون نسبت ۲:۱؛ این قانون وقتی کوچک‌ترین مقدار دو خوانده بزرگ‌تر از ۲۰,۰۰۰ اهم- سانتی‌متر باشد، به کار نمی‌رود. مقادیر داده شده در این معیار ممکن است برای موارد خاص تغییر کنند؛ مقدار اشاره شده در نقشه‌برداری بالای یک میلیون فوت از خطوط متکثر، مفید و اقتصادی شناخته شده است.

برای این نوع از نقشه‌برداری، خوانده‌هایی که با خاک در عمق لوله در ارتباط هستند انتخاب خواهند شد. این به معنی آن است که گوال‌هایی برای دستگاه میله منفرد باید حفر یا سوراخ شوند. سیستم چهار میل باید با یک فضای در حدود ۱/۵ برابر عمق لوله استفاده شود، اغلب ۵ فوت، فضای ۲/۵ اینچی (که مضرب $2\pi a$ را برابر ۱۰۰۰ می‌سازد) برای این هدف مناسب دانسته می‌شود. چنانچه در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده، اطلاعات فراهم شده از نقشه‌برداری بر روی یک نمودار نشانگر طول خط لوله رسم شده است. مقیاس مقاومت ویژه عمودی، وقتی نسبت‌های مقاومت ویژه نسبت به تقاضل آنها مورد توجه هستند، لگاریتمی است. از روی این نمودار می‌توان «نقاط داغ» را به آسانی مکان‌یابی نمود. این تکنیک به‌صورت کامل‌تر در فصل‌های بعد بحث خواهد شد.

2 0 4



شکل ۴-۱۰ پروفیل مقاومت ویژه خاک. داده‌های گرفته شده از طریق هرکدام از روش‌های شرح داده شده به‌صورت عرضی (با استفاده از یک مقیاس لگاریتمی)، با فاصله در طول خط لوله به‌عنوان محور طول رسم شدند.

نقشه‌هایی برای بستر زمین

مقاومت ویژه خاک در آنجا که بر بستر خاک مستقر است یکی از کمیت‌های طراحی اولیه است. خیلی مهم است که به منظور فراهم کردن جریان خروجی ضروری با حداقل توان، کمترین مقاومت کل را به دست آوریم. برخلاف نقشه تعیین خورندگی، مانند موضوع پیشین، در این مورد مقاومت ویژه در عمق زیاد اهمیت دارد. به این دلیل روش چهار میل تنها روش مفید در اینجاست. گرفتن خوانده‌ها در فاصله میله ۵، ۱۰ و ۲۰ فوت متداول است (مقادیر عملی استفاده شده به ترتیب ۵ فوت و ۲/۵ اینچ، ۱۰ فوت و ۵ اینچ، ۲۰ فوت و ۱۰ اینچ هستند، و مضرب‌هایی به ترتیب از ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ می‌دهند).

مکان احتمالی باید در یک شبکه مستطیلی، با فضاهای ۵۰ یا ۱۰۰ فوتی از بقیه متمایز شود، خوانده‌ها در محل تلاقی هر شبکه گرفته می‌شود؛ جایی که تفاضل‌ها بسیار بزرگ هستند، خوانده‌های میانی باید گرفته شوند.

این نمودار باید همیشه در شرایط میدانی رسم شوند تا یک تصویر کامل فراهم شود. «خطوط تراز»[۲۰۵] چنانچه در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده، می‌تواند رسم شوند. اگر از رنگ استفاده شود، خوانده‌ها در هر سه فضای میله‌ها می‌توانند بر نمودار مشابه قرار گیرند (فقط یکی اینجا نشان داده شده)؛ توجه کنید که برای خطوط تراز، از مقیاس لگاریتمی استفاده شده است، درست مانند مقیاس عمودی در خط نقشه مقاومت ویژه.

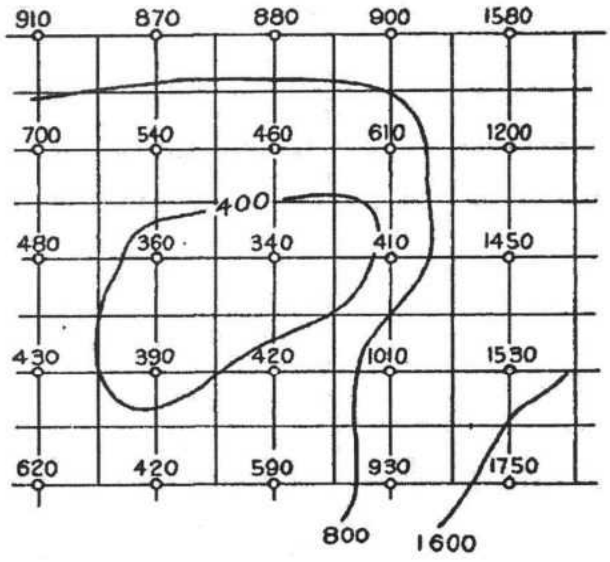
2 0 5

نقشه‌های منطقه

جایی که مجموعه‌ای از سیستم لوله‌ها و سایر سازه‌های زیرزمینی در یک منطقه پخش می‌شوند، مانند یک کارخانه شیمیایی یا پالایشگاه، نقشه‌ای مشابه آنچه شرح داده شد، اطلاعات مفیدی هم در پیش‌بینی خورندگی و هم در طراحی سیستم‌های حفاظت ارائه خواهد داد. فضای استفاده شده بین خوانده‌ها معمولاً بزرگ‌تر از فضای لازم برای طراحی بستر آند است.

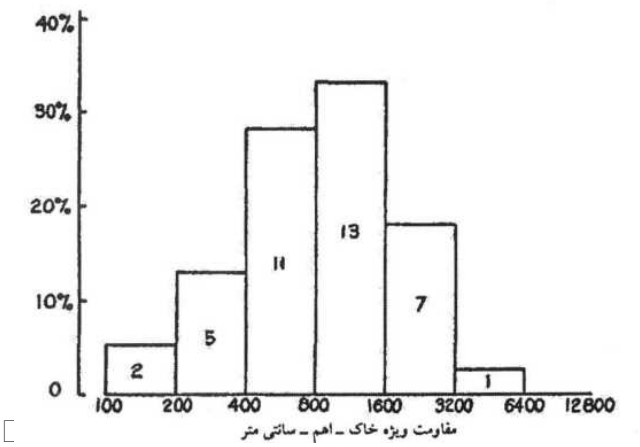
اغلب از یک فضای مقدماتی ۴۰۰ فوتی استفاده می‌شود و در جایی که گرفتن عکس واضح ضرورت دارد، نقاط میانی انتخاب می‌شوند. همانند نقشه‌برداری بستر آندی، داده‌ها معمولاً بر یک نقشه خطوط تراز مقاومت مکان کارخانه ارائه می‌شوند. معمولاً فقط یک فاصله میله استفاده می‌شود، و متداول‌ترین مقدار، فاصله اسمی پنج فوتی است که پیش از این ذکر شد.

علاوه بر توزیع جغرافیایی نشان داده بر طرح مقاومت ویژه، تهیه یک بافت‌نما، یا توزیع فرکانس، چنانچه در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است، مفید است. این بافت‌نما تعدادی خوانده‌های جمع‌آوری شده در «کلاس‌ها» یا محدوده‌های مقاومت ویژه مختلف را نشان می‌دهد، این دامنه‌ها باید لگاریتمی باشند، همان‌طور که برای فواصل مابین خطوط هم‌تراز[۶] قبلاً شرح داده شدند.



شکل ۴-۱۱ طرح مقاومت ویژه. خوانده‌های مقاومت ویژه جمع‌آوری شده در دوره‌های وقفه، همراه با خوانده‌های اضافی در نقاط بحرانی، یا اشکال کوچکی نشان داده شده‌اند. منحنی‌ها، خطوط مقاومت ویژه معادل را نشان می‌دهند. این طرح‌ها در تعیین موقعیت مکان‌های بستر آند و در طراحی آنها باارزش هستند

2 - 0 6



شکل ۴-۱۲ بافت‌نمای مقاومت ویژه. خوانده های مقاومت ویژه در فاصله‌های برابر در یک سطح یا مسیر یک خط لوله با توجه به فرکانس وقوع خوانده‌ها در دامنه‌ها مختلف. توجه کنید که محدوده‌های مناسب، نسبت‌های مقاومت ویژه معادل را در مقایسه با تفاضل‌های حسابی بهتر می‌پوشانند.

محدوده‌های لگاریتمی مقاومت ویژه

تا کنون سه مثال از عملیات لگاریتمی، مقاومت‌های ویژه ارائه شده است. در کنار این مشاهده مستقیم که نسبت‌ها بسیار مهم تر از تفاضلات هستند، یک پایه صحیح علمی نیز برای این روش وجود دارد. مشاهده شده است که تعداد زیادی خوانده‌های مقاومت ویژه، وقتی به‌صورت لگاریتمی بیان می‌شوند، تمایل به قرار گرفتن در توزیع‌های «استاندارد» دارند. توزیع استاندارد یک مفهوم آشنا و کاملاً مفید در آنالیز آماری است.

یک نتیجه این مفهوم، آن است که رفتار خوردگی و سازه گسترده (مانند دو خط لوله) که هریک در معرض تنوع گسترده‌ای از خاک‌ها قرار دارند را می‌توان با مقایسه مقاومت‌های ویژه میانگین لگاریتمی آنها با یکدیگر مقایسه کرد. مقاومت ویژه میانگین لگاریتمی یک سری از مقاومت‌های ویژه مقداری است که لگاریتم آن میانگین همه مقادیر اندازه‌گیری شده لگاریتمی است. از این مقادیر می‌تواند به آسانی و با دسته‌بندی اعداد در کلاس‌های مختلف میانگین گرفت، همان‌طور که در شکل ۱۳-۴ نشان داده شده است، میانگین لگاریتمی ۱۱۵ خوانده مختلف ohm-cm ۱۴/۹۰۰ محاسبه شده است.

انتخاب یک نسبت ۲:۱ برای مقادیر پیاپی استفاده شده در هر سیستم لگاریتمی، مانند خطوط هم‌تراز، بافت‌نماها، یا محاسبه میانگین، تقریباً یک شیوه جهانی است. سه سیستم متفاوت به طور گسترده مورد استفاده هستند: دو تای آنها تا کنون نشان داده شده‌اند، الف) بر پایهohm-cm ۱۰۰، همان‌طور که در شکل‌های ۴-۱۱ و ۴-۱۲ استفاده شده است؛ ب) بر پایه ohm-cm ۱۰۰۰، که در شکل ۴-۱۳ استفاده شده است؛ ج) که در واقع یک روش لگاریتمی نیست، در آن نسبت همیشه مشابه نبوده است. هر سه روش در اینجا برای مقایسه نشان داده شده‌اند:

مقیاس (ج) یک مزیت دارد که در آن تمام مقادیر، اعداد «گرد» شده هستند، درحالی‌که، اگر (الف) یا (ب) به اندازه کافی در هر دو جهت گسترش یابند، ارقام به دست آمده مشوش نخواهند بود. از سوی دیگر وقتی یک آنالیز ریاضی از داده‌ها انجام

می‌شود، نسبت‌های نامنظم در مقیاس (ج) پیچیدگی‌هایی را ایجاد می‌کنند. توجه کنید، وقتی (ج) برای یک بافت‌نما[۲]استفاده می‌شود، پهنای افقی «پیل‌ها» باید با لگاریتم نسبت‌ها، متناسب باشند. $log\ 2 = 0/301$، $log\ 2/5 = 0/398$ بنابراین نسبت دو فاصله باید در حدود **۳:۴** باشد.

(الف)	(ب)	(ج)
۵۰	۶۲/۵	۵۰
۱۰۰	۱۲۵	۱۰۰
۲۰۰	۲۵۰	۲۰۰
۴۰۰	۵۰۰	۵۰۰
۸۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
۱۶۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰
۳۲۰۰	۴۰۰۰	۵۰۰۰
۶۴۰۰	۸۰۰۰	۱۰۰۰۰

هم اکنون تکنسین خوردگی روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاکی که خط لوله در آن نصب خواهد شد، در اختیار دارد. سؤالی که حالا ممکن است پرسیده شود آن است که اگر خط لوله باید در آب نصب شود، آیا روش‌های مشابه برای اندازه‌گیری مناسب خواهند بود؟ جواب بله است، اما تحت برخی شرایطی. عملاً یک نمونه مجزای آب کافی است و می‌تواند در یک سویل باکس آزمایشگاهی اندازه‌گیری شود، همان‌طور که در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. انواع مختلف و بی‌شماری از مقاومت ویژه که ما در شکل ۴-۱۱ برای خاک نشان دادیم، در محیط آب وجود ندارد و لذا یک مقدار مقاومت ویژه برحسب ohm-cm معمولاً برای استفاده توسط مهندس خط لوله کافی‌ست. برای خاک‌ها، آن‌گونه که ما دیده‌ایم، این کار پیچیده‌تر است.

خلاصه مقاومت ویژه خاک

مقاومت ویژه خاک معمولاً توسط روش چهار میل با یک لرزش سنج (شکل ۴-۸)، احتمالاً آسان‌ترین ابزار برای استفاده، اندازه‌گیری می‌شود. اتصال یک دسته از میله‌ها و سیم‌ها زمان اندازه‌گیری مقاومت‌های ویژه خاک را کاهش می‌دهد و انجام یک نقشه‌برداری کامل را در زمانی نسبتاً کوتاه امکان‌پذیر می‌سازد. جدیدترین نمونه سنجه مقاومت خاک در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است و از سال ۱۹۸۱ در دسترس بوده است. مزیت آن این است که هیچ قسمت متحرکی ندارد و هیچ لرزاننده‌ای برای تغییر وجود ندارد. اگرچه این دستگاه، «مقاومت‌سنج چهارمیلی خاک» خوانده می‌شود، اما برای اندازه‌گیری نمونه‌های آب در جعبه خاک نیز مناسب است.

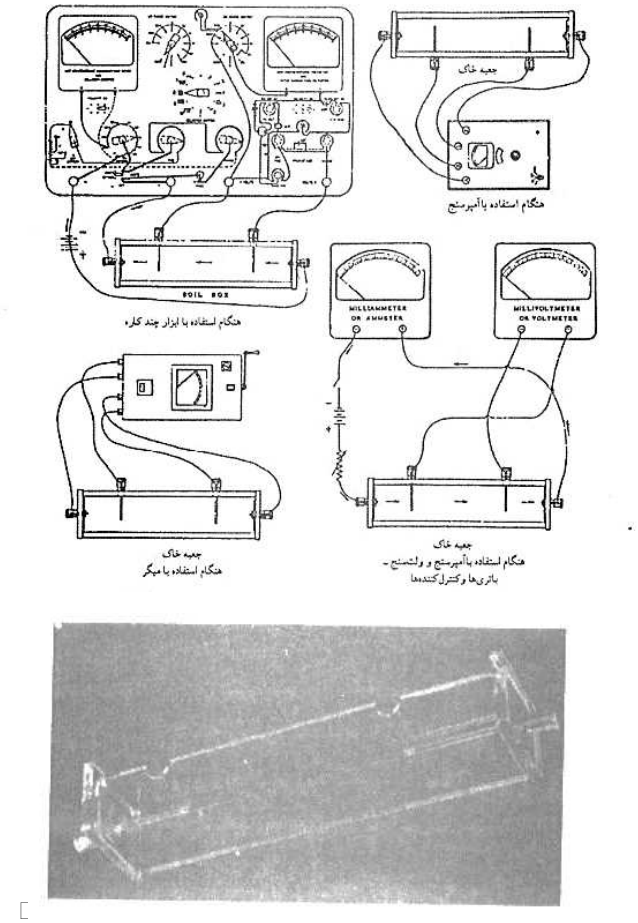
2 -Histogram 0 7

SUMMARY OF SOIL RESISTIVITY MEASUREMENTS

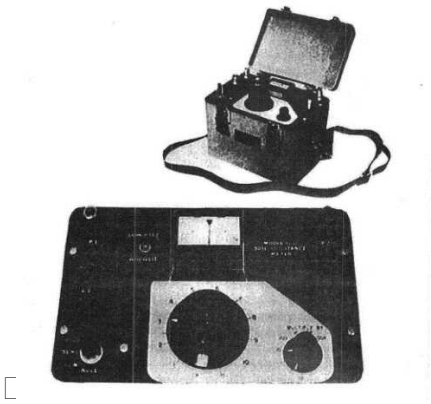
Calculation of Logarithmic Mean

Boundary Values Resistivity ohm-cm	N Number	L Log Mean	N x L Product
1,024,000		5.85	
512,000	2	5.55	11.10
256,000	4	5.25	21.00
128,000	6	4.95	29.70
64,000	16	4.65	74.40
32,000	23	4.35	100.05
16,000	25	4.05	101.25
8,000	27	3.75	101.25
4,000	11	3.45	37.95
2,000	1	3.15	3.15
1,000		2.85	
500		2.55	
250		2.25	
125		1.95	
62.5		1.65	
31.25			
Totals	115		479.85
Logarithm of Mean			4.172
Logarithmic mean resistivity, ohm-cm			14,800

شکل ۴-۱۳. خلاصه‌ای از اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه خاک



شکل ۴-۱۴ اتصالات معمول برای استفاده از جعبه خاک با انواع مختلف ابزارها



شکل ۴-۱۵ سنجه مقاومت خاک چهار میل

نقشه‌برداری و اندازه‌گیری پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت

اختلاف پتانسیل بین یک لوله مدفون و خاک، هم بر تحقق شرایط خورندگی و هم در ارزیابی میزان حفاظت کاتدی به کار رفته، مفهوم قابل اعتنایی است. این کمیت عملاً توسط اتصال یک ابزار بین خود لوله (تماس مستقیم فلزی) و یک الکترود ویژه در تماس قرار گرفته با خاک اندازه‌گیری می‌شود. این الکترود یک «نیم پیل» نامیده می‌شود.

متداول‌ترین الکترود مورد استفاده آن است که یک اتصال فلز به الکترولیت شامل مس در تماس با محلول اشباع سولفات مس به کار رود؛ این ترکیب ویژه به‌راحتی از مواد در دسترس ساخته می‌شود و بسیار پایدار است. شکل ۴-۱۶ دو الکترود معمول را نشان می‌دهد. سایر انواع مورد استفاده عبارتند از:

الکترود هیدروژنی، فقط در مطالعات آزمایشگاهی استفاده می‌شود.

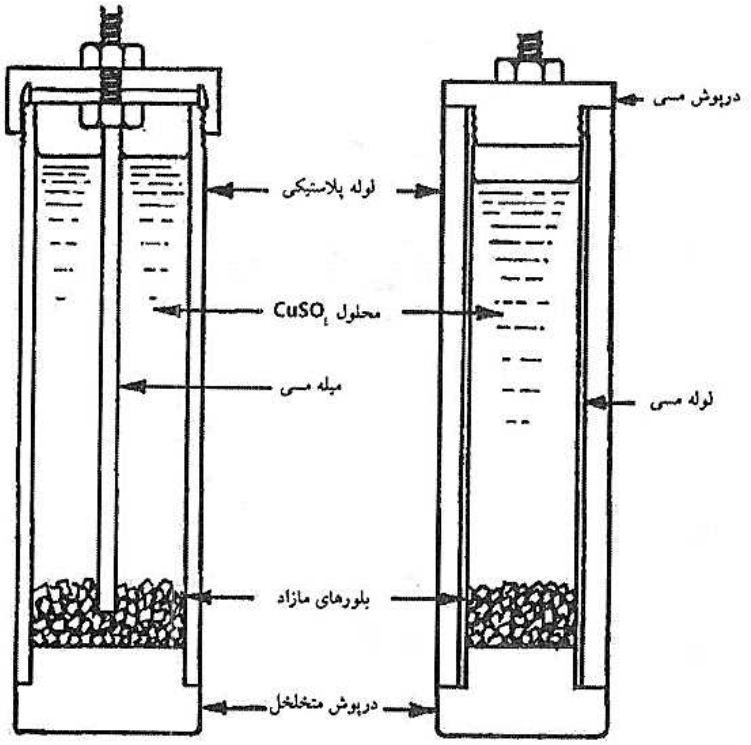
الکترود کالومل، اغلب برای آب شیرین یا آب نمک استفاده می‌شود.

الکترود سرب/کلرید سرب، مکرراً در مطالعه خوردگی کابل سربی به کار می‌رود.

الکترود نقره/کلرید نقره، به دلیل اینکه توسط حمله نمک آلوده نمی‌شود در آب دریا استفاده می‌شود.

الکترود روی خالص (در پشت‌بند[۸]بسته‌بندی شده). این الکترود به‌عنوان الکترود مرجع اتصال دائم مناسب است. (توجه: تمام الکترودهای لیست شده باید طوری تصحیح شوند که خوانده‌هایی مشابه با نیم پیل مس/سولفات مس بدهند.

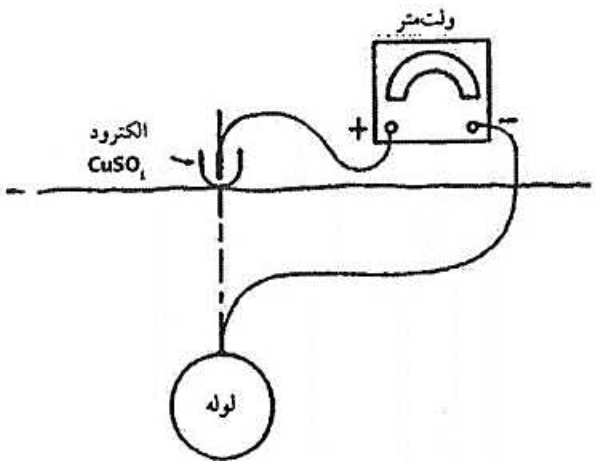
2 0 8



شکل ۴-۱۶ الکترودهای سولفات مس - قسمت‌های اصلی عبارتند از: (۱) یک تکه مس، که دستگاه به آن متصل می‌شود؛ (۲) محلول اشباع سولفات مس، در تماس با مس؛ (۳) غشای متخلخل، در تماس با خاک قرار می‌گیرد. ضروری است که هیچ فلزی جزء مس در تماس با محلول سولفات مس قرار نگیرد. بلورهای اضافی افزوده می‌شوند، تا اطمینان حاصل شود که محلول همیشه اشباع خواهد بود.

ولت‌سنج

یک گزینه برای استفاده در اندازه‌گیری این پتانسیل، ولت‌سنج است، که در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است؛ دو منبع ممکن خطا در استفاده از آن وجود دارد. نخست وقتی که یک ولت‌سنج، اختلاف پتانسیل در طول محل‌های اتصالش را به درستی نشان می‌دهد، جریانی که از میان وسیله جاری است (ولت‌سنج ضرورتاً یک میلی‌آمپر سنج) یک افت ولتاژ IR در باقی مدار ایجاد می‌کند که در خوانده نهایی لحاظ نمی‌شود. برای مثال اگر مقاومت مدار خروجی (لوله، سیم‌های سربی، خاک و الکترود) یک چهارم مقاومت ابزار اندازه‌گیری باشد، آن‌گاه ابزار اندازه‌گیری تنها چهار پنجم پتانسیل کل را خواهد خواند و خطا ۲۰ درصد خواهد بود.



شکل۴-۱۷ اندازه‌گیری پتانسیل لوله نسبت به خاک با ولت‌سنج

اتصال به لوله ممکن است توسط سیم سربی جوشکاری شده یا لحیم کاری شده (چنانچه نشان داده شد)، توسط میله تماسی، یا به‌وسیله اتصال مکانیکی به یک شیر یا اتصال بالای سطح انجام شود. مورد اخیر باید با احتیاط استفاده شود، گاهی اتصالات لبه‌دار پتانسیل‌های خارجی ایجاد می‌کنند. اگر خاک خشک باشد، مقدار کمی آب برای کم کردن مقاومت تماس اضافه می‌شود، برای این کار اندکی حفاری زیر سطح کافی است.

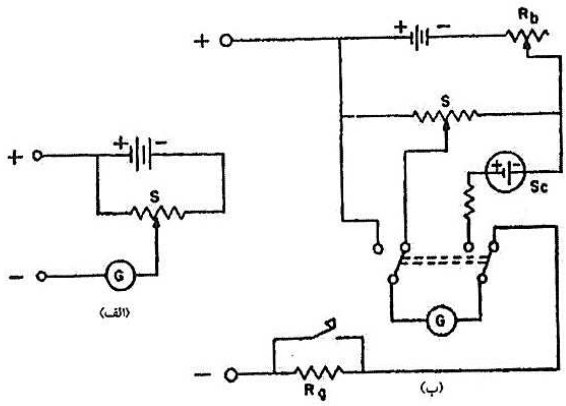
منبع دوم خطا آن است که عبور جریان از مدار ممکن است الکترود یا حتی خود لوله را پلاریزه کند، و به‌علاوه پتانسیلی که سعی در اندازه‌گیری آن داریم را تغییر دهد. هر دو این خطاها با استفاده از ولت‌سنج با مقاومت بالا می‌توانند به حداقل برسند، مقاومت کمتر از ۵۰۰۰۰ اهم بر ولت توصیه نمی‌شود، و این مقدار اغلب خیلی کم است. خوانده‌ها همیشه باید در دو مقیاس متفاوت گرفته شوند (معرف دو مقدار متفاوت مقاومت ابزار اندازه‌گیری است)؛ اگر آنها مطابقت کافی داشته باشند، مقادیر پذیرفته می‌شوند.

در بخش بعد، روش‌هایی برای تعیین مقدار اصلاح شده، وقتی خطای مقاومت ولت‌سنج خیلی بالا نیست، ارائه خواهند شد.

همچنین یک ولت‌سنج با حساسیت دو گانه ویژه در دسترس است که دو مقدار متفاوت مقاومت را در یک مقیاس مشابه ارائه می‌کند. اگر خوانده برای هر دو مشابه باشد (تعیین توسط فشار یک دکمه ایجاد می‌شود)، هیچ اصلاحی مورد نیاز نیست. اگر فشار دکمه تغییری کوچک در خوانده ایجاد کند، اصلاحی خیلی ساده می‌تواند انجام شود و در آخر، اگر تغییر بزرگ باشد، یک معادله قابل مقایسه با آنچه قبلاً ارائه شد می‌تواند استفاده شود. این ابزار اندازه‌گیری برای خواندن سریع پتانسیل بسیار سودمند است.

پتانسیومتر با مقاومت متغیر

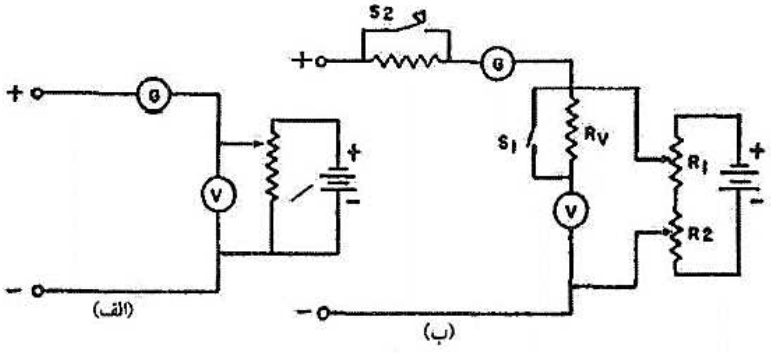
جهت برطرف کردن مشکلات به طور عمده می‌توان از پتانسیومتر استفاده کرد، ابزاری که در نقطه تعادل هیچ جریانی از مدار نمی‌کشد. باید به خاطر داشت که حین پیشروی تعادل مقداری جریان کشیده می‌شود و شاید مقداری پلاریزاسیون نیز رخ دهد. شکل ۴-۱۸ این وسیله را نشان می‌دهد و چگونگی استفاده از آن را توضیح می‌دهد.



شکل ۴-۱۸ پتانسیومتر با مقاومت متغیر. الف) مدار پایه. پس از اینکه مقاومت متغیر S طوری تنظیم شد که گالوانومتر G هیچ انحرافی نشان نداد، پتانسیل ناشناخته وصل شده به محل‌های اتصال می‌تواند از مقیاس مقاومت متغیر مستقیماً خوانده شود. این مدار ساده تنها اگر ولتاژ باتری ثابت باشد قابل استفاده است. (ب) مدار اصلاح شده، با قابلیت پیش‌بینی تنظیم ولتاژ باتری با استفاده از پیل استاندارد SC برای کالیبراسیون. مقاومت R_0 گالوانومتر را علیه جریان‌های افزوده محافظت می‌کند؛ وقتی ابزار کاملاً متعادل شد، مدار توسط یک سوئیچ اتصال کوتاه می‌شود. اغلب تجهیزات مورد استفاده برای خوردگی برخلاف نمونه نشان داده شده در اینجا دارای دو یا چند مقیاس هستند.

پتانسیومتر – ولت‌سنج

راهکار دیگر این مسئله پتانسیومتر - ولت‌سنج است که یک نوع آن در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است. هر دوی این ابزارهای مفید هنگامی که با پتانسیل‌های متغیر همچون منطقه جریان سرگردان مواجه می‌شوند، دچار نقص هستند، زیرا دنبال کردن نوسانات سریع توسط آنها غیرممکن است.



شکل ۴-۱۹ یک پتانسیومتر - ولت‌سنج. (الف) مدار پایه را نشان می‌دهد. وقتی انحراف گالوانومتر صفر است، پتانسیل خارجی متصل به محل‌های اتصال کسری از ولتاژ باتری است که روی ولت‌سنج با V نشان داده شده است؛ این روش مستقیم خواندن پتانسیل نامعلوم است. در (ب) برخی تصمیمات اضافه شده است: (۱) درحالی‌که، سوئیچ S_1 باز است، یک محدوده وسیع اضافه می‌شود، (۲) دو مقاومت R_1

و R_2 با مقادیر متفاوت، تنظیمی با دقت‌های بالا و پایین فراهم می‌کنند، و (۳) سوئیچ S_2 یک مقاومت محافظ مشابه مقاومت شکل ۴-۱۸ را کنترل می‌کند.

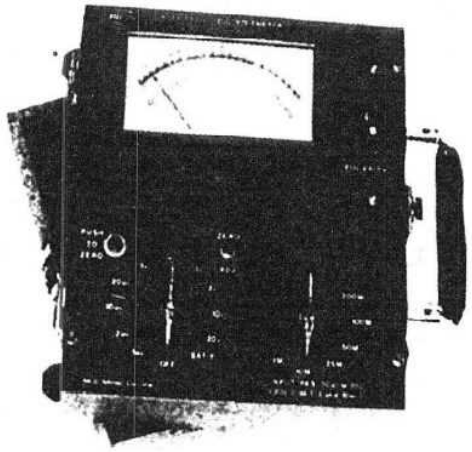
ولت‌سنج لوله خلاء

این ابزار (نشان داده نشده)، از طریق استفاده از ترانزیستورها و سایر پیشرفت‌های اخیر، به مرحله‌ای از قابلیت اطمینان و پایداری رسیده است که آن را در این زمینه کاملاً مفید می‌سازد. واحدهای توان‌دار باتری با امپدانس‌های ورودی بالاتر از ۱۰ مگااهم در دسترس هستند، بنابراین خطای مقاومت مدار به‌عنوان یک مشکل محسوب نمی‌شود. آنها مزیت مازادی نسبت به دستگاه‌های مختلف از نوع پتانسیومتری نشان می‌دهند که مزیت آنها عدم نیاز به تعادل است و بنابراین ممکن است برای دنبال کردن پتانسیل‌های نوسانی بدون دشواری استفاده شوند.

ولت‌سنج حالت جامد

این ابزار (شکل۴-۲۰) جانشین ولت‌سنج لوله خلاء است و باهم تنها در جانشین کردن ترانزیستورهای حالت جامد به جای لوله‌های خلاء خیلی حساس تفاوت دارند. مشکلات مقاومت عملاً حذف شده است و نتایج دقیق توسط شخص غیرمتخصص نیز به دست می‌آیند. یک مدل ویژه دارای مقاومت‌های ورودی قابل انتخاب ۱، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ مگااهم است. این به کاربر اجازه تعیین پتانسیل‌های خاک نسبت به لوله در محیط‌های سخت مانند محدوده‌های شهری را می‌دهد. دامنه خوانده از ۰/۱ mV تا ۲۰ mV تغییر می‌کند. این وسیله ابزاری با دوام برای تکنسینی است که خوانده‌های بسیاری را جمع‌آوری می‌کند.

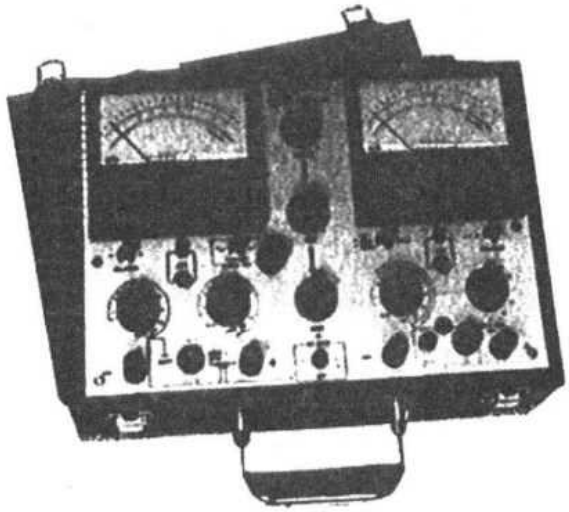
وجود بیش از دو دامنه محتمل است، و همچنین امکان استفاده از ابزار مشابه به‌صورت یک آمپرسنج توسط ساختن آن در مدار وجود دارد.



شکل ۴-۲۰ ولت‌سنج DC حالت جامد

ابزار اندازه‌گیری چندگانه

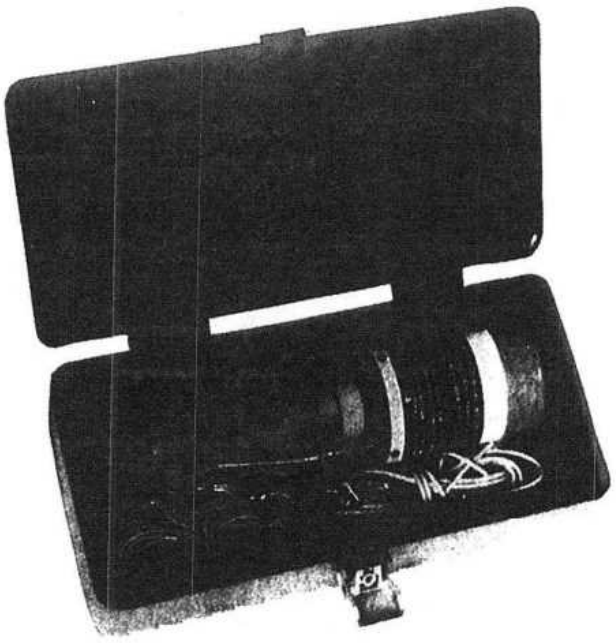
این ابزار به دلیل تنوع کاربردش اغلب توسط مهندسین خوردگی استفاده می‌شود. این ابزار، توسعه یافته پتانسیومتر – ولت‌سنج است که پیش‌تر توضیح داده شده و مشخصات ویژه زیر را دارد، مدل ۱۳۸۳ آن در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. سنجه سمت راست یک کریستال مایع دارد که ۵ دامنه از ۲۰- میلی‌ولت تا ۲۰۰ ولت و مقاومت‌های ورودی قابل انتخاب از ۱ تا ۲۰۰ مگااهم را نمایش می‌دهد. سنجه سمت چپ نیز نمایشگر کریستال مایع دارد و به‌عنوان ولت‌سنج و آمپرسنج عمل می‌کند. چهار دامنه ولتاژ شامل ۲۰- میلی‌ولت تا ۲۰ ولت و دامنه آمپرسنج از ۲۰- میلی‌آمپر تا ۲۰ آمپر است و به‌عنوان اهم‌متر از ۲۰- اهم تا ۲۰۰۰ اهم را نشان می‌دهد. این وسیله هنوز یک شماره‌گیر نقطه‌ای متحرک سنتی دارد، که مانند شماره‌های کریستال مایع برای خواندن آسان نیستند. به‌عنوان چند نمونه از کاربردهای این ابزار می‌توان به اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل خاک نسبت به لوله، برحسب افت IR، کنترل پیوستگی سیم‌ها و مقاومت سیم‌های اتصال اشاره کرد.



شکل ۴-۲۱ ابزار اندازه‌گیری چند کاره

پتانسیل‌متر الکترونیک

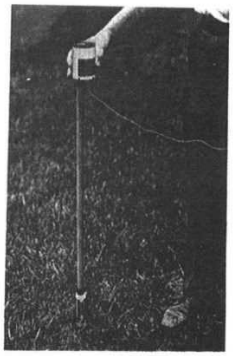
پیشرفته‌ترین ابزار برای مهندس خوردگی ابزار اندازه‌گیری چند کاره است، ساده‌ترین ابزار اندازه‌گیری جدید، پتانسیل‌سنج الکترونیک است، که به سادگی یک ولت‌سنج چسبیده به یک الکترود مرجع مس – سولفات مس است. شکل‌های ۴-۲۲ و ۴-۲۳ این دستگاه را به دو شکل برای تعیین اختلاف پتانسیل برای استفاده‌های میدانی نشان می‌دهند. این وسیله‌ای با دوام، ارزان (در حدود ۱۲ درصد قیمت ابزار اندازه‌گیری چند کاره) و ایدئال برای کاربران بی‌تجربه جهت استفاده در خطوط لوله در محیط‌های زراعی است.



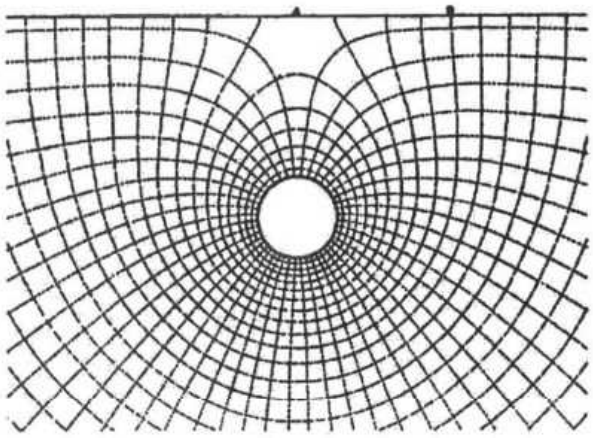
شکل ۴-۲۲ پتانسیل‌سنج الکتریکی سنج

جای‌گذاری الکترود

شکل ۴-۲۴ میدان‌های جریان و پتانسیل اطراف خط لوله را نشان می‌دهد که در نقطه نشان داده شده جریان را جمع یا تخلیه می‌کنند. مشاهده خواهد شد که هیچ نقطه‌ای بر سطح زمین وجود ندارد که هم پتانسیل سطح خود لوله باشد. بنابراین هر محل انتخاب شده برای الکترود به طور اجتناب‌ناپذیر مقداری خطای افت ولتاژ IR به خوانده‌ها وارد می‌کند. وقتی الکترود مستقیماً بالای لوله قرار می‌گیرد، کمترین مقدار خطا (برای یک میدان متقارن) رخ می‌دهد. تنها راهی که در آن خوانده از لحاظ تئوریک می‌تواند صحیح گرفته شود، قرار دادن الکترود نزدیک لوله، یا استفاده از یک مدار صفر پیچیده شامل دو یا چند الکترود است، که در آن تأثیرات افت ولتاژ حذف می‌شود. هر دوی اینها کاملاً وقت‌گیر هستند، و در نتیجه کمترین مقبولیت را دارند.



شکل ۴-۲۳ پتانسیل‌سنج با ابراز افزایش طول اختیاری

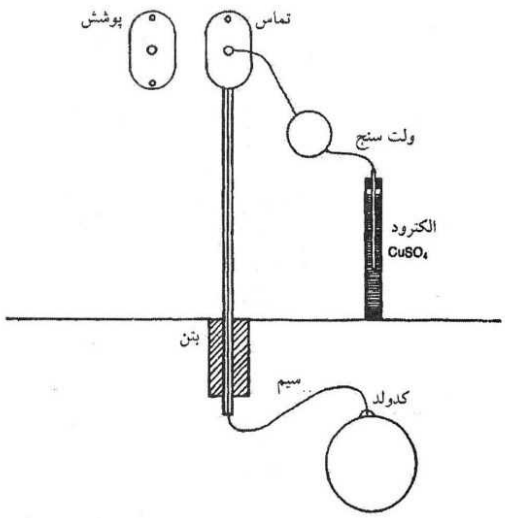


شکل ۴-۲۴ میدان جریان و پتانسیل اطراف یک لوله. خطوط نقطه‌چین شار جریان به‌طرف یا از سمت یک لوله قرار داده شده در خاک با مقاومت ویژه یکنواخت را نشان می‌دهد؛ خط تیره (–) اختلاف پتانسیل معادل را نمایش می‌دهد. می‌توان دید که هیچ نقطه‌ای بر سطح در پتانسیل مشابه با نقطه خیلی نزدیک با لوله نیست، اما یک الکترود قرار داده شده در A تقریب نزدیک‌تری نسبت به B نشان می‌دهد.

اتصال خط لوله

چنانچه شکل ۴-۱۷ نشان می‌دهد، اتصال به لوله باید توسط یک سیم سربی عایق یا یک میله تماس عایق شده، یا در بهترین حالت، توسط ایستگاه‌های آزمایش دائمی متصل شده در طول خط لوله در فاصله‌های منظم ایجاد شود. مزیت ایستگاه آزمایش این است که هنگام اتصال صدمه زدن به پوشش خط لوله ضرورتی نخواهد داشت. شکل ۴-۲۵ یک روش نصب معمولی را نشان می‌دهد؛ می‌توان دید که قسمتی از پوشش کنده می‌شود، و سپس سیم از طریق فرایندی تحت عنوان «کد ولد»[2] به لوله متصل می‌شود. این یک واحد ترمیت کوچک است که از پودر آلومینیم و اکسید مس برای تولید گرمای کافی برای پیوند سیم مسی به فولاد استفاده می‌کند. سپس اتصال و فلز لخت اطراف، با یک پوشش مشابه پوشش خط لوله پوشانده می‌شود و معمولاً با یک نوارچسب روکش می‌شود. سپس سیم سربی تا روی سطح و معمولاً تا ارتفاع پنج فوتی بالا می‌آید، جایی که جعبه حاوی سیم با ابزار اندازه‌گیری آزمایشی به آسانی اتصال برقرار می‌کند. وقتی ایستگاه آزمایش نصب می‌شود، معمولاً استفاده از آن به‌عنوان یک انتهای قطعه آزمایش برای اندازه‌گیری جریان خط تسهیل‌کننده است.

2 0 9

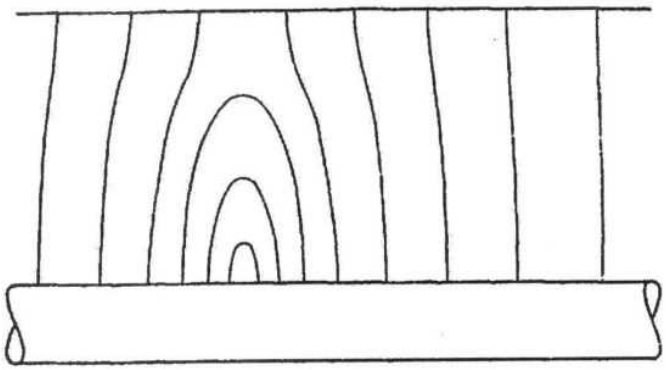


شکل ۴-۲۵ نصب ایستگاه آزمایش

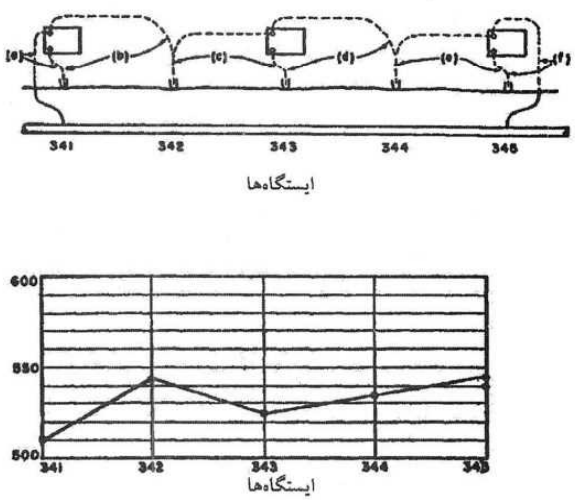
نقشه‌برداری پتانسیل خطی برای خوردگی

شکل ۴-۲۶ میدان‌های جریان و پتانسیل اطراف یک قطعه از خط لوله با یک منطقه زنگ زده فعال منفرد (آندی) را ارائه می‌کند. توزیع پتانسیل در طول سطح زمین بالای لوله به روشنی مکان منطقه فعال را نشان می‌دهد، در نتیجه نقشه‌برداری از پتانسیل‌های سطحی در طول خط لوله در تعیین مکان خوردگی مفید می‌باشد. شکل ۴-۲۷ نمودارهای یک روش برای تهیه این نوع نقشه‌برداری است، درحالی‌که، شکل ۴-۲۸ پتانسیل لوله نسبت به خاک یک خط محافظت شده را نشان می‌دهد.

تغییرات در مقاومت ویژه خاک اختلاف پتانسیلی را وارد می‌کند که ممکن است در حالت مطلوب آنها را بپوشاند، در نتیجه مسئله به هیچ‌وجه آن‌گونه که نشان می‌دهد ساده نیست. اشکال دیگر این روش (و مورد خیلی جدی‌تر مشکلات) آن است که یک پیل شدیداً موضعی را آشکار نخواهد کرد، این جایی است که آند و کاتد خیلی به هم نزدیک باشند، برای مثال، پیل «غلطتی» متداول که در آن آند در زیر و کاتد در بالا در نقطه‌ای از لوله قرار دارند.



شکل ۴-۲۶ میدان پتانسیل اطراف یک نقطه آندی منفرد. یک نقطه آندی ایزوله شده بر یک لوله مدفون در جایی که خوانده‌ها در فاصله نسبتاً نزدیک گرفته شوند می‌تواند به‌راحتی توسط اندازه‌گیری پتانسیل سطحی معلوم شود.



شکل ۴-۲۷ نقشه‌برداری پتانسیل سطحی

روش:

(الف) اندازه‌گیری پتانسیل لوله نسبت به خاک در سیم آزمایش، ایستگاه ۳۴۱.

(ب) اندازه‌گیری پتانسیل خاک نسبت به خاک بین ۳۴۱ و ۳۴۲: به‌علاوه (جمع جبری) خوانده به دست آمده از (الف). این عدد پتانسیل لوله نسبت به خاک را در ایستگاه ۳۴۲ می‌دهد.

(ج) دستگاه اندازه‌گیری را دو ایستگاه حرکت دهید: اندازه‌گیری پتانسیل لوله نسبت به خاک بین ۳۴۲ و ۳۴۳.

(د) اندازه‌گیری پتانسیل خاک نسبت به خاک بین ۳۴۳ و ۳۴۴.

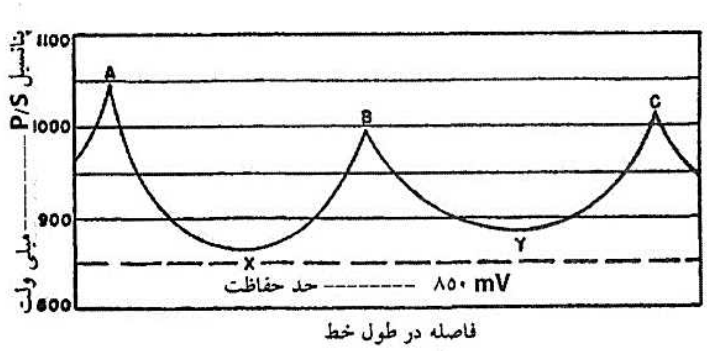
(ه) دستگاه را دو ایستگاه حرکت دهید: اندازه‌گیری پتانسیل خاک نسبت به خاک
بین ۳۴۴ و ۳۴۵.

(و) اندازه‌گیری پتانسیل لوله به خاک در ۳۴۵. مشاهده کننده باید مقادیر محاسبه شده را بررسی کند؛ ممکن است خطا توزیع شود یا اگر کوچک باشد، نادیده گرفته شود.

- یادداشت‌ها باید به‌صورت زیر نگهداری شوند:

۳۴۱	۵۱۰ □□			
۳۴۲		+۳۵	۵۴۵	
۳۴۳		−۲۰	۵۲۵	
۳۴۴		+۱۰	۵۳۵	
۳۴۵	۵۴۰	+۱۰	۵۴۵	خطا = +۵ □□

دو الکترود استفاده می‌شوند؛ آنها باید برای اجتناب از خطای ناشی از تفاوت کوچک بین الکترودها «جهش» کنند.



شکل ۴-۲۸ پتانسیل لوله نسبت به خاک خط حفاظت شده. توزیع پتانسیل معمول در طول یک خط با واحدهای حفاظت کاتدی در نقاط A، B و C. نقاط X و Y نقاط بحرانی هستند؛ اگر پتانسیل در این نقاط رضایت‌بخش باقی بماند تمام خط به مقدار کافی حفاظت می‌شود.

پتانسیل لوله نسبت به خاک به‌عنوان معیار حفاظت کاتدی

توافقی جهانی مبنی بر این وجود دارد که یک سازه فولادی تحت حفاظت کاتدی اگر پتانسیل برحسب الکترود استاندارد مس - سولفات مس اشباع قرار گرفته در الکترولیت بسیار نزدیک به سطح فلز، حداقل منفی ۰/۸۵ ولت باشد، کاملاً حفاظت می‌شود. کل سازه کاملاً محافظت می‌شود، البته فقط اگر این شرط در تمام نقاط روی سطح برقرار باشد. این حداقل شرایط نیست، بلکه حداکثر آن است. به‌بیان‌دیگر، اغلب این نکته مطمئناً درست است که حفاظت وقتی کامل می‌شود که این شرط صادق باشد. این امکان وجود دارد که در پتانسیل‌های پایین‌تر نیز خوردگی فعال وجود داشته باشد.

همان‌طور که اشاره شد، قرار دادن الکترود کاملاً نزدیک سطح لوله عملی غیرطبیعی و گرفتن خوانده در هر نقطه از سطح غیرممکن است. در نتیجه این دو مشکل، عموماً پذیرفته شده است که الکترود در خاک دقیقاً بالای لوله کار گذاشته شود. تأیید صحت این مطلب برای یک خط خوب پوشش داده شده و لوله بدون پوشش دشوار نیست. برای یک خط بدون پوشش، این درست نیست، اما خطوط بدون پوشش به‌ندرت کاملاً حفاظت می‌شوند. مشکل دیگر، با فرض درجه مشخصی از پیوستگی در شیب پتانسیل، در طول خط برطرف می‌شود. این فرض تقریباً همیشه صادق است، و تنها به علت ناپیوستگی‌های مقاومت ویژه خاک نقض می‌شود. این فقط در مناطقی اتفاق می‌افتد که عملاً غیرخورنده و بدون حفاظت هستند.

در نظر گرفتن یک خط لوله پوشش داده شده به‌عنوان خطی که کاملاً حفاظت شده است، اگر نقشه‌برداری در طول آن، یک منحنی پتانسیل صاف به دست دهد که زیر مقدار ۰/۸۵ - ولت قرار نگیرد، مقرون‌به‌صرفه و نسبتاً ایمن است؛ تمام خوانده‌های گرفته شده برحسب الکترود استاندارد مس/ سولفات مس هستند.

هنگامی که یک نقشه با جزئیات کامل در یک سیستم مشخص می‌کند که حفاظت ایجاد شده است، بازبینی‌های دوره‌ای در نقاط بحرانی (نقاط پتانسیل پایین بین واحدها)، امکان دانستن اینکه حفاظت هنوز برقرار می‌باشد را فراهم می‌کند. این موضوع بعداً به طور کامل بحث می‌شود.

سایر کاربردهای پتانسیل لوله نسبت به خاک

این اندازه‌گیری قسمتی از تکنیک استفاده شده در انواع مختلف مطالعات است، که اغلب آنها بعداً تشریح خواهند شد. از میان آنها باید اشاره کرد به: (۱) مطالعات تداخل، (۲) تحقیقات جریان سرگردان، (۳) اندازه‌گیری‌های رسانایی پوشش، و (۴) آزمایشات حفاظت کاتدی.

معیارهای دیگر

علاوه بر استفاده از پتانسیل استاندارد ۰/۸۵- ولت برای تکمیل یک سیستم حفاظت کاتدی، دو روش دیگر نیز استفاده می‌شوند:

۱- کوپن آزمایش خوردگی مدفون در طول خط لوله‌ی . این نمونه‌ها باید وزن شوند و به خط در نقاطی که احتمالاً در معرض شرایط خوردگی شدید هستند وصل شوند. بعد از مدتی قرارگیری در معرض محیط، کوپن‌ها باید بیرون آورده شده و مجدداً وزن شوند. هر کاهشی در وزن برای محاسبه درجه حفاظت ضروری است.

۲- تغییر پتانسیل، معیار دیگر استفاده از تغییر پتانسیل تا ۰/۳ ولت است. وقتی که جریان به‌عنوان معیار حفاظت کاتدی به کار می‌رود (که توسط یولی «[illegible]مشکوک» نامیده شد ولی اغلب در طراحی حفاظت کاتدی استفاده می‌شود). این روش شامل اندازه‌گیری جریان حفاظت کاتدی ناپیوسته است که در بخش مربوطه نشان داده خواهد شد. همچنین این مفهوم ممکن است در محاسبات طراحی ابتدایی، استفاده شود.

خلاصه

مشاهده کردیم که علی‌رغم اینکه الکترودهای مرجع مختلفی (نیم پیل‌ها) برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل وجود دارند، فقط الکترود مس/سولفات مس برای اغلب خوانده‌هایی که مهندس خوردگی از خاک جمع می‌کند، استفاده می‌شود. همچنین، برای تأکید، پتانسیومتر، به‌ویژه به شکل ابزار چند کاره، نسبت به ولت‌سنج‌های با مقاومت پایین ترجیح داده می‌شود. مکان قرار دادن الکترود مرجع بهتر است بر سطح زمین کاملاً بالای خط لوله مدفون باشد. گاهی، خاک باید مرطوب شود، علی‌رغم اینکه اصولاً نباید هیچ‌کاری انجام شود که محیط را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای تماس با خط لوله، داشتن ایستگاه‌های آزمایش نصب شده در فواصل منظم در طول تمام خطوط لوله اصلی مطلوب است. این مسئله تماس مستقیم فلز با خود لوله را حذف خواهد کرد، البته اگر سیم‌های دائم در دسترس نباشند این تماس مستقیم ضروری خواهد بود. هرچند سیستم «جهشی» وقتی یک فاصله بین ایستگاه‌های آزمایش وجود دارد مفید می‌باشد، در دسترس داشتن نقاط بین یک‌سوکننده‌ها سودمند خواهد بود. در روش‌های مدرن اندازه‌گیری پتانسیل لوله نسبت به خاک از ولت‌سنج‌های ثبت کننده‌ای استفاده می‌شود، که می‌توانند برای کامل کردن یک سری از پتانسیل‌های لوله نسبت به خاک در طول یک خط لوله در زمان خیلی کوتاه استفاده شوند.

2 [illegible] 1 0

الکترولیز جریان سرگردان

خوردگی جریان سرگردان

حفاظت کاتدی شاخه‌ای از مطالعات خوردگی تداخلی ناشی از خطوط آهن برقی و خطوط تراموا است که در سال‌های آغازین این قرن در سرتاسر ایالات متحده گسترده شده بود. جریان مستقیم دشارژ شده به زمین نقص‌های بسیاری در سیستم لوله‌گذاری مجاور ایجاد می‌نماید. کمیته‌های الکترولیز[1] برای یافتن راهکارهایی برای حل مسائل خوردگی حاصل از جریان-های سرگردان تشکیل شدند و اکثر دانسته‌های ما از اندازه‌گیری جریان خوردگی و روش‌های اتصال، مدت‌ها پیش از سال ۱۹۱۳، وقتی آر.ای. کوهن شروع به انجام حفاظت کاتدی در نیواورلئان کرد، به دست آمدند.

امروزه، تراموا‌ها جزء در برخی پایتخت‌ها از بین رفته‌اند، و قطارهای برقی جایگزین موتورهای دیزلی شده‌اند که پیش‌تر در راه آهن استفاده می‌شدند. به هر حال، سیستم‌های انتقال جریان مستقیم تجربی متعددی برای شبکه‌های قاره‌پیما پیشنهاد شده‌اند، و مسئله جریان سرگردان دوباره افزایش یافته است.

منابع جریان‌های سرگردان

قسمتی از جریان‌های الکتریکی که خطوط لوله را می‌خورند آنهایی هستند که از اختلاف پتانسیل گالوانیک بین قسمت‌های مختلف سازه در تماس با زمین به وجود می‌آیند. دیگر جریان‌ها، منتج از نشتی جریان از برخی سیستم‌های الکتریکی می‌باشند که در آن قسمتی از مسیر جریان از زمین می‌گذرد. هرگاه یک خط لوله در چنین مسیر جریانی قرار گیرد، فرصتی برای ورود و خروج جریان به دست می‌آید؛ در نقاطی که جریان خط را ترک می‌نماید، لوله خورده خواهد شد.

به دلیل طبیعت ذاتاً تصادفی و غیرعمدی، این جریان‌ها اغلب به «جریان‌های سرگردان» معروفند، و صدمه‌ای که وارد می‌کنند با عنوان «الکترولیز جریان سرگردان» شناخته می‌شود.

منبع قابل ملاحظه و بزرگی از جریان سرگردان، راه آهن برقی یا نوع شهری آن، قطار شهری می‌باشد.

شکل ۴-۲۹ مسیر انتخاب شده توسط جریان را به شکل ساده نشان می‌دهد. باید توجه کرد که گمان می‌رود ریل مسیر بازگشت را فراهم می‌نماید؛ شاید فرض شود که اگر اتصالات ریل به طور مناسبی متصل شوند خرابی به بار نخواهد آمد. به هر حال این فرض حقیقت ندارد. جریان برق مسیر با کمترین مقاومت را دنبال نمی‌کند یا حداقل تمام جریان این مسیر را دنبال نمی‌کند. جریان الکتریکی، وقتی دو یا چند مسیر موازی در اختیار دارد، برعکس مقاومت بین خطوط تقسیم می‌شود. اگر مسیر ریل یک دهم مقاومت مسیر زمین را داشته باشد، بنابراین جریانی تا ۱۰ مرتبه بزرگ‌تر را حمل خواهد کرد – اما قسمت باقی مانده یک یازدهم کل جریآنکه در زمین جاری می‌شود برای ایجاد صدمات بزرگ کافی است. وضعیت همواره به سادگی آنچه در نمودار نشان داده شده نیست. گاهی خط تحت تأثیر ممکن است در فاصله قابل ملاحظه‌ای از مسیرها قرار داشته باشد، احتمالاً

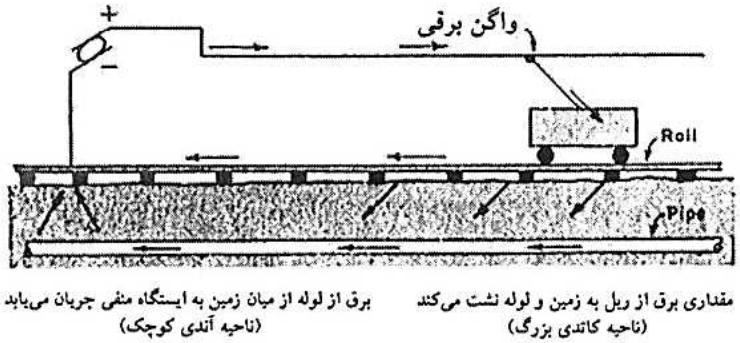
1 [illegible] 1

2 [illegible]

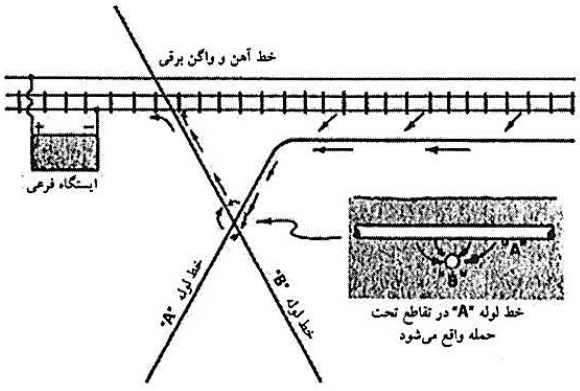
نقطه حمله نزدیک محل تقاطع دو خط می‌باشد، جایی که مقداری جریان از یک خط خارج و وارد خط دیگر می‌شود. شکل ۴-۳۰ موردی را نشان می‌دهد که از منظر فاصله از نزدیک‌ترین مسیر تا نقطه آسیب دیده به سختی قابل شناسایی است؛ بااین‌وجود، اگر مسیر یک‌بار شناخته و رسم شده باشد، رابطه روشن خواهد بود.

علاوه بر راه‌های آهن برقی منابع دیگری از جریان سرگردان وجود دارند. تقریباً هر شبکه برق DC قادر به ایجاد آسیب از این طریق می‌باشد، اگرچه اغلب آنها بی‌زیان هستند. خط آهن معدن، جرثقیل‌ها و سایر ماشین‌های استفاده‌کننده از برق DC نیز مورد شک هستند. داخل و نزدیک کارخانه‌های شیمیایی که از فرایندهای الکترولیتی استفاده می‌کنند، به دفعات موقعیت‌های خطرناکی به وجود می‌آید. تجهیزات جوشکاری، به‌ویژه در کارهای تولیدی به کار گرفته می‌شوند، منبع متداول مشکل هستند. اگرچه به‌ندرت آسیب در فاصله زیادی از این تجهیزات اتفاق می‌افتد؛ این مسئله تعیین موقعیت را بسیار ساده‌تر می‌سازد.

در نهایت، متأسفانه این حقیقت وجود دارد که جریان‌های مستقیمی که به طور عمدی با هدف حفاظت کاتدی به یک سازه وارد می‌شوند، قادر هستند به سایر سازه‌هایی که در همان منطقه قرار دارند صدمه وارد کنند. اینها دقیقاً «جریان سرگردان» نیستند؛ اثر مخرب تماماً تصادفی می‌باشد، اما حضور جریان در زمین تصادفی نیست. بررسی این مشکل به بعد موکول می‌شود.



شکل ۴-۲۹ الکترولیز جریان سرگردان. جریان بازگشتی از واگن برقی تقسیم می‌شود، قسمتی به ایستگاه فرعی ریل باز می‌گردد و قسمتی نیز از ریل‌ها به خط لوله نشت می‌کند. نزدیک ایستگاه فرعی این جریان از خط لوله به خاک و به سیستم ریل شارش می‌کند و باعث خوردگی لوله می‌شود. نصب اتصال فلزی از لوله به ترمینال منفی در ایستگاه از آسیب جلوگیری خواهد کرد.



شکل ۴-۳۰ قرار گرفتن در معرض جریان سرگردان پیچیده. نقطه‌ای که در آن آسیب در خط لوله رخ می‌دهد «A» از مسیرهای ترن برقی مهاجم دور می‌شود. این شرایط معمولاً توسط پتانسیل‌های متغیر یا جریان در خط لوله «A» توسط یک نقشه جریان خط تشخیص داده می‌شود.

آشکارسازی جریان سرگردان

هرگاه اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی متصل به یک خط لوله - جریان خط، پتانسیل لوله نسبت به خاک، یا هر کمیت دیگر - مقادیر نوسانی نشان دهد، با یک مورد جریان سرگردان مواجه هستیم. اغلب با رها کردن ابزار متصل و بررسی نوسانات در یک دوره زمانی مفید می‌باشد. سرعت و طبیعت تغییرات اغلب سرنخی درباره منشأ می‌دهد و این شاید همان چیزی است که از عملکرد واقعی سیستم مهاجم قابل مشاهده است؛ برای مثال، معمولاً تغییری که در اثر حرکت ترن برقی ایجاد می‌شود موقعیت نقص را تعیین می‌نماید.

هنگامی که تعیین موقعیت منبع توسط این روش ممکن نمی‌شود، ثبت‌کننده‌ای باید متصل شود. به دلیل حساسیت پایین‌تر ابزار حتی وقتی مقدار ثبت شده مقدار صحیح نیست، ثبت ۲۴ ساعته می‌تواند مفید باشد. برای مثال، اگر توقفی در نوسان برای نصف روز وجود داشته باشد، منبع می‌تواند یک ماشین صنعتی باشد نه وسایل حمل و نقل. با استفاده از توجیه مشابه با ثبت روزهای پیاپی مختلف، معمولاً مسیریابی سیستم DC مولد جریان‌های سرگردان ممکن می‌گردد.

اندازه‌گیری‌های اصلاحی

پوشش خوب در کاهش صدمه کلی حاصل از جریان سرگردان مؤثر می‌باشد؛ یک خط با پوشش خوب ممکن است سرعت نفوذ بیشتری را در چند نقص[۲،۱] نسبت به آنچه در یک خط بدون پوشش پیش‌بینی می‌شود ایجاد کند. پوشش به تنهایی برای حفاظت خط در برابر آسیب جریان سرگردان کافی نیست، چنانچه برای خوردگی خاک نیز کافی نمی‌باشد.

نصب اتصالات ایزوله در دو طرف راه‌آهن برقی از بسیاری از حملات جلوگیری خواهد کرد: قرار گرفتن در معرض تهاجم به مقاطع کوتاه بین اتصالات محدود خواهد شد و این می‌تواند توسط سایر روش‌های نام برده شده در اینجا رفع شود. این اتصالات اگر به‌درستی نصب شوند، می‌توانند حمله را متمرکز نمایند بدون آنکه آن را به طور قابل ملاحظه‌ای به حداقل برسانند.

رهیافت مستقیم به مشکل جریان سرگردان، نصب اتصالاتی بین لوله مورد تهدید ترمینال منفی سیستم DC است که آسیب را به وجود می‌آورد؛ این کار مسیری با مقاومت پایین ایجاد می‌کند که توسط آن جریان بر خطی با مقاطع طولانی جمع می‌شود و بدون آسیب به خط مقطع متمرکز کوچک‌تر آن را ترک می‌کند. اتصال «صلب»، در جایی که مسیر با پایین‌ترین مقاومت ممکن ایجاد می‌گردد، ساده‌ترین روش است و همواره مؤثر است و اتصال با مقادیر مقاومت خاص انتقال ضروری می‌باشد.

در مناطقی که مقدار یا حتی جهت شار جریان سرگردان به موقعیت تراموا‌ها یا ترن‌ها وابسته می‌باشد، عملاً نصب سوئیچ‌های اتصال کنترل شده کمکی که به سوئیچ‌های الکترولیز معروفند پیشنهاد شده است. سوئیچ‌ها به بزرگی و جهت پتانسیل‌های

2 [illegible] 1 2

درگیر وابسته‌اند و از طریق ایجاد اختلال در مدار یا بستن آن عمل می‌نمایند. اصلاح این سیستم با استفاده از واحدهای یک‌سوکننده به‌عنوان سوپاپ کنترل برقی، به جریان اجازه می‌دهد از خط لوله وقتی پتانسیل در آن جهت است حرکت نماید، اما وقتی پتانسیل معکوس می‌باشد شار جریان در خط را متوقف می‌نماید.

اتصال ترمینال منفی

در وضعیتی نظیر آن چه در شکل۴-۲۹ نشان داده شده، آسیب می‌تواند توسط نصب اتصال فلزی یا اتصال بین لوله و ترمینال منفی در ایستگاه فرعی حذف شود. وقتی هندسه مشابه حالت نشان داده شده ساده می‌باشد، ناحیه بیشینه در معرض خطر بودن در همسایگی نزدیک ایستگاه فرعی خواهد بود. در موارد پیچیده‌تر، نقشه‌ای برای تعیین موقعیت این ناحیه ضروری خواهد بود.

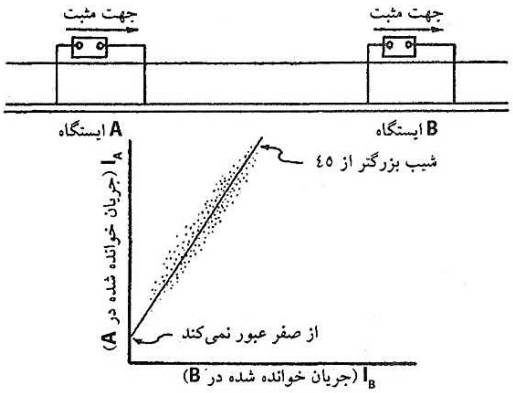
نصب چنین اتصالی مقداری حفاظت کاتدی برای خط فراهم می‌نماید. در یک شبکه گسترده، شامل خطوط لوله و مسیرهای فراوان، مانند آنچه در سیستم گاز یک شهر با ترن برقی دیده می‌شود، تقریباً همه سیستم توزیع گاز با نصب این اتصالات تحت حفاظت کاتدی قرار می‌گیرد. آیا این کار برای شرکت قطار شهری هزینه‌ساز می‌باشد؟ از آنجا که آنها برق را مصرف می‌کنند، اولین جواب آری می‌باشد. اما در نظر بگیرید که نصب این اتصالات عملاً مقاومت کل مدار آنها را کاهش می‌دهد و دیده خواهد شد که عملاً برق کمتری برای اجرای مقدار کار مشابه لازم است. باز هم این هزینه عملاً برعهده شرکت راه‌آهن شهری می‌باشد – نه از باب مصرف برق بلکه از لحاظ صدمه به سیستم ریلی. وجود اتصالات به این معنی است که درصد بالایی از جریان برگشتی به ریل‌ها نشت می‌کند و از طریق مسیر اتصال لوله به زمین باز می‌گردد که در این صورت مشکل ایجاد می‌شود. این به آن دلیل است که همواره تلاش در جهت نصب اتصالات مقاوم محدوده‌کننده جریان و پیشگیری از آسیب به خط مبذول می‌شود، بدون آنکه عملاً آنها را در برابر تماس با خاک حفاظت کاتدی کند.

مناطق در معرض

اگر اثر جریان سرگردان بر یک خط لوله پایدار باشد، محل مناطق حداکثر تماس می‌تواند به‌راحتی توسط نقشه جریان خط یا یک نقشه پتانسیل سطحی برای تعیین نواحی که در آن جریان، خط را ترک می‌نماید، تعیین موقعیت شود. این نوسانات باعث ایجاد اشکالات و پیچیدگی‌های بیشتری می‌شود و نیازمند راهکارهای ویژه است.

یک راهبرد اصلاح نقشه جریان خط می‌باشد. اندازه‌گیری‌های جریان به طور هم‌زمان در دو منطقه انجام می‌گیرند و ۲۰ تا ۴۰ جفت از خوانده‌ها گرفته می‌شوند. سپس جفت‌های مرتبط بر روی نموداری رسم می‌شوند، مانند آنچه در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده است؛ اگر خط راست شکل گرفته در زاویه ۴۵ درجه باشد و از مبدأ بگذرد، دیگر بهره یا افت جریان در مقطع مورد نظر وجود ندارد؛ اگر این خط در زاویه‌ای غیر از ۴۵ درجه باشد، بنابراین بهره جریان یا افت جریان به دلیل اثرگذاری جریان سرگردان وجود دارد؛ اگر این خط از مبدأ عبور ننماید، یک بهره یا افت ثابت مستقل از جریان‌های نوسانی وجود دارد. در نهایت، اگر نقاط در جایی نزدیک خط مستقیم قرار نگیرند، منبع جریان سرگردانی وجود دارد که تنها بر یکی از نقاط اثر می‌گذارد.

به مجرد اینکه مجموعه‌ای از خوانده‌ها برای یک زوج از اتصالات کامل می‌شود، یک خدمه بلافاصله جلو می‌رود و مقطع دیگر مطالعه می‌شود. اگر بیش از دو خدمه و مجموعه ابزار در دسترس باشد، هم‌زمان بیش از یک مقطع می‌تواند مطالعه گردد. خوانده ها معمولاً با استفاده از دستگاه علامت‌دهی (یک فرستنده مکان یاب لوله و گیرنده می‌توانند استفاده شوند) یا با استفاده از ساعت‌های هماهنگ شده، هم‌زمان می‌شوند. این نقشه‌ها به‌ندرت طول‌های بسیار بزرگی از خط را پوشش می‌دهند و معمولاً به نواحی محدود می‌شوند که با مطالعه نقشه‌ها احتمالاً مناطق در معرض هستند.



شکل ۴-۳۱ موقعیت نواحی حداکثر تماس. در نمودار نشان داده شده شیب بزرگ‌تر از ۴۵ درجه به محور I_A نزدیک‌تر می‌باشد و نشان می‌دهد که مؤلفه جریان سرگردان در A بزرگ‌تر از B می‌باشد؛ بنابراین، افت جریان در مقطع AB وجود دارد؛ مقطع بالای محور مؤلفه پایدار کوچکی در A نشان می‌دهد؛ این یعنی، مقداری افت جریان در مقطع به دلیل منابعی غیر از جریان سرگردان وجود دارد. اگر این نقاط، یک خط مستقیم تشکیل ندهند، چند منبع جریان سرگردان وجود دارند. تکنیکی مشابه می‌تواند برای نقشه‌های پتانسیل سطحی استفاده شود.

نقشه‌های پتانسیل

اگرچه مطالعه جریان‌های خط، چنانچه شرح داده شد، جنبه مثبتی دارد و شواهدی از بهره یا افت جریان عملی را تعریف می‌نماید – و اینها شواهد مستقیمی از خوردگی می‌باشند – اطلاعات بیشتری می‌تواند از طریق مطالعه پتانسیل‌های لوله نسبت به خاک، و لوله نسبت به لوله، یا حتی، از پتانسیل‌های سازه نسبت به سازه در نواحی مشکوک به آسیب به دست آید. برای انجام مؤثر این امر، اندازه‌گیری تعدادی از پتانسیل‌ها به طور هم‌زمان ضروری می‌باشند و دقیق بودن این کار بسیار مهم است، زیرا اختلاف کمتر از یک ثانیه نیز می‌تواند ارتباط بین نکات قابل فهم را از بین ببرد.

کمیته تخصصی T-4B انجمن ملی مهندسین خوردگی اولین بار ابزاری را معرفی کرد که این وظیفه خطیر را کاملاً درست انجام می‌دهد. تعدادی خازن به ترمینال‌های مختلف که بین آنها پتانسیل‌ها اندازه‌گیری می‌شوند متصل می‌گردند. وقتی مجموعه‌ای از خوانده‌ها مورد نیاز است، دکمه‌ای فشرده می‌شود (این کار می‌تواند از راه دور انجام گیرد) و تمام خازن‌ها به طور هم‌زمان قطع می‌شوند، به این طریق پتانسیل‌های مجزای آنها «ثابت نگه‌داشته» می‌شوند. اینها سپس، یک‌به‌یک، و توسط ولت‌سنج با تیوب تخلیه خوانده می‌شوند.

ابزار شرح داده شده در مرجع، ۱۹ مدار داشت که به طور ابتدایی برای تحقیق خوردگی کابل روکش‌دار طراحی شد؛ در کار خط لوله به‌ندرت به این تعداد مدار نیاز می‌باشد و حالت اصلاح شده بسیار ساده‌ای از این دستگاه که از دو یا سه خازن ۴ میکروفارادی استفاده می‌کند به‌راحتی می‌تواند ساخته شود. با این تعداد کم، ابزارهای کمکی و کنترل از راه دور می‌تواند به کار روند و حتی سوئیچ دوار غیرضروری است؛ گیره کابل می‌تواند در صورت لزوم از یک ترمینال به ترمینال دیگر جابه‌جا شود. ویژگی مهم کل دستگاه آن است که خازن‌ها باید تماماً در یک زمان از پتانسیل‌هایشان قطع شوند.

تماس ثانویه

شکل ۴-۳۰ وضعیتی را نشان داد که در آن ناحیه در تماس در فاصله‌ای از چند مسیر قرار دارد. جریان از مسیرها بر روی خط لوله «A» نشت می‌کند و به‌سمت پایین تقاطع حرکت می‌کنند، سپس از «A» به «B» نشت می‌کند و «B» را تا همسایگی از ایستگاه فرعی یا مسیر دنبال می‌کند. برای پیش‌گیری از آسیب، اتصالات می‌بایست در هر دو مکان نصب شوند؛ نصب هر اتصال، به تنهایی، تماس را در منطقه دیگر توسط کاهش مقاومت مسیر بازگشت کل تشدید خواهد کرد. این تماس‌ها پیچیده هستند و تنها می‌توانند توسط نقشه‌برداری‌های بسیار دقیق و کامل یافت شوند؛ اغلب اینها توسط رخ دادن نشتی‌ها آشکار می‌شوند. به هر حال، نقشه‌برداری پتانسیل سطحی، پتانسیل‌های نوسانی را نشان خواهد داد، تا زمانی که این نقشه‌ها بدون تفسیر باقی می‌مانند، در معرض بودن در هر جایی از خط وجود دارد و کار دقیق بالاخره آن را ردیابی خواهد نمود. پتانسیل‌های نوسانی یا جریان‌های خط هرگز نباید نادیده انگاشته شوند. آنها اغلب بی‌ضرر هستند، اما تا زمانی که منبع آنها شناخته نشده است باید مورد تحقیق قرار گیرند.

در یک خط خوب پوشش شده در خاک با مقاومت ویژه بالا، و به ویژه در عرض جغرافیایی شمالی، اغلب نوسانات گسترده پتانسیل‌ها مشاهده می‌شوند که تنها می‌توانند با جریان‌های طبیعی زمین مرتبط باشند. اینها در طول دوره‌های فعالیت مغناطیسی بسیار وحشتناک‌تر می‌باشند، مثلاً وقتی سپیده شمالی فعال است، اما گاهی تا هفته‌ها ادامه می‌یابند. واضح است این جریان‌ها خطر کمی دارند و اگر خطی تحت حفاظت کاتدی قرار گیرد، آنها ناپدید می‌شوند. به هر حال، آنها تهیه نقشه‌های جریان مورد نیاز را کاملاً مشکل می‌سازند و تقریباً از اتخاذ هر پتانسیل استاتیکی جلوگیری می‌کنند.

خلاصه

دیده می‌شود که مشکل اصلی حاصل از الکترولیز جریان سرگردان در گذشته نشتی مستقیم جریان از واگن‌ها و ترن‌های برقی بوده است. به هر حال، دلیل فعلی، جریان مستقیم از یک خط لوله بدون اتصال تحت حفاظت کاتدی می‌باشد. تمام تکنیک‌هایی که برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی آموخته‌ایم، شامل سنجه ثبت‌کننده، معمولاً، نیاز به تعیین مشکل و منابع آن دارد. فلنج-های ایزوله شده و اتصال ترمینال منفی اغلب برای حداقل کردن آسیب ایجاد شده توسط الکترولیز به کار می‌روند.

تداخل در حفاظت کاتدی

مشکل

در بخش قبلی، جریان سرگردان به‌صورت جریان نشتی از برخی سیستم‌های الکتریکی تعریف شد که به‌صورت اتفاقی از زمین جریان می‌یابد. اگر این جریان قادر به ایجاد آسیب باشد، جریان‌هایی که هنگام اعمال حفاظت کاتدی از زمین می‌گذارند، نیز قابلیت ایجاد تخریب دارند. در مورد اول، مشکل مهندس خوردگی جلوگیری از آسیب ساختارهای زیر زمین تحت کنترل اوست؛ در مورد دوم، وظیفه او اقدام برای جلوگیری از آسیب رسیدن به سایر سازه‌ها توسط عملکرد سیستم‌های حفاظت کاتدی وی است. هرگز نباید تصور شود که جریان الکتریسیته کاملاً به زمینی محدود می‌شود که بین آند و ساختار حفاظت شده قرار گرفته است.

جریان الکتریکی می‌تواند در سمت سطح زمین با استفاده از دو الکترود و یک پتانسیومتر، در فاصله چندین صد فوت در هر سمت خط لوله محافظت شده و تقریباً در هر فاصله‌ای از آند مشاهده شود. همچنین جریان می‌تواند در فاصله چند هزار فوتی در هر جهتی از آند شناسایی شود. هیچ حد قابل تعریفی برای میدان وجود ندارد؛ ابزارهای حساس‌تر وقتی جریانی در زمین وجود دارد می‌توانند فواصل دورتری را تحت پوشش قرار دهند، و از هر منبعی یک قطعه فلز مدفون در خاک می‌تواند به‌عنوان بخشی از مسیر حرکت آن جریان عمل کند و آن را در بخشی از سطح خود جمع و سپس در محلی دیگر - همراه خوردگی - تخلیه نماید. مقدار جریان جمع شده و سپس تخلیه شده توسط عوامل بسیاری کنترل می‌شود: پوشش روی سازه، در صورت وجود؛ طول سازه در جهت جریان؛ شیب پتانسیل یا دانسیته جریان در نقطه تماس و توانایی سازه برای انتقال جریان. یک خط لوله بدون پوشش، که در جهت جریان الکتریکی، نزدیک به بستر آند (جایی که دانسیته جریان و شیب پتانسیل زیاد است) قرار گرفته است، در موقعیتی بسیار خطرناک قرار دارد؛ خط لوله خوب پوشش داده شده‌ای که از بستر آند دور است و با میدان جریان زاویه می‌سازد در شرایط کم خطرتری قرار دارد.

مشکل تداخل کاتدی از بسیاری جهات ساده‌تر از جریان سرگردان است. به طور کلی شرایط پایدارتر از حالت نوسانی است، لذا اندازه‌گیری‌ها و تنظیمات دقیق‌تری انجام می‌شود. منبع جریان اعمال شده تحت کنترل است، در صورت نیاز یک‌سوکننده می‌تواند خاموش یا روشن شود، یا از یک وقفه‌ساز استفاده شود تا اثرات واحد به روشنی شناسایی و مطالعه شوند. تحت بدترین شرایط، این تداخل به علت مقدار جریان‌های اعمال شده به‌شدت خطرناک است: به دلیل مقدار زیاد جریان‌های موجود، همه جریان بازگشتی از طریق مسیر زمین است، درحالی‌که، فقط بخشی از آن مانند جریان‌های سرگردان نشت می‌کند.

راه حل‌های اساسی

سه راهبرد اساسی برای این مشکل وجود دارد: (۱) طرحی که حداقل تماس را ایجاد می‌کند، (۲) اتصالی که بازگشت فلزی جریان جمع‌آوری شده توسط یک خط خارجی را تأمین می‌کند، و (۳) تخلیه کمکی جریان جمع‌آوری شده.

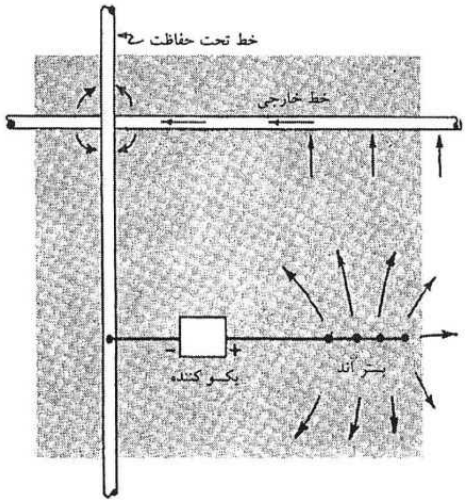
طراحی

دانسیته جریان در زمین، در اطراف بستر آند بزرگ‌تر از هر جای دیگر است؛ لذا این منطقه‌ای است که پر خطرترین شرایط را دارد. هر تلاشی باید صورت گیرد تا نقاطی برای نصب یک‌سوکننده‌هایی که دور از خطوط خارجی هستند، انتخاب شوند. شکل ۳۲-۴ مسیر جریان در مورد عبور یک خط خارجی که از نزدیکی بستر آند می‌گذرد را نشان می‌دهد؛ موقعیت وقتی خط عبور کننده دورتر واقع شده است مشابه، ولی بسیار مساعدتر است. شکل ۴-۳۳ موردی از تداخل را نشان می‌دهد که تنها وقتی بستر آند خیلی نزدیک است، خطرناک می‌باشد. حالت طرح کلی که چنین آسیبی را به حداقل می‌رساند، به وضوح حالتی است که بستر آندها بسیار دورتر از سازه‌های دیگر قرار گرفته است.

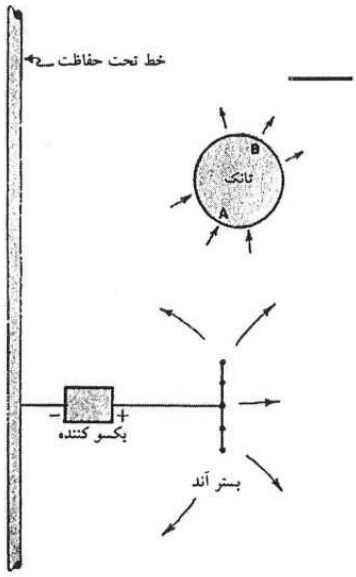
اتصالات متقاطع

در شرایطی نظیر آنچه در شکل ۴-۳۲ تشریح شده، چاره، نصب یک اتصال فلزی یا باند بین دو سازه را نزدیک نقطه تقاطع است. برخی مواقع یک اتصال جامد استفاده می‌شود؛ یعنی اتصال بدون مقاومت. این روش معمولاً موجب مقدار قابل توجهی حفاظت کاتدی خط خارجی می‌شود و اگر خط بدون پوشش یا دارای پوشش ضعیف‌تری نسبت به خط حفاظت شده باشد، سهم بیشتری از جریان را به خود اختصاص می‌دهد. روشن است بهترین کار برای انجام این است که در طول جریان اتصال جریان کافی برای جلوگیری از ایجاد هر آسیبی روی خط خارجی اعمال شود، برای انجام این کار استفاده از یک مقاومت در اتصال ضروری است.

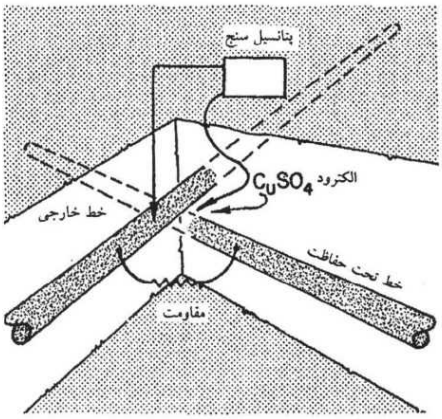
روش مستقیم نصب و تنظیم چنین اتصالی در شکل ۴-۳۴ تشریح شده است. یک الکترود سولفات مس در خاک بین دو خط در نقطه تماس قرار داده شده است. این کار معمولاً مستلزم حفاری و ایجاد یک دیوار عمودی از خاک در نزدیک‌ترین محل به دو خط است؛ گاهی یک الکترود بلند می‌تواند به‌درستی در سوراخ ایجاد شده قرار گیرد. اتصالات دو خط ایجاد و مقاومت تنظیم می‌شود تا جایی که وقتی یک‌سوکننده خاموش و روشن می‌شود، هیچ تغییری در پتانسیل خط خارجی نسبت به الکترود مرجع مشاهده نشود. این کار برای جلوگیری جریان مدار باز بین دو خط، با استفاده از مدار آمپرسنج با مقاومت صفر شکل ۴-۳۵ مفید است؛ از این راه می‌توان اندازه رسانای مورد نیاز برای اتصال را به دست آورد. اتصالات لوله‌ها معمولاً توسط روش (جوش) ترمیت ایجاد می‌شوند، و سیم کرومل یا نای کروم برای مقاومت استفاده می‌شود؛ اتصالات باید لحیم نقره شوند. تعیین طول سیم مقاومت مورد نیاز به روش آزمایش و خطا به مراتب آسان‌تر از محاسبه آن است.



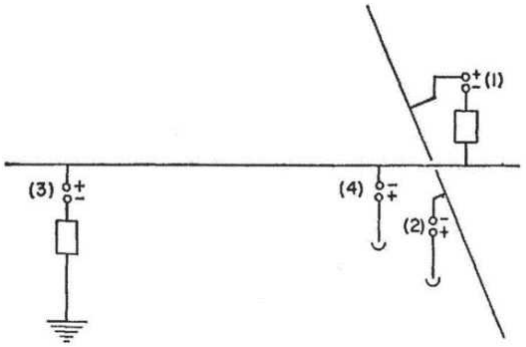
شکل ۳۲-۴ تداخل.برخی جریان‌های عبورکننده از بستر آند به‌سمت خط محافظت شده روی خط خارجی جمع می‌شوند و در طول آن به‌صورت عرضی (از هر دو سمت) جریان می‌یابند، و سپس از طریق خاک به‌سمت خط محافظت شده تخلیه می‌شوند. آسیب روی خط خارجی در همسایگی مقطع ایجاد می‌شود.



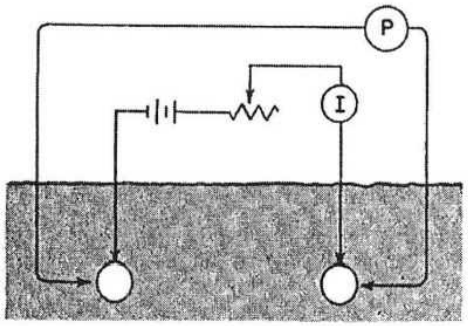
شکل ۳۳-۴ تداخل (جریان الکتریکی شعاعی). وقتی سازه‌ای در منطقه دانسیته جریان قوی قرار می‌گیرد، مثل تانکی که در نزدیکی بستر آند نشان داده شده است، ممکن است جریان را در نقطه A جمع کند و از نقطه B به زمین تخلیه کند، که این کار همراه با تخریب در نقطه تخلیه است. گاهی یک ساختار فلزی عایق که نزدیک خط حفاظت شدید قرار گرفته است می‌تواند دچار چنین تخریبی شود.



شکل ۴-۳۴ تنظیم اتصال متقاطع، یک الکترود مس/سولفات مس بین دو خط در نقطه تلاقی قرار می‌گیرد. سپس مقاومت توسط آزمون و خطا و تا جایی که هیچ تغییری در پتانسیل خطا خارجی برحسب الکترود و در اثر روشن و خاموش کردن یک‌سوکننده ایجاد نشود، تنظیم نمی‌شود.



شکل ۴-۳۵ نمودار شماتیک برای تعیین مقدار واقعی مقاومت اتصال و جریان یک‌سوکننده برای حذف تداخل تقاطع.



شکل ۴- ۳۶ آمپرسنج مقاومت صفر (بدون مقاومت). برای تعیین جریانی که از یک اتصال «صلب» یا بدون مقاومت بین دو سازه می‌گذرد، مدار تشریح شده به کار می‌رود. جریان از باتری طوری تنظیم می‌شود که پتانسیومتر (یا ولت‌سنج با مقاومت بالا) عدد صفر را نشان دهد. سپس جریان I که از آمپرسنج خوانده می‌شود همان مقدار مورد نظر است. اینها ابزارهای در دسترسی هستند که خودبه‌خود این مدار را کامل می‌کنند.

محاسبه مقاومت اتصال

به جای دسترسی مستقیم که پیش از این شرح داده شده روشی اتصال شده‌تر وجود دارد که با محاسبه مقدار اتصال تداخلی را امکان‌پذیر می‌سازد. این روش استفاده شده تعیین ثابت مدار است. مدار پیچیده می‌تواند به مدار معادل سازه‌ای تبدیل شود که رفتار دو خط لوله را در نقاط مورد نظر تکرار می‌کنند و لذا می‌تواند برای حل مشکل موجود به کار رود. این روش با در نظر گرفتن ساده‌ترین مورد ممکن، شرح داده خواهد شد.

فرض کنید یک مقطع خط لوله تحت حفاظت توسط یک تکثیر یک‌سوکننده (یا تحت آزمایش از یک نقطه نشتی) وجود دارد (شکل ۴-۳۵). فرض کنید این خط باید توسط یک خط خارجی خارج میدان آند قطع شود به‌علاوه برای اینکه ساده‌ترین مورد ممکن برای بررسی را داشته باشیم فرض کنید اختلاف پتانسیل بین دو خط در نقطه تقاطع در غیاب حفاظت کاتدی وجود ندارد.

اولین قدم تنظیم مناسب یک‌سوکننده برای ایجاد حفاظت کاتدی بر روی خط است، سپس با تداخل در جریان یک‌سوکننده و بررسی در طول خط خارجی در نزدیکی تقاطع صورت می‌گیرد تا نقطه‌ای تعیین شود که پتانسیل خط لوله خارجی نسبت به زمین در کمینه مقدار خود قرار گیرد. معمولاً این نقطه در محل یا نزدیکی تقاطع واقع شده است. این نقطه به دقت تعیین می‌شود و با شماره (۲) در شکل ۴-۳۵ نشان داده می‌شود (محل این نقطه مکان دقیق نصب الکترود را نشان می‌دهد؛ اگر خط لوله پیوسته باشد تماس واقعی با خط ممکن است در نقطه نزدیک مناسبی تعیین شود). نقطه (۱) یک جفت ترمینال یا سیم آزمایش متصل به دو خط در محل یا نزدیکی تقاطع است اینها سیم‌هایی هستند که در صورت نیاز متصل می‌شود. نقطه (۴) محل الکترود روی خط حفاظت شده است محل دقیق الکترود بعداً تشریح می‌شود در نهایت نقطه (۳) ترمینال‌های یک ابزار (آمپرسنج) قرار گرفته در مدار یک‌سوکننده جهت اندازه‌گیری جریان خروجی را نشان می‌دهد.

همواره برای انجام آزمایش‌های تداخل از این نوع طرحی مانند شکل ۴-۳۴ اید تهیه شود، که نشان می‌دهد خوانده‌ها چگونگی باید گرفته شوند. قطبیت مورد انتظار باید توسط علامت‌های + و - نشان داده شده در هر جفت ترمینال شماره‌گذاری شده مشخص شود، آن‌گاه وقتی آزمایش در حال انجام است اگر خوانده مربوط به قطبیت تعیین شده باشد، + و اگر خلاف آن باشد - گزارش می‌شود.

روند آزمایش به این شرح است؛ جریان یک‌سوکننده یا جریان موقت آزمایش دچار اختلاف می‌شود و مقادیر V_2 و V_1برای هر دو شرایط (روشن و خاموش) تعیین می‌شوند ولتاژ V_2 در عرض ترمینال‌های (۲) است یعنی پتانسیل بین خط خارجی؛ V_1 ولتاژ در عرض ترمینال‌های (۱) یا اختلاف پتانسیل بین دو خط است از این خوانده‌ها، ΔV_1 و ΔV_2 تعیین می‌شوند ΔV تغییر V هنگام اختلاف در جریان است یا اختلاف بین مقادیر «روشن» و «خاموش»، این دو اولین ثابت مدار را ارائه می‌دهند.

$$B_{21}=\Delta V_2/\Delta V_1$$

که به‌عنوان کوپل ولتاژ زمین شناخته می‌شود به خاطر داشته باشید که این مقدار نسبت بین دو ولتاژ است و واحد ندارد این مقدار تعیین می‌کند که چگونه پتانسیل خط خارجی به تغییرات پتانسیل روی خط حفاظت شده مربوط مرتبط است. همین

مقدار باید برای این ثابت برای هر مقدار جریان یک‌سوکننده در محدوده‌ای منطقی به دست آید. استفاده از این مقدار برای تأمین حفاظت خط متداول است اما ضروری نیست.

قدم بعدی مدار باز کردن یک‌سوکننده از مدار منظور حفظ حذف کامل اثر آن و نصب منبع جریان با تداخل‌گر در ترمینال‌هاست (۱). یک باتری ذخیره یا در بسیاری موارد حتی یک باطری خشک این هدف را تأمین می‌کند این منبع انتقال جریان از یک خط به خط دیگر را ممکن می‌سازد همان‌طور که بدن اتصال این کار را انجام می‌دهد و تعیین اثرات جریان اتصال را ممکن می‌سازد جریان مختل شده و ولتاژ در عرض ترمینال‌ها (۱) بین دو خط اندازه‌گیری می‌شوند؛ مقادیر پتانسیل P/S خط خارجی در ترمینال‌ها (۲) نیز به دست می‌آیند. این دو مقدار آخر به ترتیب V_1و V_2 نامیده می‌شوند، ولی مشابه همان مقادیری که قبلاً استفاده شده‌اند نیستند، آنها به‌ندرت در نقاط مشابه به دست می‌آیند.

از این سه سری مقدار، دو ثابت مدار را به دست می‌آوریم.

$$R_{21}=\Delta V_2/\Delta I_1$$

و

$$R_{11}=\Delta V_1/\Delta I_1$$

مقدار دوم، R_{11} می‌توان به‌عنوان مقاومت کپی لین بین دو خط در نظر گرفت. اگرچه R_{21} نسبت یک ولتاژ به یک جریان است و واحد آن مشابه مقاومت است، ولی به هیچ مقاومت واقعی موجودی مرتبط نمی‌باشد؛ این مقدار مقاومت انتقال نامیده می‌شود. I_1، وقتی که تداخل‌گر باز است برابر صفر است، لذا مقدار ΔI_1 درست مقدار جریان استفاده شده است.

از این سه ثابت مدار مقدار صحیح مقاومت اتصال را می‌توان محاسبه کرد.

$$R_B = \frac{R_{21}}{B_{21}} - R_{11}$$

چون مقدار جریان یک‌سوکننده در این رابطه مشاهده نمی‌شود، به نظر می‌رسد که مقاومت اتصال مستقل از جریان نشتی است. این مسئله وجود دارد، اما فقط در مورد ساده شده‌ای که پتانسیل‌های دو خط برابر هستند. همواره و در حالتی که پتانسیل‌ها متفاوت هستند مقاومت اتصال توسط این رابطه ارائه می‌شود.

$$R_B = \frac{R_{21}(E_1 + \Delta V_1)}{B_{21}\Delta V_1} - R_{11}$$

که E_1 پتانسیل طبیعی بین دو خط و ΔV_1 تغییر پتانسیل در ترمینال‌ها (۱) ایجاد شده توسط اختلال در یک‌سوکننده جریان سازگار است. این حقیقت که مقاومت اتصال به جریان یک‌سوکننده مرتبط است، اکنون ایجاد اشکال می‌کند. اگر یک‌سوکننده به گونه‌ای تنظیم شود که فقط از خط محافظت کند و سپس اتصال ایجاد شود، مشاهده می‌شود که خط دیگر حفاظت نمی‌شود، زیرا اتصال در جریان شرکت می‌کند. سپس اگر جریان تا حدی افزایش یابد که خط بیشتر حفاظت شود، کاهش مقاومت اتصال ضروری است و حفاظت مجدداً از بین می‌رود. این مسئله منجر به جست‌وجوی بی‌پایان یک سیستم

کاملاً متعادل می‌شود، اگرچه تقریب با هر بار تغییر نزدیک‌تر می‌شود و سه یا چهار بار تنظیم کافی خواهد بود. به هر حال، روش ساده‌تری وجود دارد که در آن همه کارها یک‌باره انجام می‌شود. ابتدا، یک‌سوکننده تا مقداری مناسب نزدیک به همسایگی حفاظت کامل تنظیم می‌شود: مقدار واقعی اهمیت ندارد، اما نباید خیلی اختلاف داشته باشد. سپس نقشه‌ای برای تعیین نقطه تداخل بیشینه تهیه می‌شود؛ این نقطه (۲) در شکل ۴-۳۵ است. سپس منبع جریان بین دو خط متصل می‌شود و یک نقشه مشابه در طول خط حفاظت شده، در نقطه (۴)، ایجاد می‌شود. جریانی که در این نقشه استفاده می‌شود، باید تقریبی از جریان اتصال سازگار شده نهایی باشد. چون دانستن این مقدار از ابتدا امکان پذیر نیست، باید آن را حدس زد. اگر حدس به علت اختلاف فاحشی رد شود، لازم است آزمایش تکرار شود. نقطه (۱) مانند قبل، اتصال بین دو خط و نقطه (۳) تخلیه یک‌سوکننده است. با ایجاد اختلاف در جریان یک‌سوکننده، ثابت شبکه زیر تعیین می‌شوند: R_{13}، R_{23} و R_{43}، با اختلاف در جریان اتصال، مقادیر زیر به دست می‌آیند: R_{11}، R_{21}، R_{41} ، B_{21}و E_1 نیز اندازه‌گیری می‌شود (ترجیحاً این کار در ابتدا انجام می‌شود تا از خطاهای مربوط به پلاریزاسیون توسط جریان‌های آزمایش جلوگیری شود). از این ثابت مدار، مقادیر زیر محاسبه می‌شوند.

$$I_3^{'}=\mathrm{I}_3\frac{R_{43}R_{21}}{R_{43}R_{21}-R_{23}R_{41}}$$

$$R_B=\frac{(R_{13}I_3^{'}+\mathrm{E}_1)R_{21}}{R_{23}I_3^{'}}$$

I_3 مقدار جریان یک‌سوکننده است که باید بدون هیچ جریان اتصالی کافی باشد. I_3' مقداری ضروری برای ایجاد اتصال است. R_B مقاومت اتصالی است که تداخل را هنگام تنظیم نهایی جریان $I_3^{'}$حذف می‌کند.

در تمامی این بحث‌ها، اگر مقدار مقاومت اتصال کمتر از مقدار محاسبه شده باشد، مقدار حفاظت کاتدی در خط خارجی نزدیک تقاطع ایجاد می‌شود؛ افزایش مقدار بیشتر موجب حذف کامل تداخل نمی‌شود. آزمایش نهایی، پس از اینکه همه تنظیمات و اتصالات کامل شد، به این صورت است: پتانسیل P/S خط خارجی در نقطه بیشینه تداخل، هنگام وجود یک‌سوکننده و اتصال در محل در نظر گرفته می‌شود، سپس هم‌زمان یک‌سوکننده و اتصال در حالت مدار باز قرار داده می‌شود، اگر تنظیمات کامل و درست باشند پتانسیل خط خارجی نباید تغییر کند.

اتصالات چندتایی

روابطی مشابه آنچه قبلاً ارائه شد، برای تنظیم هم‌زمان دو یا چند اتصال به خطوط خارجی مختلف و اصلاح خروجی یک‌سوکننده برای جبران داده شده‌اند، ولی این روابط پیچیده و گنگ هستند. روش زیر آسان‌تر و در بسیاری موارد دقیق‌تر است:

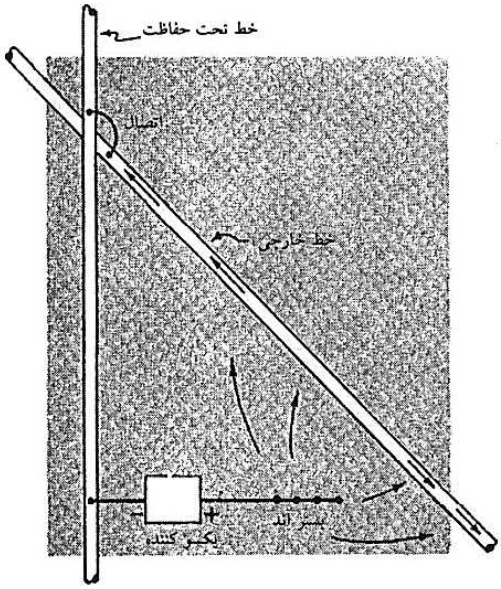
۱. یک‌سوکننده را طوری تنظیم کنید که حفاظت کافی برای خط ایجاد کند، بدون اینکه اتصالی برقرار باشد. با این اختلالی که ایجاد می‌شود، نقاط بیشینه اختلال را برای همه خطوط متقاطع تعیین کنید (اختلاف پتانسیل‌ها بین خطوط باید قبل از شروع جریان یک‌سوکننده تعیین شوند).

۲. جریان را در اولین اتصال برقرار کنید، نقطه حداکثر اثر اتصال را مشخص کنید و اندازه‌گیری‌های موارد برای تنظیم اتصال درست را مانند مورد تک اتصال بالا، انجام دهید. این کار مقدار I_3' را می‌دهد که از آن مقدار مشخص جریان اضافی یک‌سوکننده مورد نیاز برای اتصال اول به دست می‌آید.
۳. این مرحله را برای سایر اتصالات تکرار کنید و یک‌سوکننده را در مقدار اولیه خود نگه دارید. هریک از اینها مقداری از جریان اضافی مورد نیاز را ارائه خواهند داد.
۴. همه این مقادیر مازاد مورد نیاز را باهم جمع کنید، حاصل را به جریان اولیه یک‌سوکننده اضافه کنید. این کار مقدار نهایی مورد نیاز را می‌دهد و مقدار I_3' در رابطه قبل مقدار مقاومت هر اتصال را می‌دهد.

وقتی این فرایند کامل شد، یک نقشه کامل باید تهیه شود تا مشاهده شود که خط کاملاً حفاظت شده است. اگر نه، جریان باید افزایش یابد، که این منجر به تنظیمات اتصالات اضافی می‌شود؛ این مقدار باید به حداقل برسد.

زهکشی کمکی[۲۱۳]

در بسیاری موارد، مشابه آنچه در شکل ۴-۳۷ تشریح شده است، نقطه تماس خط خارجی در نقطه تقاطع واقع نشده است (همان طور که در شکل ۴-۳۳ اتفاق افتاده است) در چنین مواردی، معمولاً بهترین راه حل نصب یک یا چند آند منیزیمی در نقطه تماس، و به‌تبع آن ایجاد حفاظت کاتدی کافی، یا زهکشی کمی برای جبران آسیب ایجاد شده توسط سیستم روی سازه تحت تأثیر است.



شکل ۴-۳۷ یک مورد گنگ. بیشتر جریان جمع شده روی خط خارجی از تقاطع می‌گذرد می‌تواند به‌راحتی از یک اتصال ساده بگذرد. مقداری از آن در جهت مخالف جریان می‌یابد و در یک منطقه دور و نسبتاً وسیع تخلیه می‌شود. چنین شرایطی معمولاً پیش نمی‌آید و در هر مورد به علت مساحت دشارژ بزرگ آسیب کمی اتفاق می‌افتد. این مسئله با قراردهی بستر آند مناسب قابل جلوگیری و با استفاده از آندهای زهکشی کمکی قابل جبران است.

2 1 3

در عمل، این روش مسیری برای جبران ایجاد می‌کند که می‌تواند بدون تخریب ساختار انجام شود ، در عوض آسیب روی منیزیم اتفاق می‌افتد. این تکنیک می‌تواند در موارد تقاطع مشابه به جای اتصال شرح داده شده در بالا استفاده شود؛ جای جمع‌آوری شده به جای اتصال ایجاد شده روی خط حفاظت شده، از طریق آندهای منیزیمی به زمین وارد می‌شود.

خطوط موازی

هنگامی که حفاظت کاتدی روی خط لوله‌ای اعمال می‌شود که در جهت یک خط محافظت نشده قرار دارد، موقعیتی برای خط خارجی برای جمع‌آوری جریان در برخی مناطق و تخلیه آن از طریق زمین به‌سمت خط محافظت شده در نقاط دیگر به وجود می‌آید. تعیین مناطقی که در آنها تخلیه‌ای صورت می‌گیرد می‌تواند به آسانی و با اصلاح نقشه پتانسیل سطح انجام شود که پیش از این بحث شد. در مورد حاضر، دو الکترود استفاده شده‌اند، که هریک برای اولین داده روی یک خط قرار گرفته‌اند، و برای داده دوم همان‌طور که در شکل ۴-۳۸ نشان داده شده است یکی روی خط خارجی و دیگری در فاصله برابر فضای بین دو خط قرار گرفته است.

داده‌ها در هر دو موقعیت باید در دو حالت روشن و خاموش خوانده شوند و اختلاف آنها مورد استفاده قرار گیرد. با این روش می‌توان تعیین کرد که آیا جریان از خط خارجی به خط حفاظت شده جریان می‌یابد یا خیر، همان‌طور که از عبور جریان از خط خارجی به خط حفاظت شده قابل تشخیص است، هنگامی که مناطق جریان نامطلوب تعیین شدند، اتصالات باید بین دو خط در نقاطی که شرایط وخیم‌تر است نصب شوند. آزمایش‌های بیشتر برای اطمینان از مناسب بودن اتصالات، مورد نیاز هستند. تعیین اینکه آیا اتصال موجود در محل تخلیه، جریان را در یک مقطع جمع می‌کند یا اتصالات بیشتری مورد نیاز است، در ابتدا امکان‌پذیر نیست.

تداخل در جریان شعاعی

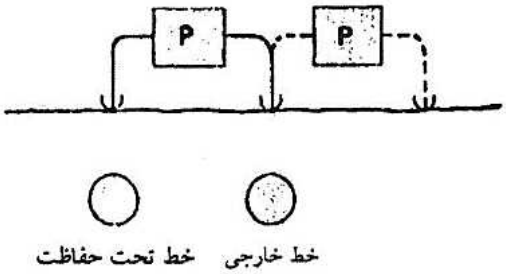
همان‌طور که در شکل ۴-۳۳ نشان داده شده است، لطمه دیدن یک سازه از جریان‌های تداخلی هنگامی امکان‌پذیر است که سازه در نزدیکی خط حفاظت شده قرار نگرفته است. نوع تماس شرح داده شده، تحت عنوان تداخل در جریان شعاعی شناخته می‌شود که عمدتاً به این معناست که سازه در منطقه‌ای قرار گرفته است که جریانی از زمین عبور می‌کند. چون این سازه تا حدی در جهت جریان قرار گرفته است، مقداری از جریان روی سمت مجاور آند جمع می‌شود و در سمت دورتر تخلیه می‌شود. چنین مشکلی جزء در مناطقی خیلی نزدیک به بستر آند اتفاق نمی‌افتد و همان‌طور که پیش از این تشریح شد به آسانی توسط زهکشی کمکی قابل جبران است. نصب بسترهای آند دور از سازه‌ها از مشکلاتی نظیر این جلوگیری می‌کند، ولی این کار همیشه امکان‌پذیر نیست.

خطوط خارجی با اتصالات عایق

شکل ۴-۳۹ مشکل دیگری که ممکن است پیش بیاید را نشان می‌دهد. در این مورد خط خارجی دارای کوپل‌های غیررسانا، نظیر روکش‌هاست. جریان جمع شده نمی‌تواند بدون عبور از کوپل به نقطه اتصال برسد. در هر نقطه گذر، مقداری از جریان

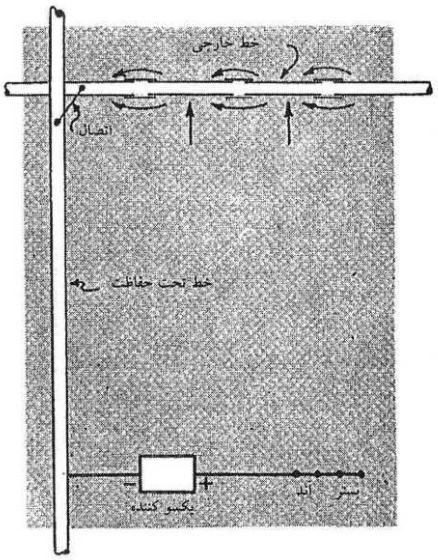
از طریق زمین، از خط خارج می‌شود و به اتصال بعدی وارد می‌شود و در محل کوپل دور از خط محافظت شده آسیب ایجاد می‌کند.

چنین خطی، دور از بستر آند، جریان کافی برای ایجاد آسیب جدی جمع نمی‌کند؛ تنها وقتی که خط در منطقه دانسیته جریان سنگین قرار می‌گیرد مستعد تخریب است. تخریب می‌تواند هم توسط اتصال ضعیف اتصالات کم رسانه (و نصب یک اتصال متقاطع) ایجاد شود و هم توسط نصب زهکشی کمکی روی هر اتصال خط از طریق منطقه تماس. دو روش ممکن است از طریق نصب اتصال و یک آند منیزیمی روی کوپل‌های متناوب ترکیب شوند. به‌طوری‌که خط به دو بخش دو اتصالی تقسیم شود و هریک از آنها دارای یک تک آند زهکشی کمکی باشند.



شکل ۴-۳۸ انتقال جریان بین خطوط موازی

اگر دلتا (اختلاف بین داده‌های روشن و خاموش) در موقعیت نشان داده شده در خطوط پر رنگ به‌شدت بزرگ‌تر از موقعیت خط چین باشد، جریان از خط خارجی به‌سمت خط حفاظت شده انتقال می‌یابد. وقتی نقطه وخیم‌ترین تماس تعیین می‌شود، یک اتصال باید نصب شود. سپس یک نقشه تکراری برای تعیین طول مقطعی که اتصال حفاظت می‌شود باید تهیه شود و سایر اتصالات در صورت نیاز نصب شوند.



شکل ۴-۳۹ خط خارجی با کوپل‌های روکش‌دار

نصب یک اتصال در نقطه تقاطع آسیب را خنثی می‌کند، ولی همچنان تخریب در اتصالات مکانیکی توسط جریان عبوری از زمین اتفاق می‌افتد. این آسیب را می‌توان با ایجاد اتصالات یا استفاده از زهکشی آند منیزیمی کمکی جبران کرد.

خلاصه

همان‌گونه که پیش از این نشان داده شد، مشکلات تداخل همیشه در جایی محتمل هستند که حفاظت کاتدی به کار گرفته می‌شود. این سیستم بر موارد زیر مؤثر است:

۱. خطوط خارجی: اینها شامل خطوط حفاظت شده و خطوطی با سیستم‌های حفاظت خودشان هستند. این مشکلات تداخلی معمولاً با ایجاد اتصالات مقاومتی حل می‌شوند.
۲. فلنج‌های عایق: برای جلوگیری از نشت جریان ضروری برای حفاظت یک خط در چنین سیستم‌های لوله‌کشی نظیر خطوط ذخیره، غلاف چاه‌ها، و خطوط لوله بلااستفاده، گاهی نصب فلنج‌های عایق یا کوپل‌های روکش‌دار ضروری است. خوردگی روی لوله‌های مدفون در ترکیبی از چنین لوله‌هایی اتفاق می‌افتد مگر اینکه اتصالات در اطراف فلنج‌ها قرار گیرند و برای بالانس نیروهای خوردگی تنظیم شوند.
۳. خطوط ریلی و تجهیزات جاده‌ای: هر سیستم فلزی در مجاورت خط لوله محافظت شده مشکلاتی ایجاد می‌کند. هریک از اینها توسط اندازه‌گیری دقیق نشان داده می‌شوند و در صورت پیدایش باید حل شوند.

انواع بسترهای حفاظت کاتدی تزریق جریان

انواع بسترهای آند اعمال جریان به محل استقرار، جهت و عمق آندها بستگی دارند. بسترهای آند اعمال جریان معمولاً دور از سازه قرار گرفته و جریان را از فواصل دور از سازه حفاظت شده (خطوط لوله، محوطه مخازن، سیستم‌های توزیع و...) توزیع می‌کنند. گاهی اوقات از بسترهای زمینی اعمال جریان توزیع شده برای سازه‌های کوچک (شیرها، مخازن) استفاده می‌شود و آندها به طور یکنواخت در امتداد سازه تحت حفاظت توزیع می‌شوند به‌طوری‌که هر آند بخش کوچکی از کل سازه را حفاظت می‌کند. معمولاً از سیستم‌های اعمال جریان توزیع شده برای حفاظت از داخل مخازن آب، چه در سازه‌های هم‌سطح زمین و چه در سازه‌های بالاتر از سطح زمین استفاده می‌شود. بستر زمینی از نوع دور از سازه را می‌توان در نزدیکی سطح، به‌صورت افقی یا عمودی یا در عمق نصب کرد. سیستم‌های توزیع شده مانند آندهای فداشونده نصب می‌شوند که قبلاً توضیح داده شد، با این تفاوت که یک کابل اصلی پیوسته جهت اتصال آندها به یک‌سوکننده (یا یک منبع توان دیگر) و یک اتصال ساختاری از منبع برق به سازه حفاظت شده نیز دارد.

سیستم‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان از راه دور عمودی

از این سیستم‌ها معمولاً برای خطوط لوله واقع در مناطق دور استفاده می‌شود. معمولاً هنگامی‌که تأسیسات دیگری در منطقه وجود نداشته و فضای کافی برای قرار دادن آندها دور از سازه وجود دارد، این سیستم‌ها اقتصادی‌ترین گزینه می‌باشند. عمودی قرار دادن آندها در زمین (برخلاف حالت افقی) مقاومت کل را نسبت به زمین سیستم کاهش می‌دهد. فاصله آندها تا زمین، متناسب با مقاومت ویژه خاک و معمولاً از ۹۱ تا ۲۱۳ متر (۳۰۰ تا ۷۰۰ فوت) متغیر می‌باشد.

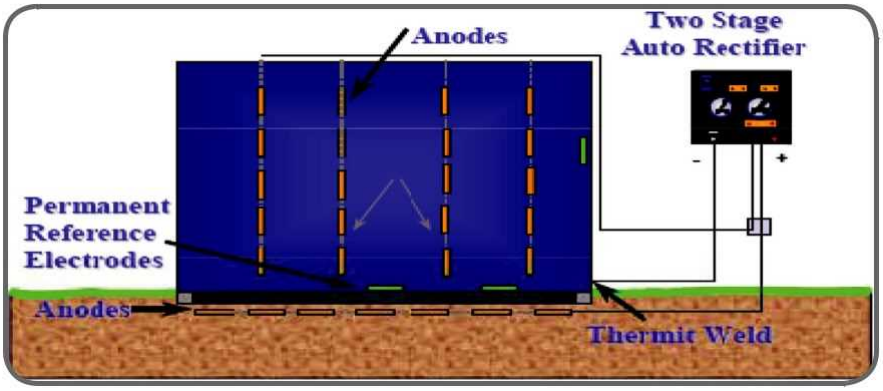
در ناحیه مورد نظر برای بستر آندی، باید آزمایش مقاومت ویژه خاک انجام شود تا محلی با مقاومت کم برای قرار دادن آندها پیدا شود. جهت اطمینان باید دقت کرد که ناحیه با مقاومت کم تا سازه حفاظت شده پیوسته نباشد، زیرا ممکن است توزیع جریان ضعیف رخ دهد. در بعضی موارد ممکن است بهترین محل برای یک بستر آندی در خاکی باشد که مقاومت ویژه بیشتری دارد. با اضافه نمودن آندهای بیشتر، استفاده از آندهای بلندتر یا با افزایش فاصله آندها می‌توان مقاومت بستر آندی را کاهش داد.

سیستم‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان از راه دور افقی

معمولاً از این سیستم‌ها جهت خطوط لوله در مناطق دور با لایه سنگی در نزدیکی سطح یا در مناطقی استفاده می‌شود که شرایط خاک آن، برای اطمینان از قرار دادن آند در محیط یکنواخت، نصب افقی را می‌طلبد. معمولاً در نبود تأسیسات دیگر در منطقه و وجود فضای کافی برای قرار دادن آندها دور از سازه، و وجود یک لایه سنگی در نزدیکی سطح، این سیستم اقتصادی‌ترین گزینه می‌باشد. افقی قرار دادن آندها در زمین (برخلاف حالت عمودی) باعث افزایش مقاومت کل نسبت به زمین سیستم می‌شود. فاصله آندها تا زمین، متناسب با مقاومت ویژه خاک، معمولاً از ۹۱ تا ۲۱۳ متر (۳۰۰ تا ۷۰۰ فوت) متغیر می‌باشد.
در ناحیه مورد نظر برای بستر آندی، باید آزمایش مقاومت ویژه خاک انجام شود تا محلی با مقاومت کم برای قرار دادن آندها پیدا شود. جهت اطمینان باید دقت کرد که ناحیه با مقاومت کم تا سازه حفاظت شده پیوسته نباشد، زیرا در غیر این‌صورت ممکن است توزیع جریان ضعیف رخ دهد. در بعضی موارد ممکن است بهترین محل برای یک بستر آندی در خاکی باشد که مقاومت ویژه بیشتری دارد. با اضافه نمودن آندهای بیشتر، استفاده از آندهای بلندتر یا با افزایش فاصله آندها می‌توان مقاومت بستر آندی را کاهش داد. آندها می‌توانند اتصالات مجزایی به یک کابل اصلی داشته باشند یا روی یک کابل پیوسته نصب شوند.

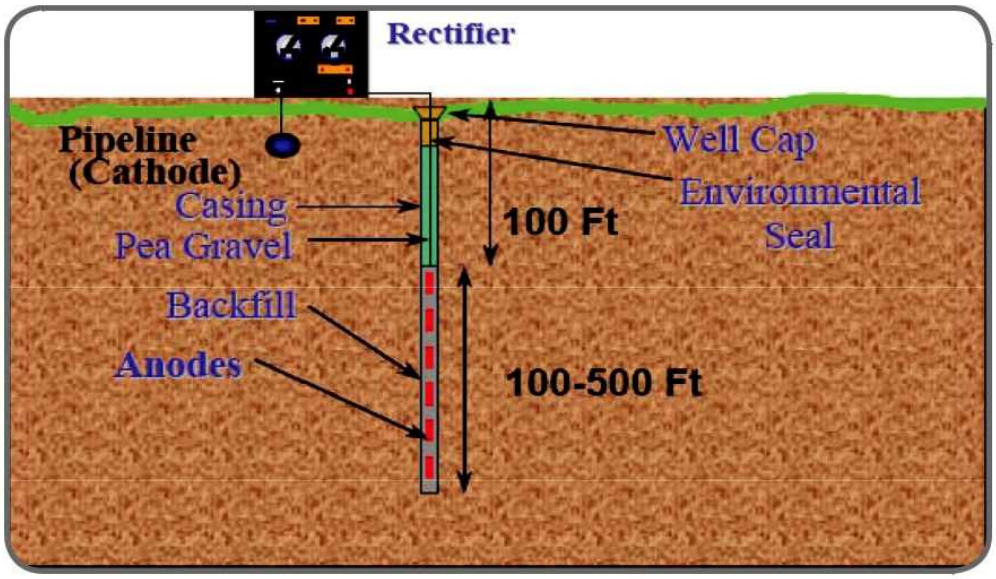
سیستم‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان توزیع شده

معمولاً از این سیستم‌ها برای حفاظت از سازه‌های کوچک استفاده می‌شود. معمولاً در مواقعی که سازه کوچک بوده یا آندها را نمی‌توان در فواصل دور قرار داد، این سیستم مقرون‌به‌صرفه‌ترین انتخاب است. این نوع بستر آندی برای حفاظت قسمت‌های داخلی مخزن آب، کف مخزن‌های همسطح زمین، مخازن مدفون یا خطوط لوله کوتاه به کار می‌رود. آندها در امتداد خط لوله یا دور سطح مخزن (داخل مخازن آب، خارج مخازن مدفون) توزیع می‌شوند. فاصله از سازه معمولاً ۱.۵ تا ۳ متر (۵ تا ۱۰ فوت) و فاصله بین آندها معمولاً دو برابر این فاصله (۳ تا ۶ متر یا ۱۰ تا ۲۰ فوت) است. در بعضی موارد آند پیوسته است و به‌صورت شبکه روی مخازن یا در امتداد کناری خط لوله قرار داده می‌شود.



سیستم‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان از راه دور عمقی

از این سیستم‌ها معمولاً برای حفاظت سازه‌های بزرگ در مناطق ساختمانی استفاده می‌شود. معمولاً در صورت بزرگ بودن سازه، وجود تأسیسات دیگر بسیار در منطقه یا درصورتی‌که نمی‌توان آندها را در نزدیکی سطح قرار داد، این سیستم‌ها اقتصادی‌ترین انتخاب می‌باشند. از این نوع بستر آندی برای حفاظت از شبکه توزیع گاز، مخازن بالاتر از سطح زمین و خطوط لوله واقع در مناطق ساختمانی استفاده می‌شود. با حفر سوراخی عمیق در زیر سطح، این آندها در محلی دور از سازه قرار داده می‌شوند. فاصله بستر آندی عمیق معمولی تا آند بالایی ۳۰,۵ متر (۱۰۰ فوت) و تا آند زیرین از ۶۱ تا ۱۸۳ متر (۲۰۰ تا ۶۰۰ فوت) است. آندها می‌توانند روی اتصالاتی مجزا روی یک کابل پیوسته قرار بگیرند، یا به‌صورت یک سیم آند پیوسته باشند. این نوع بستر آندی می‌تواند ظرفیت جریان بسیار بیشتری نسبت به سیستم‌های آند سطحی معمولی داشته باشد. ساختار این نوع سیستم تداخل با سایر سازه‌های فلزی را به حداقل می‌رساند که نیازمند ملاحظات خاصی برای پرکننده، عایق کابل و تهویه است.



اندازه‌گیری جریان مستقیم DC

مقدمه

هدف از این بخش، ارائه دستور العمل‌های اندازه‌گیری جریان مستقیم (DC) در مدار الکتریکی حفاظت کاتدی می‌باشد. اندازه‌گیری‌های جریان در حفاظت کاتدی، برای تعیین خروجی منبع تغذیه، جریان باند هم پتانسیل سازی[۱۴]جریان باند تداخل و تکمیل تست‌های مختلف مورد نیاز است. اندازه‌گیری‌های جریان مستقیم را می‌توان با استفاده از یک آمپرسنج معمولی یا یک آمپرسنج گیره‌ای[۱۵]انجام داد یا می‌توان جریان را با اندازه‌گیری افت ولتاژ در یک شانت[۱۶]یا مقاومتی معلوم محاسبه کرد.

آمپرسنج گیره‌ای: یک آمپرسنج جریان مستقیم است که بر اساس اصول الکترومغناطیس کار می کند و میدان الکترومغناطیسی ایجاد شده توسط جریان در رسانا را اندازه‌گیری می کند. کویل آمپرسنج باید در اطراف فقط یک رسانه (سیم) قرار داده شود، زیرا رسانای برگشتی، میدان مغناطیسی رسانای اول را خنثی می کند. بنابراین آمپرسنج گیره‌ای باید فقط برای یک رسانا به کار برود.

ابزارها و تجهیزات

تجهیزات زیر بسته به نوع تست مورد نیاز هستند:

- آمپرسنج DC
- آمپرسنج گیره‌ای DC
- پروب گیره‌ای DC اضافه شده به ولت‌متر DC
- ولت‌متر DC با امپدانس داخلی بالا برای اندازه‌گیری ۰ تا ۴۰۰۰ میلی‌ولت
- ولت‌متر DC /دیتا لاگر با حافظه قابل برنامه‌ریزی برای ذخیره مقادیر، واحدها، قطبیت، زمان و تاریخ در فواصل زمانی مشخص
- شانت
- اتصالات تست به همراه اتصالات یا گیره‌های فنری
- قرقره کابل
- منبع تغذیه قابل تنظیم یا باتری ۶ تا ۱۲ ولت و یک مقاومت متغیر

نکات لازم

جهت جریان

جهت قراردادی جریان از یک رسانا، از قطب مثبت (+) به قطب منفی (−) می‌باشد. علامت منفی در ولت‌متر دیجیتال نشان می‌دهد که اتصالات دستگاه برخلاف جهت واقعی جریان برقرار شده‌اند؛ یعنی ترمینال منفی ولت‌متر، در واقع سمت مثبت مدار می‌باشد.

---

2 [illegible] 1 4
2 [illegible] 1 5
2 [illegible] 1 6

آمپرسنج

برای اندازه‌گیری جریان باید یک آمپرسنج در مدار قرار داده شود. قبل از نصب آمپرسنج اطمینان حاصل گردد که جریان، قطع شده است. با نصب آمپرسنج، مقاومت مدار افزایش پیدا خواهد کرد و بنابراین منجر به کاهش میزان جریان نسبت به جریان قبل از نصب آن می‌شود.

آمپرسنج DC گیره‌ای یا کلمپی

آمپرسنج DC، میدان الکترومغناطیسی ایجاد شده توسط جریان عبوری در رسانا را اندازه‌گیری می‌کند. کوپل باید در اطراف یک رسانا قرار داده شود، زیرا رسانای برگشتی، میدان مغناطیسی رسانای اول را خنثی می‌نماید. برای اندازه‌گیری دقیق‌تر، رسانا باید در مرکز آمپرسنج گیره‌ای باشد.

ولت‌متر

از ولت‌متر برای اندازه‌گیری افت ولتاژ (ناشی از جریان و مقاومت شانت) در طول شانت استفاده می‌شود (طبق قانون اهم، ولتاژ = جریان × مقاومت). برای اینکه ولت‌متر جریان زیادی از مدار شانت، نگیرد باید مقاومت آن زیاد باشد.

شانت

شانت، مقاومتی کوچک است که می‌تواند برحسب اهم یا میلی‌ولت و آمپر نام‌گذاری شده باشد (برای مثال ۵۰ میلی‌ولت و ۱۰ آمپر). هر شانت یک اتصال حامل جریان و یک اتصال جداگانه برای قرائت ولتاژ دارد. از اتصال حامل جریان نباید برای اندازه‌گیری‌های ولتاژ استفاده کرد، زیرا این کار ممکن است باعث ایجاد خطا شود.

روش‌های اندازه‌گیری جریان خط لوله

جریان خط لوله را می‌توان با استفاده از یک آمپرسنج گیره‌ای یا توسط کالیبره کردن بخشی از خط لوله به‌عنوان شانت جریان (که اغلب یک پل جریان[۱۷]نامیده می‌شود)، اندازه‌گیری کرد.

الف– آمپرسنج □□ گیره‌ای

باید از یک کویل با گیره‌ای (clamp) که متناسب با قطر خط لوله است، استفاده کرد. کویل باید به‌درستی حول لوله به نحوی قرار داده شود که لوله در مرکز آن باشد. در هنگام اندازه‌گیری، مقیاس و همچنین قطبیت کویل ثبت شود. اندازه‌گیری با معکوس کردن جهت کویل، تکرار گردد.

---

2 □□□□□□□□□□□□□□□□ 1 7

ب– پل جریان خط لوله

پل جریان، توسط اتصالات تست متصل به لوله ایجاد می‌شود که در فواصل کافی از یکدیگر قرار دارند؛ در نتیجه جریان عبوری از پل لوله، منجر به ایجاد افت ولتاژ قابل اندازه‌گیری خواهد شد و با داشتن مقاومت این بخش و ولتاژ اندازه‌گیری شده، جریان به دست خواهد آمد.

۱- فاصله بین اتصالات تست، قطر لوله، ضخامت جداره یا وزن لوله باید معلوم باشد و ضخامت لوله نیز در امتداد تست باید یکسان بوده و تجهیزات دیگری به آن متصل نشده باشد.
۲- یک روش جایگزین، نصب دو کابل تست در هر انتهای بخش تست می‌باشد که در این حالت، پل جریان را می‌توان کالیبره کرد. در این حالت، پل لوله باید در جریان‌های نزدیک به مقادیر مورد انتظار از اندازه‌گیری قبلی کالیبره شوند.

دستورالعمل آمپرسنج DC

۱- منابع جریان مدار را خاموش شود. آمپرسنج باید به گونه‌ای وارد مدار شود که ترمینال مثبت آن به‌سمت قطب مثبت منبع تغذیه و ترمینال منفی آن به‌سمت قطب منفی منبع تغذیه باشد. اگر عدد خوانده شده برای جریان، منفی باشد، باید مطمئن شد که منبع جریان دیگری وجود نداشته باشد.
۲- بالاترین مقیاس آمپر انتخاب شود و سپس منبع جریان روشن گردد.
۳- مقیاس آمپرسنج کاهش داده شود تا مقدار قرائت شده در دو مقیاس، مشابه باشد. نکته قابل ذکر این است که مقاومت داخلی آمپرسنج با کاهش مقیاس، افزایش پیدا می‌کند. بنابراین جریان مدار به دلیل اینکه مقاومت آمپرسنج به‌صورت سری در مدار قرار گرفته است، کاهش می‌یابد که این میزان می‌تواند قابل توجه باشد یا نباشد.
۴- جهت، مقدار و واحد جریان (آمپر یا میلی‌آمپر) ثبت شود.

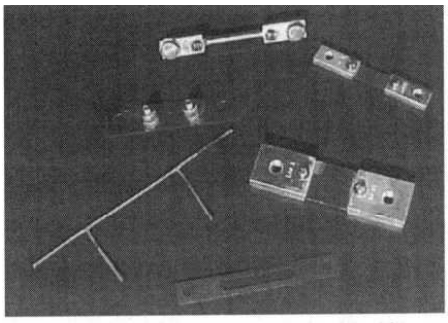
آمپرسنج DC گیره‌ای (کلمپی)

۱- قبل از شروع اندازه‌گیری‌ها باید دستورالعمل‌های سازنده دستگاه خوانده شود.
۲- اگر ترمینال الکتریکی بدون پوششی نزدیک به نقطه اندازه‌گیری وجود نداشته باشد، نیازی به خاموش کردن منبع جریان نیست، اما اگر ترمینال الکتریکی بدون پوششی وجود داشته باشد، در هنگام اتصال آمپرسنج، منبع جریان خاموش گردد.
۳- اگر آمپرسنج از نوع مقیاس اتوماتیک نباشد، در بالاترین مقیاس برحسب آمپر تنظیم شود.
۴- کویل دور یک کابل قرار داده شود (قطب مثبت کویل به‌سمت قطب مثبت منبع جریان باشد). اگر عدد قرائت شده، مثبت نباشد، باید اطمینان حاصل کرد که منبع تغذیه دیگری وجود نداشته باشد.
۵- مقیاس در نزدیک‌ترین محدوده به اندازه‌گیری تنظیم شود.
۶- کویل معکوس شود و اطمینان حاصل گردد که مقادیر مشابه هستند. متوسط دو قرائت، غالباً نزدیک به مقدار واقعی می‌باشد.
۷- جهت، مقدار و واحد جریان (آمپر یا میلی‌آمپر) مثبت شود.

شانت

۱- شانت، مقاومتی کوچک و کالیبره شده بادقت زیاد می‌باشد. طرز کار آن، اندازه‌گیری افت ولتاژ در طول مقاومت شانت و سپس محاسبه جریان می‌باشد. آمپرسنج در مواقع، ولت‌متری است که افت ولتاژ در طول یک شانت را اندازه‌گیری می‌کند، اما مقیاس این دستگاه به گونه‌ای کالیبره شده است که آمپر را می‌خواند. در بعضی از موارد، شانت در بیرون آمپرسنج می‌باشد و در موارد دیگر، شانت در داخل آمپرسنج تعبیه شده است.

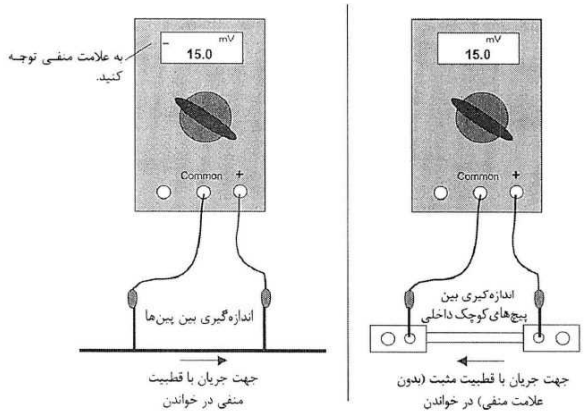
۲- شانت‌ها، انواع مختلفی دارند که در شکل ۴-۴۰ نشان داده شده است، اما در تمام موارد، ماده بین دو اتصال، بخشی است که کالیبره می‌شود. در مورد شانت سیمی (شانت پایینی سمت چپ در شکل ۴-۴۰)، قرائت‌های میلی‌ولت باید بین دو پین برآمده، گرفته شوند. پیچ‌های کوچک داخلی در بقیه شانت‌ها اتصالاتی هستند که برای قرائت‌های میلی‌ولتی به کار می‌روند.



شکل ۴-۴۰ انواع شانت در شکل نشان داده شده است. اندازه‌گیری باید بین پیچ‌های کوچک داخلی یا بین پین‌های دندانه‌دار انجام شود (نه پیچ‌های حامل جریان)

۳- شانت باید به‌صورت سری در مدار نصب شود و بنابراین قبل از نصب شانت در مدار، باید منبع تغذیه خاموش گردد. اغلب شانت‌ها پس از آنکه نصب شدند، در مدار باقی می‌مانند. در نتیجه مقاومت شانت در طول اندازه‌گیری، مقاومت مدار را تغییر می‌دهد.

۴- در ابتدا افت اهمی در طول شانت، توسط یک ولت‌متر اندازه‌گیری می‌شود (از طریق دو سیم امتداد یافته از شانت یا از طریق دو پیچ کوچک در بلوک‌های انتهایی شانت (شکل ۴-۴۱). جهت جریان با دو علامت مخالف، در شکل ۴-۴۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۱ اتصال ولت‌متر برای شانت‌ها نشان داده شده است

۵- نکته قابل ذکر این است که علامت منفی در ولت‌متر سمت چپ شکل ۴-۴۱، نشان می‌دهد که اتصالات ولت‌متر به‌صورت معکوس وصل شده‌اند؛ یعنی ترمینال مثبت، به‌سمت منفی شانت و ترمینال منفی به‌سمت مثبت شانت متصل شده است.
۶- سپس جریان از طریق روش ذکر شده محاسبه می‌گردد.

پل جریان خط لوله؛ پل دو سیمه[۲۱۸]

۱- قطر خارجی و ضخامت جداره لوله مشخص گردد.
۲- فاصله بین دو سیم تعیین شده و اطمینان حاصل گردد که ضخامت جداره لوله در بین این دو سیم یکنواخت باشد. همچنین اطمینان حاصل شود که ولو، اتصالات لوله‌ای یا شیری بین آنها وجود نداشته باشد.
۳- افت ولتاژ بین دو سیم اندازه‌گیری شده و جریان محاسبه گردد.

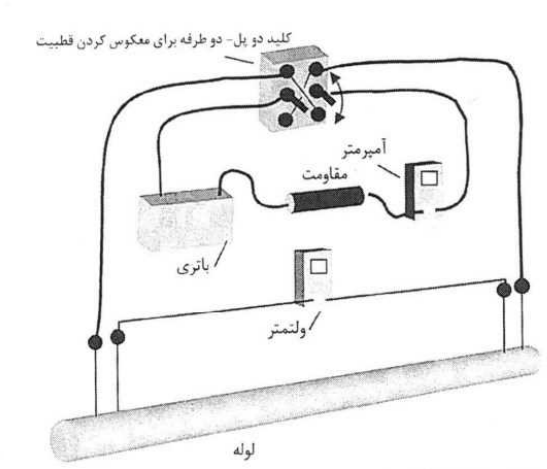
پل چهار سیمه[۲۱۹]

اگر فاکتور کالیبراسیون یا مقاومت پل لوله، معلوم نباشد، با این تست‌ها تعیین می‌شود:

۱- جریان معمولی، بین دو سیم خارجی اعمال شود (همان‌گونه که در شکل ۴-۴۲ نشان داده شده است). کلید «دو پل دو طرفه»[۲۲] برای برعکس کردن قطبیت، اختیاری است، زیرا می‌توان ترمینال‌ها را برعکس کرد.
۲- افت ولتاژ بین سیم‌های داخلی قبل از اعمال جریان اندازه‌گیری شود و قطبیت، مقدار و واحد آن ثبت گردد $(\mathrm{mV_{off}})$
۳- جریانی نزدیک به مقدار جریان مورد انتظار در خط لوله، اعمال شود و قطبیت، مقدار و واحد آن ثبت گردد (I_{on}).
۴- افت اهمی در طول سیم‌های داخلی پس از اعمال جریان، اندازه‌گیری شود $(\mathrm{mV_{on}})$.
۵- جهت جریان، برعکس شود و اندازه‌گیری‌های جریان و ولتاژ تکرار گردد.

- برای تعیین جریان در خط لوله، ولت‌متر بین دو سیم داخلی متصل شده و افت ولتاژ برای تمام قرائت‌های جریان لوله اندازه‌گیری شود (همان‌گونه که در شکل ۴-۴۳ نشان داده شده است).
- قطبیت مقدار و واحدها، علاوه بر جهت اتصال ولت‌متر ثبت گردد.
- جریان در خط لوله طبق موارد ذکر شده محاسبه شود.

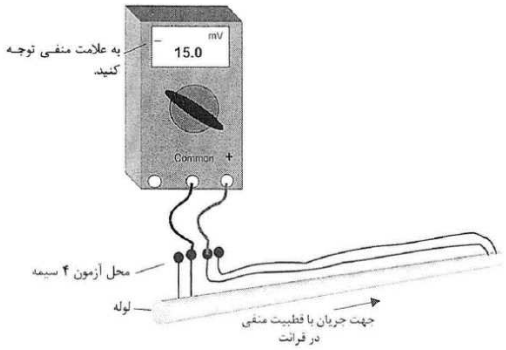
218 [illegible] 1 8
219 [illegible] 1 9
220 [illegible] 2 0



شکل ۴-۴۲ کالیبراسیون پل جریان چهار سیمه نشان داده شده است

آنالیز آمپرسنج DC

- آمپرسنج DC، قرائت مستقیمی از جریان برحسب آمپر یا میلی‌آمپر ارائه می‌دهد.
- قطبیت، مقدار و واحدهای ذکر شوند (برای مثال ۱/۵ + آمپر).



شکل ۴-۴۳ اتصال ولت‌متر به پل جریان ۴ سیمه نشان داده شده است

آمپرسنج DC گیره‌ای (کلمپی)

- یک آمپرسنج DC گیره‌ای از نوع self - contained، قرائت مستقیمی از جریان برحسب آمپر یا میلی‌آمپر ارائه می‌دهد یا اینکه برای محاسبه مقدار پتانسیل باید ضریب مقیاس دستگاه در مقدار قرائت اعمال گردد.
- انواع add - on پروب گیره‌ای تا یک ولت‌متر DC، نتیجه را برحسب میلی‌ولت نشان داده و دارای فاکتور کالیبراسیونی برحسب آمپر بر میلی‌ولت هستند. اندازه‌گیری میلی‌ولت با استفاده از رابطه زیر به آمپر تبدیل می‌شود:

$$I = mV_{measured} \times CF_p$$

که I جریان واقعی (برحسب آمپر)، $mV_{measured}$ ولتاژ اندازه‌گیری شده در امتداد شانت (برحسب میلی‌ولت) و CF_p فاکتور کالیبراسیون پروب گیره‌ای (برحسب آمپر بر میلی‌ولت) می‌باشند.

- قطبیت، توسط ترکیبی از قطبیت قرائت و جهت کویل تعیین می‌گردد. اگر قطبیت قرائت، مثبت باشد، جریان از مثبت به منفی در کویل عبور می‌کند. قرائت منفی نشان می‌دهد که جریان در خلاف این جهت می‌باشد.

شانت

جریان را با استفاده از یکی از سه روش می‌توان محاسبه کرد.

روش نسبت شانت

اعمال جریان در شانت، باعث ایجاد افت ولتاژ متناسب با درجه شانت (rating) در آن خواهد شد. جریان را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد:

$$I=\frac{mV_{measured}}{mV_{rated}}\times I_{rated}$$

که I جریان واقعی (برحسب آمپر) $mV_{measured}$ ولتاژ اندازه‌گیری شده در طول شانت (برحسب میلی‌ولت)، mV_{rated} درجه ولتاژ شانت (برحسب میلی‌ولت) و I_{rated} درجه جریان شانت (برحسب آمپر) می‌باشند.

فاکتور کالیبراسیون شانت

فاکتور کالیبراسیون برای شانت‌های پرکاربرد در صنعت حفاظت کاتدی در جدول ۴-۱ آمده است.

جدول ۴-۱ مقاومت و فاکتورهای شانت

□□□□□ شانت

میلی‌ولت	آمپر	مقاومت شانت (اهم)	فاکتور شانت (آمپر بر میلی‌ولت)
–	–	۰/۰۱	۰/۱
–	–	۰/۰۰۱	۱/۰
۵۰	۱	۰/۰۵	۰/۰۲
۵۰	۲	۰/۰۲۵	۰/۰۴
۵۰	۳	۰/۰۱۶۷	۰/۰۶
۵۰	۴	۰/۰۱۲۵	۰/۰۸
۵۰	۵	۰/۰۱	۰/۱
۵۰	۱۰	۰/۰۰۵	۰/۲
۵۰	۱۵	۰/۰۳۳	۰/۳
۵۰	۲۰	۰/۰۰۲۵	۰/۴
۵۰	۲۵	۰/۰۰۲	۰/۵

۵۰	۳۰	۰/۰۰۱۶۷	۰/۶
۵۰	۴۰	۰/۰۰۱۲۵	۰/۸
۵۰	۵۰	۰/۰۰۱	۱/۰
۵۰	۶۰	۰/۰۰۸۳	۱/۲
۵۰	۷۵	۰/۰۰۰۶۷	۱/۵
۵۰	۱۰۰	۰/۰۰۰۵	۲/۰
۱۰۰	۱۰۰	۰/۰۰۱	۱/۰

این اعداد را می‌توان از روی درجه‌بندی شانت برحسب آمپر در هر میلی‌ولت نیز محاسبه کرد:

$$\mathrm{SF}=\frac{I_{\mathrm{rated}}}{\mathrm{mV}_{\mathrm{rated}}}$$

که در اینجا SF فاکتور کالیبراسیون شانت (آمپر در هر میلی‌ولت)، I_{rated} درجه جریان شانت (آمپر) و $\mathrm{mV}_{\mathrm{rated}}$ درجه ولتاژ شانت (میلی‌ولت) می‌باشد.

برای محاسبه جریان، ولتاژ اندازه‌گیری شده در طول شانت برحسب میلی‌ولت، در فاکتور کالیبراسیون ضرب می‌گردد:

$$\mathrm{I}=\mathrm{mV}_{\mathrm{measured}}\times\mathrm{SF}$$

که I جریان واقعی (آمپر)، $\mathrm{mV}_{\mathrm{measured}}$ ولتاژ اندازه‌گیری شده در طول شانت (میلی‌ولت) و SF فاکتور کالیبراسیون شانت (برحسب آمپر در هر میلی‌ولت) می‌باشند.

روش مقاومت شانت

از فاکتور اهم می‌توان برای تعیین جریان در هر یک شانت استفاده کرد. مقاومت شانت‌های متداول به کار رفته در حفاظت کاتدی، در جدول ۴-۱آمده‌اند. بنابراین جریان بر اساس قانون اهم از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mathrm{I}=\frac{V_{\mathrm{measured}}}{R_s}$$

که I جریان در شانت (برحسب آمپر)، V_{measured} ولتاژ اندازه‌گیری شده در طول شانت (ولت) و R_s درجه مقاومت شانت (برحسب اهم) می‌باشند. نکته قابل ذکر این است که هنگام محاسبه مقاومت برحسب اهم، ولتاژ شانت باید از میلی‌ولت به ولت تبدیل شود.

اگر مقاومت شانت (R_s) معلوم نباشد، اما درجه آن برحسب میلی‌ولت و آمپر مشخص باشد، مقاومت را می‌توان با فرمول زیر محاسبه کرد:

$$R_s = \frac{V_r}{I_r}$$

که R_s درجه مقاومت شانت (برحسب اهم)، V_r درجه ولتاژ شانت (برحسب ولت) و I_r درجه جریان شانت (برحسب ولت) می‌باشد. مجدداً باید یادآور شد که در هنگام محاسبه مقاومت برحسب اهم و با داشتن جریان برحسب آمپر، ولتاژ شانت باید از میلی‌ولت به ولت تبدیل شود.

پل جریان؛ پل جریان دو سیمه

۱- قطر و ضخامت جداره لوله تعیین شود.

۲- فاصله بین دو سیم تعیین شده و اطمینان حاصل گردد که ضخامت جداره لوله بین دو سیم، یکنواخت است. همچنین اطمینان حاصل شود که ولو یا فیتینگی بین دو اتصال تست وجود ندارد.

۳- مقاومت پل جریان با استفاده از سه معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{R}=\rho\frac{L}{A}$$

که R مقاومت خطی لوله برای طول L (اهم)، ρ مقاومت فولاد (اهم. سانتی‌متر)، L طول پل جریان (سانتی‌متر) و A سطح مقطع لوله (سانتی‌مترمربع) می‌باشد.

$$\mathrm{A}=\pi\frac{(\mathrm{OD}^2\text{-}\mathrm{ID}^2)}{4}$$

که OD قطر خارجی لوله (سانتی‌متر) و ID قطر داخلی لوله (سانتی‌متر) می‌باشد یا

$$\mathrm{ID}=(\mathrm{OD}\text{-}2\mathrm{wt})$$

که wt ضخامت جداره لوله (برحسب سانتی‌متر) می‌باشد.

۴- مقاومت لوله در واحد طول را می‌توان از روی جداول مشخصات لوله نیز تعیین کرد. قطر و ضخامت جداره یا وزن در واحد طول باید معلوم باشند.

۵- برای تعیین مقاومت لوله، طول آن در مقاومت در واحد طول ضرب شود.

پل جریان چهار سیمه

۱- با توجه به نتایج تست‌های کالیبراسیون، مقاومت پل لوله از داده‌های تست با استفاده از فرمول زیر محاسبه شود:

$$R_p=\frac{[\mathrm{mV_{on}}\text{-}\mathrm{mV_{off}}]}{[I_{\mathrm{on}}\text{-}\mathrm{I_{off}}]\times 1000}$$

که R_p مقاومت پل لوله (اهم)، $\mathrm{mV_{on}}$ افت ولتاژ بین اتصالات داخلی تست در اثر اعمال جریان (میلی‌ولت)، $\mathrm{mV_{off}}$ افت ولتاژ در داخل پین‌ها بدون اعمال جریان (میلی‌ولت)، I_{on} جریان اعمالی بین اتصالات داخلی تست (آمپر) و I_{off} جریان قطع شده (معمولاً. آمپر) می‌باشند.

۲- در روش دیگر، فاکتور کالیبراسیون $\left(\mathrm{CF_{span}}\right)$ برای پل لوله محاسبه شود:

$$\mathrm{CF_{span}} = \frac{[I_{\mathrm{on}}\text{-}\mathrm{I_{off}}]}{[\mathrm{mV_{on}}\text{-}\mathrm{mV_{off}}]}$$

که $\mathrm{CF_{span}}$ فاکتور کالیبراسیون پل لوله (آمپر بر میلی‌ولت)، I_{on} جریان اعمالی بین اتصالات خارجی تست (برحسب آمپر)، I_{off} جریان قطع شده (معمولاً. آمپر)، $\mathrm{mV_{on}}$ افت ولتاژ بین اتصالات داخلی تست با اعمال جریان (برحسب میلی‌ولت) و $\mathrm{mV_{off}}$ افت ولتاژ بین پین‌های داخلی بدون جریان اعمالی (برحسب میلی‌ولت) می‌باشند.

جریان خط لوله

۱- جریان خط لوله در هر مکان با استفاده از مقاومت پل جریان محاسبه می‌شود:

$$I_{\mathrm{span}} = \frac{V_{\mathrm{span}}}{R_{\mathrm{span}}}$$

که I_{span} جریان در پل جریان (آمپر)، V_{span} افت ولتاژ در طول پل جریان (برحسب ولت) و R_{span} مقاومت پل جریان (اهم) می‌باشد.

۲- در روش جایگزین می‌توان با استفاده از فاکتور کالیبراسیون پل جریان، جریان خط لوله را در هر مکانی توسط معادله محاسبه کرد:

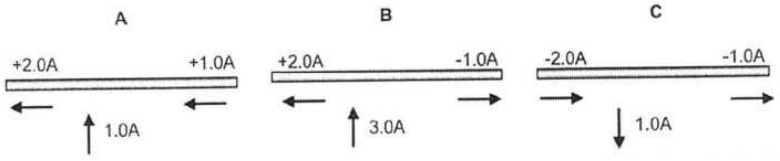
$$I_{\mathrm{span}}=\mathrm{mV_{span}}\times\mathrm{CF_{span}}$$

که I_{span} جریان در پل جریان خط لوله (برحسب آمپر)، $\mathrm{mV_{span}}$ افت ولتاژ در امتداد پل جریان (برحسب میلی‌ولت) و $\mathrm{CF_{span}}$ فاکتور کالیبراسیون پل جریان (برحسب آمپر بر میلی‌ولت) می‌باشند.

۳- ورود یا خروج جریان برای هر بخش مشخصی از خط لوله بین مکان‌هایی که در آنها جریان و جهت آن اندازه‌گیری می‌شود، با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$I_{\mathrm{section}}=\mathrm{I_1}\times\mathrm{I_2}$$

که I_{section} ورود یا خروج جریان از بخش مشخصی از لوله (آمپر)، I_1 جریان اندازه‌گیری شده در مکان ۱ (آمپر) و I_2 جریان اندازه‌گیری شده در مکان ۲ (آمپر) می‌باشند. برای تعیین جریان واقعی خروجی یا ورودی در هر بخش از لوله، نیاز به یک سیستم قطبیت (جهت جریان) مشترک می‌باشد. شکل ۴-۴۴، نشان می‌دهد که میزان جریان اندازه‌گیری شده در هر انتها، یکسان است، اما جهت جریان در آنها متفاوت بوده و بنابراین جریان خالص ورودی یا خروجی، متفاوت می‌باشند.



شکل ۴-۴۴ مثال‌هائی از جهت جریان لوله مؤثر بر ورود یا خروج جریان در شکل نشان داده شده است

برای مثال در شکل ۴-۴۴ با استفاده از معادله داریم:

$I_{\text{section A}}$=+2.0 A-1.0 A=+1.0 A (ورود جریان)

$I_{\text{section A}}$=+2.0 A-(-1.0 A)=+3.0 A (ورود جریان)

$I_{\text{section A}}$= -2.0 A-(-1.0 A)= -1.0 A (ورود جریان)

تداخل جریان سرگردان

مقدمه

هدف از این دستورالعمل، بررسی احتمال تداخل جریان‌های سرگردان DC بر روی سازه‌های مدفون در خاک یا آب می‌باشد. مسائل تداخل دینامیک پیچیده مانند موارد مشاهده شده در سیستم‌های انتقال، در این دستورالعمل نیامده است. در این بخش، اطلاعات پایه‌ای درباره تداخل دینامیک ارائه شده است.

جریان سرگردان دینامیک را می‌توان به‌عنوان عبور جریان در یک مسیر الکتریکی به غیر از مدار مورد نظر تعریف کرد. در جایی که جریان DC فلز را ترک کرده و وارد الکترولیت (مانند آب یا خاک) می‌شود، خوردگی رخ خواهد داد؛ بنابراین اگر جریان سرگردان DC، از سازه وارد الکترولیت شود، خوردگی تشدید می‌شود که شدت آن متناسب با جریان و زمان قرارگیری می‌باشد. خروج جریان DC از فلز به درون الکترولیت

(شکل ۴-۴۵)، باعث ایجاد خوردگی برای فلزات با نرخ‌های زیر می‌شود:

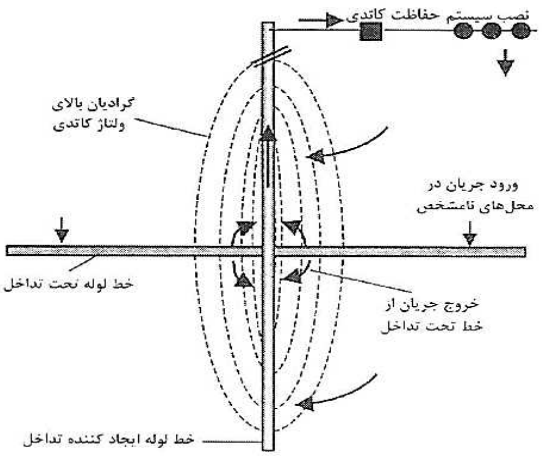
آهن: ۹/۲ کیلوگرم بر آمپر. سال (۲۰/۱ پوند بر آمپر. سال)

مس: ۲۰/۷ کیلوگرم بر آمپر. سال (۴۵ پوند بر آمپر. سال)

سرب: ۳۳/۹ کیلوگرم بر آمپر. سال (۷۴/۶ پوند بر آمپر. سال)

برای مثال اگر جریان ۱ آمپری، به‌مدت ۱ سال از سطح فولاد وارد الکترولیت شود، ۹/۲ کیلوگرم (۲۰/۱ پوند) از وزن آن از دست خواهد رفت. اگر این جریان محدود به ناحیه‌ای کوچک شود، می‌توان انتظار داشت که نفوذ سریعی در جداره سازه رخ دهد.

به نظر می‌رسد که رابطه‌ای بین جریان AC و خوردگی نیز وجود دارد؛ اما این رابطه مانند جریان DC کاملاً مشخص نیست. جریان سرگردان AC نیز منجر به ایجاد مشکلات خطرناکی می‌شود. به نظر می‌رسد حفاظت کاتدی می‌تواند خوردگی ناشی از جریان AC را در دانسیته جریان AC کمتر از ۲۰ آمپر بر مترمربع کنترل کند. خوردگی در جریان بین ۲۰ و ۱۰۰ آمپر بر مترمربع، غیرقابل پیش‌بینی است، اما در جریان‌های بیشتر از ۱۰۰ آمپر بر مترمربع، صرف‌نظر از میزان حفاظت کاتدی می‌توان انتظار خوردگی را داشت. در ولتاژهای AC بالا، ایمنی نیز حائز اهمیت است.



شکل ۴-۴۵ نمونه‌ای از تداخل کاتدی نشان داده شده است

منابع جریان سرگردان شامل موارد زیر هستند:

- حفاظت کاتدی
- خطوط جریان □□ ولتاژ بالا□□□□□
- سیستم‌های حمل و نقل
- تجهیزات معدن کاری با برق □□
- ریل‌های الکتریکی
- جوشکاری
- تجهیزات آبکاری که اتصال به زمین آنها، مشکل دارد.
- تجهیزات شارژ باتری که اتصال به زمین آنها، مشکل دارد.
- جریان طبیعی (تلوریک)
- خطوط جریان □□ و ولتاژ بالا□□□□□

اپراتورهای حفاظت کاتدی، به جزء تست‌های اصلی برای رکتیفایرها باید تست‌هایی نیز انجام دهند که تداخل ناشی از جریان سرگردان تشکیل داده شود (این مراحل فقط برای تشخیص بوده و برای برطرف کردن آنها نیست). پس از تشخیص جریان‌های سرگردان، مدیر پروژه یا ناظر باید فوراً این مسئله را گزارش دهد. تکنسین‌های حفاظت کاتدی باید تست‌های میدانی را برای تشخیص و رفع اثرات تداخل‌های DC ابتدائی انجام دهند. متخصصان حفاظت کاتدی باید تست‌هایی را برای تشخیص و رفع اثرات تداخل‌های پیچیده‌تر وکامل کردن آنالیز آنها انجام دهند. اثرات تداخل پیچیده، شامل تداخل دینامیک و جریان سرگردان ناشی از چندین منبع می‌باشد.

افراد میدانی مشغول به فعالیت حفاظت کاتدی باید درک خوبی از معیارها، شرایط خاص و نکات پیشگیرانه‌ای داشته باشند که برای این معیارها به کار می‌روند.

آنالیز ارزیابی خطر و ایمنی کار باید برای هرکدام از فازهای پروژه تکمیل شده و اقدامات احتیاطی مناسب انجام شود.

جریان‌های سرگردان استاتیک یا پایدار، ناشی از منابعی هستند که جهت و مقدارشان یکنواخت است و شامل سیستم‌های حفاظت کاتدی، تا مقداری خطوط انتقال جریان DC ولتاژ بالا می‌باشند. جریان سرگردان دینامیک، از نظر مقدار و اغلب جهت متغیر بوده و شامل سایر منابع ذکر شده در بالا می‌باشد.

تداخل کاتدی وقتی رخ می‌دهد که سازه از یک گرادیان ولتاژ قوی که نسبت به زمین دور، منفی است، عبور کند (شکل ۴-۴۵).

جریان در این نقطه، از سازه تحت تداخل وارد خاک شده و بنابراین باعث تشدید خوردگی آن می‌گردد. ورود جریان می‌تواند در فاصله‌ای نامعلوم رخ دهد.

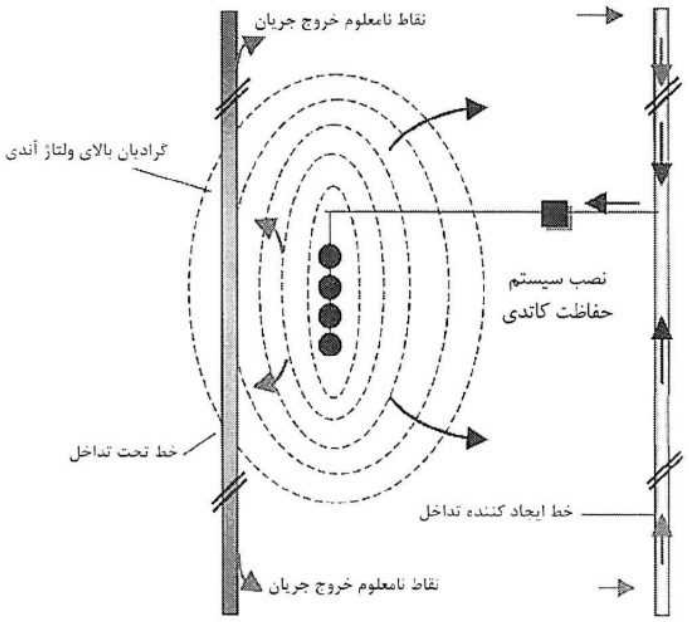
تداخل آندی رخ می‌دهد که سازه از یک گرادیان ولتاژ قوی که نسبت به زمین دور، مثبت است، عبور کند. در این حالت، جریان بر روی سازه تقویت شده و سپس می‌تواند در فاصله‌ای نامعلوم به منبع خود برگشت پیدا کند (شکل ۴-۴۶).

تداخل‌های کاتدی و آندی می‌توانند باهم نیز رخ دهند.

شرایط زیر می‌توانند در ایجاد تداخل نقش داشته باشند:

- موقعیت نسبی سازه نسبت به منبع جریان سرگردان □□
- اندازه و دانسیته جریان
- کارایی پوشش سازه
- نزدیکی به سازه خارجی
- محیط‌هایی که سازه از آنها عبور می‌کند: سنگ، خاک، آب، رودخانه‌ها و غیره.
- ناپیوستگی‌های الکتریکی در سازه که توسط اتصالات عایقی، بخش‌هایی از خط که تعویض شده و غیره ایجاد شده‌اند.
- جریان تلوریک

جریان تلوریک، جریانی طبیعی است که در اثر نوسانات ژئومغناطیسی در زمین رخ می‌دهد (این نوسانات در اثر طوفان‌های خوردگی که با میدان مغناطیسی زمین تداخل دارند. ایجاد می‌گردند). میدان مغناطیسی زمین به طور کلی از شمال به جنوب می‌باشد، اما در سرتاسر جهان متغیر است. جریان تلوریک، معمولاً از طریق نوسانات آهسته در پتانسیل‌های سازه به الکترولیت (که می‌توانند به‌صورت مقادیر بسیار منفی‌تر از حد معمول باشند یا حتی مقادیر مثبت) شناخته می‌شود.



شکل ۴-۴۶ نمونه‌ای از تداخل آندی نشان داده شده است

ابزارها و تجهیزات

- مولتی‌متر با قابلیت اندازه‌گیری ولتاژ □□ از ۱ میلی‌ولت تا ۴۰ ولت به همراه اتصالات پروب‌های عایق.
- دیتالاگر با قابلیت اندازه‌گیری ولتاژ □□ از ۱ میلی‌ولت تا ۴۰ ولت به همراه اتصالات و پروب‌های عایق، ترجیحاً هم‌زمان شده با □□□ .
- الکترود مرجع مس - سولفات مس.
- مولتی‌متر شامل حالت‌های □□ و □□ و اهم‌متر.
- قطع‌کننده‌های جریان، ترجیحاً هم‌زمان شده با □□□ .
- آمپرسنج □□ متناسب با جریان تست.

تجهیزات زیر بسته به تست مورد نظر، قابل استفاده می‌باشند:آمپرسنج گیره‌ای (کلمپی)

- سیم‌های تست
- ابزارهای دستی.

نکات مقدماتی

- قبل از برقراری تماس با قاب رکتیفایر، ولتاژ بین قاب و زمین اندازه‌گیری شود.
- در هنگام باز کردن قاب، احتمال وجود حیوانات و حشرات موذی در درون آن وجود دارد، بنابراین اقدامات احتیاطی انجام شود.

- رکتیفایر برای پیدا کردن دما، بو یا صداهای غیرعادی بازرسی شود و در صورت مشاهده این موارد، رکتیفایر خاموش گردد.
- قبل از نصب یک قطع‌کننده جریان یا برای تنظیم تپ‌ها، منبع تغذیه □□ خاموش گردد.
- ترمینال‌های بدون پوشش در یک محفظه قفل شده، قرار داده شوند.
- قبل از انجام اندازه‌گیری‌های حفاظت کاتدی، ولتاژ□□□ سازه نسبت به زمین اندازه‌گیری شود. اگر ولتاژ □□ نسبت به زمین، برابر یا بیشتر از ۱۵ ولت باشد، روش‌های ذکر شده در□□□□□□□□□□□□ دنبال شود.
- در هنگام کار در نزدیکی خطوط برق □□ ولتاژ بالا□□□□□□، مقادیر پتانسیل‌های □□ سازه نسبت به زمین در فواصل متناوب اندازه‌گیری شود، زیرا این ولتاژها می‌توانند با تغییر هندسه و بار خط برق تغییر کنند.
- در هنگام صاعقه، کاری بر روی سازه انجام نشود.
- هنگام کار در نزدیکی فنس، اطمینان حاصل شود که ولتاژ □□ از یک خط برق □□□□ بر روی فنس القا نشده باشد.
- اقدامات احتیاطی برای خطرات موضعی مانند ترافیک یا حیوانات و حشرات خطرناک انجام شود.
- فقط افراد دارای صلاحیت برای تست و آنالیز جریان سرگردان □□ باید این تست‌ها را انجام دهند.

دستورالعمل تشخیص اولیه جریان سرگردان

۱- احتمال وجود جریان سرگردان DC تحت شرایط زیر وجود دارد، لازم به ذکر است که علت ایجاد آنها می‌تواند به خاطر دلایل دیگر باشد:

- تغییر پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت در یک مکان در طول زمان
- تغییر قابل توجه مقادیر پتانسیل در جهت منفی در امتداد سازه، به‌ویژه در صورت مجاورت با سازه‌های تحت حفاظت کاتدی یا تجهیزاتی که با جریان □□ کار می‌کنند.
- تغییر پتانسیل‌ها در جهت مثبت در امتداد سازه، در فواصل دور از سیستم حفاظت کاتدی سازه.
- تغییرات ناگهانی پتانسیل سازه در طول مسافتی کوتاه، به‌ویژه در نزدیکی تأسیساتی که با جریان □□ کار می‌کنند.
- تغییرات اندازه و جهت جریان سازه
- حفره‌دار شدن موضعی، به‌ویژه در نواحی مجاور با دیگر منابع جریان □□
- تخریب موضعی پوشش سازه، به‌ویژه در نزدیکی منابع جریان □□

۳- در مناطقی که ولتاژ □□ سازه نسبت به زمین، بیشتر از ۵ ولت باشد، احتمال جریان سرگردان □□ وجود دارد.

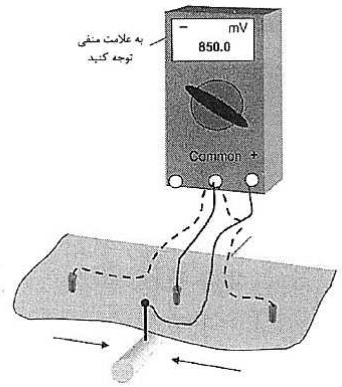
گرادیان‌های ولتاژ زمین

۱- تغییر پتانسیل اندازه‌گیری شده در سطح سازه ممکن است به دلیل تغییر گرادیان ولتاژ خاک ناشی از جریان در خاک باشد و می‌تواند ناشی از ورود و خروج جریان به جریان سازه نباشد.

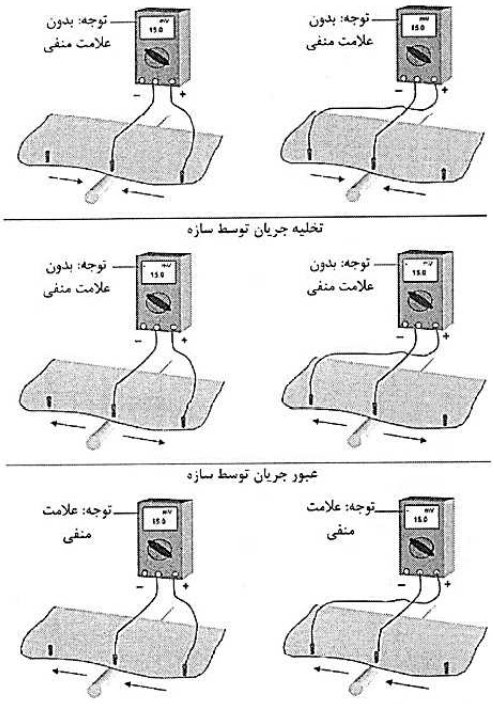
۲- پتانسیل سازه در فواصل عرضی حداقل ۳ متری از دو طرف خط لوله (در صورت امکان با قطع منبع ایجادکننده تداخل) اندازه‌گیری شود (شکل ۴-۴۷). فواصل الکترود مرجع در دو طرف لوله باید یکسان باشد.

۳- در روش جایگزین روش قبل، پتانسیل‌ها بین دو الکترود مرجع مانند شکل ۴-۴۸ اندازه‌گیری شود.

۴- قطبیت هرکدام از اندازه‌گیری‌ها به طور صحیح ثبت شود، زیرا همان‌گونه که در سه حالت شکل ۴-۴۹ نشان داده شده است، ممکن است که در اندازه‌گیری‌های مشابه، نتایج کاملاً متفاوتی حاصل شوند. نمونه‌ای از یادداشت‌های میدانی مربوط به این تست در جدول ۴-۲ آمده است.



شکل ۴-۴۷ اندازه‌گیری پتانسیل‌های سازه در عرض خط لوله نشان داده شده است



شکل ۴-۴۸ پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده بین دو الکترود مرجع در جهت عمود بر خط لوله نشان داده شده است. نکته قابل توجه این است که قطبیت در آنالیز، اهمیت زیادی دارد

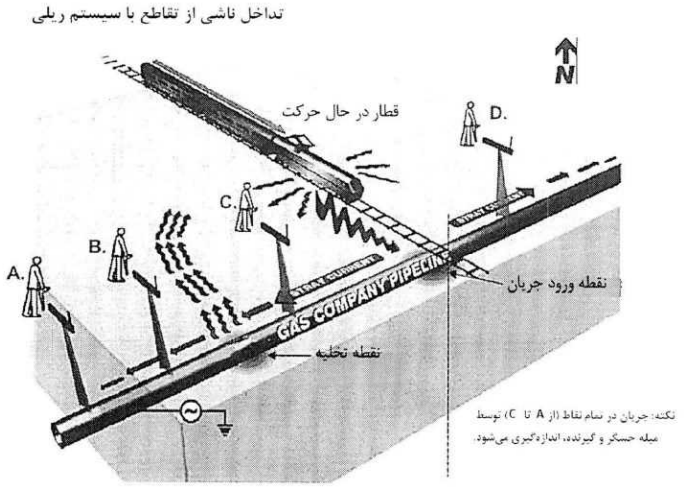
جدول ۴-۲ یادداشت‌های میدانی برای اندازه‌گیری گرادیان ولتاژ با دو الکترود مرجع

پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترود					
موقعیت	شمال / غرب	الکترود مرجع مرکزی، مثبت یا منفی؟	جنوب / شرق	الکترود مرجع مرکزی، مثبت یا منفی؟	فاصله الکترودهای مرجع
	IR_1		IR_2		

۵- فواصل الکترود مرجع به تدریج تغییر داده شود تا قدرت گرادیان‌های ولتاژ زمین مشخص گردد.

۶- می‌توان گرادیان‌ها را به‌صورت الگوی شبکه‌ای نیز اندازه‌گیری و در نهایت کانتورهای گرادیان را رسم کرد.

۷- در هنگام استفاده از تجهیزات ویژه برای اندازه‌گیری جریان زمین می‌بایست دستورالعمل‌های سازنده دنبال شود. مکان‌های اندازه‌گیری به نحوه انتخاب شوند که بیشترین احتمال وجود جریان سرگردان را داشته باشند (شکل ۴-۵۰).

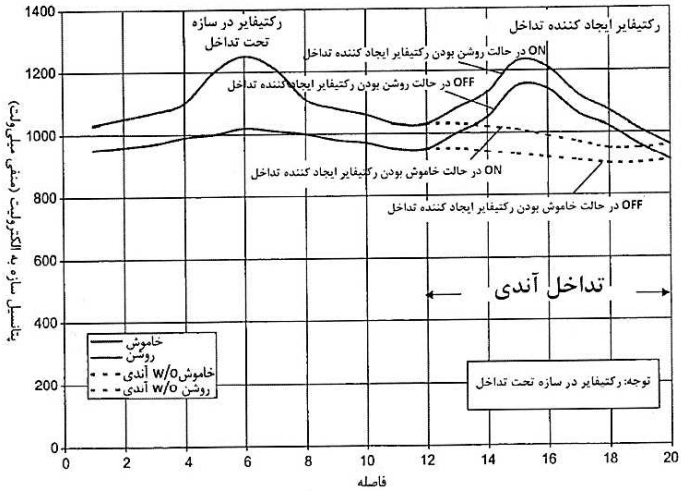


شکل ۴-۵۰ اندازه‌گیری جریان زمین نشان داده شده است

تداخل آندی ثابت[۲۲۱]

۱- اگر در نزدیک یک منبع جریان DC خارجی، تغییر مقادیر پتانسیل در جهت منفی مشاهده شود، احتمال تداخل آندی وجود دارد (مانند پروفیل پتانسیل نشان داده شده در شکل ۴-۵۱).

2 [illegible] 2 1



شکل ۴-۵۱ اندازه‌گیری جریان زمین نشان داده شده است

۲- اگر منبع ایجادکننده تداخل، نسبتاً ثابت باشد، برنامه‌ای ترتیب داده شود که منبع خارجی کاملاً خاموش شده یا در یک سیکل زمانی یا به‌صورت موقتی، قطع شود.

۳- برای تعیین ناحیه ورود جریان یا گرادیان آندی، ارزیابی فواصل کوتاه (CIS) انجام شود. این ناحیه در جایی قرار دارد که در آن پتانسیل سازه در اثر منبع جریان DC خارجی (ایجادکننده تداخل)، منفی‌تر است.

۴- ناحیه‌ای نیز وجود دارد که خروج جریان از آنجا رخ می‌دهد و اگر این جریان خروجی، وارد الکترولیت شود، موقعیت این ناحیه باید مشخص شود؛ در غیر این صورت، مقداری از جریان از طریق یک مسیر فلزی، خارج شود.

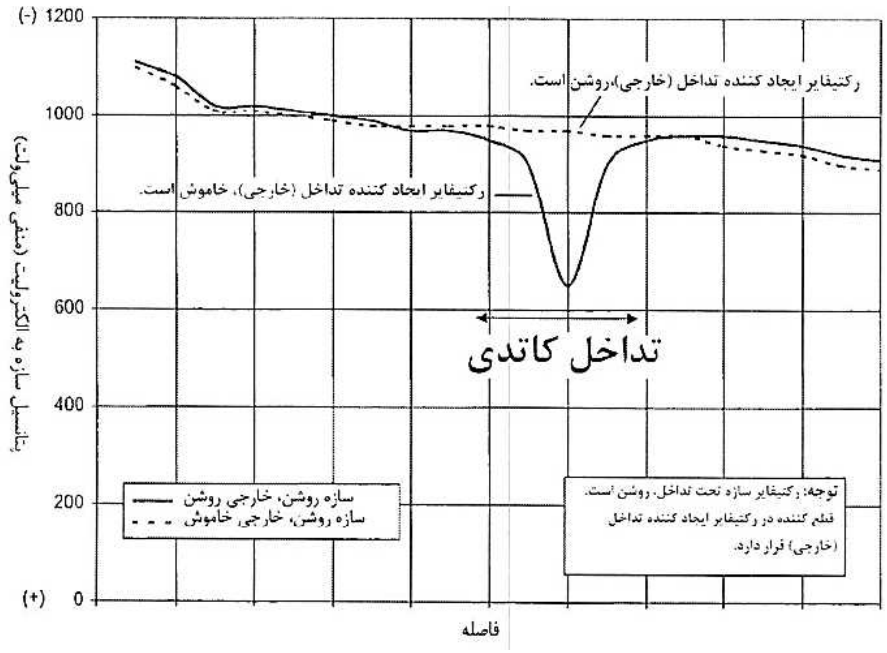
۵- اندازه‌گیری پتانسیل در ایستگاه‌های تست، به خصوص در نقاط نزدیک به سازه ایجادکننده تداخل انجام شود تا حدود نقاط خروج جریان مشخص گردد.

۶- وقتی حدود تخلیه جریان مشخص شد، برای تعیین نقاطی که بیشترین تأثیر را پذیرفته‌اند، یک ارزیابی CIS انجام گیرد.

تداخل کاتدی ثابت[۲۲۲]

۱- اگر تغییر مقادیر پتانسیل در جهت مثبت به خصوص در نزدیکی یک سازه خارجی با احتمال ایجاد تداخل مشاهده شود، احتمال تداخل کاتدی وجود دارد (مانند پروفیل پتانسیل on نشان داده شده در شکل ۴-۵۲).

2 [redacted] 2 2



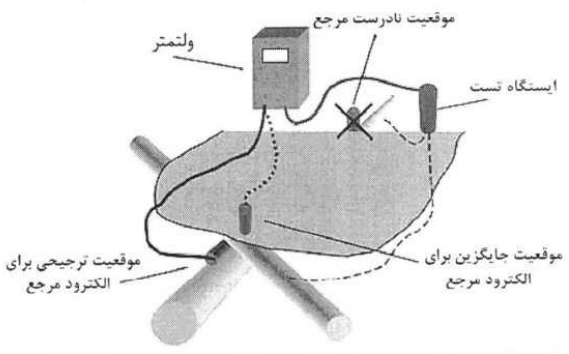
شکل ۴-۵۲ نمونه‌ای از تداخل کاتدی نشان داده شده است

۲- اگر منبع ایجادکننده تداخل، نسبتاً ثابت باشد، برنامه‌ای ترتیب داده شود که منبع خارجی کاملاً خاموش شده یا در یک سیکل زمانی یا به‌صورت موقتی، قطع شود.

۳- برای تعیین ناحیه تخلیه جریان یا گرادیان کاتدی، ارزیابی در فواصل کوتاه (CIS) انجام شود. این ناحیه را در جایی قرار دارد که در آن، پتانسیل سازه در اثر منبع جریان DC خارجی (ایجادکننده تداخل)، مثبت‌تر شده است.

۴- تست‌های CIS اضافی، به خصوص در نقاطی انجام شود که در آنها سازه ایجادکننده تداخل نزدیک به سازه تحت تداخل قرار دارد، تا نقاط دیگر تخلیه جریان نیز مشخص گردند.

۵- در مناطقی که تخلیه جریان، توسط مشاهده تغییر پتانسیل‌ها در جهت مثبت مشخص شده است، ارزیابی CIS برای تعیین نقاطی انجام شود که بیشترین تأثیر را پذیرفته‌اند.

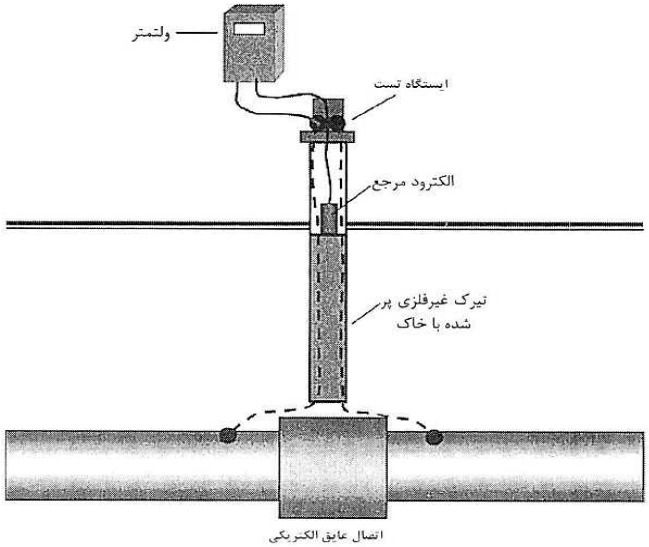


شکل ۴-۵۳ موقعیت‌های ترجیحی برای قرار دادن الکترود مرجع در محل تقاطع دو خط لوله

۶- در هنگام اندازه‌گیری پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت در نقطه‌ای که بیشترین تأثیر را پذیرفته است (برای مثال در محل تقاطع خط لوله)، موقعیت قرار دادن الکترود مرجع اهمیت بسیار زیادی دارد. الکترود مرجع به جای اینکه در نزدیکی ایستگاه تست یا محل تماس با سازه قرار داده شود، تا حد ممکن در نزدیکی نقطه‌ای از سازه تحت تداخل قرار گیرد که بیشتر تأثیر را پذیرفته است (شکل ۴-۵۳). در غیر این صورت، نتایج اندازه‌گیری شامل گرادیان‌های زمین (افت اهمی) خواهد بود، زیرا لوله به‌عنوان الکترود مرجع دوم عمل می‌کند و نتایج دارای مقادیر زیادی خطا خواهند شد.

۷- بهتر است که برای دقت بهترین تست، یک الکترود مرجع ثابت در نقطه‌ای نصب گردد که بیشترین تأثیر را پذیرفته است.

۸- اگر ایستگاه تست در موقعیت صحیحی برای تست اندازه‌گیری‌های جریان سرگردان قرار گرفته باشد، می‌توان الکترود مرجع را در داخل ایستگاه تست قرار داد (همان‌گونه که در شکل ۴-۵۴ نشان داده شده است). اگر الکترود مرجع در بخش زیرین ایستگاه تست قرار داده شود، پتانسیل اندازه‌گیری شده همان مقدار خواهد بود. خاک ایستگاه تست، یک پل الکترولیتی بین الکترود مرجع و زیر ایستگاه تست ایجاد می‌کند و می‌توان خاک را به‌عنوان امتداد سر متخلخل الکترود مرجع در نظر گرفت.

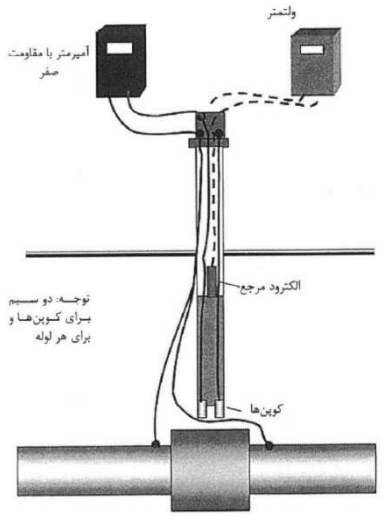


شکل ۴-۵۴ قرار دادن الکترود مرجع در داخل تیرک غیرفلزی جهت اندازه‌گیری جریان سرگردان در اتصال عایق

۹- اگر ایستگاه تست، فلزی بوده یا در مکان اشتباهی قرار داشته باشد، یک لوله غیرفلزی در نقطه صحیح تست نصب شده و با خاک پر شود. سپس الکترود مرجع در داخل لوله فلزی قرار داده شود.

۱۰- در جایی که گرادیان‌های ولتاژ زمین، در حال ایجاد تداخل با پتانسیل‌های سازه هستند، یک ایستگاه تست از نوع کوپنی (همانند شکل۴-۵۵) نصب شود.

۱۱- از کوپن برای دو هدف استفاده شود: ۱- اندازه‌گیری ورود یا خروجی جریان با استفاده از آمپرسنج یا مقاومت صفر ۲- اندازه‌گیری پتانسیل‌های واقعی سازه نسبت به الکترولیت توسط الکترود مرجع قرار گرفته در داخل ایستگاه تست غیرفلزی (به شکل‌های ۴-۵۳ و ۴-۵۴ مراجعه شود).

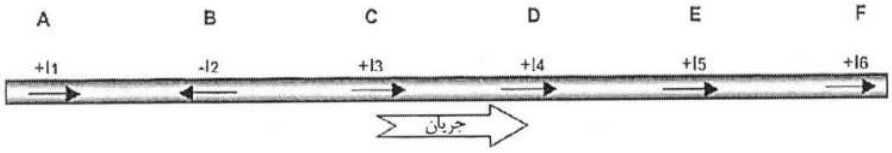


شکل ۴-۵۵ کاربرد ایستگاه تست کوپن برای اندازه‌گیری جریان سرگردان DC نشان داده شده است

تهیه نقشه جریان

نقشه‌برداری از جریان معمولاً برای سازه‌های خطی مانند خط لوله که در آنها می‌توان در فواصل منظم، اندازه‌گیری جریان را انجام داد، به کار می‌رود.

۱- جریان در خط لوله یا سازه با استفاده از یک پل جریان، یک آمپرسنج گیره‌ای، یا یک نقشه‌بردار جریان خط لوله (PCM) در فواصل منظم در امتداد خط لوله اندازه‌گیری شود (همان‌گونه که در شکل ۴-۵۶ نشان داده شده است).



شکل ۴-۵۶ جهت قراردادی جریان در خط لوله نشان داده شده است

۲- اندازه و جهت جریان خط لوله ثبت گردد. نمونه‌ای از این کار در شکل ۴-۵۶ آمده است که در این شکل، جریان مثبت هم‌جهت با شار سیال می‌باشد و مقداری منفی به جریان در جهت مخالف داده شده است (جریان پیوسته در حال افزایش، نشان‌دهنده ورود جریان است، درحالی‌که، جریان کاهشی یا جریان در جهت‌های مخالف، نشان‌دهنده خروج جریان می‌باشد).

تداخل دینامیک

۱- تداخل دینامیک، جریانی سرگردان است که اندازه و اغلب جهت آن متغیر می‌باشد.

۲- منبع جریان سرگردان تعیین گردد. تغییرات سریع در پتانسیل با الگوی تکرارپذیر و دوره‌های کامل، نشان‌دهنده جریان سرگردان ناشی از عوامل انسانی هستند. تغییرات آهسته بدون الگوی قابل توجه می‌توانند نشان‌دهنده جریان تلوریک یا طبیعی باشند.

- تأسیساتی در ناحیه بررسی شوند که می‌توانند منبع جریان سرگردان دینامیک باشند.
- پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت در طول ۲۲ الی ۲۴ ساعت توسط دیتالاگر ثبت شود تا با استفاده از نمودار پتانسیل‌ها، منبع تداخل تشخیص داده شود. در صورت مشاهده نوسانات مشابه در زمان‌های خاصی که روز، ارتباط آنها با شیفت‌های کاری معمول در معادن یا نیروگاه‌ها بررسی شود.

۳- اگر جریان سرگردان، ناشی از منبعی ایستا[۲] عوامل انسانی باشد، یک دیتالاگر نصب گردد تا پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت و در صورت امکان، جریان سازه در مکان‌های محتمل برای تداخل مانیتور شود. دیتالاگرها باید هم‌زمان شده باشند.

۴- اگر جریان سرگردان، ناشی از یک منبع انسانی متحرک باشد، دیتالاگرهایی در چندین نقطه در امتداد سازه نصب شود تا پتانسیل و جریان سازه به‌صورت هم‌زمان اندازه‌گیری شوند. دیتالاگرها باید هم‌زمان شده باشند.

۵- اگر جریان سرگردان، تلوریک باشد، دو دیتالاگر ثابت، یکی در یک چهارم و دیگری در سه چهارم بخش تحت تست نصب شود. یک دیتالاگر تنها می‌تواند فاصله کوتاهی از بخش تحت تست را مانیتور کند. هر اندازه‌گیری به‌مدت تقریباً ۵ دقیقه با یک دیتالاگر پرتابل که با دیتالاگرها ثابت هم‌زمان شده است نیز گرفته شود.

جریان تداخل داخلی

- تداخل داخلی معمولاً وقتی رخ می‌دهد که یک جریان سرگردان، از طریق الکترولیت با مقاومت کم داخل لوله، از اتصال عایقی عبور کند.
- پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت درحالی‌که، منبع مشکوک به ایجاد تداخل قطع شده است، اندازه‌گیری شود.
- اما درصورتی‌که الکترود مرجع در الکترولیت بیرون لوله قرار داشته باشد، در نقطه تخلیه جریان داخلی، تغییر مقادیر پتانسیل در جهت مثبت مشاهده نخواهد شد.

تست جریان سرگردان DC پس از حذف آن

۱- از دستورالعملی مشابه با دستورالعمل به کار رفته برای تشخیص جریان سرگردان DC استفاده شود تا اطمینان حاصل گردد که اثرات جریان سرگردان حذف شده است؛ باید یادآوری شد که بسته به روش حذف جریان سرگردان، شرایط تغییر خواهد کرد.

الف- باندها:

- باندها، معمولاً به‌عنوان یک اتصال بحرانی تعریف می‌شود و باید هر دو ماه یک‌بار بازرسی شوند.

---

2 [illegible] 2 3

- پتانسیل‌های دو سازه باید باند شده با یکدیگر، ترکیب پتانسیل این دو سازه بوده و بسته به مقاومت باند، متغیر خواهد بود.
- تغییر پتانسیل سازه از حالت □□ به□□□ در سازه تحت تداخل وقتی که رکتیفایرهای جریان سیستم حفاظت کاتدی ایجادکننده تداخل قطع شده باشند، ضرورتاً نشان‌دهنده وجود تداخل نمی‌باشد. در واقع پتانسیل سازه تحت تداخل ممکن است که به‌سمت مقادیر مثبت‌تر جابه‌جا شود، زیرا با قطع سیستم حفاظت کاتدی ایجادکننده تداخل، سیستم حفاظت کاتدی سازه تحت تداخل اکنون تلاش به حفاظت از سازه خارجی می‌کند.
- معمولاً پتانسیل□□ سازه تحت تداخل، وقتی که با سازه خارجی باند شود، به مقدار پتانسیل □□ اولیه (در حالتی که جریان تداخلی و باند وجود نداشته باشند) برمی‌گردد.
- برای به دست آوردن مقدار پتانسیل پلاریزه□□□□ واقعی سازه، در رکتیفایرهای ایجادکننده تداخل، رکتیفایرهای تحت تداخل و باند، قطع‌کننده‌های هم‌زمان شده نصب شود. می‌توان از سیکل‌های مختلف برای تمایز بین دو سیستم حفاظت کاتدی استفاده کرد، اما این سیکل‌ها باید در طول سیکل‌های□□ و□□□ هم‌پوشانی داشته باشند.
- پتانسیل‌های□□ و□□□ هر دو سازه اندازه‌گیری شود تا اطمینان حاصل گردد که پتانسیل‌های سازه تحت تداخل، به مقادیر عادی خود برگشته‌اند.

ب– آندهای فداشونده:

- اگرچه آندهای فداشونده به کار رفته برای برطرف کردن تداخل جزء بحرانی نیستند، اما به‌صورت مرتب باید بازرسی گردند، زیرا کارکرد نامناسب آنها ممکن است عواقب شدیدی به دنبال داشته باشد.
- پتانسیل‌های سازه که آند فداشونده به آن متصل شده باشد، ترکیبی از پتانسیل‌های سازه و آند فداشونده می‌باشد. وقتی رکتیفایر ایجادکننده تداخل روشن باشد، آند منیزیمی در حال تخلیه جریان است، اما جریان حاصل از آن به سازه ایجادکننده تداخل بر می‌گردد. به‌واسطه این تخلیه جریان در هنگام روشن شدن رکتیفایر ایجادکننده تداخل، ممکن است تغییرات پتانسیل در جهت مثبت مشاهده شود. این تغییر، نشان‌دهنده تداخل با سازه نیست، بلکه بیانگر تخلیه جریان از آند فداشونده می‌باشد و نشان می‌دهد که الکترود مرجع در موقعیت صحیحی قرار ندارند.
- الکترود مرجع در نقطه تخلیه جریان سازه قرار داده شود (در حالتی که آندهای فداشونده متصل نیستند) و پتانسیل‌های □□یا□□□ با خاموش کردن رکتیفایر ایجادکننده تداخل اندازه‌گیری شود.
- پتانسیل‌های□□ و□□□، در حالتی اندازه‌گیری شود که آندهای فداشونده متصل هستند. اگر با روشن شدن رکتیفایر، تغییر پتانسیل‌ها در جهت منفی رخ دهد، نتایج مثبت گردند. اگر تغییر پتانسیل‌ها در جهت مثبت باشد، الکترود مرجع حرکت داده شود (بدون دور کردن آن از گرادیان کاتدی در سازه) تا مشخص شود که آیا در گرادیان آندی آندهای فداشونده قرار دارد. اگر پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت در طول سیکل□□ رکتیفایر ایجادکننده، هنوز در حال مثبت‌تر شدن باشد، نیاز به آندهای بیشتری می‌باشد.
- مقدار و جهت جریان آندهای فداشونده اندازه‌گیری شود.

- در رکتیفایرهای ایجادکننده تداخل، رکتیفایرهای تحت تداخل و در آندهای فداشونده، قطع‌کننده‌های هم‌زمان‌کننده نصب گردد تا پتانسیل پلاریزه واقعی□□□□ در سازه ایجادکننده تداخل به دست آید. برای متمایز شدن دو سیستم حفاظت کاتدی می‌توان از سیکل‌های متفاوت استفاده کرد، اما این سیکل‌ها باید در طول سیکل‌های□□ و□□□ هم‌پوشانی داشته باشند.
- پتانسیل‌های□□ و□□□ در هر دو سازه اندازه‌گیری شود و اطمینان حاصل گردد که پتانسیل سازه تحت تداخل، به میزان نرمال برگشته است (نکته قابل توجه این است که اگر این سازه‌ها قبلاً تحت حفاظت قرار نداشتند، اکنون نیز نیازی به حفاظت آنها نیست، اما فقط پتانسیل آنها به مقدار اولیه‌شان برمی‌گردد).

ج- حفاظت کاتدی اضافی:

- علاوه بر نصب آندهای فداشونده، می‌توان یک سیستم حفاظت کاتدی جریان اعمالی نیز نصب کرد تا گرادیان‌های کاتدی بین سازه‌ها متعادل شوند.
- قبل از نصب سیستم حفاظت کاتدی جریان اعمالی، تست‌های بالا انجام شود تا مشخص گردد که آیا سازه‌های ایجادکننده تداخل یا تحت تداخل تغییر کرده‌اند یا نه.
- سیستم حفاظت کاتدی جریان اعمالی جدید به گونه‌ای تنظیم شود که هیچ‌گونه تداخلی با سازه‌های دیگر نداشته باشد.

د- پوشش‌دهی مجدد نواحی ورود جریان:

- لازم به یادآوری است که پوشش‌دهی نواحی تخلیه جریان می‌تواند باعث تجمع جریان داخلی در عیوب کوچک پوشش شده و در نتیجه منجر به خوردگی سریع‌تر جداره سازه گردد. پوشش‌دهی نواحی ورود جریان، مقاومت مسیر جریان را افزایش داده و بنابراین ورود جریان به این نواحی را کاهش می‌دهد. مقدار قابل توجهی از سازه که جریان وارد آنها می‌شود، می‌بایست پوشش داده شوند.
- همان تست‌های ذکر شده قبل از پوشش‌دهی مجدد، برای تعیین کارایی این راه حل انجام شوند.

ه- نصب عایق‌های الکتریکی اضافی:

- لازم به ذکر است که هدف از نصب عایق‌های الکتریکی اضافی، محدود کردن جریان سرگردان طولانی است. عیب این روش این است که هر بخش باید یک سیستم حفاظت کاتدی مستقل داشته باشد و همچنین احتمال ایجاد تداخل در هر اتصال عایق وجود دارد.
- همان تست‌های ذکر شده قبل از نصب اتصال عایق، انجام گردد و علاوه بر آن، این تست‌ها در هرکدام از اتصالات عایقی جدید نیز انجام می‌شود.

فصل چهارم : حفاظت کاتدی | 233

و– باندهای جریان تحمیلی[۲۲۴]

باندهای جریان تحمیلی، جریان را تحت شرایط جریان سرگردان دینامیک کنترل می کنند. این روش حاصل مطالعه پیچیده‌ای است که فراتر از محدوده این کتاب می‌باشد.

آنالیز گرادیان‌های زمین

۱- جهت جریان قراردادی، از الکترود مرجع مثبت به الکترود منفی می‌باشد. اگر جریانی، در هر دو سمت سازه به‌سمت آن باشد، نشان‌دهنده ورود جریان می‌باشد. اگر جریان، در هر دو سمت سازه از آن دور شود، نشان‌دهنده تخلیه (خروج) جریان است. درصورتی‌که جریان از یک‌سمت سازه، در حال ورود به آن بوده و از سمت دیگر در حال خروج می‌باشد، این حالت، بیانگر عبور جریان در خاک خواهد بود.

۲- جدول۴-۳، مثالی از ورود جریان، خروج جریان و عبور جریان توسط یک خط لوله را نشان می‌دهد.

۴- داده‌های این جدول، از یک خط لوله به دست آمده‌اند. آنالیز داده‌های حاصل از خط لوله‌های موازی، پیچیده‌تر خواهد بود، زیرا اطلاعات هر خط لوله باید تطابق داده شود.

جدول ۴-۳ داده‌های میدانی پتانسیل در خط لوله

موقعیت	پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت (میلی‌ولت)						نکته
	شمال خط لوله (۳ متر)		بالای خط لوله		جنوب خط لوله (۳ متر)		
	off	on	off	on	off	on	
MP 10	-۹۶۰	-۱۵۰۰	-۹۴۰	-۱۳۰۰	-۹۸۰	-۱۵۵۰	ورود جریان
MP 2	-۸۰۰	-۶۵۰	-۸۲۰	-۷۵۰	-۸۰۰	-۶۸۰	خروج جریان
MP 30	-۹۲۰	-۱۶۰۰	-۹۴۰	-۱۷۰۰	-۹۶۰	-۱۸۰۰	عبور جریان توسط خط لوله

تداخل آندی ثابت

۱- احتمال وجود تداخل آندی، در ابتدا اغلب توسط یک تغییر الکترونگاتیو (منفی) مقادیر پتانسیل‌های سازه در نواحی که بستری آندی برای سازه وجود ندارد، تشخیص داده می‌شود (شکل۴-۵۱).

۲- اگر منبع تغذیه DC که به سازه متصل نیست، قطع شود، یک متغیر الکترونگاتیو در مقادیر پتانسیل‌های سازه تحت تداخل، نشان‌دهنده تداخل آندی در آن سازه می‌باشد. اگرچه این تغییر منفی نشان‌دهنده ورود جریان است، اما تخلیه جریان مربوط به آن نیز باید در مکان (یا مکان‌های) دیگری از سازه رخ دهد تا جریان به منبع خود برگشت پیدا کند. مکان‌های خروج جریان دارای اهمیت زیادی هستند، زیرا خوردگی در این مکان‌ها رخ خواهد داد.

---

[224] . Forced current bonds

۳- احتمال جابه‌جایی بستر آندی ایجادکننده تداخل به‌نحوی بررسی گردد که سازه تحت تداخل، دیگر در گرادیان آندی آن قرار نداشته باشد.

۴- در صورت عدم امکان انجام این کار، مکان‌های تخلیه جریان مشخص شود، اگر تخلیه جریان از طریق خاک باشد، آنالیز تداخل کاتدی انجام شود.

۵- به‌عنوان روشی موقتی می‌توان از طریق یک باند، جریان را به منبع برگشت داد. یک تجهیز یک جهته می‌تواند در این باند نصب شود تا از برعکس شدن مسیر جریان جلوگیری شود.

۶- در ابتدا مقدار جریان مورد نیاز، با محاسبه افت اهمی ناشی از ورود جریان محاسبه شود. سپس از طریق یک بستر موقتی قرار گرفته در نزدیک بستر آندی ایجادکننده تداخل، این جریان به خط لوله تزریق شود که با این کار، مقدار معادل اهمی اضافه خواهد شد. تزریق این جریان به‌عنوان روشی موقتی بوده و تا زمانی ادامه داده می‌شود که بررسی‌های بیشتر برای پیدا کردن مکان تخلیه جریان انجام شود.

تداخل کاتدی ثابت

۱- اولین نشانه تداخل کاتدی، اغلب تغییرات مثبت در مقادیر پتانسیل سازه، به خصوص در جاهایی می‌باشد که نزدیک به یک سازه دیگر (که از لحاظ الکتریکی از سازه مورد نظر جدا شده است) قرار دارد. اگر منبع جریان DC سازه خارجی، قطع شود و پتانسیل سازه تحت تداخل، منفی‌تر شده و با روشن شدن مجدد این منبع جریان، مقادیر پتانسیل مثبت‌تر شوند، احتمال وجود تداخل کاتدی تأیید می‌گردد (شکل۴-۵۲).

۲- اگر با روشن شدن منبع جریان خارجی (ایجادکننده تداخل) پتانسیل‌های سازه تست تداخل مثبت‌تر شوند، تخلیه جریان از آن در حال رخ دادن است. یا باید منبع این جریان حذف شود یا اینکه جریان باید با روش مناسبی به منبع اولیه برگشت داده شود.

۳- حذف جریان ایجادکننده تداخل می‌تواند به روش‌های زیر انجام گیرد:

- کاهش خروجی منبع جریان □□ ایجادکننده تداخل.
- اصلاح اشکال در اتصال به زمین منبع جریان □□
- پوشش‌دهی مجدد ناحیه ورود جریان به منظور کاهش دادن گرادیان کاتد و افزایش مقاومت مدار.
- استفاده از رکتیفایرهایی با کنترل پتانسیل.

۴- برگشت دادن جریان تداخلی به منبع خودش را می‌توان از طریق روش‌های زیر انجام داد:

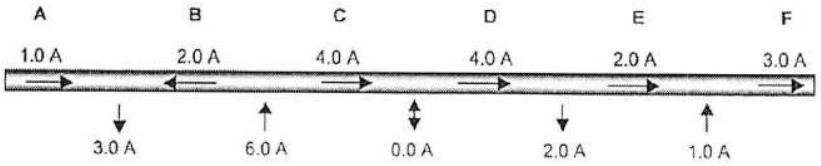
- استفاده از باندها.
- آندهای فداشونده.
- نصب یک سیستم حفاظت کاتدی جریان اعمالی جدید.
- باندهای جریان تحمیلی.

۵- می‌توان از ترکیبی از روش‌های ذکر شده در بالا نیز استفاده نمود.

نقشه‌های جریان

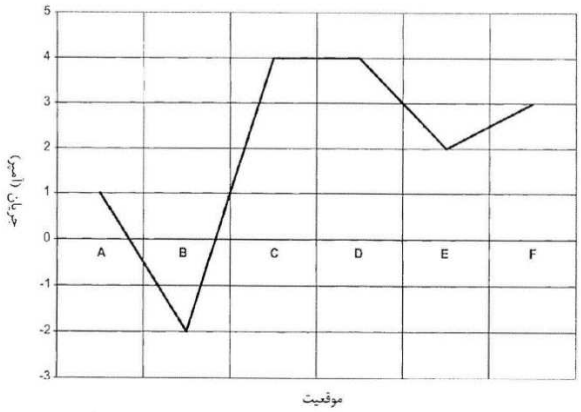
۱- مکان‌های ورود و خروج جریان، توسط جمع زدن جریان در خط لوله مشخص گردد.

- جمع جریان در هر تقاطع جریانی باید برابر با صفر بوده یا اینکه جریان ورودی به یک نقطه باید برابر با جریان خروجی از آن باشد.
- یک نمونه از این روش، در شکل ۴-۵۷ آمده است. جریان از موقعیت □ تا موقعیت □، از ۱ آمپر تا ۲ آمپر تغییر می‌کند، اما جهت جریان در نقطه □، خلاف جهت جریان در نقطه □ است (۲- آمپر در□)؛ بنابراین بین این دو نقطه، تخلیه جریان ۳ آمپری رخ می‌دهد. جریان در نقطه □ به ۴+ آمپر می‌رسد؛ بنابراین بین نقاط □ و □، ورود ۶ آمپر جریان رخ می‌دهد. در بین نقاط □ و □ تغییری در جریان خط لوله مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین بین این دو نقطه، ورودی یا خروج جریانی اتفاق نمی‌افتد. جریان در نقطه □ هم‌جهت با جریان در نقطه □، اما با مقداری کمتر می‌باشد؛ بنابراین بین این دو نقطه، باید تخلیه جریانی رخ داده باشد. جریان در نقطه□، هم جهت با جریان در نقطه □، اما با مقدار بیشتری می‌باشد؛ بنابراین در این پل جریان (□ یا□)، ورود جریان رخ داده است.



شکل ۴-۵۷ نقشه جریان بخشی از خط لوله نشان داده شده است

۲- این مقادیر به‌صورت نموداری رسم شوند (شکل ۴-۵۸) که در این نمودار، جریان‌های در جهت مخالف، با مقدار منفی نشان داده شده‌اند. بخش‌های ورود و خروج جریان از لوله را می‌توان به سادگی در پروفیل جریان خط لوله نشان داد؛ شیب مثبت، نشان‌دهنده ورود جریان و شیب منفی، نشان‌دهنده تخلیه جریان می‌باشند.



شکل ۴-۵۸ نمودار جریان خط لوله با جهت جریان از چپ به راست نشان داده شده است. ورود جریان با شیب مثبت و تخلیه جریان با شیب منفی نشان داده شده است

۴- در بخش‌هایی که تخلیه جریان رخ داده است باید اقدامات اصلاحی انجام شود.

تداخل دینامیک

ارزیابی و اقدامات اصطلاحی تداخل دینامیک پیچیده است و فراتر از محدوده این کتاب می‌باشد. خلاصه‌ای از پیشنهادات در این زمینه به‌صورت زیر می‌باشد:

جریان سرگردان تلوریک (طبیعی)

- اگرچه جریان‌های تلوریک می‌توانند باعث ایجاد مشکل تداخل شوند، اما مسئله اصلی این واقعیت است که پتانسیل واقعی سازه نسبت به الکترولیت در این شرایط مشخص نیست؛ بنابراین هرگونه تغییری در امتداد سازه می‌تواند مخفی بماند.
- چندین روش وجود دارد که می‌توان از آنها برای تغییر پتانسیل واقعی سازه نسبت به الکترولیت تحت شرایط تلوریک استفاده کرد، یکی از این روش‌ها در قسمت «اندازه‌گیری پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت» توضیح داده شده است.

جریان سرگردان دینامیک ناشی از یک منبع ایستای انسانی

- یک منبع ایستا جریان دینامیک، مشابه با روشی که برای تداخل حالت ثابت به کار می‌رود، در بازده‌های زمانی کوتاه بررسی می‌شود. دوره‌های زمانی تخلیه جریان و میزان آن، بیشترین اهمیت را دارند.
- روشی که برای حذف تداخل به کار می‌رود باید تغییرات پتانسیل سازه را به حداقل رسانده و آن را در پتانسیلی برابر یا منفی‌تر از حالت بدون تداخل نگه دارد.

تداخل دینامیک ناشی از یک منبع متحرک انسانی

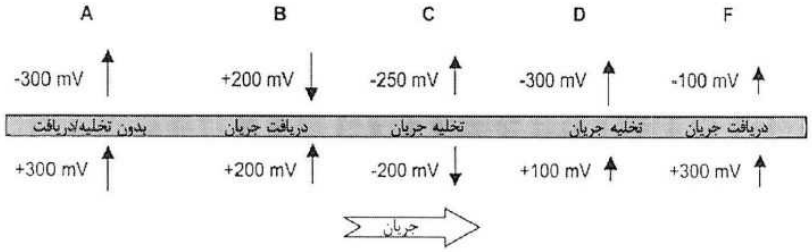
- شرایط در تمام نقاط سازه، به‌صورت پیوسته در حال تغییر است (اندازه جریان سرگردان و همچنین مکان منبع متغیر می‌باشند).
- اگر از یک اتصال باند برای برگشت جریان به منبعش استفاده شود، موضوع مهم مکان این باند خواهد بود. مکان ترجیحی، در نقطه تخلیه جریان است. قرار دادن باند در هر نقطه دیگری می‌تواند مسیری موازی با نقطه تخلیه جریان ایجاد کند و بنابراین مشکل را حل نخواهد کرد.
- یکی از روش‌ها که در آن، مکان‌های ورود و تخلیه جریان مشخص می‌شوند. روش «منحنی بتا» نامیده می‌شود. در این روش، جریان یک مکان با مکان بعدی در یک نمودار و همچنین جریان خط با پتانسیل سازه در مکان‌ها در نمودار دیگری مقایسه می‌گردد. با دانستن جهت جریان، شیب نمودار نشان‌دهنده ورود یا خروج جریان خواهد بود.
- روش دیگر، مقایسه داده‌های جریان خط، پتانسیل‌های سازه، و در مورد سیستم انتقال پتانسیل‌های ریل نسبت به سازه در تمام مکان‌ها می‌باشد.
- پس از اعمال روش‌های اصلاحی، دستورالعمل‌های مشابهی برای ارزیابی به کار می‌رود.

جریان زمین (earth)

۱- نواحی ورود و تخلیه جریان با روشی مشابه با نقشه برداری جریان مشخص گردد (شکل۴-۵۹).

۲- اگرچه اندازه‌گیری کمی جریان زمین مورد نظر نیست، اما با استفاده از مقایسه مستقیم پتانسیل‌ها با فرض اینکه مقاومت خاک و فواصل الکتریکی مرجع، یکسان باقی بماند می‌تواند جریان نسبی را تخمین زند.

۳- تغییرات جریان، رابطه عکس با تغییرات مقاومت دارد.



در شکل ۴-۵۹ نقشه جریان سرگردان زمین نشان داده شده است

ارزیابی برای تنظیم

مقدمه

هدف از ارزیابی تنظیمی، تأیید عملکرد سیستم حفاظت کاتدی در انجام وظیفه خود است و درصورتی‌که این معیار حفاظتی برآورده نشود، سیستم برای رسیدن به معیار، تنظیم مجدد می‌خواهد. اگر این کار با استفاده از ظرفیت سیستم حفاظت کاتدی موجود قابل انجام نباشد، برنامه‌ای برای تعیین راه حل برطرف کردن آن (معمولاً یک تست عیب‌یابی DC) صورت می‌گیرد

ابزارها و تجهیزات

بسته به تست به کار رفته می‌توان از تجهیزات زیر استفاده کرد:

- مولتی‌متر با قابلیت اندازه‌گیری ۱ میلی‌ولت تا ۴۰ ولت به همراه اتصالات و پروب‌های عایق
- الکترود مرجع مس- سولفات مس
- چک‌کننده عایق الکتریکی
- دستگاه اندازه‌گیری مقاومت خاک به همراه کابل‌ها و چهار پین
- مولتی‌متر دارای حالت‌های و و اهم‌متر
- قطع‌کننده جریان
- آمپرسنج متناسب با جریان تست
- باتری و مقاومت کنترل یا منبع تغذیه قابل تنظیم پرتابل
- فرستنده و گیرنده لوله‌یاب

- سیم‌های تست
- ابزارهای دستی کوچک

نکات مقدماتی

قبل از برقراری تماس با قاب رکتیفایر، ولتاژ بین قاب و زمین اندازه‌گیری شود.

- در هنگام باز کردن قاب، احتمال وجود حیوانات و حشرات موذی در درون آن وجود دارد، بنابراین اقدامات احتیاطی انجام شود.
- رکتیفایر برای پیدا کردن دما، بو یا صداهای غیرعادی بازرسی شود و در صورت مشاهده این موارد، رکتیفایر خاموش گردد.
- قبل از نصب یک قطع‌کننده جریان یا برای تنظیم تپ‌ها، منبع تغذیه □□ خاموش گردد.
- ترمینال‌های بدون پوشش در یک محفظه قفل شده، قرار داده شوند.
- قبل از انجام اندازه‌گیری‌های حفاظت کاتدی، ولتاژ □□ سازه نسبت به زمین اندازه‌گیری شود. اگر ولتاژ □□ نسبت به زمین، برابر یا بیشتر از ۱۵ ولت باشد، روش‌های ذکر شده در□□□□□□□□□□□□ دنبال شود.
- در هنگام کار در نزدیکی خطوط برق □□ ولتاژ بالا (□□□□)، مقادیر پتانسیل‌های □□ سازه نسبت به زمین در فواصل متناوب اندازه‌گیری شود، زیرا این ولتاژها می‌توانند با تغییر هندسه و بار خط برق تغییر کنند.
- در هنگام صاعقه، کاری بر روی سازه انجام نشود.
- هنگام کار در نزدیکی فنس، اطمینان حاصل شود که ولتاژ □□ از یک خط برق □□□□ بر روی فنس القا نشده باشد.

دستورالعمل‌ها

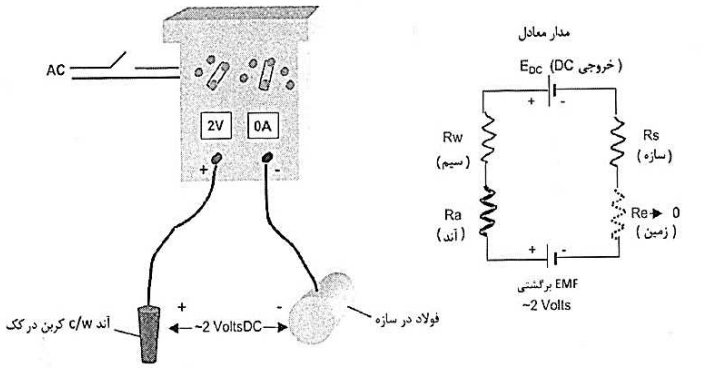
اطلاعات مورد نیاز قبل از انجام ارزیابی تنظیمی

- داده‌های ارزیابی سالانه قبلی
- داده‌های سالانه رکتیفایر
- نقشه‌ها
- جزئیات سازه
- جزئیات نصب و مکان سیستم حفاظت کاتدی
- انواع ایستگاه‌های تست و مکان آنها
- جزئیات باند و مکان آنها
- تست‌های ولتاژ □□
- نتایج تست‌های تداخل □□
- داده‌های باند بحرانی

- اطلاعات عایق
- داده‌های کیسینگ و جاده
- داده‌های ارزیابی پتانسیل در فواصل کوتاه (
- اطلاعات پوشش و خط لوله
- بازرسی خط یا سایر نتایج بازرسی
- داده‌های مانیتورینگ ماهانه

منبع جریان مستقیم

۱- خروجی جریان و ولتاژ DC توسط یک مولتی‌متر پرتابل اندازه‌گیری شده و با داده‌های روی پنل رکتیفایر مقایسه شود.

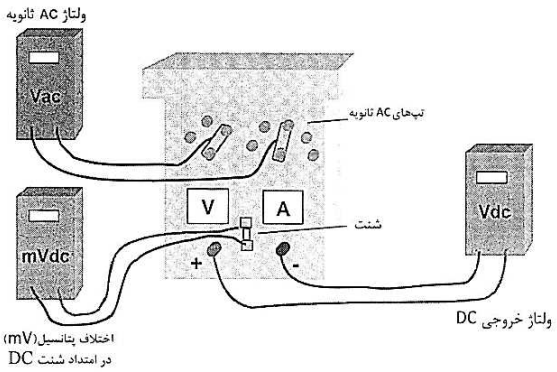


شکل ۴-۶۰ نیروی EMF برگشتی بین سازه فلزی و کربن در کک بریز (در سمت چپ منبع تغذیه، AC، در حالت خاموش می‌باشد)

۲- منبع جریان خاموش گردد و ولتاژ DC بین سازه و آندها اندازه‌گیری شود. با این کار اثر نیروی الکترومحرکه برگشتی (EMF) ناشی از اختلالات پتانسیل گالوانیک بین فلز سازه و آند تعیین می‌شود که در مقابل ولتاژ DC رکتیفایر قرار می‌گیرد. مدار معادل در شکل ۴-۶۰، نشان می‌دهد که چرا این پتانسیل در مقابل پتانسیل محرکه منبع جریان DC قرار می‌گیرد و باید هنگام محاسبه مقاومت مدار خارجی در نظر گرفته شود.

۳- ولتاژ AC بین تپ‌های ثانویه ترانسفرمر اندازه‌گیری شود (شکل ۴-۶۱). ولتاژ AC ثانویه بین میله‌های تپ‌های ریز و درشت در یک رکتیفایر باید اندکی بیشتر از خروجی ولتاژ DC باشد.

۴- داده‌های تنظیمات تپ‌ها، ولتاژ و جریان خروجی منابع جریان DC و مدارها در شرایط تست و عادی ثبت شود.

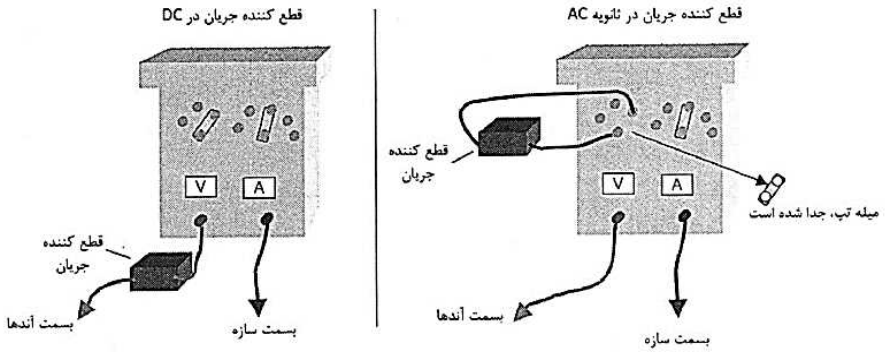


شکل ۴-۶۱ تست‌های رکتیفایر نشان داده شده است

۵- اگر دستگاه سنجش کیلووات- ساعت (KWH) در دسترس باشد، مقدار KWH، فاکتور Kh و تغییرات در هر دقیقه ثبت گردد.

۶- برای سیستم‌های آند فداشونده، سایر شانت و مقدار پتانسیل در طول آن ثبت گردد و خروجی جریان محاسبه شود.

۷- در صورت امکان، یک قطع‌کننده جریان در منبع تغذیه AC، تپ‌های ثانویه AC یا خروجی AC رکتیفایر (مانند شکل ۴-۶۲) یا در خروجی DC منابع دیگر جریان DC نصب شود. قطع‌کننده به‌صورت سری آندها نصب گردد.



شکل ۴-۶۲ دو نمونه از نحوه نصب قطع‌کننده جریان نشان داده شده است

۸- برای بیشتر از یک منبع جریان، از قطع کننده‌های هم‌زمان شده (ترجیحاً توسط GPS) استفاده شود.

۸- برای به حداقل رساندن افت پلاریزاسیون در طول دوره قطع شدن جریان، زمان□□ طولانی و زمان□□□ کوتاه انتخاب گردد□

پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت

۱- برای بررسی برآورده شدن معیارهای حفاظت کاتدی، در صورت امکان، پتانسیل‌های on-off سازه نسبت به الکترولیت در حالتی که تمام منابع جریان DC مؤثر خاموش شده‌اند، در تمام نقاط در دسترس به سازه اندازه‌گیری شود.

۲- از یک ولت‌متر با امپدانس بالا (حداقل ۱۰ مگااهم) به همراه الکترود مرجع مس- سولفات مس (CSE) برای محیط‌های خاک یا آب دریا یا یک الکترود مرجع نقره- کلرید نقره (SCC) برای محیط‌های حاوی نمک زیاد استفاده شود.

۳- الکترود مرجع مس- سولفات مس میدانی، از طریق اندازه‌گیری پتانسیل آن نسبت به یک الکترود مس- سولفات مس نو، تمیز و استاندارد که به تازگی با آب مقطر و کریستال‌های سولفات مس پر شده، کالیبره شود. الکترود مرجع نقره- کلرید نقره میدانی نیز با همین روش توسط یک الکترود مرجع نقره- کلرید نقره نو و تمیز کالیبره می‌شود. اگر اختلاف پتانسیل این الکترودها بیشتر از ۵ میلی‌ولت باشد، الکترود مرجع میدانی باید تعویض گردد.

۴- قطب مثبت ولت‌متر به سازه و قطب منفی آن به الکترود مرجع متصل شود. پتانسیل سازه نسبت به الکترود در این حالت باید منفی باشد.

۵- در زمین‌های یخ زده، یا خاک‌های بسیار خشک و حاوی سنگریزه و ماسه باید به سطح زمین آب اضافه گردد یا اینکه یک اسفنج مرطوب به الکترود مرجع متصل شود. در شرایط بدتر می‌توان از یک فصل مشترک با چند امپدانس ورودی یا ولت‌متری با چند امپدانس ورودی استفاده کرد. اندازه‌گیری‌های پتانسیل در حداقل دو امپدانس ورودی باید یکسان باشند؛ در غیر این صورت، مقاومت مدار الکترود مرجع باید بیشتر کاهش داده شود.

۶- تمام روش‌ها و داده‌های خام به کار رفته برای بهبود کیفیت داده‌ها، مستند شوند.

۷- فرکانس اندازه‌گیری‌های پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت تعیین شود.

۸- تمام منابع جریان DC مؤثر بر روی سیکل‌های on و off قطع شود.

۹- در صورت امکان یک دیتالاگر ثابت نصب گردد تا اطمینان حاصل شود که عملکرد قطع‌کننده‌های جریان ادامه داشته و به‌صورت هم‌زمان کار می‌کنند. همچنین اگر در طول دوره زمانی قطع جریان، فرایند دپلاریزاسیون رخ دهد، دیتالاگر ثابت این موضوع را نشان خواهد داد.

۱۰- پتانسیل‌های لحظه خاموش (instant off) سازه نسبت به الکترولیت در حالتی اندازه‌گیری شود که تمام منابع جریان DC مؤثر قطع شده‌اند.

۱۱- مقادیر پتانسیل لحظه خاموش (instant off)، بین ۰/۶ ثانیه تا ۱ ثانیه پس از قطع شدن جریان ثبت شود. در صورت استفاده از ولت‌متر دیجیتال، دومین عدد نشان داده شده پس از قطع جریان، ثبت گردد، زیرا عدد اول ممکن است میانگین مقادیر در حالت افت از پتانسیل on باشد.

۱۲- برای خط لوله‌ها، فاصله ایستگاه‌های تست اندازه‌گیری‌های پتانسیل باید تقریباً ۳کیلومتر باشد، اما هرقدر فاصله بین این ایستگاه‌ها کمتر باشد، داده‌های به دست آمده دقیق‌تر خواهند بود.

۱۳- باید مجموعه کاملی از داده‌ها به دست بیاید که می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- تست‌های پتانسیل□□□□□ در حالی انجام گردد که تمام منابع جریان مؤثر قطع شده‌اند، تا معیار حفاظتی پتانسیل پلاریزه بررسی شود. تمام منابع جریان ذکر شده در اینجا، شامل منابع جریان □□ (رکتیفایرها، ژنراتورهای ترموالکتریکی و ژنراتورهای خورشیدی، بادی و دیزلی)، آندهای فداشونده و بادها می‌باشند□

۲۴۲ | اطلس حفاظت کاتدی

- درصورتی‌که امکان قطع منابع جریان وجود داشته باشد، پتانسیل on سازه نسبت به الکترولیت اندازه‌گیری شود. در این حالت، برای پیش‌بینی مقدار خطای ناشی از افت اهمی (IR drop)، نیاز به انجام تست‌های اضافی است.
- انجام تست‌های پتانسیل پلاریزاسیونی (ترجیحاً CIS) توصیه می‌شود که در آنها پس از انجام تست پتانسیل on-off، جریان قطع می‌گردد.
- خروجی‌های منبع جریان DC و داده‌های جریان باند.
- اندازه‌گیری پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت در دو سمت اتصالات عایق الکتریکی، در سازه‌های خارجی و در کیسینگ‌های جاده یا ریل آهن.
- ولتاژهای AC سازه نسبت به زمین باید قبل از انجام تست‌های پتانسیل DC سازه نسبت به الکترولیت اندازه‌گیری شود.
- مقایسه داده‌های ارزیابی نتایج آخرین ارزیابی برای بررسی اینکه منطقه تست شده، همان ناحیه مورد نظر بوده است یا نه.

۱۴- پتانسیل‌های on سازه نسبت به الکترولیت:

- فرکانس اندازه‌گیری‌های پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت تعیین شود.
- پتانسیل‌های on سازه نسبت به الکترولیت اندازه‌گیری شود و هرکدام از مکان‌های اندازه‌گیری با رنگ یا یک میله به نحوی علامت‌گذاری گردد که در تست‌های بعدی، الکترود مرجع دقیقاً در همان مکان قرار داده شود.
- مقدار افت اهمی در هرکدام از نقاط اندازه‌گیری پتانسیل on سازه نسبت به الکترولیت تعیین شود.
- پتانسیل پلاریزه واقعی از طریق حذف خطای اهمی از پتانسیل on اندازه‌گیری شده، محاسبه شود.

۱۵- پتانسیل‌های on-off سازه نسبت به الکترولیت:

- تمام منابع جریان DC شامل تمام منابع جریان حفاظت کاتدی و اتصالات به سازه قطع شود. برای تعیین تأثیر یک منبع جریان DC یا یک اتصال به سازه، فقط آن را قطع کرده و تغییر در پتانسیل را در ناحیه مورد تست یادداشت شود.
- پتانسیل حالت روشن (on)، درست قبل از قطع جریان و پتانسیل حالت خاموش (off)، درست پس از قطع جریان ثبت شود. در صورت استفاده از ولت‌متر دیجیتال، دومین عدد قرائت شده پس از قطع جریان، ثبت گردد.
- در صورت استفاه از دیتالاگر برای حذف جهش ولتاژ (اسپایک[225])، عدد ثبت شده پس از ۰/۶ ثانیه بعد از قطع جریان به‌عنوان پتانسیل حالت خاموش (off) در نظر گرفته شود.

۱۶- پتانسیل‌های دپلاریزاسیون:

- فرکانس اندازه‌گیری پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت تعیین شود.
- تمام منابع جریان DC مؤثر بر سیکل on و off قطع شده و زمان هر سیکل، ثبت گردد.
- پتانسیل‌های off-on سازه نسبت به الکترولیت اندازه‌گیری شود و هرکدام از مکان‌های اندازه‌گیری با رنگ یا یک میله به نحوی علامت‌گذاری گردد که در تست‌های بعدی پتانسیل دپلایزه، الکترود مرجع دقیقاً در همان مکان قرار داده شود.

---

[225] - Spike

- تمام منابع جریان قطع شود و پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت در طول زمان، تا وقتی ثبت گردد که پتانسیل‌ها نسبتاً پایدار شوند. ممکن است در بعضی از موارد، این کار تا چندین روز طول بکشد. استفاده از یک دیتالاگر ثابت، انجام این فرایند را تسهیل خواهد کرد.
- وقتی که پتانسیل‌ها پایدار باشند، پتانسیل دپلایزه سازه نسبت به الکترولیت در همان مکان‌هایی که ارزیابی پتانسیل سازه انجام شد، اندازه‌گیری شود.
- میزان دپلاریزاسیون (پلاریزاسیون) در هرکدام از نقاط اندازه‌گیری با استفاده از معادله زیر محاسبه شود.

$$\Delta V_p = E_{off} - E_{depol}$$

که ΔV_p میزان دپلاریزاسیون (پلاریزاسیون) (برحسب ولت)، E_{off} پتانسیل لحظه خاموش سازه نسبت به الکترولیت (برحسب ولت)، E_{depol} پتانسیل دپلاریزه سازه نسبت به الکترولیت است.

تست‌های جریان سرگردان (تداخل)

۱- با توجه به بخش‌های قبلی تعیین شود که آیا سازه مورد نظر، تحت تأثیر جریان سرگردان DC دینامیک قرار دارد یا نه.

۲- پتانسیل سازه خارجی در جاهایی که احتمال تداخل آن با اتصالات حفاظت کاتدی وجود دارد، اندازه‌گیری شود. در مناطقی که سازه‌های خارجی تحت تأثیر قرار گرفته‌اند، نمای شماتیکی از چیدمان آنها به همراه داده‌های مربوطه رسم گردد.

۳- درصورتی‌که ایستگاه تستی برای سازه خارجی وجود نداشته باشد، برای بررسی اثر سیستم حفاظت کاتدی، مکان‌های نزدیک به منطقه تداخل احتمالی تست شود.

۴- وجود اتصالات (باندها) با سازه‌های خارجی شامل جریان و جهت آن، باید ثبت شود.

۵- دقت پتانسیل‌های مناطق نزدیک به هم که بیشتر از ۲۰٪ با یکدیگر تفاوت دارند مورد بررسی قرار گیرد. تغییرات غیرمعمولی پتانسیل ممکن است نشان‌دهنده تماس نامناسب الکترود مرجع با خاک باشد.

۶- جریان تلوریک یا جریان‌های سرگردان دینامیک دیگر که نیاز به کالیبراسیون دارند را می‌توان به‌صورت نوسانات بیشتر از ۲۰ میلی‌ولت (پیک تا پیک) پتانسیل off در طول زمان تست تعریف کرد.

۷- اگر جریان تلوریک یا جریان سرگردان دینامیک دیگری تشخیص داده شود، دو دیتالاگر در فاصله یک چهارم و سه چهارم از بخش تحت تست، نصف شود تا پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت در طول زمان (در صورت امکان در طی دوره زمانی بین ۲۲ تا ۲۴ ساعت) ثبت شود.

۸- روش دیگر بدین صورت است که پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت، به‌صورت دستی اندازه‌گیری شود و مقدار و زمان هرکدام از قرائت‌ها ثبت گردد. سپس نمودار این نتایج برای مشاهده روند تغییرات رسم گردد.

۹- اگر بخش تحت تست، کوچک‌تر از ۱/۶ کیلومتر باشد، می‌توان از یک دیتالاگر در محل تست استفاده کرد.

۱۰) پتانسیل تمام ایستگاه‌های تست، با دیتالاگر دیگری به‌مدت ۵ دقیقه ثبت شود.

بررسی دلایل ناکافی بودن حفاظت کاتدی

۱- در صورت امکان، منبع مشکلات موجود در طول مرحله ارزیابی تنظیمی مشخص شود.

۲- منبع جریان DC بازرسی شده و با جریان و ولتاژهای DC مورد نظر مقایسه گردد. اگر خروجی‌های منابع جریان، تفاوت قابل توجهی با مقادیر مورد نظر داشته باشند، مراحل زیر تکمیل شوند:

- اگر ولتاژ خروجی □□ بین ۰ تا ۲ ولت و ولتاژ خروجی □□، صفر باشند، احتمالاً مشکل از رکتیفایر یا منبع تغذیه □□ رکتیفایر است. با خاموش کردن منبع تغذیه □□ و قطع یک کابل □□، تأیید شود که ولتاژ □□ حدود ۲ ولت، از منبع تغذیه است. اگر عدد ولتاژ □□ در حدود ۲ ولت باقی بماند، ناشی از منبع تغذیه □□ است. اما اگر این عدد به «۰» ولت کاهش پیدا کند، ناشی از اختلاف پتانسیل گالوانیک بین سازه و آند یا کربن در زغال کک است□
- اگر خروجی ولتاژ، نرم باشد، اما خروجی جریان □□ صفر باشد، احتمالاً مشکل در کابل‌ها، آندها یا اتصالات خارجی به رکتیفایر می‌باشد□
- اگر ولتاژ و جریان تقریباً به اندازه نصف مقادیر نرمال‌شان باشند، احتمالاً مشکل ناشی از خرابی یک دیود می‌باشد که موج رکتیفایر را نصف می‌کند□
- اگر احتمال وجود مشکل در رکتیفایر یا مدار □□ خارجی وجود داشته باشد، به قسمت «بازرسی، تنظیم و رفع عیب رکتیفایر» مراجعه شود. قبل از انجام تنظیمات سیستم، باید عیوب موجود کاملاً برطرف شوند.

۳- تمام اتصالات DC بازرسی شده و در صورت وجود عیب، تعمیر شوند.

۴- تمام اتصالات عایق الکتریکی تست شوند.

۵- تمام کیسینگ‌های جاده یا ریل آهن در صورت امکان تست شود تا از عایق بودن آنها اطمینان حاصل شود.

۶- اگر سیستم حفاظت کاتدی پس از اصلاح مشکلات، به عملکرد درست رسید، سپس مرحله ارزیابی تنظیمی کامل می‌شود.

۷- اگر عیوب اصلاح شود، ولی باز هم معیار حفاظت کاتدی برآورده نشود، باید تست عیب‌یابی (□□) انجام گیرد□

اندازه‌گیری جریان خط لوله

در صورت امکان، جریان خط لوله در فواصل مختلف اندازه‌گیری شود تا توزیع جریان در دو حالت on و off تعیین شود□

ولتاژ AC در سازه‌ها

- قبل از اندازه‌گیری پتانسیل □□ سازه نسبت به الکترولیت، ولتاژ □□ سازه نسبت به زمین اندازه‌گیری شود تا اطمینان حاصل گردد که ولتاژ خطرناکی در سیستم وجود ندارد□
- اگر ولتاژ □□ سازه نسبت به زمین، ۱۵ ولت یا بیشتر باشد، باید دستورالعمل ارائه شده در□□□□□□□□□□□□ دنبال شده و خطرات موجود به کارکنان تذکر داده شود□

□

آنالیز

معیارهای حفاظت کاتدی

۱- معیارهای حفاظت کاتدی در بخش ۶ استاندارد NACE SP0169 ذکر شده است. معیارهای مشابهی در استانداردهای ISO 15589-1 و CGA OCC-1 آمده است. دستورالعمل‌های تست برای تعیین این معیارها نیز در NACE TM0497 ذکر شده‌اند.

۲- سه معیار برای اثبات کافی بودن حفاظت کاتدی اعمالی از طریق اندازه‌گیری پتانسیل سازه‌های فولادی مدفون در خاک یا آب وجود دارد:

- پتانسیل کاتدی بدون افت اهمی حداقل ۸۵۰- میلی‌ولت (نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس اشباع). افت‌های اهمی بین الکترود مرجع و مرز سازه- الکترولیت، باعث ایجاد خطا در نتایج شده و قبل از استفاده از این معیار باید حذف شوند (همان‌گونه که در معادله زیر نشان داده شده است). استاندارد □□□□□□□□□□ درباره روش‌های ارزیابی افت اهمی که اختلاف بین پتانسیل روش (□□) و پتانسیل لحظه خاموش (□□□□□□□□□□) می‌باشد، بحث کرده است:

$$E_c = (E_{\text{on}}\text{-IR})$$

که E_c پتانسیل بدون افت اهمی (۸۵۰- میلی‌ولت یا منفی‌تر)، E_{on} پتانسیل در حالت اعمال جریان IR افت ولتاژ بین الکترود مرجع و مرز سازه- الکترولیت می‌باشند.

- پتانسیل پلاریزه حداقل ۸۵۰- میلی‌ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس اشباع. این کار با قطع تمام منابع جریان مؤثر بر سازه و اندازه‌گیری پتانسیل لحظه خاموش (□□□□□□□□□□) آن انجام می‌شود□
- حداقل ۱۰۰ میلی‌ولت پلاریزاسیون کاتدی بین سطح سازه و یک الکترود مرجع پایدار در تماس با الکترولیت. پلاریزاسیون، اختلاف پتانسیل طبیعی یا خوردگی فلز با پتانسیل لحظه خاموش (□□□□□□□□□□) آن می‌اشد (همان‌گونه که در معادلات زیر نشان داده شده است). این اختلاف پتانسیل را می‌توان در طول ایجاد پلاریزاسیون یا افت آن (پلاریزاسیون) پس از قطع تمام منابع مؤثر جریان اندازه‌گیری کرد:
- پلاریزاسیون□

$$\Delta \text{E}_p = (E_{\text{off}}\text{-E}_{\text{native}})$$

- دپلاریزاسیون:

$$\Delta \text{E}_{\text{depol}} = \left(E_{\text{off}}\text{-E}_{\text{depol}}\right)$$

ΔE_p میزان پلاریزاسیون (۱۰۰ میلی‌ولت یا بیشتر)، E_{off} پتانسیل به دست آمده با قطع لحظه‌ای تمام منابع جریان، $\Delta \text{E}_{\text{depol}}$ دپلاریزاسیون برای معیار ۱۰۰ میلی‌ولت، E_{depol} پتانسیل دپلاریزه پس از قطع جریان (میلی‌ولت) و E_{native} پتانسیل طبیعی یا خوردگی سازه قبل از اعمال حفاظت کاتدی یا پس از دپلاریزه شدن کامل آن می‌باشد.

۳- لازم است که فقط یکی از این معیارها، برآورده شوند. برای مثال اگر پتانسیل پلاریزه، منفی‌تر از ۸۵۰- میلی‌ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس باشد، ارزیابی دپلاریزاسیون نشان می‌دهد که معیار ۱۰۰ میلی‌ولت نیز برآورده شده است.

دلایل پایین بودن پتانسیل‌ها (برآورده نشدن معیارهای حفاظتی)

۱- تعدادی از دلایل متداول ناتوانی یک سیستم حفاظت کاتدی در برآورده کردن معیارهای حفاظتی، تست‌ها و روش برطرف کردن آنها در جدول ۴- ۴ آمده است.

۲- خروجی منبع DC با اطلاعات قبلی مقایسه شود. اگر مشابه بودند، اطلاعات دیگر باید مورد بازبینی قرار بگیرند.

جدول ۴- ۴ خلاصه مشخص کردن عیوب سیستم حفاظت کاتدی، تست‌ها و دلایل

	منبع جریان □□					
جزء سیستم	ولت□	آمپر	ولتاژ □□ ثانویه	پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت	عیب احتمالی	تست‌ها	راه حل
آند فداشونده	□ □ □□ □			□□	ممکن است که مشکل وجود نداشته باشد. با منفی‌تر شدن پتانسیل‌ها جریان آند کاهش خواهد یافت.	-	تعمیر
	+ □□	□		+□□	برعکس حالت بالا	تست برای بررسی اتصال کوتاه یا وجود عیب در سیستم سازه پتانسیل آند نسبت به الکترولیت اندازه‌گیری شود. تست گرادیان ولتاژ آند انجام شود. منبع □□، قطع‌کننده مدار و فیوزها تست شوند، وجود اتصالات ضعیف یا سیم‌های قطع شده در منبع تغذیه □□ بررسی گردد. علائم گرمای بیش از حد چک شوند. اگر منبع تغذیه با باتری کار می‌کند، شارژ باتری‌ها بررسی شوند.	در صورت نیاز، آندها تعویض شوند
	+ □□	□		+□□	آندها در حال خراب شدن هستند.		
منبع تغذیه □□□	۰ تا حدود ۲	۰	۰	+□□	منبع □□ خاموش است یا اجزاء منبع تغذیه □□ خراب شده‌اند. مشکل در منبع □□ یا قبل از آن		

	۰ تا حدود ۲	۰	۰	+□□	عدم وجود ولتاژ ثانویه □□ در تپ‌ها	منبع □□ و قطع‌کننده مدار تست شود.	اگر منبع □□ و قطع‌کننده مدار، درست باشند، ترانسفورمر
							چک شود. اگر مشکل از فیوز باشد، وجود اتصال کوتاه چک شود. اگر اتصال کوتاهی پیدا نشد، ولتاژ کاهش داده شده و مجدداً برق‌دار شود. در غیر این صورت، تعمیر یا تعویض گردد.
	۰ تا حدود ۲	۰	□□	+□□	فیوز در منبع جریان □□، خراب بودن عضو یک‌سوکننده اتصالات ضعیف یا کابل خراب	فیوزها، عضو یک‌سوکننده، اتصالات و کابل‌ها تست شوند.	
	در حدود □ ۰/۵	در حدود □ ۰/۵	□□	+□□	خروجی □□ نیم موج. یک بخش از مدار پل رکتیفایر، باز است. اشکال در تجهیزات اندازه‌گیری	رکتیفایر خاموش شود، اتصالات عضو یک‌سوکننده، جدا شوند و تمام دیودها یا عضوها تست شوند.	عضو (اعضاء) یک‌سوکننده تعویض شوند.
	□□□	□□□	□□	+□□		تجهیزات اندازه‌گیری کالیبره شوند.	در صورت نیاز تعویض گردد.
کابل‌های □□ / بستر آندی	□□	۰	□□	+□□	اشکال در اتصالات کابل، یا آندها	کابل تا سازه و آندها ردیابی شود. تست گرادیان ولتاژ آند انجام گردد.	تعمیر یا تعویض شود.
	□□	افت در طول زمان	□□	+□□	خراب با خشک شدن آندها	پروفیل پتانسیل در آندها تعیین شود. رکتیفایر خاموش گردد.	راه حل موقتی می‌تواند خیس کردن آندها باشد. آندها تعویض شوند. عایق یا باندها تعمیر شود. تماس با سازه خارجی قطع شود. ظرفیت سیستم حفاظت کاتدی برای جبران زوال پوشش، افزایش داده شود.
سازه	□□	□□	□□	+□□	عایق الکتریکی اتصال کوتاه شده، تماس تصادفی با سازه خارجی، باندهای خراب، زوال پوشش.	عایق الکتریکی و باندها تست شوند. اتصالات ردیابی شوند. تست هدایت پوشش انجام شود. □□ تکمیل گردد.	

راهنمای جدول (V: ولتاژ نرمال، A: جریان نرمال، P: پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت نرمال، +V: ولتاژ بزرگ‌تر از مقدار نرمال، -V: ولتاژ کمتر از مقدار نرمال، +A: جریان بزرگ‌تر از مقدار نرمال، -A: جریان کمتر از مقدار نرمال، V? و A?: قرائت‌های غیرعادی یا متغیر، +P: پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت مثبت‌تر، -P: پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت منفی‌تر)

پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت

۱- اطمینان حاصل شود که تمام پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت، در محدوده یکی از معیارهای حفاظت کاتدی قرار دارند. اگر نتایج اندازه‌گیری‌ها با معیارهای حفاظتی تطابق نداشته باشد، آنالیزی که در ادامه آمده است، تکمیل شود.

۲- پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت با داده‌های قبلی مقایسه شوند.

۳- اگر در یک خروجی جریان ثابت، مقادیر پتانسیل منفی‌تر از قبل باشند، احتمالاً اندازه سازه کاهش پیدا کرده است (به‌صورت خواسته یا ناخواسته، مثلاً از طریق باند شدن اشتباه بخش عایق یک سازه) یا اینکه یک سیستم حفاظت کاتدی که در پتانسیل الکترونگاتیوتری (منفی‌تر) قرار دارد، به سازه مورد نظر اتصال کوتاه شده است.

۴- مقادیر پتانسیل منفی‌تر از قبل در یک جریان ثابت می‌توانند نشان‌دهنده تداخل آندی نیز باشند؛ یعنی بستر آندی یک منبع جریان DC خارجی، در مجاورت سازه قرار دارد.

۵- پتانسیل‌های مثبت‌تر از قبل می‌توانند نشان‌دهنده یکی یا چند تا از مشکلات زیر باشند:

۵- ۱- پایین بودن خروجی DC حاصل از منبع جریان DC.

- خراب شدن آندها
- عدم ورود جریان □□ یا منبع انرژی به منبع تغذیه □□
- خراب شدن اجزاء منبع جریان □□
- خراب شدن کابل‌ها یا اتصالات مدار خارجی □□
- اتصال کوتاه در مدارهای □□ یا □□

۵- ۲- اتصال کوتاه در عایق‌های الکتریکی، اضافه شدن یک سازه خارجی به سازه مورد نظر و در نتیجه افزایش جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی درصورتی‌که پتانسیل سازه خارجی نسبت به سازه تحت حفاظت، مثبت‌تر باشد.

۵- ۳- اتصال کوتاه در کیسینگ‌ها، اضافه شدن سطح بیشتری از فلز بدون پوشش به سازه و بنابراین افزایش جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی.

۵- ۴- تماس سازه تحت حفاظت با سازه‌ای خارجی که در پتانسیل منفی‌تری قرار دارد، باعث جابه‌جایی پتانسیل سازه در جهت مثبت می‌شود.

۵- ۵- تخریب پوشش، منجر به افزایش جریان مورد نیاز برای رسیدن به معیار حفاظتی می‌گردد.

۵-۶ - اتصال تداخل اشتباه یا تداخل جدی از یک منبع جریان DC خارجی

جریان سرگردان دینامیک

۱- اگر جریان تلوریک یا جریان‌های سرگردان دینامیک دیگری تشخیص داده شوند، باید از یکی از روش‌هایی که در ادامه آمده، برای تصحیح آنها استفاده کرد. باید در نزدیکی دو انتهای بخش تحت تست، دیتالاگر نصب شود تا پتانسیل‌های لوله نسبت به الکترولیت برحسب زمان (در صورت امکان در طول دوره زمانی تقریباً ۲۲ ساعت) ثبت شود.

۲- اگر بخش تحت تست، کمتر از ۱/۶ کیلومتر باشد، می‌توان فقط یک دیتالاگر در آنجا نصب کرد.

۳- پتانسیل تمام ایستگاه‌های تست لوله نسبت به الکترولیت باید با یک دیتالاگر دیگر به‌مدت ۵ دقیقه ثبت شود، در غیر این صورت، پتانسیل‌های CIS به‌صورت نرمال در نظر گرفته می‌شوند.

۴- فعالیت جریان تلوریک یا جریان‌های سرگردان دینامیک دیگر که نیازمند کالیبراسیون هستند، به‌صورت نوسانات بیشتر از ۲۰ میلی‌ولت پتانسیل خاموش (off) در پیک تا پیک در طول زمان تست تعریف می‌شود.

۵- در ابتدا باید پتانسیل واقعی دیتالاگرهای ثابت در یک دوره کامل یا توسط میانگین‌گیری در طول دوره تست تعیین شود. برای هرکدام از اندازه‌گیری‌های پتانسیل در امتداد خط، اختلاف پتانسیل بین آنها و مقدار دیتالاگر ثابت در یک زمان باید تعیین شود. این اختلاف اضافه شده به اختلاف با پتانسیل واقعی در دیتالاگر ثابت، فاکتور تصحیح برای نتایج دیتالاگر پرتابل می‌باشد. سه معادله‌ای که در ادامه آمده است، برای حالت‌های زیر ارائه شده‌اند:

- اگر دو دیتالاگر ثابت به کار رود، از روش ارائه شده در معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\varepsilon_b^{'} = [\varepsilon_a^{'}(\mathrm{c\text{-}b})/\mathrm{c}] + [\varepsilon_c^{'}(\mathrm{b\text{-}a})/\mathrm{c}]$$

که در این رابطه a مکان دیتالاگر ثابت اول، b مکان دیتالاگر پرتابل، c مکان دیتالاگر ثابت دوم، ε_a' خطای پتانسیل در مکان a در زمان x، ε_b' خطا در پتانسیل در مکان b در زمان x و ε_c' خطا در پتانسیل در مکان c در زمان x می‌باشد و:

$$E_p = \mathrm{E_{p.measured}} - \varepsilon_b^{'}$$

که E_p پتانسیل واقعی در مکان دیتالاگر پرتابل و $E_{\mathrm{p.measured}}$ پتانسیل در مکان دیتالاگر پرتابل می‌باشد.

- اگر فقط از یک دیتالاگر ثابت استفاده شود، این معادله به کار می‌رود:

$$E_p = \mathrm{E}_s - \left(E_{\mathrm{sa}} - \mathrm{E_{pa}}\right)$$

که E_p پتانسیل واقعی در مکان دیتالاگر پرتابل، E_s پتانسیل واقعی در مکان دیتالاگر ثابت، E_{sa} پتانسیل دیتالاگر ثابت در زمان a در طول داده‌برداری و E_{pa} پتانسیل دیتالاگر پرتابل در زمان a در طول داده‌برداری می‌باشد.

۶- از روش‌های دیگر نیز می‌توان برای تصحیح جریان‌های سرگردان دینامیک استفاده کرد.

۷- دیتالاگر ثابت به‌عنوان ابزاری برای تأیید هم‌زمان بودن قطع شدن جریان و رخ دادن دپلاریزاسیون در طول زمان قطع جریان نیز به کار می‌رود.

قطع منبع جریان

- پروفیل‌های دیتالاگر ثابت برای حصول اطمینان از تداوم عملکرد قطع‌کننده‌های جریان در تمام رکتیفایرهای مؤثر مرور شود.
- مقادیر پتانسیل‌هایی مشخص شود که ممکن است تحت تأثیر عملکرد نادرست یک قطع‌کننده، تحت تأثیر قرار گرفته باشند.
- مقدار دپلاریزاسیون رخ داده در طول دوره قطع جریان تعیین گردد.

اندازه‌گیری جریان خط لوله

۱- روش پل جریان:

- جریان خط لوله در جاهایی که امکان‌پذیر است، محاسبه شود.
- ورود و خروج جریان برای هرکدام از بخش‌های خط لوله محاسبه شود.

۲- آمپرسنج گیره‌ای (کلمپی):

ورود و خروج جریان برای هرکدام از بخش‌های خط لوله اندازه‌گیری شود.

راندمان رکتیفایر

راندمان رکتیفایر، محاسبه شده و با داده‌های قبلی مقایسه شود.

ارزیابی برای راه‌اندازی[۲۲۶]

مقدمه

هدف از ارزیابی راه‌اندازی، حصول اطمینان از این موضوع است که تجهیزات حفاظت کاتدی جدید، طبق مشخصات طراحی قادر به فعال کردن سیستم حفاظت کاتدی و تنظیم آن برای رسیدن به معیارهای حفاظتی می‌باشند. اگر ظرفیت طراحی سیستم حفاظت کاتدی قادر به انجام این کار نباشد، برنامه‌ای برای اصلاح آن انجام خواهد شد.

ابزارها و تجهیزات

تجهیزات زیر بسته به نوع تست به کار رفته، مورد استفاده قرار می‌گیرند:

- مولتی‌متر با قابلیت اندازه‌گیری ۱ میلی‌ولت تا ۴۰ میلی‌ولت به همراه اتصالات و پروب‌های عایق.
- الکترود مرجع مس - سولفات مس.
- چک‌کننده عایق‌های الکتریکی.
- ابزار اندازه‌گیری مقاومت خاک به همراه سیم‌ها و چهار پین.

2 2 6

- مولتی‌متر شامل حالت‌های □□ (جریان متناوب)/□□ (جریان مستقیم) و اهم‌متر.
- قطع‌کننده جریان.
- آمپرسنج □□ و متناوب با جریان تست.
- باکتری و مقاومت کنترل یا منبع تغذیه □□ پرتابل.
- مشخص‌کننده مکان لوله.
- سیم‌های تست.
- ابزارهای دستی کوچک.

نکات مقدماتی

- مکان تمام منابع تغذیه □□ تعیین گردد.
- قبل از برقراری تماس با قاب رکتیفایر و بلافاصله پس از برق‌دار کردن آن، ولتاژ بین قاب و زمین اندازه‌گیری شود.
- در هنگام باز کردن قاب، احتمال وجود حیوانات و حشرات موذی در درون آن وجود دارد، بنابراین اقدامات احتیاطی انجام شود.
- رکتیفایر برای پیدا کردن دما، بو یا صداهای غیرعادی بازرسی شود و در صورت مشاهده این موارد، رکتیفایر خاموش گردد.
- قبل از نصب یک قطع‌کننده جریان یا برای تنظیم تپ‌ها، منبع تغذیه □□ خاموش گردد.
- ترمینال‌های بدون پوشش در یک محفظه قفل شده، قرار داده شوند.
- قبل از انجام اندازه‌گیری‌های حفاظت کاتدی، ولتاژ □□ سازه نسبت به زمین اندازه‌گیری شود. اگر ولتاژ □□ نسبت به زمین، برابر با بیشتر از ۱۵ ولت باشد، روش‌های ذکر شده در□□□□□□□□□□□□□□دنبال شود.
- در هنگام کار در نزدیکی خطوط برق □□ ولتاژ بالا□□□□□، مقادیر و پتانسیل‌های □□ سازه نسبت به زمین در فواصل متناوب اندازه‌گیری شود، زیرا این ولتاژها می‌توانند با تغییر هندسه و بار خط برق تغییر کنند.
- در هنگام صاعقه، کاری بر روی سازه انجام نشود.
- هنگام کار در نزدیکی فنس، اطمینان حاصل شود که ولتاژ □□ از یک خط برق □□□□ بر روی فنس القا نشده باشد.

دستورالعمل

اطلاعات مورد نیاز قبل از ارزیابی و راه‌اندازی

- اطلاعات طراحی
- نقشه‌ها
- جزئیات سازه
- مکان و جزئیات نصب سیستم حفاظت کاتدی

- نوع و مکان‌های ایستگاه‌های تست
- مکان‌ها و جزئیات اتصالات (باندها)
- مکان‌های احتمالی ولتاژ □□ خطرناک
- تداخل □□ احتمالی در طراحی
- اطلاعات عایق الکتریکی
- داده‌های کیسینگ جاده و ریل راه آهن
- اطلاعات خط لوله و پوشش

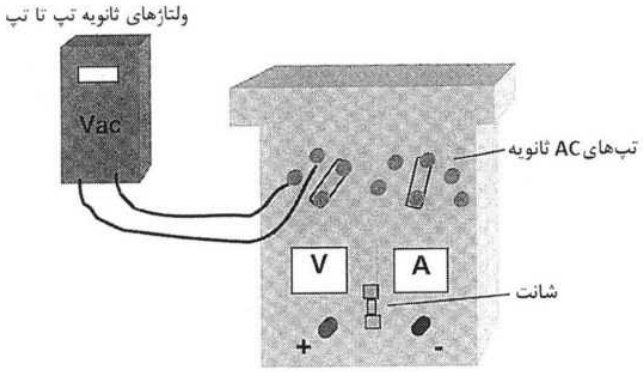
منبع جریان DC

۱- فقط افراد متخصص باید تست‌های مربوط به منابع جریان □□ را انجام دهند.

۲- داده‌های اسمی منبع تغذیه □□ ثبت گردد.

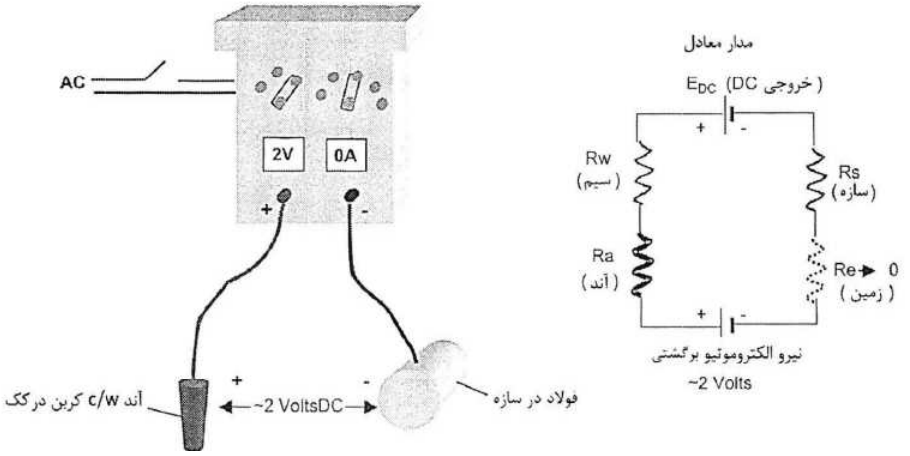
۳- تپ ثانویه ترانسفرمر - رکتیفایر

- منبع □□ بررسی شده و اطمینان حاصل شود که با مشخصات ولتاژ □□ رکتیفایر مطابقت دارد. اگر رکتیفایر، دو ورودی ولتاژ □□ داشته باشد، تأیید شود که تپ‌های □□ ورودی مطابق با منبع تغذیه □□ تنظیم شده‌اند. تا زمانی که منبع تغذیه □□با مشخصات رکتیفایر تطابق نداشته باشد، رکتیفایر نباید راه‌اندازی شود.
- ولتاژ □□ تپ تا تپ بین تپ‌های ثانویه ترانسفرمر اندازه‌گیری شود (شکل ۴-۶۳). ولتاژهای □□ بین تپ‌های ریز، باید تقریباً یکسان بوده و با ولتاژ یک تپ درشت جمع شود. تپه‌های درشت نیز باید ولتاژ □□ تقریباً یکسانی داشته باشند.
- ولتاژ □□ بین سازه و آندها اندازه‌گیری شود. با این کار اثر نیروی الکترو محرکه برگشتی□□ □□□ ناشی از اختلاف پتانسیل گالوانیک بین فلز سازه و آند یا کربن در زغال کک (که برخلاف ولتاژ □□ رکتیفایر عمل می‌کند) تعیین می‌شود (شکل ۴-۶۴).



بار خارجی قطع شده است

شکل ۴-۶۳ اندازه‌گیری ولتاژ AC ثانویه تپ تا تپ نشان داده شده است



شکل ۴-۶۴ نیروی الکترو محرکه (EMF) برگشتی بین سازه فلزی و کربن در کک نشان داده شده است. منبع جریان AC خاموش است

- برای تست مقاومت مدار خارجی، تپ‌ها به گونه‌ای تنظیم شوند که ولتاژ □□ ثانویه به اندازه ۲ تا ۴ ولت بیشتر از این مقدار شوند. راه‌اندازی شده و ولتاژ و جریان □□ اندازه‌گیری شود. مقاومت مدار خارجی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شود:

$$R_a = \frac{(E_{\mathrm{DC1}}\text{-Back EMF})}{I_{\mathrm{DC1}}}$$

که R_a مقاومت مدار آند (برحسب آند)، E_{DC1} خروجی ولتاژ DC تست (برحسب ولت)، Back EMF پتانسیل DC بین سازه و آند قبل از راه‌اندازی (برحسب ولت) و I_{DC1} خروجی جریان DC تست (برحسب آمپر) می‌باشد.

- ولتاژ □□ مورد نیاز برای جریان طراحی با استفاده از این معادله محاسبه شود:

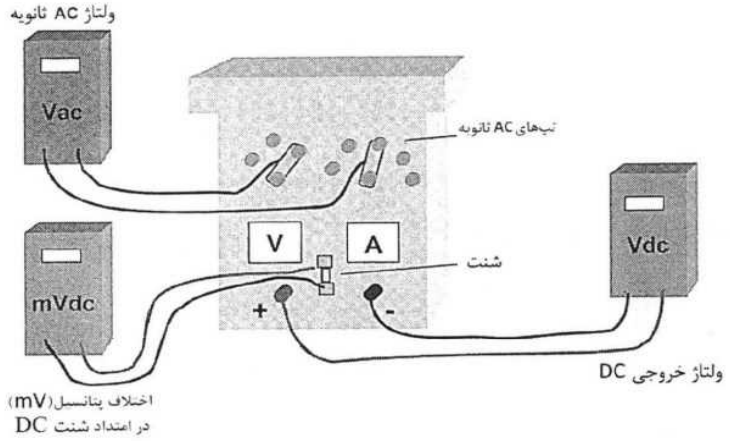
$$E_{\mathrm{DC1}} = I_{\mathrm{DC1}} R_a + \text{Back EMF}$$

که E_{DC1} خروجی ولتاژ DC مورد نیاز (برحسب ولت)، I_{DC1} خروجی جریان DC طراحی (برحسب آمپر)، R_a مقاومت مدار آند (برحسب اهم) و Back EMF پتانسیل DC بین سازه و آند قبل از راه‌اندازی (برحسب ولت) می‌باشد.

- میزان ولتاژ رکتیفایر، تقریباً در ٪۱۰ تا ٪۱۵ بیشتر از مقدار E_{DC1} تنظیم شود. ولتاژ □□ ثانویه بین تپ‌های ریز و درشت در یک رکتیفایر معمولاً در حدود ٪۱۵ بیشتر از خروجی ولتاژ □□ می‌باشد. اما این مقدار در رکتیفایرهای مختلف و در درصد عملکرد رکتیفایر متغیر می‌باشد. برای تعیین تنظیمات درست، به اندازه‌گیری‌های قبلی مراجعه شده یا پتانسیل □□ بین تپ‌های ریز و درشت اندازه‌گیری شود.

- رکتیفایر راه‌اندازی شده و خروجی‌های جریان و ولتاژ □□ اندازه‌گیری شود. تنظیمات به‌نحوی انجام شوند که خروجی جریان مورد نظر به دست آید.
- خروجی جریان و ولتاژ □□ با یک مولتی‌متر اندازه‌گیری شده و با مقادیر نشان داده شده روی پنل رکتیفایر مقایسه شوند (شکل ۴-۶۵).

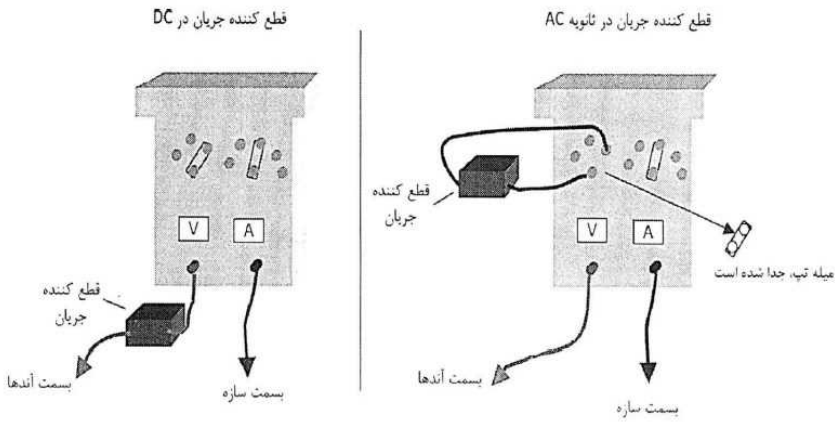
۴- داده‌های اسمی، تنظیمات جریان و ولتاژ، خروجی جریان و ولتاژ منابع جریان DC و مدارها در شرایط اولیه و تست ثبت شوند.



شکل ۴-۶۵ تست‌ها نشان داده شده است

۵- برای سیستم‌های آند فداشونده، اندازه شانت، مقدار پتانسیل در طول آن و خروجی جریان ثبت شود.

۶- در صورت امکان، یک قطع‌کننده جریان در منبع تغذیه AC، تپ‌های AC ثانویه یا خروجی DC رکتیفایر(همان‌گونه که در شکل ۴-۶۶ نشان داده شده). یا در خروجی DC دیگر منابع جریان DC نصب شود. قطع‌کننده جریان به‌صورت سری با آندهای فداشونده یا بسترهای آندی نصب شوند.



شکل ۴-۶۶ نمونه‌هایی از نصب قطع‌کننده‌های جریان نشان داده شده است

۷- اگر بیشتر از یک منبع جریان وجود داشته باشد، از قطع‌کننده‌های هم‌زمان شده[۲۷](ترجیحاً توسط GPS) استفاده شود.

۸- برای به حداقل رساندن افت پلاریزاسیون در طول زمان قطع جریان، طول سیکل on طولانی و طول سیکل off کوتاه انتخاب شده و زمان این سیکل‌ها ثبت شود.

۹- اگر حالت خاصی وجود داشت، قطع‌کننده‌های جریان باید به گونه‌ای برنامه‌ریزی شوند که پس از انتهای روز ارزیابی خاموش شده و مجدداً بلافاصله قبل از شروع ارزیابی، روشن شوند تا پلاریزاسیون بیشتر حفظ شود.

پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت

۱- برای بررسی برآورده شدن معیارهای حفاظت کاتدی، در صورت امکان، پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت در حالتی که تمام منابع جریان مؤثر خاموش شده‌اند، در تمام نقاط در دسترس به سازه اندازه‌گیری شود.

۲- از یک ولت‌متر با امپدانس بالا (حداقل ۱۰ مگااهم) به همراه الکترود مرجع مس - سولفات مس برای محیط‌های خاک یا آب دریا یا یک الکترود مرجع نقره - کلرید نقره برای محیط‌های حاوی نمک زیاد استفاده شود.

۳- الکترود مرجع مس - سولفات مس میدانی، از طریق اندازه‌گیری پتانسیل آن نسبت به یک الکترود مس - سولفات مس نو، تمیز و استاندارد که به تازگی با آب مقطر و کریستال‌های سولفات مس پر شده، کالیبره شود. الکترود مرجع نقره - کلرید نقره میدانی نیز با همین روش توسط یک الکترود مرجع نقره - کلرید نقره نو و تمیز کالیبره می‌شود. اگر اختلاف پتانسیل این الکترودها بیشتر از ۵ میلی‌ولت باشد، الکترود مرجع میدانی باید تعویض گردد.

۴- قطب مثبت ولت‌متر به سازه و قطب منفی آن به الکترود مرجع متصل شود (برای اتصال ولت‌متر به یک منبع تغذیه، از این قطبیت استفاده نشود). پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت در این حالت باید منفی باشد. می‌توان قطب منفی ولت‌متر را نیز به سازه متصل نمود؛ ولی نتایج قرائت شده در این حالت، مثبت خواهند بود.

۵- در زمین‌های یخ زده، یا خاک‌های بسیار خشک حاوی سنگریزه و ماسه باید به سطح زمین آب اضافه گردد یا اینکه یک اسفنج مرطوب به الکترود مرجع متصل شود. در شرایط بدتر می‌توان از یک فصل مشترک با چند امپدانس ورودی یا ولت‌متری با چند امپدانس ورودی استفاده کرد. اندازه‌گیری‌های پتانسیل در حداقل دو امپدانس ورود باید یکسان باشند؛ در غیر این صورت، مقاومت مدار الکترود مرجع باید بیشتر کاهش داده شود.

۶- تمام روش‌ها و داده‌های خام به کار رفته برای بهبود کیفیت داده‌ها، مستند شوند.

۷- فرکانس اندازه‌گیری‌های پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت تعیین شود.

۸- فواصل ایستگاه‌های تست در خط لوله‌ها برای اندازه‌گیری پتانسیل لوله نسبت به الکترولیت، باید در حدود ۳ کیلومتر باشد؛ اما با کوچک‌تر شدن این فواصل دقت آنالیز داده‌ها بیشتر خواهد شد.

۹- باید مجموعه کاملی از داده‌ها جمع‌آوری شود که می‌تواند شامل موارد زیر باشند:

2 2 7

۲۵۶ | اطلس حفاظت کاتدی

با انجام تست‌های پتانسیل on - off سازه نسبت به الکترولیت در حالتی که تمام منابع جریان مؤثر قطع شده باشند می‌توان برآورده شدن معیارهای حفاظت کاتدی را بررسی کرد.

- منابع جریان شامل منبع تغذیه‌های DC (رکتیفایرها، ژنراتورهای ترموالکتریک و ژنراتورهای خورشیدی، بادی و دیزلی)، آندهای فداشونده و بسترهای آندی می‌باشد.
- در جاهایی که امکان قطع کردن منابع جریان وجود نداشته باشد، می‌توان تست‌های پتانسیل on سازه نسبت به الکترولیت را انجام داد. در این حالت، برای پیش‌بینی افت اهمی باید تست‌های دیگری انجام داد.
- انجام تست‌های پتانسیل دپلاریزاسیونی (ترجیحاً ارزیابی CIS)، توصیه می‌گردد که در آنها پس از تست پتانسیل on - off، جریان قطع شده باقی می‌ماند.
- داده‌های جریان باند و خروجی‌های منبع جریان DC
- اندازه‌گیری پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت در دو سمت اتصالات عایق الکتریکی، در سازه‌های خارجی و در کیسینگ‌های جاده یا ریل راه‌آهن.
- لزوم اندازه‌گیری ولتاژهای AC سازه نسبت به زمین، قبل از انجام تست‌های پتانسیل DC سازه نسبت به الکترولیت.
- مقایسه داده‌های ارزیابی با نتایج آخرین ارزیابی برای بررسی اینکه منطقه تست شده، همان ناحیه مورد نظر بوده است یا نه.

۹- پتانسیل‌های on سازه نسبت به الکترولیت:

- فرکانس اندازه‌گیری‌های پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت تعیین شود.
- پتانسیل‌های on سازه نسبت به الکترولیت اندازه‌گیری شود و هرکدام از مکان‌های اندازه‌گیری با رنگ و یا یک میله به‌نحوی علامت‌گذاری گردد که در تست‌های بعدی، الکترود مرجع دقیقاً در همان مکان قرار داده شود.
- مقدار افت اهمی در هرکدام از نقاط اندازه‌گیری پتانسیل on سازه نسبت به الکترود تعیین شود.
- پتانسیل پلاریزه واقعی از طریق حذف خطای اهمی از پتانسیل on اندازه‌گیری شده، محاسبه شود.

۱۰- پتانسیل‌های on - off سازه نسبت به الکترولیت:

- تمام منابع جریان DC مؤثر با سیکل‌های روشن (on) و خاموش (off) مشخص قطع شوند.
- در صورت امکان، یک دیتالاگر ثابت نصب شود تا سیکل‌های قطع شده جریان ثبت شده و اطمینان حاصل گردد که تمام قطع‌کننده‌های جریان، به عملکرد خود ادامه داده و هم‌زمان باهم عمل می‌کنند. این دیتالاگر ثابت، قطع شده هم‌زمان جریان را نیز تأیید می‌کند، و اگر در طول دوره قطع جریان، دپلاریزاسیون رخ دهد، آن را نشان خواهد داد.
- پتانسیل‌های لحظه خاموش (instant off) سازه نسبت به الکترولیت درحالی‌که تمام منبع تغذیه‌های DC مؤثر قطع شده‌اند (در صورت امکان)، اندازه‌گیری شود. مقادیر پتانسیل‌های off، فقط با ذکر مدت زمان سیکل ذکر شود.

- در صورت استفاده از دیتالاگرهای سریع، برای حذف جهش ولتاژ (اسپایک)[۲۲]عدد ثبت شده بین ۰/۶ تا ۱ ثانیه بعد از قطع جریان به‌عنوان پتانسیل لحظه خاموش در نظر گرفته شود. در صورت استفاده از ولت‌متر دیجیتال، دومین عدد قرائت شده پس از قطع جریان، ثبت گردد، زیرا عدد اول ممکن است که میانگین مقادیر در حال افت از پتانسیل باشد.

۱۱- پتانسیل‌های دپلاریزاسیون:

- فرکانس اندازه‌گیری‌های پتانسیل سازه نسب به الکترولیت تعیین شود.
- تمام منابع جریان مؤثر بر سیکل و قطع شده و زمان هر سیکل، ثبت گردد.
- پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت اندازه‌گیری شود و هرکدام از مکان‌های اندازه‌گیری با رنگ یا یک میله به‌نحوی علامت‌گذاری گردد که در تست‌های بعدی پتانسیل دپلاریزه، الکترود مرجع دقیقاً در همان مکان قرار داده شود.
- تمام منابع جریان قطع شود و پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت در طول زمان، تا وقتی ثبت گردد که پتانسیل‌ها نسبتاً پایدار شوند. ممکن است که در بعضی از موارد، این کار تا چندین روز طول بکشد. استفاده از یک دیتالاگر ثابت، انجام این فرایند را تسهیل خواهد کرد.
- وقتی که پتانسیل‌ها پایدار شدند، پتانسیل دپلاریزه سازه نسبت به الکترولیت در همان مکان‌هایی که ارزیابی پتانسیل سازه انجام شد، اندازه‌گیری شود.
- میزان دپلاریزاسیون (پلاریزاسیون) در هرکدام از نقاط اندازه‌گیری با استفاده از معادله زیر محاسبه شود:

$$\Delta V_p = E_{off} - E_{depol}$$

که ΔV_p میزان دپلاریزاسیون (پلاریزاسیون) (برحسب ولت)، E_{off} پتانسیل لحظه خاموش سازه نسبت به الکترولیت (برحسب ولت)، E_{depol} پتانسیل دپلاریزه سازه نسبت به الکترولیت می‌باشد.

تست‌های جریان سرگردان DC (تداخل)

۱- با توجه به بخش‌های قبلی تعیین شود که آیا سازه مورد نظر، تحت تأثیر جریان سرگردان دینامیک قرار دارد یا نه.

۲- پتانسیل سازه خارجی در جاهایی که احتمال تداخل آن با اتصالات حفاظت کاتدی وجود دارد، اندازه‌گیری شود. در مناطقی که سازه‌های خارجی تحت تأثیر قرار گرفته‌اند، نمای شماتیکی از چیدمان آنها به همراه داده‌های مربوطه رسم گردد.

۳- درصورتی‌که ایستگاه تستی برای سازه خارجی وجود نداشته باشد، برای بررسی اثر سیستم حفاظت کاتدی، مکان‌های نزدیک به منطقه تداخل احتمالی تست شود.

۴- وجود اتصالات (باندها) با سازه‌های خارجی شامل جریان و جهت آن، باید ثبت شود.

۵- دقت پتانسیل‌های مناطق نزدیک به هم که بیشتر از ٪۲۰ با یکدیگر تفاوت دارند مورد بررسی قرار گیرد. تغییرات غیرمعمول پتانسیل ممکن است نشان‌دهنده تماس نامناسب الکترود مرجع با خاک باشد.

2 2 8

۶- جریان تلوریک یا جریان‌های سرگردان دینامیک دیگر که نیاز به کالیبراسیون دارند را می‌توان به‌صورت نوسانات بیشتر از ۲۰ میلی‌ولت (پیک تا پیک) پتانسیل□□□ در طول زمان تست تعریف کرد.

۷- اگر جریان تلوریک یا جریان سرگردان دینامیک دیگری تشخیص داده شود، دو دیتالاگر در فاصله یک چهارم و سه چهارم از بخش تحت تست، نصب شود تا پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت در طول زمان (در صورت امکان در طی دوره زمانی بین ۲۲ تا ۲۴ ساعت) ثبت شود.

۸- روش دیگر بدین صورت است که پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت، به‌صورت دستی اندازه‌گیری شود و مقدار و زمان هرکدام از قرائت‌ها ثبت گردد. سپس نمودار این نتایج برای مشاهده روند تغییرات رسم گردد.

۹- اگر بخش تحت تست، کوچک‌تر از ۱/۶ کیلومتر باشد، می‌توان از یک دیتالاگر در محل تست استفاده کرد.

۱۰- پتانسیل تمام ایستگاه‌های تست، با دیتالاگر دیگری به‌مدت ۵ دقیقه ثبت شود.

بررسی علت ناکافی بودن حفاظت کاتدی

۱- در صورت امکان، منبع مشکلات موجود در طول مرحله ارزیابی تنظیمی مشخص شود.

۲- منبع جریان □□ بازرسی شده و با جریان و ولتاژهای □□ مورد نظر مقایسه گردد. اگر خروجی‌های منابع جریان، تفاوت قابل توجهی با مقادیر مورد نظر داشته باشند، مراحل زیر تکمیل شوند:

- اگر ولتاژ خروجی □□ بین ۰ تا ۲ ولت و ولتاژ خروجی □□ صفر باشند، احتمالاً مشکل از رکتیفایر یا منبع تغذیه □□ رکتیفایر است. با خاموش کردن منبع تغذیه □□ و قطع یک کابل□□ ، تأیید شود که ولتاژ □□ حدود ۲ ولت، از منبع تغذیه است. اگر عدد ولتاژ □□ در حدود ۲ ولت باقی بماند، ناشی از منبع تغذیه □□ است. اما اگر این عدد به صفر ولت کاهش پیدا کند، ناشی از اختلاف پتانسیل گالوانیک بین سازه و آند یا کربن در زغال کک است.
- اگر خروجی ولتاژ، نرمال باشد، اما خروجی جریان □□ صفر باشد، احتمالاً مشکل در کابل‌ها، آندها یا اتصالات خارجی به رکتیفایر می‌باشد.
- اگر ولتاژ و جریان تقریباً به اندازه نصف مقادیر نرمال باشند، احتمالاً مشکل ناشی از خرابی یک دیود می‌باشد که موج رکتیفایر را نصف می‌کند.
- اگر احتمال وجود مشکل در رکتیفایر با مدار □□ خارجی وجود داشته باشد، به بخش «بازرسی، تنظیم و رفع عیب رکتیفایر» مراجعه شود. قبل از انجام تنظیمات سیستم، باید عیب‌های موجود کاملاً برطرف شوند.

۳- تمام اتصالات DC بازرسی شده و در صورت وجود عیب، تعمیر شوند.

۴- تمام اتصالات عایق الکتریکی تست شوند.

۵- تمام کیسینگ‌های جاده یا ریل راه‌آهن در صورت امکان تست شود تا از عایق بودن آنها اطمینان حاصل شود.

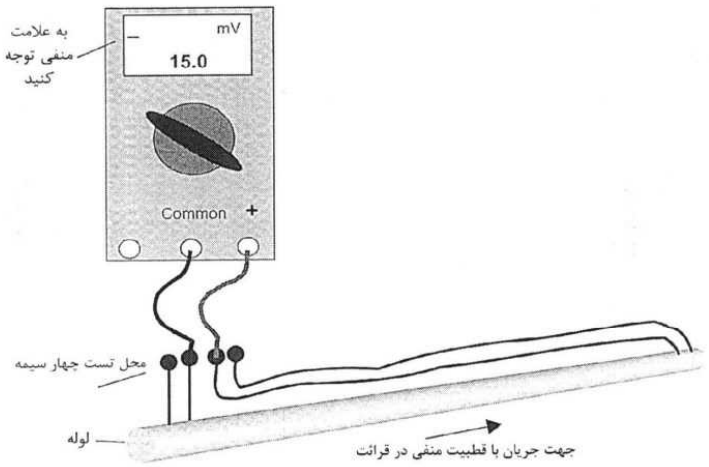
۶- اگر سیستم حفاظت کاتدی پس از اصلاح مشکلات، به عملکرد درست رسید، سپس مرحله ارزیابی تنظیمی کامل می‌شود.

۷- اگر عیب‌ها اصلاح شود، ولی باز هم معیار حفاظت کاتدی برآورده نشود، باید تست عیب‌یابی (DC) انجام گیرد.

اندازه‌گیری‌های جریان خط لوله

۱- در صورت امکان، جریان خط لوله در فواصل مختلف اندازه‌گیری شود تا توزیع جریان در دو حالت□□ و□□□ تعیین شود.

۲- اگر پل‌های جریان وجود داشته باشد، افت اهمی و قطبیت در امتداد سیم‌های یک پل دو سیمه یا داخل سیم‌های یک پل چهار سیمه (شکل ۴-۶۷) در دو حالت□□ و□□□ اندازه‌گیری شود.



شکل ۴-۶۷ اندازه‌گیری پل جریان جهت محاسبه جریان خط لوله نشان داده شده است

۳- در جاهایی که خط لوله به روی سطح زمین می‌رسد (aboveground)، جریان خط لوله توسط یک آمپرسنج گیره‌ای (کلمپی) اندازه‌گیری شود. این اندازه‌گیری باید در دو حالت جریان خاموش (off) و جریان روشن (on) در جاهایی که خط لوله وجود داشته و وارد زمین می‌شود نیز انجام شود تا میزان جریان ورودی به سازه در بین این مناطق (منطقه ورود و خروج لوله از زمین) مشخص گردد.

ولتاژ AC در سازه‌ها

- قبل از اندازه‌گیری پتانسیل□□ سازه نسبت به الکترولیت، ولتاژ□□ سازه نسبت به زمین اندازه‌گیری شود تا اطمینان حاصل گردد که ولتاژ خطرناکی در سیستم وجود ندارد.
- اگر ولتاژ□□ سازه نسبت به زمین، ۱۵ ولت یا بیشتر باشد، باید دستورالعمل ارائه شده در□□□□□□ □□□□ دنبال شده و خطرات موجود به کارکنان تذکر داده شود.

آنالیز

معیارهای حفاظت کاتدی

۱- معیارهای حفاظت کاتدی در بخش ۶ استاندارد [redacted] ذکر شده است. معیارهای مشابهی در استانداردهای [redacted] آمده است. دستورالعمل‌های تست برای تعیین این معیارها نیز در [redacted] ذکر شده‌اند.

۲- سه معیار برای پتانسیل حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی مدفون در خاک یا آب وجود دارد:

- پتانسیل کاتدی بدون افت اهمی حداقل ۸۵۰- میلی‌ولت (نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس اشباع). افت‌های اهمی بین الکترود مرجع و مرز سازه - الکترولیت، باعث ایجاد خطا در نتایج شده و قبل از استفاده از این معیار باید حذف شوند (همان‌گونه که در معادله زیر نشان داده شده است). استاندارد [redacted] درباره روش‌های ارزیابی افت اهمی که اختلاف بین پتانسیل روشن [redacted] و پتانسیل لحظه خاموش [redacted] می‌باشد، بحث کرده است:

$$E_c = (E_{\text{on}}\text{-IR})$$

که E_c پتانسیل بدون افت اهمی (۸۵۰- میلی‌ولت یا منفی‌تر)، E_{on} پتانسیل در حالت اعمال جریان و IR افت ولتاژ بین الکترود مرجع و مرز سازه - الکترولیت می‌باشند.

- پتانسیل پلاریزه حداقل ۸۵۰- میلی‌ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس اشباع. این کار با قطع تمام منابع جریان مؤثر بر سازه و اندازه‌گیری پتانسیل لحظه خاموش [redacted] آن انجام می‌شود.
- حداقل ۱۰۰ میلی‌ولت پلاریزاسیون کاتدی بین سطح سازه و یک الکترود مرجع پایدار در تماس با الکترولیت. پلاریزاسیون، اختلاف پتانسیل طبیعی یا خوردگی فلز با پتانسیل لحظه خاموش [redacted] آن می‌باشد (همان‌گونه که در دو معادله زیر نشان داده شده است). این اختلاف پتانسیل را می‌توان در طول ایجاد پلاریزاسیون یا افت آن (دپلاریزاسیون) پس از قطع تمام منابع مؤثر جریان اندازه‌گیری کرد:
- پلاریزاسیون:

$$\Delta\text{E}_p = (E_{\text{off}}\text{-E}_{\text{native}})$$

- دپلاریزاسیون

$$\Delta\text{E}_{\text{depol}} = \left(E_{\text{off}}\text{-E}_{\text{depol}}\right)$$

ΔE_p میزان پلاریزاسیون (۱۰۰ میلی‌ولت یا بیشتر)، E_{off} پتانسیل به دست آمده با قطع لحظه‌ای تمام منابع جریان، $\Delta\text{E}_{\text{depol}}$ دپلاریزاسیون برای معیار ۱۰۰ میلی‌ولت، E_{depol} پتانسیل دپلاریزه پس از قطع جریان (میلی‌ولت) و E_{native} پتانسیل طبیعی یا خوردگی سازه قبل از اعمال حفاظت کاتدی یا پس از دپلاریزه شدن کامل آن می‌باشد.

۳- لازم است که فقط یکی از این معیارها، برآورده شوند. برای مثال اگر پتانسیل پلاریزه، منفی‌تر از ۸۵۰- میلی‌ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس باشد، ارزیابی دپلاریزاسیون نشان می‌دهد که معیار ۱۰۰ میلی‌ولت نیز برآورده شده است.

دلایل پایین بودن پتانسیل‌ها (برآورده نشدن معیارهای حفاظتی)

۱- تعدادی از دلایل متداول ناتوانی یک سیستم حفاظت کاتدی در برآورده کردن معیارهای حفاظتی، تست‌ها و روش برطرف کردن آنها در جدول ۴-۵ آمده است.

۲- خروجی منبع □□ با اطلاعات قبلی مقایسه شود. اگر مشابه بودند، اطلاعات دیگر باید مورد بازبینی قرار گیرند.

جدول ۴-۵ خلاصه مشخص کردن عیوب سیستم حفاظت کاتدی، تست‌ها و دلایل

	منبع جریان □□						
جزء سیستم	ولت	آمپر	ولتاژ □□ ثانویه	پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت	عیب احتمالی	تست‌ها	راه حل
آند فداشونده		□□		□□□	ممکن است که مشکلی وجود نداشته باشد. با منفی‌تر شدن پتانسیل‌ها، جریان آند کاهش خواهد یافت.	-	تعمیر
		□□		□□	برعکس حالت بالا	تست برای بررسی اتصال کوتاه یا وجود عیب در سیستم سازه پتانسیل آند نسبت به الکترولیت اندازه‌گیری شود. تست گرادیان ولتاژ آند انجام شود. منبع □□، قطع‌کننده مدار و فیوزها تست شوند، وجود اتصالات ضعیف یا سیم‌های قطع شده در منبع	در صورت نیاز، آندهای تعویض شوند.
		□□		□□	آندها در حال خراب شدن هستند.		
منبع تغذیه □□	۰ تا حدود ۲	۰	۰	□□	منبع □□ خاموش است یا اجزاء منبع تغذیه □□ خراب		علت عیب تأیید شده و قبل از برق‌دار شدن
					شده‌اند. مشکل در منبع تغذیه □□ یا قبل از آن.	تغذیه □□ بررسی گردد. علائم گرمای بیش از حد چک شوند. اگر منبع تغذیه با باتری کاری می‌کند، شارژ باتری‌ها بررسی شوند.	مجدد، تصحیح گردد.
	۰ تا حدود ۲	۰	۰	□□	عدم وجود ولتاژ ثانویه □□ در تپ‌ها	منبع □□ و قطع‌کننده مدار تست شود.	اگر منبع □□ و قطع‌کننده مدار، درست باشند، ترانسفورمر چک شود.

	۰تا حدود ۲	۰	□□		فیوز در منبع جریان □□، خراب بودن عضو یک‌سوکننده، اتصالات ضعیف یا کابل خراب	فیوزها، عضو یک‌سوکننده، اتصالات و کابل‌ها تست شوند.	اگر مشکل از فیوز باشد، وجود اتصال کوتاه چک شود. اگر اتصال کوتاهی پیدا نشد، ولتاژ کاهش داده شده و مجدداً برق‌دار شود. در غیر این صورت، تعمیر یا تعویض گردد.
	در حدود □ ۰/۵	در حدود □ ۰/۵	□□	□□□	خرجی □□ نیم موج. یک بخش از مدار پل رکتیفایر، باز است.	رکتیفایر خاموش شود، اتصالات عضو یک‌سوکننده، جدا شوند و تمام دیودها یا عضوها تست شوند.	عضو (اعضاء) یک‌سوکننده تعویض شوند.
	□ ؟	□ ؟	□	□	اشکال در تجهیزات اندازه‌گیری	تجهیزات اندازه‌گیری کالیبره شوند.	در صورت نیاز تعویض گردد.
کابل‌های □□/ بستر آندی	□□	۰	□	□□	اشکال در کابل، اتصالات یا آندها	کابل تا سازه و آندها ردیابی شود. تست گرادیان ولتاژ آند انجام گردد.	تعمیر یا تعویض شود
	□□	افت در طول	□	□□	خراب یا خشک	پروفیل پتانسیل در آندها تعیین	راه حل موقتی می‌تواند خیس
		زمان			شدن آندها	شود. رکتیفایر خاموش گردد.	کردن آندها باشد. آندها تعویض شوند.
سازه	□□	□□	□	□□	عایق الکتریکی اتصال کوتاه شده، تماس تصادفی با سازه خارجی، باندهای خراب، زوال پوشش.	عایق الکتریکی و باندها تست شوند. اتصالات ردیابی شوند. تست هدایت پوشش انجام شود. □□ تکمیل گردد.	عایق یا باندها تعمیر شود. تماس با سازه خارجی قطع شود. ظرفیت سیستم حفاظت کاتدی برای جبران زوال پوشش، افزایش داده شود.

راهنمای جدول: (V: ولتاژ نرمال، A: جریان نرمال، P: پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت نرمال، +V: ولتاژ بزرگ‌تر از مقدار نرمال، -V: ولتاژ کمتر از مقدار نرمال، +A: جریان بزرگ‌تر از مقدار نرمال، -A: جریان کمتر از مقدار نرمال، V ؟ و

A؟:قرائت‌های غیرعادی یا متغیر، +P: پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت مثبت‌تر، -P: پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت منفی‌تر) پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت.

۱- اطمینان حاصل شود که تمام پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت، در محدوده یکی از معیارهای حفاظت کاتدی قرار دارند. اگر نتایج اندازه‌گیری‌ها با معیارهای حفاظتی تطابق نداشته باشد، آنالیزی که در ادامه آمده است، تکمیل شود.

۲- اگر در یک خروجی جریان ثابت، مقادیر پتانسیل منفی‌تر از قبل باشند، احتمالاً اندازه سازه کاهش پیدا کرده است (به‌صورت خواسته یا ناخواسته، مثلاً از طریق باند شدن اشتباه بخش عایق یک سازه) یا اینکه یک سیستم حفاظت کاتدی در پتانسیل الکترونگاتیوتری (منفی‌تر) قرار دارد، به سازه مورد نظر اتصال کوتاه شده است.

۳- مقادیر پتانسیل‌های منفی‌تر از قبل در یک جریان ثابت می‌توانند و نشان‌دهنده تداخل آندی نیز باشند؛ یعنی بستر آندی یک منبع جریان □□ خارجی، در مجاورت سازه قرار دارد.

۴- پتانسیل‌های مثبت‌تر از قبل می‌توانند نشان‌دهنده ضعف بخشی از پوشش، اشکال در اتصالات الکتریکی، اتصال کوتاه شدن عایق‌های الکتریکی، تماس با یک سازه خارجی یا اتصال کوتاه شدن کیسینگ‌ها باشد.

جریان سرگردان دینامیک

۱- اگر جریان تلوریک یا جریان‌های سرگردان دینامیک دیگری تشخیص داده شوند، باید از یکی از روش‌هایی که در ادامه آمده، برای تصحیح آنها استفاده کرد. باید در نزدیکی دو انتهای بخش تحت تست، دیتالاگر نصب شود تا پتانسیل‌های لوله نسبت به الکترولیت برحسب زمان (در صورت امکان در طول دوره زمانی تقریباً ۲۲ ساعت) ثبت شود.

۲- اگر بخش تحت تست، کمتر از ۱/۶کیلومتر باشد، می‌توان فقط یک دیتالاگر در آنجا نصب کرد.

۳- پتانسیل تمام ایستگاه‌های تست لوله نسبت به الکترولیت باید با یک دیتالاگر به دیگر به‌مدت ۵ دقیقه ثبت شود؛ در غیر این صورت، پتانسیل‌های □□□ به‌صورت نرمال در نظر گرفته می‌شوند.

۴- فعالیت جریان تلوریک یا جریان‌های سرگردان دینامیک دیگر که نیازمند کالیبراسیون هستند، به‌صورت نوسانات بیشتر از ۲۰ میلی‌ولت پتانسیل خاموش□□□□ در پیک تا پیک در طول زمان تست تعریف می‌شود.

۵- در ابتدا باید پتانسیل واقعی دیتالاگرهای ثابت در یک دوره کامل یا توسط میانگین‌گیری در طول دوره تست تعیین شود. برای هرکدام از اندازه‌گیری‌های پتانسیل در امتداد خط، اختلاف پتانسیل بین آنها و مقدار دیتالاگر ثابت در یک زمان باید تعیین شود. این اختلاف اضافه شده به اختلاف با پتانسیل واقعی در دیتالاگر ثابت، فاکتور تصحیح برای نتایج دیتالاگر پرتابل می‌باشد. سه معادله‌ای که در ادامه آمده است، برای حالت‌های زیر ارائه شده‌اند:

- اگر دو دیتالاگر ثابت به کار رود، از روش ارائه شده در معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\varepsilon_b^{'} = [\varepsilon_a^{'}(\mathrm{c\text{-}b})/\mathrm{c}] + [\varepsilon_c^{'}(\mathrm{b\text{-}a})/\mathrm{c}]$$

که در این رابطه a مکان دیتالاگر ثابت اول، b مکان دیتالاگر پرتابل، c مکان دیتالاگر ثابت دوم، ε_a' خطای پتانسیل در مکان aدر زمان X، ε_b' خطا در پتانسیل در مکان b در زمان X، ε_c' خطا در پتانسیل در مکان c در زمان X می‌باشد و:

$$E_p = \mathrm{E_{p.measured}} - \varepsilon_b^{'}$$

که E_p پتانسیل واقعی در مکان دیتالاگر پرتابل و $E_{\text{p.measured}}$ پتانسیل در مکان دیتالاگر پرتابل می‌باشد.

- اگر فقط از یک دیتالاگر ثابت استفاده شود، معادله زیر به کار می‌رود:

$$E_p = \mathrm{E}_s - \left(E_{\text{sa}} - \mathrm{E}_{\text{pa}}\right)$$

که E_p پتانسیل واقعی در مکان دیتالاگر پرتابل، E_s پتانسیل واقعی در مکان دیتالاگر ثابت، E_{sa} پتانسیل دیتالاگر ثابت در زمان a در طول داده‌برداری و E_{pa} پتانسیل دیتالاگر پرتابل در زمان a در طول داده‌برداری می‌باشد.

۶- از روش‌های دیگر نیز می‌توان برای تصحیح جریان‌های سرگردان دینامیک استفاده کرد.

۷- دیتالاگر ثابت به‌عنوان ابزاری برای تأیید هم‌زمان بودن قطع شدن جریان و رخ دادن دپلاریزاسیون در طول زمان قطع جریان نیز به کار می‌رود.

قطع کردن[۲۹] منبع جریان DC

- یک دیتالاگر ثابت نصب گردد تا پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت مانیتور شود. پروفیل‌های دیتالاگر ثابت برای حصول اطمینان از تداوم عملکرد قطع‌کننده‌های جریان در تمام رکتیفایرهای مؤثر، مرور شود.
- مقادیر پتانسیل‌هایی مشخص شود که ممکن است تحت تأثیر عملکرد نادرست یک قطع‌کننده، تحت تأثیر قرار گرفته باشند.
- مقدار دپلاریزاسیون رخ داده در طول دوره قطع جریان تعیین گردد.

اندازه‌گیری جریان خط لوله

روش پل جریان

۱- اگر مقاومت پل جریان خط لوله معلوم باشد، جریان on و off در خط لوله در هر منطقه بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$I_{\text{span}} = \frac{V_{\text{span}}}{R_{\text{span}}}$$

که I_{span} جریان در پل جریان خط لوله (برحسب آمپر)، V_{span} افت ولتاژ در طول پل جریان (برحسب ولت) و R_{span} مقاومت پل جریان (برحسب اهم) می‌باشد.

۲- اگر کالیبراسیون پل جریان خط لوله معلوم باشد، جریان on و off خط لوله در هر منطقه بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$I_{\text{span}} = \mathrm{mV}_{\text{span}} \times \mathrm{CF}_{\text{span}}$$

که I_{span} جریان در پل جریان خط لوله (برحسب آمپر)، $\mathrm{mV}_{\text{span}}$ افت ولتاژ در امتداد پل جریان (برحسب میلی‌ولت) و $\mathrm{CF}_{\text{span}}$ فاکتور کالیبراسیون پل جریان (آمپر بر میلی‌ولت) می‌باشند.

آمپرسنج گیره‌ای (کلمپی)

میانگین جریان اندازه‌گیری شده در دو جهت را محاسبه کرده و جهت واقعی جریان را نشان می‌دهد.

2 [illegible] 2 9

ورود جریان

ورود جریان بین مکان‌های اندازه‌گیری جریان در خط لوله محاسبه شود. جریان معمولاً در جهتی بوده که به‌سمت نزدیک‌ترین منبع جریان اشاره دارد، و با نزدیک شدن به آن افزایش پیدا می‌کند.

نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی

به منظور افزایش عمر، ایمنی و مطمئن‌سازی سیستم‌های حفاظت کاتدی، این سیستم‌ها باید به طور اصولی بازرسی، مراقبت و نگهداری شوند. در آنالیز اقتصادی اولیه در زمان انتخاب نوع سیستم‌های حفاظت کاتدی، هزینه‌های بازرسی، مانیتورینگ و نگهداری این سیستم‌ها نیز باید لحاظ شوند.

نگهداری و مانیتورینگ الزامی ادواری

اثرات حفاظتی سیستم‌های حفاظت کاتدی بر سازه‌ها با گذشت زمان تغییر می‌کند. با مصرف آندهای فداشونده و آندهای سیستم اعمال جریان، خروجی جریان آندها نیز کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش حفاظت این سیستم‌ها می‌شود. فرسوده شدن عایق کابل‌ها و اتصالات منجر به افزایش مقاومت در مدار در سیستم‌های حفاظت کاتدی شده که آن نیز باعث کاهش سطح حفاظت بر سازه‌ها می‌شود. خروجی یک‌سوکننده‌ها با پیر شدن المان‌های یک‌سوکنندگی در آنها کاهش می‌یابد یا در اثر آسیب‌های الکتریکی کاملاً متوقف می‌شود. شرایط محیطی در اطراف سازه‌های تحت حفاظت با تغییرات ورودی و خروجی آب در محیط‌ها تغییر می‌کند، برای مثال اگر مناطق اطراف آندها را با آسفالت بپوشانیم، میزان رطوبت موضعی خاک کاهش خواهد یافت. نصب و راه اندازی سیستم‌های جدید حفاظت کاتدی در کنار سازه‌های تحت حفاظت کاتدی یا ایجاد هرگونه تغییرات بر سازه‌های موجود تحت حفاظت کاتدی باعث به وجود آمدن تداخل در این سیستم‌ها می‌شود.

اطلاعات طراحی مورد نیاز برای اجرا و نگهداری مطلوب سیستم‌ها

به منظور آنکه یک سیستم حفاظت کاتدی به طور مؤثر و مفید بازرسی و نگهداری شود باید تمام پارامترهای طراحی آن سیستم و نقشه‌های رسم شده با جزئیات در اختیار باشد.

نقشه‌ها

باید تمام نقشه‌های رسم شده از سیستم‌های حفاظت کاتدی به انضمام تمام نقشه‌های رسم شده از سازه‌های اطراف آن سیستم تحت حفاظت کاتدی که می‌توانند تداخل ایجاد کنند در اختیار قرار گیرند. نقشه‌های سیستم‌های حفاظت کاتدی باید شامل جزئیات و موقعیت تمام ایستگاه‌های آزمایش، موقعیت و نوع تمام آندها و یک‌سوکننده‌ها و موقعیت تمام اتصالات و فلنج‌های عایق باشد. این نقشه‌ها باید به طور ادواری بروزرسانی شوند تا تمام تغییرات ایجاد شده در سیستم‌ها به همراه آخرین وضعیت سازه تحت حفاظت و سازه‌های همسایه آن مشخص گردد.

اطلاعات سیستم

باید پارامترهای طراحی سیستم که در پایین آورده می‌شود، ثبت شوند و به همراه نقشه‌ها نگهداری شوند تا به طور صحیح و اصولی آن سیستم مانیتور و نگهداری شود.

پتانسیل‌های طراحی

باید پتانسیل‌های مطلوب نشان داده شوند که در طراحی مورد نیاز بوده‌اند. در بعضی موارد، از معیارهای متفاوت برای رسیدن به حداقل پتانسیل حفاظتی در مناطق و نواحی مختلف بر سطوح سازه تحت حفاظت استفاده می‌شود.

خروجی جریان

خروجی جریان‌های طراحی برای یک‌سوکننده‌ها و یا آندهای فداشونده در سیستم‌ها باید ثبت شوند. این اطلاعات برای بازرسی‌های اولیه سیستم‌ها بسیار مفید هستند و همچنین برای توجیح و تفسیر در ناهماهنگی‌ها و پراکندگی‌های ارقام خوانده شده برای پتانسیل‌های سازه به الکترولیت مهم هستند.

تنظیم‌های سیستم و اعداد خوانده شده برای پتانسیل

تنظیم‌های اولیه سیستم و اعداد خواده شده پتانسیل بایستی ثبت شوند. تغییرات اعمال شده به سیستم‌ها همچون تنظیم‌های یک‌سوکننده باید به طور ادواری ثبت شوند. همان‌طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد، اعداد خوانده شده در هنگام تنظیم‌های اولیه سیستم و هم در خلال مونیتورینگ ادواری سیستم باید ثبت شوند تا روند اعداد خوانده شده برای پتانسیل مشخص گردد. تغییرات در ارقام قرائت شده برای پتانسیل معمولاً مهم‌تر از خود ارقام قرائت شده پتانسیل می‌باشند زیرا این تغییرات در ارقام خوانده شده است که عملکرد غیرصحیح سیستم را تعیین می‌کند.

طرز کار با یک‌سوکننده

برای آنکه تمام یک‌سوکننده‌های موجود در سیستم‌های حفاظت کاتدی به طور اصولی تنظیم، نگهداری و تعمیر شوند. باید برگه‌های طرز کار با آنها همواره در مکان مطمئن نگهداری شود. یک کپی از برگه طریقه کار با یک‌سوکننده باید بر روی دستگاه یک‌سوکننده نصب شود.

الزامات نگهداری اصولی

این الزامات به شرح ذیل هستند:

الف) ماهیانه – باید درب موجود بر روی گیج‌های اندازه‌گیری در رکتیفایر برداشته شود و سوئیچ‌های اندازه‌گیری تنظیم شوند. سپس ارقام قرائت شده در فرم مربوطه ثبت شوند و همچنین اتصالات یک‌سوکننده چک شوند.

ب) سه ماه یک‌بار – ارقام قرائت شده برای پتانسیل سازه به الکترولیت در موقعیت‌های انتخابی ثبت شوند (این موقعیت‌ها نباید کمتر از ۴ نقطه باشد). این نقاط آزمایش باید شامل نقاط زیر باشد:

۱) نقطه با پایین‌ترین پتانسیل منفی

۲) نقطه با بالاترین پتانسیل منفی

۳) دو نقطه با پایین‌ترین پتانسیل منفی متفاوت با نقاط موجود در گزینه (۱)

اعداد قرائت شده باید در فرم مربوطه ثبت شوند.

اتصالات آند به سازه در سیستم‌های حفاظت کاتدی از نوع فداشونده هر سه ماه یک‌بار بازرسی شوند.

ج) سالیانه – مصرف آندهای فداشونده و آندهای سیستم اعمال جریآنکه به طور غوطه‌ور در آب قرار گرفته‌اند مورد بازرسی قرار گیرد. ایستگاه‌های آزمایش برای وجود سیستم‌های قطع شده، اتصالات شل شده و دیگر آسیب‌ها بازرسی شوند. ارقام برای پتانسیل سازه به الکترولیت در تمام ایستگاه‌های آزمایش قرائت شده و ثبت شوند.

علاوه بر الزامات اصلی که در بالا لیست شده است، از فرصت‌های بازرسی سازه‌های مدفون برای بررسی سطوح آنها جهت یافتن آثار خوردگی و صدمات ایجاد شده بر پوشش خطوط لوله باید استفاده شود. ایجاد چنین فرصت‌هایی به‌ویژه برای سازه‌های مدفونی که امکان دسترسی آسان به آنها در حین نگهداری امکان‌پذیر نیست، بسیار مفید است. بنابراین می‌توان در نزدیکی سازه‌های تحت حفاظت، از فرصت قرار دادن سازه‌های مدفون در زمین و سپس بازرسی سطوح آنها از جهت وجود آثار خوردگی یا ایجاد صدمات بر پوشش استفاده نمود. از این فرصت‌ها باید در هنگام نصب سیستم‌های حفاظت کاتدی و بعد در هنگام نگهداری آنها استفاده نمود.

راهنمای نگهداری

راهنمای کار و طرز نگهداری

این راهنماها (MO - 306، روش‌های کنترل و پیشگیری از خوردگی و MO - 307 راهنمای نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی) چگونگی کار و نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی را ارائه می‌دهند. همچنین این راهنماها در مورد دیگر روش‌های کنترل خوردگی اطلاعات لازم را ارائه می‌دهند.

قوانین و آئین‌نامه‌های DOT

قوانین حمل و نقل در مورد روش‌های کار و برنامه‌های بازرسی و نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی مطالبی را ارائه می‌دهند.

استانداردهای NACE

استانداردهای NACE با شماره‌های RP-02-85 و RP-01-69 و RP-50-72 نیز در مورد طرز کار و برنامه‌های بازرسی، مانیتورینگ و نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی مطالبی را ارائه می‌دهند.

فصل پنجم

سیستم حفاظت کاتدی به‌وسیله آند فداشونده

حفاظت کاتدی، پتانسیل فلز را در جهت کاتدی تغییر داده و از تخریب آن جلوگیری می‌کند. دو روش برای تغییر پتانسیل فلز در جهت منفی، با فراهم آوردن یک جریان خارجی، وجود دارد که آندهای فداشونده[۲۳۰] یا حفاظت کاتدی گالوانیکی[۲۳۱] یکی از آنها می‌باشد. در این روش یک آند کمکی که الکتروپوزتیوتر[۲۳۲] از فلزی است که باید حفاظت شود، به فلز متصل می‌شود. به‌طوری‌که الکترون‌ها از آند به فلز جریان می‌یابند، یون‌های فلزی، فلز را ترک نمی‌کنند و از خوردگی جلوگیری می‌شود و به این ترتیب آند خود را برای حفاظت فلز فدا می‌کند. این روش برای حفاظت سازه‌های زیرزمینی و همچنین کشتی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای نمونه، آندهای گالوانیکی جریانی شبیه به باتری تولید می‌کنند که از طریق یک اتصال خارجی به کاتد انتقال می‌یابد و الکترون‌های مورد نیاز واکنش کاتدی را تولید می‌کند. اگر حفاظت گالوانیکی به دلیل ویژگی‌های محیطی کارایی نداشته باشد، حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان[۲۳۳] ترجیح داده می‌شود. برای قطبش[۲۳۴] کاتدی فلزی که باید محافظت شود، پتانسیل آندهای گالوانیکی باید به اندازه کافی منفی باشند.

پتانسیل‌های آندی و قطبش آندی

از آنجا که اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد است که شار جریان حفاظت کاتدی را اجازه می‌دهد، برای قطبش کاتدی فلز محافظت شونده، پتانسیل آند گالوانیکی باید به اندازه کافی منفی باشد. این اختلاف پتانسیل باید بر مقاومت سامانه حفاظت کاتدی غلبه کند. آندهای با پتانسیل کم نمی‌توانند در نواحی یا زمین‌هایی با مقاومت بالا استفاده شوند. در مورد سازه‌های آهنی و فولادی، پتانسیل کاتدی باید به زیر ۸۵۰ mV– در مقایسه با الکترود مرجع مس/سولفات مس (CSE)[۲۳۵] کاهش یابد. علاوه بر این، افت پتانسیل اُهمی IR که عمدتاً ناشی از مقاومت بستر آندی، مقاومت کابل‌های اتصال و مقاومت زمین است، باید در زمان اندازه‌گیری پتانسیل کاتدی تحت جریان اعمالی و محاسبه جریان کل مورد نیاز حفاظت کاتدی لحاظ گردد.

برای تولید جریان‌های یکنواخت حفاظت کاتدی، آندهای گالوانیکی باید به طور یکنواخت تجزیه شوند، درحالی‌که، این موضوع در آب دریا امکان‌پذیر است، آندها در زیر زمین بی‌درنگ قطبیده می‌شوند. به‌عنوان یک دلیل، یون‌های فلزی با حل شدن رسوبات آندها عمدتاً به‌صورت هیدروکسیدها بر روی سطح آند، که مساحت سطح فعال را کاهش و مقاومت آندی را افزایش می‌دهد و به یک افزایش پتانسیل در جهت مثبت منجر می‌شود؛ ازاین‌رو، جریان تولیدی با زمان کاهش می‌یابد. بنابراین، بسترهای آندی مناسب باید برای ممانعت از چنین قطبشی مورد استفاده قرار گیرند.

0	3	2
1	3	2
2	3	2
3	3	2
4	3	2
5	3	2

جریان الکتریکی مورد نیاز حفاظت کاتدی گالوانیک

جریان مورد نیاز که باید توسط آندها فراهم شود، به فاکتورهایی از قبیل مساحت کل سطح سازه فلزی که باید محافظت شود، کیفیت پوشش سطح موجود، پتانسیل مدار باز آند نسبت به سازه فلزی که باید محافظت شود و مقاومت بستر آندی یا مقاومت الکترولیت یا امپدانس و همچنین مقاومت آند در الکترولیت یا بستر آندی بستگی دارد.

اگر عمر آندها طولانی‌تر از مدت برنامه‌ریزی شده عمر حفاظت کاتدی باشد، پس آندهای کوچک‌تر یا به‌عبارت‌دیگر، آندی با نسبت طول به قطر (L/d) بزرگ‌تر، می‌تواند استفاده شوند، یا نوع مختلفی از آندها مانند آندهای منیزیم HP می‌تواند به جای آندهای منیزیم AZ - 63 استفاده شوند، زیرا آنها می‌توانند همان مقدار جریان را با تعداد کمتری آند برای مدت زمان کوتاه‌تری تولید کنند.

در مقابل، اگر عمر آندها کمتر از مدت برنامه‌ریزی شده عمر حفاظت کاتدی باشد، پس آندهای بزرگ‌تر یا به‌عبارت‌دیگر، آندهای با نسبت طول به قطر (L/D) کمتر، می‌تواند استفاده شوند که جرم آندی را بدون افزایش شدت جریان تولیدی، افزایش می‌دهند. روش دیگر، نصب چندین آند به‌صورت موازی است که از یک محل به لوله متصل شده‌اند، که در نتیجه مقاومت بستری آندی افزایش و واحد جریانی دریافتی از یک آند کاهش می‌یابد.

به طور معمول، به دلیل تشکیل لایه‌های محافظ از محصولات خوردگی، سختی آب، و غیره در سطح سازه محافظت شونده، جریان خروجی از آندهای گالوانیک با زمان کاهش می‌یابد، که به طولانی‌تر شدن عمر آنها از عمر پیش‌بینی شده منجر می‌شود. بااین‌حال، باید توجه شود که در برخی از موارد، به دلیل پوشش آسیب دیده که با زمان فرسوده می‌شوند، به جریان حفاظت کاتدی بالایی نیاز باشد، که ممکن است تأثیرات ایجاد شده را تعدیل کند.

ظرفیت جریان آندی و بازدهی جریان آندی

ظرفیت جریان آندی، مقدار جریانی است که ۱ کیلوگرم آند می‌تواند در یک ساعت تولید کند (A.hour/kg)، که با مقدار جریان دریافتی از آند (mA/m^2) و دما تغییر می‌کند:

$$\text{current anode capasity}(A.hour/kg) = \frac{\text{جریان تولید آندی}(A.hour)}{\text{جریان آندی}(kg)}$$

در عمل، عمدتاً تفسیر دیگری از همین عبارت که مقدار آندی که می‌تواند ۱ آمپر در سال تولید کند (kg/A.year) استفاده می‌شود.

ظرفیت جریان نظری ذکر شده، بر اساس قانون فارادی محاسبه می‌شود، درحالی‌که، در عمل، ظرفیت جریان آندها کوچک‌تر هستند. نسبت ظرفیت جریان واقعی به ظرفیت جریان نظری به‌عنوان بازده جریان آندی شناخته می‌شود:

$$\text{آندی جریان بازده} = \frac{\text{واقعی جریان ظرفیت}}{\text{نظری جریان ظرفیت}} \times 100$$

بازده جریان آندی به نوع آند و چگالی جریان دریافتی از آند بستگی دارد. آندهای منیزیم بازده جریان ٪۵۰ تا ٪۶۰ دارند، درحالی‌که، بازده جریان آندهای آلومینیم و روی تا ٪۹۰ می‌باشد.

عمر یک آند

ازآنجاکه، سطح آندهای مورد استفاده کوچک‌تر می‌شود، مقاومت آندی آنها افزایش می‌یابد و همچنین به دلیل مصرف غیریکنواخت جرم آندی؛ در عمل، تنها یک درصد معینی از جرم آند می‌تواند برای تولید جریان استفاده شود، بنابراین، آند نمی‌تواند هرگز به طور کامل مصرف شود. این درصد از جرم آندی که می‌تواند استفاده شود، ظرفیت کاربری[۶] نامیده می‌شود. ضریب کاربری عمدتاً به شکل آند بستگی دارد و به‌عنوان مثال برای آندهای گالوانیکی استوانه‌ای ٪۸۵ است. بر اساس ضریب کاربری و با توجه به ظرفیت جریان آندی و بازده جریان آندی، عمر یک آند می‌تواند با توجه به جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی و جرم آند از طریق فرمول زیر برآورد شود:

$$\text{(year)anode life time} = \frac{\text{(kg)}I * U}{(A)\text{Ia} \times \text{(kg/A.year)}anodecapasity}$$

حداقل تعداد آندهای گالوانیکی

تعداد آندهایی که نصب می‌شوند باید هر دو جریان کل مورد نیازهای حفاظت کاتدی برحسب آمپر و همچنین جرم آندی کل را برآورده سازد. در روش اول، تعداد آندها (n) با تقسیم جریان کل مورد نیاز حفاظت کاتدیک (I) به‌شدت جریان آندی یا جریان خروجی از هر آند تعیین می‌شود: $n = \frac{I}{i}$

در هر روش دیگر تعداد آندها (n) با تقسیم جرم کل آندهای مورد نیاز (m) بر جرم یک آند (m) تعیین می‌شود:

$$n = \frac{M}{m}$$

از آنجا که همه متغیرها شناخته شده هستند، جرم آندی کل هم از فرمول عمر آند، تعیین می‌گردد. در نتیجه، تعداد بیشتر آندهای حاصل از دو روش محاسبه، انتخاب و نصب می‌شود.

آندهای گالوانیکی (آند فداشونده) مورد استفاده رایج

آندهای گالوانیک از میان فلزات یا آلیاژهایی فعال‌تر از فلز محافظت شونده، انتخاب و به طور مستقیم به فلز محافظت شونده متصل می‌شوند، و یک پتانسیل ترکیبی منفی در مقایسه با پتانسیل سیستم منفی، شکل می‌گیرد. از این طریق، پتانسیل سیستم به

2 [illegible] 3 6

عوض E_{corr} به E_{corr}' و جریان به جای i_{corr} به i_{corr}' تبدیل می‌شود. ازآنجاکه، در این روش، آند گالوانیک به جای فلز محافظت شده خورده می‌شود، عمر محدودی دارد.

آندهای گالوانیکی، بازده و ظرفیت جریان معینی دارند. با نصب مقدار و تعداد کافی از آندها در سامانه حفاظت کاتدی، یک سازه فلزی را می‌توان برای مدت زمان دلخواه به‌عنوان کاتد نگه داشت و در نتیجه از خوردگی محافظت شود. کمیت و اندازه آند می‌تواند فقط بر اساس جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی تعیین شود. برای آنکه آندهای گالوانیک حتی در محیط‌های با مقاومت بالا سازه را از خوردگی محافظت کنند، پتانسیل تعادلی باید بسیار منفی باشد. آند نباید بیش از حد قطبیده شود و در جریان‌های بالا تنها کمی افت جرم الکتروشیمیایی حاصل شود که نشان می‌دهد، بازده بالاست.

بنابراین، پتانسیل خوردگی آند گالوانیک باید به اندازه کافی منفی باشد، ظرفیت آندی و بازده آندی آنها باید بالا باشد و پیوسته فعال باشند و غیرفعال[۲۱۷](رویین) نشوند. اگر بیش از یک آند در یک محل به خط لوله متصل باشد، آنها باید به‌صورت موازی و از طریق یک کابل اصلی به یکدیگر متصل شوند. حفر یک چاه برای هر آند و اتصال آنها، با استفاده از کابل‌های مختلف پر هزینه است، زیرا نیاز به کار و فعالیت بیشتری دارد، و همچنین ممکن است تعداد محل‌های مناسب در امتداد یک لوله برای نصب جداگانه آندها کافی نباشد.

روی، آلومینیم، منیزیم آلیاژهایی هستند که به‌عنوان آندهای فداشونده بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. درصد فلزات نجیب موجود در این آلیاژها نمی‌تواند بیش از حد معینی باشد، زیرا آنها آند را غیرفعال (رویین) می‌کنند، و آنها را به‌عنوان آندهای فداشونده بلااستفاده می‌سازند. آلومینیم دارای بالاترین بازده جریان ٪۹۵ است که به ظرفیت جریان نظری 2830A.hour/kg منجر می‌شود، منیزیم دارای بازده جریان پایین‌تر از ٪۵۵ می‌باشد که به ظرفیت جریان نظری نسبتاً بالای 1230A.hour/kg منجر می‌شود، و روی دارای بازده بالای ٪۹۵ است که به ظرفیت جریان نظری پایین 780A.hour/kg منجر می‌شود. به‌علاوه، تنها حدود ٪۹۰ – ٪۸۵ ظرفیت جریان نظری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که ضریب کاربری نامیده می‌شود.

آند بر اساس مقاومت محیط انتخاب می‌شود. برای مثال، روی یا منیزیم در محیط‌هایی با مقاومت بالا استفاده می‌شوند، درحالی‌که، محیط‌های که مقاومت آن کم است، از آلومینیم استفاده می‌شود. بنابراین، آندهای آلیاژ روی و منیزیم برای حفاظت کاتدی سازه‌های فلزی زیرزمینی مانند خطوط لوله ترجیح داده می‌شوند، درحالی‌که، آلومینیم برای حفاظت کاتدی سازه‌های فلزی در آب دریا ارجح است. آندهای منیزیم و به‌ویژه آندهای منیزیم پتانسیل بالا (HP) در زمین با مقاومت بالا و در آب‌های شیرین برتری دارند. آندهای روی (Zn) ارزان و بازده جریان آندی بالایی دارند؛ با این وجود ازآنجاکه، پتانسیل‌های مدار آنها پایین است، آنها فقط می‌توانند در زمین‌های با مقاومت کمتر از ۲۰۰۰ ohm.cm و در آب‌های شور استفاده شوند. آند منیزیم برای زمین‌هایی با مقاومت بالاتر از ۵۰۰۰ ohm.cm مناسب نیست، درحالی‌که، در زمین‌هایی با مقاومت کمتر از ۵۰۰ ohm.cm، آندهای منیزیم می‌توانند به طور مستقیم در خاک قرار گیرند. اگرچه بازده جریان آندی آندهای منیزیم پایین است، ظرفیت جریان آندی آنها از آند روی، در شرایط یکسان، بالاتر است. از سوی دیگر، آند آلومینیم

2 3 7

ظرفیت جریان بسیار بالایی دارد و از همه قیمت کمتری دارد، به‌عنوان مثال ۳/۵ کیلوگرم آلومینیم برای تولید جریان A.year ۱ کافی‌ست، درحالی‌که، همین جریان A.year ۱ را می‌توان از ۷/۸۸ کیلوگرم منیزیم و ۱۱/۸۴ کیلوگرم روی (Zn) تولید کرد. بااین‌حال، ازآنجاکه، آندهای آلومینیم حتی زمانی که با جیوه و ایندیم آلیاژ شوند غیرفعال (رویین) می‌شوند، فقط در آب دریا استفاده شوند.

قیمت آندها برحسب قیمت جرم واحد و ظرفیت جریان مقایسه می‌شوند، که هزینه تولید ۱ آمپر جریان در سال است. به‌عنوان مثال، قیمت واحد تقریبی منیزیم، با توجه به قیمت‌های سال ۲۰۱۲ برابر ۳/۲ دلار به کیلوگرم، و با توجه به ظرفیت جریان واقعی آند منیزیم $1100A.hour/kg$ ، هزینه تولید A.year ۱ حدود ۲۳ دلار محاسبه می‌شود.

جریان خروجی از آندهای گالوانیک می‌تواند بسته به اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد و همچنین مقاومت بستر آندی افزایش یابد، که با افزایش مساحت سطح با استفاده از آند کوچک‌تر، مانند دو آند کوچک در مقایسه با یک آند بزرگ که جرم دو آند کوچک را داراست، به آن دست یافت؛ بنابراین، استفاده از تعداد بیشتری آند کوچک به جای چند آند بزرگ، به‌ویژه در زمین‌های با مقاومت بالا مناسب‌تر است.

موضوع دیگر امکان حفاظت بیش از حد[۲۳۴] است. آندهای روی دارای پتانسیل مدار پایینی هستند. با استفاده از آند روی پتانسیل سیستم می‌تواند با تا V ۱/۰- افزایش یابد، و وقتی که پتانسیل به این مقدار برسد، جریان خروجی به طور خودکار کاهش می‌یابد، در نتیجه هرگز با مشکل حفاظت بیش از حد مواجه نمی‌شود. در مورد آندهای منیزیم، اگرچه ممکن است پتانسیل تولیدی بالاتر از مقدار مورد نیاز باشد، که نتیجه آن جریان‌های اضافی است که به حفاظت بیش از حد و اتلاف آندها منتهی می‌شود. بنابراین، ازآنجاکه، عمر آند روی طولانی‌تر از عمر آند منیزیم با اندازه برابر است، زمانی که حفاظت کاتدی برای مدت زمانی طولانی مدنظر باشد، ارجحیت دارند و برعکس.

آندهای منیزیم

پتانسیل الکتروشیمیایی آند منیزیم به دلیل تشکیل فیلم نازک اکسید منیزیم روی سطح آن، در مقایسه با فلزاتی که در بالای سری پتانسیل الکتروشیمیایی قرار دارند، نسبتاً کمتر است. به‌علاوه، آندهای منیزیم در محلول‌های آبی فاقد سولفات و کلرید $Mg(OH)_2$ تشکیل می‌دهند. ترکیب $Mg(OH)_2$ حلالیت بسیار کمی دارد و بر سطح آند رسوب کرده و آن را غیرفعال (رویین) می‌کند. در حضور کلرید و سولفات، فیلم $Mg(OH)_2$ آسیب دیده و آند به شکل خوردگی حفره‌ای تجزیه می‌شود، بنابراین، آند منیزیم نمی‌تواند در شکل خالص استفاده شود. پتانسیل الکتروشیمیایی منیزیم خالص نسبت به الکترود مرجع استاندارد هیدروژن برابر V ۲/۴- است، درحالی‌که، پتانسیل آن در آب دریا نسبت به الکترود سولفات مس (CSE) برابر مقدار V ۱/۵۵- قرائت می‌شود. با اضافه کردن مقدار حداقل ۰/۵٪ منگنز، پتانسیل آند منیزیم می‌تواند به V ۱/۷۵- افزایش یابد، چون منگنز اثرات منفی آهن را خنثی می‌کند. بنابراین، این آند منیزیم با پتانسیل بالا می‌تواند در زمین‌های با مقاومت بالا و در آب‌های شیرین استفاده شود. اضافه کردن آلومینیم و روی هم اثر تأثیر بر پتانسیل و ظرفیت جریان آند منیزیم دارد، اگرچه

2 3 8

ناخالصی‌هایی مانند آهن، نیکل، مس و سیلیسیم بر پتانسیل و ظرفیت آند منیزیم، اثرات منفی دارند. دریافت جریان‌های زیاد در خلال مدت حفاظت کاتدی، بازده جریان آندی منیزیم را افزایش می‌دهد.

آندهای منیزیم معمولاً به شکل میله یا حرف«D» تولید می‌شوند و در امتداد محورشان، اسکلت فولادی دارند. آنها یا به‌صورت آند تنها یا به‌صورت بسته‌بندی شده همراه با مواد بستر آندی به فروش می‌رسند. در بین آندهای منیزیم، آلیاژ منیزیم آلیاژ پتانسیل بالا (HP) بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. درصد منگنز موجود در آلیاژ (HP) بستگی به درصد آلومینیم دارد، به‌عنوان مثال، آند منیزیم پتانسیل بالا (HP) کالومگ[۹] ۱/۳۵٪ منگنز و ۰/۱٪ آلومینیم دارد. بنابراین، به طور کلی در آلیاژهای (HP)حدود ۰/۵٪ آلومینیم وجود دارد و مقدار منگنز حداقل برابر $Mn\% = (0.6 * Al\%) + 0.5\ \%$ است، پس، برای ۰/۵٪ آلومینیم، مقدار ۰/۸٪ منگنز لازم، درحالی‌که، ۰/۰۳٪ روی و ۰/۰۵٪ سیلیکون، ۰/۰۲٪ مس، ۰/۰۳٪ آهن، ۰/۰۲٪ نیکل و مابقی منیزیم می‌باشد. پتانسیل مدار آلیاژ (HP) نسبت به فولاد ۹۰۰ mV است.

آلیاژ AZ - 63 یکی دیگر از آلیاژهای منیزیم به‌عنوان یک آند گالوانیک مورد استفاده است که دارای چگالی $1/7g/cm^3$ و مقدار پتانسیل مدار برابر ۷۰۰ mV در مقایسه با فولاد است. آلیاژ AZ - 63 منیزیم که با اضافه کردن ۵/۳٪ تا ۶/۷٪ آلومینیم،۲/۵٪ تا ۳/۵٪ روی، ۰/۲۵٪ تا ۰/۰۴٪ منگنز، ۰/۳٪ سیلیکون،۰/۰۸٪ مس، ۰/۰۳٪ آهن، ۰/۰۳٪ نیکل و مابقی منیزیم به دست می‌آید. اضافه کردن مقدار کافی منگنز به این آلیاژ به آند آلیاژ منیزیم AZ - 63 پتانسیل بالا منجر می‌شود، که برای زمین با مقاومت بالا مناسب می‌باشد. ظرفیت جریان نظری آند آلیاژ منیزیم AZ - 63 برابر $2200A.hour/kg$ است که بیشتر از دیگر آندها است؛ بااین‌حال، به دلیل بازده جریان آندی کم ۵۰٪، ظرفیت جریان واقعی $1100A.hour/kg$ خواهد بود. آلیاژ AZ - 63 دارای بازده جریان بهتر از آلیاژ HP است. اگر چگالی جریان خروجی کمتر از $0/3mA/cm^2$ باشد، پس بازده جریان آند منیزیم HP حتی به زیر ۵۰٪ کاهش می‌یابد، و بازه آند آلیاژ AZ - 63 منیزیم در چگالی جریان یکسان بیشتر از ۶۰٪ است.

آندهای روی

آند روی برای اولین بار در سال ۱۸۲۴ توسط سر هنری دیوی به منظور حفاظت کاتدی بدنه کشتی ساخته شده از مس استفاده شد. آندهای روی هنوز به طور معمول برای حفاظت کاتدی سازه‌های دریایی و سازه‌های واقع در زمین با مقاومت پایین استفاده می‌شوند. آند روی حداکثر۰/۰۰۶٪ سرب، ۰/۰۰۵٪ آهن، ۰/۰۰۵٪ مس، ۰/۱۵٪ کادمیم،۰/۵۰٪ آلومینیم و ۰/۱۲۵٪ سیلیسیم به‌عنوان عنصر آلیاژی و مابقی روی است.

پتانسیل آند روی خالص در آب دریا حدود ۱/۱۰ V– در مقایسه با الکترود مرجع سولفات مس (CSE) می‌باشد، که به ولتاژ محرکه حدود ۲۵۰ mV منجر می‌شود، در مقایسه با پتانسیل حفاظت قابل قبول فولاد در یک الکترولیت هوازی نزدیک به pHخنثی، یعنی ۸۵۰ mV–، که برای حفاظت کاتدی در آب شیرین و در زیرزمین با مقاومت بیشتر از ۲۰۰۰ ohm.cm، کافی نیست. بااین‌حال، اگر آند روی حاوی مقدار ناخالصی آهن باشد، این اختلاف پتانسیل کاهش می‌یابد، و بنابراین اگر هیچ مقدار

2 .□□ □□□□□ □□ 3 9

آلومینیم وجود نداشته باشد، مقدار آهن در آند روی باید کمتر از۰/۰۰۱۴٪ باشد و اگر حدود ۰/۱٪ آلومینیم در آلیاژ موجود باشد، مقدار آهن باید از ۰/۰۰۳٪ کمتر باشد، تا اثر منفی آهن خنثی شود. آند MIL - A 18001 مثالی است که مقدار ۰/۰۱٪ تا ۰/۰۳٪ آلومینیم دارد که تشکیل آلیاژ با آهن تا ۰/۰۰۳٪ را اجازه می‌دهد و بنابراین می‌تواند در آب دریا استفاده شود. در هر صورت، درصد آهن باید زیر ۰/۰۰۵٪ باشد، زیرا درصد بیشتر آهن به تشکیل لایه اکسید آهن منجر می‌شود که سبب غیرفعال (رویین) شدن آند می‌گردد. آلومینیم به آهن پیوند شده و از تبدیل شدن آن به کاتد در پیل خوردگی جلوگیری می‌کند که روی آند آن است. در صورت عدم وجود آلومینیم، روی، در ابتدا هیدروکسید روی و سایر محصولات خوردگی تشکیل می‌دهد، که سطح آند را می‌پوشاند و به غیرفعال (رویین) شدن آند منتهی می‌شود و در نتیجه پتانسیل آن کاهش می‌یابد.

ناخالصی‌هایی مانند سرب و مس مانند آهن اثرات منفی بر بازده آند روی دارند، درحالی‌که، آلومینیم و کادمیم اثر مثبت دارند. کادمیم اثر مسمومیت سرب را خنثی می‌کند، همان‌گونه که آلومینیم اثر منفی آهن را خنثی می‌کند. آندهای MIL - A 18001 مقدار ۰/۰۶٪ کادمیم تا ۰/۰۰۶٪ سرب و ۰/۰۰۵٪ مس دارند.

برخلاف آند روی مورد استفاده در آب دریا، آند روی مورد استفاده در زیر زمین حاوی آلومینیم نیست و همچنین کادمیم و آهن بسیار کم دارد. آند روی مورد استفاده در زیر زمین با گذشت زمان تجزیه شده و هیدروکسید روی تولید می‌کند که در سطح آند رسوب کرده و به غیرفعال (رویین) شدن آن منجر می‌شود، به خصوص اگر یون‌هایی مانند کربنات‌ها، فسفات‌ها و سیلیکات‌ها در محیط موجود باشد، که این مورد در آب دریا رخ نمی‌دهد، زیرا محصولات خوردگی روی در آب دریا حاصل شده و بر سطح آند، رسوب نمی‌کنند. بنابراین، برای قابل استفاده بودن در زیر زمین، آندهای روی در بستر آندی قرار داده می‌شوند. مواد بستر آندی حاوی سدیم و کلسیم سولفات است، و چون سولفات روی به‌راحتی به‌صورت کلرید روی تجزیه می‌شود، آند نمی‌تواند غیرفعال (رویین) شود. به‌علاوه، در دمای بالا به‌ویژه در دمای بیش از $60^{\circ}C$ ، هیدروکسید روی به شکل یک ژل سطح آند را می‌پوشاند.

آند روی حدود 820A.hour/kg ظرفیت جریان نظری دارد و بازده جریان بالایی، بیش از ٪۹۰، دارد که به ظرفیت جریان واقعی 738A.hour/kg منجر می‌شود. چگالی آنها $7/1g/cm^3$ و بهای تولید جریان 1A.hour/kg حدود ۱۴ دلار است؛ پس، هزینه آن حدوداً ٪۶۰ کمتر از منیزیم است. ظرفیت جریان آند روی با جریان دریافتی افزایش می‌یابد؛ اگرچه با افزایش دما، کاهش می‌یابد.

آندهای آلومینیم

آندهای آلومینیم در آب دریا و در دیگر آب‌های با اندکی شوری، استفاده می‌شوند. وجود مس و نیکل در آند آلومینیم، پتانسیل آن را در جهت مثبت جابه‌جا می‌کند، درحالی‌که، وجود روی، منیزیم و کادمیم، غیرفعال (رویین) شدن را کاهش می‌دهد و پتانسیل آن را در جهت مثبت جابه‌جا می‌کند. به‌علاوه، وجود جیوه، قلع و ایندیم، آندهای آلومینیم را در همه زمان فعال نگه می‌دارد و به تجزیه یکنواخت آند آلومینیم منجر می‌شود.

به طور معمول، وقتی سری نیروی الکتروموتوری ذُرّ نظر گرفته شود، آلومینیم از روی فعال‌تر است؛ بااین‌حال، با توجه فیلم اکسید محافظتی که به طور طبیعی بر سطح آن تشکیل می‌شود، تا سال ۱۹۵۰ نمی‌توانستند از آن به‌عنوان آند استفاده کنند، زمانی که پتانسیل آند آلومینیم در مقایسه با الکترود مرجع سولفات مس (CSE) در آب دریا ۹۰۰ mV- بود. پس از سال ۱۹۶۰، اضافه کردن حدود ٪۳ روی و٪۰/۵ قلع، بازده جریان آند آلومینیم در آب دریا تا ٪۵۰ و پتانسیل تا ۱/۳ V- بهبود یافت، درحالی‌که، عناصر آلیاژی مانند روی و جیوه و یا ایندیم بازده جریان تا ٪۹۰ و پتانسیل تا ۱/۵ V- را افزایش می‌دهند. عناصر آلیاژی جیوه به مقدار٪۰/۰۳ تا ٪۰/۰۵، ایندیم به مقدار ٪۰/۰۱ تا ٪۰/۰۳، و مقدار ناچیز قلع از غیرفعال (رویین) شدن آلومینیم جلوگیری می‌کنند. آندهای آلیاژی ایندیم به آندهای آلیاژی جیوه و قلع در آب دریا ترجیح داده می‌شوند، چون هر دوی آنها سمی هستند و باعث آلودگی محیط زیست می‌شوند. آند آلومینیم آلیاژی با ایندیم، ٪۲/۷ تا ٪۲/۱ روی، ٪۰/۰۰۳ تا ٪۰/۰۳۲ کادمیم، ٪۰/۰۱ تا ٪۰/۱۵ سیلیسیم، حداکثر ٪۰/۲۵ آهن ٪۰/۰۱۷ تا ٪۰/۰۲۴ ایندیم دارد، و مابقی آلومینیم است. ایندیم نجیب‌تر از آلومینیم است و بنابراین، آلومینیم را از طریق واکنش زیر فعال نگه می‌دارد:

$$Al + In^{3+} \rightarrow Al^{3+} + In$$

آند آلومینیم آلیاژی با جیوه مقدار ٪۰/۳۵ تا ٪۰/۵۰، روی ٪۰/۱۱ تا ٪۰/۲۱ سیلیسیم، حداکثر ٪۰/۲۵ آهن و ٪۰/۰۳۵ تا ٪۰/۴۵ جیوه دارد، و مابقی آلومینیم است. ازآنجاکه، آهن، آند آلومینیم را غیرفعال (رویین) می‌سازد، مقدارش نباید از ٪۰/۰۱ تجاوز نماید. سیلیسیم اثر منفی آهن را خنثی می‌کند و در نتیجه آلیاژ گالوالم که ٪۰/۱۵ تا آهن دارد، با افزودن سیلیسیم می‌تواند به‌عنوان آند استفاده شود.

با وجود پتانسیل نسبتاً پایین ۱/۱۰ V- در آب دریا که مقاومت ۲۵ ohm.cm در $25°C$برای دریافت چگالی جریان mA/m^2 ۳۰۰ به پتانسیل مدار ۲۵۰ mV در مقایسه با فولاد منجر می‌شود، آند آلومینیم ظرفیت جریان ۲/۴ برابر بیشتر از آند منیزیم و ۳/۶ برابر بیشتر از آند روی ظرفیت جریان آندی دارد، که ظرفیت جریان نظری برابر 2960A.hour/kgو به دلیل بازده جریان ٪۹۰ ظرفیت جریان واقعی 2671A.hour/kg یا 3/5A.hour/kgمی‌باشد.

چگالی آندهای آلومینیم $2/7g/cm^3$است و برحسب واحد تولید جریان، حدود سه برابر از آندهای روی و منیزیم ارزان‌تر هستند؛ به هر حال، آلومینیوم تنها می‌تواند در آب دریا یا در آب شور با مقاومت پایین استفاده شود، چون مقاومت بالاتر از ۵۰۰ ohm.cm برای آلیاژ آلومینیم + روی + جیوه و بالاتر از ۵۰۰ ohm.cm برای آلیاژ آلومینیم + روی + ایندیوم + سیلیسیم باعث کاهش پتانسیل آن به زیر ۱/۰ V- می‌شود.

اندازه‌گیری عملکرد آندهای گالوانیک

خواص الکتروشیمیایی آندهای گالوانیک قبل از نصب و راه‌اندازی برآورد می‌شوند که آیا می‌توانند ظرفیت‌های جریان، بازده جریان و پتانسیل‌های مورد نیاز را برای مدت زمان برنامه‌ریزی شده حفاظت کاتدی تولید کنند. این خواص شیمیایی به شرح زیر است:

2 4 0

ترکیب شیمیایی

مواد آندی باید برای عناصر آلیاژی یا ناخالصی‌هایی بررسی شوند که بر عملکرد آند تأثیر منفی دارند.

دوام مکانیکی

محل اتصال کابل به آند، ضعیف‌ترین قسمت آندها به لحاظ مکانیکی است، که باید پنج برابر واحد آند و حداکثر وزنه ۱۰۰ کیلوگرم را تحمل کند. تحت این وزن، کابل نباید آسیب ببیند یا پاره شود.

مقاومت الکتریکی

برای رسانایی جریان الکتریکی، یک اسکلت فولادی در امتداد محور داخلی آند گالوانیک وجود دارد. این اسکلت و آند باید کاملاً باهم ممزوج شوند و هیچ مقاومت الکتریکی داخل آند ایجاد نشود، که در غیر این صورت به کاهش تولید جریان آندی منجر خواهد شود. این مقاومت الکتریکی داخلی آند از طریق اعمال یک جریان ۱ آمپری از یک منبع جریان مستقیم خارجی و اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل رخ داده در فواصل ۰/۱ mV تعیین می‌شود. با جریان‌های ۲ و ۳ و ۴ و ۵ آمپر همین اندازه‌گیری تکرار می‌شود. مقاومت الکتریکی داخلی آند نباید از ۰/۰۱ ohm بیشتر باشد.

آزمون‌های الکتروشیمیایی

پتانسیل‌های آند معمولاً در آب دریای تمیز و یا در آب دریا با توجه به استاندارد ASTM 1141 و در دمای $20^{\circ}C$، در مقایسه با الکترود مرجع نقره/نقره کلرید (SCE)[۲۴۱] یا الکترود مس/سولفات مس (CSE) اندازه‌گیری می‌شود. اگر در برابر الکترود CSEاندازه‌گیری شود، پس ۷۰ mV- به پتانسیل اندازه‌گیری شده در مقابل SCE اضافه می‌شود. اندازه‌گیری ظرفیت و بازده جریان توسط روش گالوانواستاتیک[۲۴۲] یا[۲۴۳] با روش خروجی جریان آزاد انجام می‌شود.

۱. روش گالوانواستاتیک

روش گالوانواستاتیک بر اساس اندازه‌گیری کاهش وزن می‌باشد، که این به دلیل خروج جریان از آند است. برای این منظور، سطوح آند با اسید نیتریک غلیظ تمیز می‌شود، لایه‌های اکسید زدوده شده و بعد از آن با آب مقطر شسته می‌شود. یک چگالی جریان ثابت بین ۰/۵ و $0/7 mA/cm^2$ به‌مدت ۵ تا ۱۰ روز از آند تا زمانی که جریان قبلی به A.hour ۱ برسد، عبور داده می‌شود. سپس، آند شسته شده و از محصولات خوردگی عاری می‌گردد و برای تعیین مقدار کاهش وزن توزین می‌شود. از فرمول زیر برای تعیین ظرفیت جریان واقعی استفاده می‌شود:

---

1 [illegible]
2 [illegible] 4
2 [illegible] 4
2 [illegible] 4

$$\left(\mathrm{A}.\frac{\mathrm{hour}}{\mathrm{kg}}\right) \text{ظرفیت جریان واقعی} = \frac{\text{مدار از عبوری جریان}(\mathrm{A.hour})}{\text{آند جرم گاهش}(\mathrm{kg})}$$

و سپس برای تعیین بازده جریان آندی، مقدار ظرفیت جریان واقعی در فرمول مربوطه قرار داده می‌شود. به‌عنوان مثال، برای کاهش جرم معادل ۴۰ mg با جریان عبوری ۰/۱۰ A.hour، ظرفیت جریان واقعی به‌صورت زیر اندازه‌گیری می‌شود:

$$\left(\mathrm{A}.\frac{\mathrm{hour}}{\mathrm{kg}}\right) \text{ظرفیت جریان واقعی} = \frac{0/10(\mathrm{A.hour})}{40 \times 10^{-6}} = 2500\mathrm{A.hour/kg}$$

و با توجه به ظرفیت جریان نظری آند آلومینیم که برابر $2965\mathrm{A.hour/kg}$است، بازده جریان آندی محاسبه می‌شوند:

$$\text{آند جریان ظرفیت} = \frac{2500\mathrm{A.hour/kg}}{2965\mathrm{A.hour/kg}} \times 100 = 84/3\%$$

۲. روش خروجی جریان آزاد

برای روش جریان خروجی آزاد، ابتدا یک مدار حفاظت کاتدی با نسبت سطح کاتد به روش آند حداقل برابر ۲۰۰ ایجاد می‌شود. از فولاد نرم به‌عنوان کاتد و آب دریای مصنوعی به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌شود. به دلیل ولتاژ محرکه بین آند و کاتد، جریان از مدار عبور می‌کند و در نتیجه استفاده از جریان خارجی مورد نیاز نمی‌باشد. برای مدت زمان دو هفته، پتانسیل و جریان اندازه‌گیری و نمودار آنها در مقابل زمان رسم و کاهش وزن محاسبه می‌شود. جریان خروجی در طول آزمایش با محاسبه سطح زیر منحنی شدت جریان در مقابل زمان و با استفاده از فرمول زیر بررسی و محاسبه می‌شود، که i جریان و t زمان و Q بار به کولمب است:

$$Q=i\times t$$

بسترهای آند گالوانیک

آندهای گالوانیک مستقیماً در زمین دفن نمی‌شوند، بلکه در بسترهای آندی قرار داده می‌شوند، به‌طوری‌که آند به‌صورت یکنواخت خورده شود، که به ضریب کاربری بزرگی منجر می‌گردد. ازاین‌رو، اطراف آندها پیوسته خیس می‌باشد که به کاهش مقاومت آند منتهی شده و نتیجه آن، خروجی جریان بیشتر است. بسترهای آندی نمکی رسانا نیز مقاومت آندی را کاهش داده که سبب کاهش مقاومت آندی و جلوگیری از قطبش آندی می‌شوند. در نتیجه بسترهای آندی، استفاده از آندها در زمین‌هایی با مقاومت بالا را ممکن می‌سازند.

در نواحی با مقاومت بالا، بسترهای آندی به‌صورت مخصوص تهیه می‌شوند. آندها باید قالب داشته و شکل‌شان مناسب سازه‌ای باشد که باید از آن محافظت کنند. اتصال آندها به سامانه باید به‌گونه‌ای باشد که رسانایی الکتریکی خوب و دوام مکانیکی بالا باشد. معمولاً، آندهای گالوانیکی به‌صورت تجاری تولید و در بسته‌بندی در دسترس هستند؛ برای بسته بندی ، ابتدا یک سوم مواد پرکننده در بستر آندی ریخته می‌شود، سپس آند در وسط چاله قرار داده شده و مابقی مواد پرکننده برای پر کردن پیرامون آند استفاده می‌شود. آندهای منیزیم بسته‌بندی شده معمولاً ۱/۵ تا ۳ متر دورتر و یک متر پایین خط لوله یا تا رسیدن به

ناحیه مرطوب، قرار داده می‌شوند. در این روش، آندها به‌وسیله حوادث جوی و عملیات ساختمانی در نواحی نزدیک تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند. آندهای گالوانیک به‌صورت متوالی و در فواصل مساوی به خط لوله متصل می‌شود. مناسب‌تر است که آند را در جاهایی که در آن مقاومت زمین کمتر است، نصب شود. اگر بیش از یک آند به خط لوله در یک محل متصل شود، ابتدا آند به‌صورت موازی به همدیگر متصل می‌شوند، و سپس آنها با جوش ترمیتی[۴۴] به خط لوله جوش می‌خورند. محل جوش و اتصالات دیگر باید به‌خوبی عایق شده و سطح مقطع کابل باید حداقل $6mm^2$ باشد، به‌طوری‌که هیچ کاهش پتانسیل رخ ندهد.

مواد پرکننده بستر آندی

معمولاً دو نوع مواد پرکننده بستر آندی وجود دارد: نوع -A شامل ٪۷۰ تا ٪۷۵ گچ $(CaSO_4.2H_2O)$، ٪۲۰ تا ٪۲۵ بنتونیت و ٪۶ تا ٪۵ سولفات سدیم، که به مقاومت الکتریکی ohm.cm ۱۰۰ – ۵۰ منجر می‌شود، درحالی‌که، نوع -B شامل ٪۴۰ تا ٪۵۰ بنتونیت، ٪۲۵ تا ٪۳۰ گچ $(CaSO_4.2H_2O)$، و ٪۲۵ تا ٪۳۰ سولفات سدیم، که به مقاومت الکتریکی ohm.cm ۵۰ – ۲۵ منجر می‌شود. مواد نوع -A برای آند منیزیم مناسب‌تر است، درحالی‌که، نوع -B برای آند روی مناسب‌تر می‌باشد. حلالیت گچ موجود در بستر مواد آندی g ۳ در هر لیتر آب است و یون‌های سولفات مدام در بستر سطح بستر آزاد می‌شوند که از تشکیل فیلم هیدروکسید برای مدت زمان طولانی جلوگیری کرده و مقاومت پایین را حفظ می‌کند. حلالیت سولفات سدیم بسیار زیاد است و استفاده از آن برای کاهش مقاومت به زیر ohm.cm ۱۰۰ است. از طرف دیگر، بنتونیت می‌تواند مقادیر بالایی آب جذب کند و بستر آندی را مرطوب نگه دارد.

مقاومت بستر آندی

یکی از پارامترهای مهم در طراحی سامانه حفاظت کاتدی، مقاومت الکتریکی محیط می‌باشد. برای محیط‌های خط لوله متفاوت، با مقاومت‌های مختلفی مواجه می‌شویم، به‌عنوان مثال، از ohm.cm ۱ در آب رودخانه شور تا بیش از ohm.cm ۵۰۰۰۰۰ در گرانیت غیرمتخلخل متغیر است. برای اطمینان از خروجی جریان کافی دریافتی از آند در آتیه و در تمام عمر سازه، اندازه‌گیری مقاومت محیط و محاسبه مقاومت الکتریکی بین آند و سازه ناشی از الکترولیت باید در مرحل اولیه طراحی نقشه حفاظت کاتدی انجام شود. به هر حال، محاسبه دقیق مقدار مقاومت الکتریکی بین آندها و سازه ناشی از الکترولیت به‌ندرت امکان‌پذیر است.

بسترهای آندی می‌تواند برای قرارگیری در یک الکترولیت تا حدی – نامحدود مورد توجه قرار گیرد، و مقاومت الکترودها به زمین محدود یا آب دریا می‌تواند برای تعدادی از اشکال آندها محاسبه شود. بنابراین، اگر آندها از سازه دور باشند، مقاومت آندها می‌تواند برای تعیین خروجی جریان آندها بر اساس قانون اُهم همراه با اختلاف بین پتانسیل حفاظتی مورد نیاز و پتانسیل آند تعیین شود:

$$i = \frac{V}{R}$$

2 [illegible] 4 4

در اینجا i جریان خروجی از آند گالوانیک به آمپر است، اختلاف پتانسیل به ولت اندازه‌گیری می‌شود و R مقاومت آند یا آندهای متصل شده به‌صورت موازی می‌باشد. اگر، آندها به سازه نزدیک باشند، پس برخی اصطلاحات در مقاومت مورد نیاز است. هنگامی که جریان از یک آند کوچک به سازه فلزی بزرگ جریان می‌یابد، چگالی جریان نزدیک به سطح آند حداکثر می‌باشد. ازاین‌رو، بخش عمده‌ای از افت پتانسیل بین آند و سازه، در مجاورت آند رخ می‌دهد که مقادیر مقاومت آند به زمین نامحدود به‌صورت منطقی استفاده می‌شود. حتی زمانی که آند و سازه به‌خوبی جدا نشده‌اند.

در عمل، کنترل توزیع جریان به یک ساختار فلزی دشوار است که به‌صورت کاتدی حفاظت می‌شود. برای مثال، زمانی که حفاظت یک خط لوله توسط یک آند در نظر گرفته می‌شود، روشن است که چگالی جریان در نزدیک‌ترین نقطه خط لوله به آند بالاتر از دیگر نقاط است. بنابراین، واضح است که برای انجام حفاظت انتهای لوله به‌خوبی مرکز نزدیک‌ترین لوله به آند چند درجه حفاظت بیش از حد خواهد شد. این اثر را می‌توان با نصب چند آند با فاصله در امتداد خط لوله، به حداقل می‌رسد، بااین‌حال، هزینه‌های نصب و راه‌اندازی تا حد زیادی افزایش پیدا می‌کند.

از لحاظ نظری، مقاومت بستر آندی به اندازه آند، قطر و طول آن، و مقاومت زمین بستگی دارد. مقاومت بستر شامل مقاومت فلز به بستر آندی و مقاومت بستر آندی به زمین است. هر دو نوع مقاومت، ابتدا جداگانه با استفاده از فرمول دوایت[۲۴۵] محاسبه و سپس برای پیدا کردن مجموع مقاومت آند باهم جمع می‌شوند. مقاومت آند یا آندها به روش قرار گرفتن آندها در چاله، به‌صورت عمودی و افقی، بستگی دارد و همچنین تعداد آندهایی که نصب می‌شود و طریقه اتصال آنها به یکدیگر نیز بستگی دارد، درحالی‌که، مقاومت ناشی از بستر آندی به زمین، اصولاً به نوع مواد پرکننده بستر آندی بستگی دارد.

۱. مقاومت یک آند منفرد

مراقبت آندها بر اساس عمودی یا افقی بودن‌شان، متفاوت است. مقاومت آندهایی که به‌صورت عمودی قرار گرفته‌اند از مقاومت آندهایی بالاتر است که افقی هستند. مقاومت یک آند منفرد استوانه‌ای که نسبت طول به قطرش بیشتر از ۵ می‌باشد $(L/d > 5)$ و به طور کامل در زمین قرار گرفته است، به‌صورت افقی یا عمودی، از طریق فرمول اچ.بی.دوایت محاسبه می‌شود:

$$R_{\text{vertical}} = \frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{8L}{d} - 1\right)$$

$$R_{\text{horizental}} = \frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{d} - 1\right)$$

که مقاومت آند منفرد (R) به اُهم، مقاومت بستر آندی (ρ) به ohm.cm است، و هر دو طول آند (L) و قطر آند (d) به سانتی‌متر می‌باشد. برای آندهای میله‌ای که سطح مقطع دایره‌ای ندارند، قطر مؤثر که با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود، باید در فرمول قرار داده شود:

$$\text{موثر قطر}(d) = \sqrt{\frac{\text{مقطع سطح مساحت}}{\pi}} = \sqrt{(r_1 \chi r_2)/\pi}$$

2 [illegible] 4 5

۲. مقاومت آند چندتایی

مقاومت یک گروه از آندها که به‌صورت موازی به یکدیگر و سپس به‌صورت گروهی به خط لوله متصل شده‌اند از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\rho}{2\pi \mathrm{Ln}}\left(\mathrm{In}\frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{s}\mathrm{In}0/056n\right)$$

که n تعداد آندها و s فاصله بین آندها به سانتی‌متر است.

پروژه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده

مرحله اصلی که به ترتیب در زمان اجرای یک پروژه سیستم حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده باید دنبال شود، شامل:

۱. اول، مساحت سطح سازه فلزی محاسبه می‌شود که باید به‌صورت کاتدی حفاظت شود؛
۲. سپس، مقدار جریان حفاظت کاتدی مورد نیاز در سطح بر اساس آزمایش‌های میدانی تعیین می‌شود؛
۳. کل جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی از ضرب جریان حفاظت کاتدی مورد نیاز در سطح اندازه‌گیری شده در مرحله ۲ و مساحت سطح واقعی اندازه‌گیری شده در مرحله ۱ به دست می‌آید؛
۴. پس از آن، بر اساس مقاومت زمین و کل جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی که در مرحله ۳ محاسبه شد، تصمیم گرفته می‌شود که از حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده یا حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان استفاده شود؛
۵. اگر حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده مناسب‌تر باشد، پس بر اساس مقاومت زمین، نوع آند گالوانیک انتخاب می‌شود؛
۶. از مجموع مقاومت آند یا آندها و مواد پرکننده بستر آندی بر اساس فرمول‌های مربوطه، مقاومت بستر آندی محاسبه می‌شود؛
۷. پتانسیل مدار آند نسبت به سازه فلزی که باید محافظت شود، بر مقاومت بستر آندی تقسیم شده و در نتیجه شدت جریان آندی که می‌توان از آند دریافت کرد، به درستی به دست می‌آید؛
۸. سپس، با جاگذاری خروجی جریان آندی به دست آمده در مرحله ۷ در فرمول مربوطه، طول عمر آند محاسبه یا به‌عبارت‌دیگر، مدت زمان حفاظت کاتدی که با استفاده از آند گالوانیک معین شده تعیین می‌گردد؛
۹. از طریق دو روش و فرمول‌های مربوطه دو مقدار برای تعداد آندها محاسبه می‌شود، تعداد بزرگ‌تر انتخاب شده، و نصب می‌شوند.

نگهداری و تعمیرات سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده

سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده در سال اول که سامانه به طور کامل در سرویس است، باید یک‌بار در ماه بررسی شوند؛ پس از آن می‌توان آنها را دو بار در سال بررسی کرد، که یک بررسی باید در طول فصل بارانی انجام گیرد. به منظور تعمیر و نگهداری، اندازه‌گیری‌ها و کنترل‌های زیر باید انجام شود:

- اندازه‌گیری پتانسیل خط لوله/زمین در هر دو حالت «روشن»و «خاموش»؛
- اندازه‌گیری پتانسیل آند/زمین در موقعیت «خاموش»؛

- اندازه‌گیری پتانسیل سیستم یا پتانسیل محرکه؛
- اندازه‌گیری شدت جریان خروجی آند؛
- کنترل دستگاه‌های اندازه‌گیری و اتصالات؛
- کنترل اتصالات عایقی یا فلنج‌های عایقی؛
- کنترل مقاومت اتصالات جریان سرگردان اگر وجود داشته باشد.

مسائل زیر مسائلی هستند که در سامانه‌های حفاظت کاتدی آند فداشونده بیشتر با آن مواجه هستیم و لازم است بررسی شوند:

پتانسیل خط لوله/زمین پایه

پتانسیل‌های خط لوله/زمین که با وجود خروج جریان آندی زیاد، منفی‌تر از ۸۵۰ mV- نمی‌باشد، ممکن است ناشی از یک یا چند تا از دلایل زیر باشد:

۱. ممکن است یک جزء جدید به سیستم خط لوله اضافه شده باشد؛ به هر حال، ممکن است با استفاده از یک فلنج عایقی از هم جدا نشده باشند و در نتیجه جریان مورد نیاز افزایش پیدا کند؛
۲. ممکن است فلنج‌های عایقی مقاومت خود را از دست داده باشد، در نتیجه جریان‌های سرگردان به سازه‌های بیگانه وارد شوند؛
۳. ممکن است یک سامانه حفاظت کاتدی جدید که پتانسیل منفی بیشتری دارد، در اطراف نصب شده باشد و در نتیجه جریان‌های سرگردان به این سامانه جدید وارد شود؛
۴. پوشش خط لوله آسیب دیده به حدی است که جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی از مقداری که در ابتدا پیش‌بینی شده افزایش یافته است.
۵. ویژگی‌های خورندگی زمینی که خط لوله در آن واقع شده است، تغییر کرده و به دلیل افزایش میزان رطوبت یا افزایش نرخ نفوذ اکسیژن، خوانندگی افزایش یافته است.

کاهش تولید جریان آندی

به طور معمول، به علت دریافت جریان از آند که به کاهش وزن و حجم منجر می‌شود، و همچنین به دلیل کاهش ولتاژ محرکه ناشی از افزایش پتانسیل خط لوله/زمین است، کاهش تدریجی تولید جریان آندی رخ می‌دهد. به هر حال، در هر دو مورد، تا زمانی که پتانسیل خط لوله/زمینی بالاتر از حد حفاظت باقی بماند، حفاظت کاتدی همچنان ادامه دارد؛ اما اگر هیچ جریان آندی تولید نشود و پتانسیل خط لوله/زمین زیر حد حفاظت باقی بماند، یکی یا بیشتر از وضعیت‌های زیر دلیل آن است:

۱. جریان خروجی از آند بیشتر از مقدار پیش‌بینی است، و در نتیجه آند قبل از طول عمر محاسبه شده، از بین رفته است؛
۲. اتصال کابل – آند ضعیف می‌باشد، یا به طور کامل جدا شده است؛ اگر به طور کامل جدا شده باشد، پتانسیل آند/زمین را نمی‌توان اندازه گرفت.

فصل ششم

سیستم حفاظت کاتدی به‌وسیله آند تزریق جریان

این امکان وجود دارد که با تبدیل سازه فلزی به کاتد با استفاده از یک جریان مستقیم با شدت و پتانسیل مناسب از طریق روش حفاظت کاتدی اعمال جریان، آن را از خوردگی محافظت کرد. جریان مستقیم مورد استفاده برای حفاظت کاتدی از طریق یک دستگاه ترانسفورماتور/یک‌سوکننده (T/R)[۲۴۶] که جریان متناوب را به جریان مستقیم تبدیل می‌کند، تأمین می‌شود. قطب مثبت جریان مستقیم خروجی از دستگاه T/R به بستر آندی و قطب منفی به سازه فلزی، به‌عنوان مثال، به خط لوله تحت حفاظت کاتدی، متصل می‌شود. برخلاف سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده که با نصب آند اضافی، جریان حفاظت کاتدی کل افزایش می‌یابد، در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال، جریان و پتانسیل سامانه را می‌توان بسته به ظرفیت دستگاه T/R به اندازه مورد نظر افزایش داد. بنابراین، در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، یک خط لوله بسیار طولانی می‌تواند فقط با یک بستر آندی محافظت شود، به شرطی که پتانسیل خط لوله/زمین از یک مقدار حدی معین در نقطه تزریق جریان تجاوز نکند که به علت حفاظت بیش از حد نمی‌تواند اجازه داده شود. طول بخشی از یک خط لوله که می‌تواند با استفاده از یک بستر آندی منفرد حفاظت شود به نوع خط لوله، قطر داخلی و خارجی آن و ضخامت بدنه فلزی، همچنین در صورت وجود کیفیت پوشش و به‌شدت جریان آندی تولیدی بستگی دارد.

به‌عنوان مثال، در مورد حفاظت بیش از حد، اگر پتانسیل فولاد با قطبش اضافی در جهت کاتدی در جهت منفی افزایش یابد، بنابراین، نه تنها اکسیژن در کاتد کاهش می‌یابد، بلکه هیدروژن نیز از طریق واکنش الکترولیز آب نیز کاهش می‌یابد. هیدروژن متصاعد شده ممکن است باعث تاول زدن و تورق شود. به‌علاوه، در محیط‌های مناسب برای خوردگی تنشی، برخی از اتم‌های هیدروژن تولید شده ممکن است در ساختار بلوری فلز نفوذ کنند که نتیجه آن تردی هیدروژنی است. همچنین، استفاده از جریان برای حفاظت بیش از حد به هزینه‌های اضافی منجر می‌شود.

دستگاه ترانس رکتیفایر

در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، جریان از شبکه برق عمومی به شکل جریان متناوب دریافت و به جریان مستقیم تبدیل می‌شود. یک دستگاه ترانسفورماتور/یک‌سوکننده (T/R) برای تبدیل جریان متناوب (AC)[۲۴۷] به جریان مستقیم (DC)[۲۴۸] استفاده می‌شود. با توجه به اینکه یک الکترود مرجع ثابت به سامانه حفاظت کاتدی متصل است، اگر پتانسیل تنظیم شود، هر اندازه جریان مستقیم که مورد نیاز باشد را می‌توان از دستگاه T/R دریافت کرد. بنابراین، تنظیم خودکار جریان خروجی از یک سیستم T/R، به‌عنوان مثال، یک دستگاه T/R تک فاز و دیگری سه فاز، ممکن و میسر است. قطب منفی از

---

2 [illegible] 4 6

2 [illegible] 4 7

2 [illegible] 4 8

جریان مستقیم سیستم ترانسفورماتور/یک‌سوکننده (T/R) به فلزی که باید محافظت شود، متصل می‌شود، درحالی‌که، قطب مثبت به آندهای موجود در سامانه حفاظت کاتدی متصل هستند.

هر یک از دو نوع دیودهای سیلیکونی یا سلنیومی در یکسوسازی استفاده می‌شوند، که در هر دو شکل نیم موج یا تمام موج، برای تبدیل جریان متناوب به جریان مستقیم به کار می‌روند. ازآنجاکه، دیودهای سیلیکونی نسبت به دیودهای سلنیومی، ۱۰ درصد بازدهی بیشتر دارند و نیز فضای کمتری اشغال می‌کنند، ترجیح داده می‌شوند.

به دلیل نوسان ۶۰ دور در ثانیه که «موج‌دار شدن»[۴۹]نامیده می‌شود، جریان متناوب به شکل سینوسی در می‌آید. این جریان نوسانی نیز خود را در حفاظت کاتدی نشان می‌دهد، اما از آنجا که تغییر پتانسیل کم است، به‌عنوان مثال، بین ۱۲۰۰ mV– و ۱۴۰۰ mV– و چون از این نوسانات در پتانسیل در کمتر از یک چند صدم ثانیه رخ می‌دهد، ولت‌متر تنها یک مقدار ثابت یعنی ۱۳۰۰ mV–، را نشان می‌دهد و در نتیجه در عمل هیچ‌گونه آسیبی ایجاد نمی‌کند.

بازده دستگاه ترانس رکتیفایر □□

در بهره‌برداری، ابتدا ترانسفورماتور پتانسیل جریان متناوب سه فاز یا تک فاز دریافتی از شبکه برق را به سطح مورد نظر کاهش می‌دهد، سپس، یک‌سوکننده آن را به جریان مستقیم معمولاً با بازدهی ٪۶۰ تا ٪۷۰ تبدیل می‌کند.

بازده دستگاه T/R برابر با نسبت قدرت جریان مستقیم تولیدی یک‌سوکننده به قدرت جریان متناوب تولیدی شبکه برق می‌باشد:

$$\text{power (watt)} = \text{جریان}(A) * \text{پتانسیل}(V)$$

و

$$\text{قدرت جریان متناوب (watt)} = \text{E T /hour (kW.hour)}$$

و

$$\text{T/R efficiency} = \frac{\text{P out}}{\text{P in}} \times 100$$

بنابراین بر اساس فرمول‌های مربوطه، برای تولید جریان مستقیم ۲۰ A و ۱۵ V، قدرت جریان مستقیم ۳۰۰ W خواهد بود و اگر انرژی برق ۰/۲ Kw.hour به مدت نیم ساعت صرف شده باشد، قدرت برابر با ۴۰۰ W خواهد شد و در نتیجه بازده دستگاه T/R برابر ٪۷۵ می‌باشد. بازده دستگاه T/R با پتانسیل جریان مستقیم خروجی افزایش می‌یابد. بنابراین، برای پتانسیل‌های کمتر از ۱۰ V، بازده به کمتر از ٪۶۰ کاهش پیدا کند. زمانی بازده بالاتر است که جریان سه فاز استفاده می‌شود.

دستگاه ترانس رکتیفایر □□ با پتانسیل ثابت

در برخی موارد، به دلیل وجود جریان‌های سرگردان ناشی از تغییر مقاومت بستر آندی بسته به تغییرات فصلی، جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی تغییر می‌کند؛ بنابراین، برای حفظ پتانسیل ثابت خط لوله/زمین دستگاه T/R به طور خودکار جریان را تنظیم می‌کند. به همین دلیل، یک الکترود مرجع دائمی در نزدیک سازه فلزی تحت حفاظت نصب می‌شود و پتانسیل تولید شده

2 □□□□□□□ 4 9

تحت کنترل جریان از طریق تقویت‌کننده مغناطیسی،[۲۵]استفاده می‌شود. اگر پتانسیل بیشتر از مقدار مورد نیاز باشد، پس تقویت‌کننده جریان را برای یک دوره کوتاه زمانی متوقف می‌کند و اگر پتانسیل کمتر باشد، جریان بیشتری از دستگاه T/R خارج می‌شود و ازاین‌رو، پتانسیل خط لوله/زمین همیشه ثابت نگه داشته می‌شود.

نصب دستگاه ترانس رکتیفایر

دستگاه T/R معمولاً روی یک بلوک بتنی که حداقل ۳۰ سانتی‌متر ارتفاع دارد یا روی یک تیر برق نصب می‌شود که حداقل ۱۳۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح زمین است، به‌طوری‌که تحت تأثیر عوامل محیطی مانند باران، تغییر دما و غیره قرار نگیرند. کابل‌های حامل جریان متناوب از شبکه برق، باید با قرار دادن آنها در کابل محافظ دیگر و سپس بستن آنها بر روی تیر، محافظت شوند. برای قطع کردن جریان، باید یک کلید در بیرون جعبه T/R متصل کرد. جعبه بیرونی باید ارت شود و کابل‌های حامل جریان مستقیم باید برای مشخص کردن قطب مثبت و منفی برچسب زده شوند. برای دستگاه‌های T/R که برای حفظ پتانسیل ثابت خط لوله/زمین، به طور خودکار جریان را تنظیم می‌کنند، باید یک کابل نصب شده باشد که به‌خوبی به الکترود مرجع نزدیک خط لوله متصل شده است. کابل‌ها از طریق جوش ترمیتی و پس از زدودن پوشش تا نمایان شدن سطح لخت فولاد و تمیز کردن کامل سطح، به لوله متصل می‌شوند. در سطحی که کاملاً تمیز شده است، ذرات ترمیت آتش زده می‌شوند، پس از جوشکاری سرباره حذف و نواحی باز با استفاده از مواد ماستیک عایق می‌شوند. به منظور جلوگیری از کاهش پتانسیل، کابل‌هایی که برای حمل جریان مستقیم با شدت بالا استفاده می‌شوند، باید سطح مقطع بزرگ داشته باشد و اتصالات آنها نباید ناحیه‌ای با مقاومت بالا ایجاد کنند. اگر یک سوراخ ریز در هر یک از کابل‌های مدفون در زمین به وجود آید، جریان‌های سرگردان شکل می‌گیرد و این کابل‌ها به دلیل خوردگی، پوسیده و قطع می‌شوند. یک جریان سرگردان به این معنا خواهد بود که پتانسیل جریان مستقیم اعمالی توسط دستگاه T/R به سمت آند نیز کاهش خواهد یافت.

مشخصات فنی دستگاه ترانس رکتیفایر

مشخصات فنی یک دستگاه T/R از قبیل ظرفیت، پتانسیل و جریان خروجی مستقیم است، که باید در طی فاز طراحی پروژه براساس معیارهای زیر تعیین شود:

- از جریان متناوب V ۲۲۰ یک فاز یا ۳۸۰ ولت سه فاز استفاده خواهد شد؛
- از سیستم خنک‌کننده هوا و یا روغن استفاده خواهد شد؛ در جو خورنده، دستگاه T/R خنک‌شونده با روغن ترجیح داده می‌شود، درحالی‌که، در جاهایی که پالایشگاه‌ها، گازها و مواد شیمیایی قابل احتراق، دستگاه T/R ضدانفجار خنک‌شونده با هوا باید استفاده شود؛
- دستگاه T/R، دیودهای سلنیومی و یا سیلسکونی خواهد داشت؛
- حداکثر درجه حرارت بهره‌برداری؛
- حساسیت و ظرفیت دستگاه‌های اندازه‌گیری مانند آمپرمتر یا ولت‌متر که در جعبه دستگاه T/R است؛

2 5 0

- جاهایی که دستگاه T/R نصب خواهد شد، روی تیر برق، روی دیوار یا روی سطح بلوک بتنی.

انواع آندهای تزریق جریان

در حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، ازآنجاکه، انرژی یا جریان از بیرون تأمین می‌شود، آند مرجع به جای فلز تحت حفاظت، دچار خوردگی نمی‌شود؛ بااین‌حال، ازآنجاکه با اعمال پتانسیل، هر فلزی کم‌وبیش، خورده می‌شود، حتی بادوام‌ترین آندها عمر محدودی خواهند شد. بنابراین، به دلیل اینکه نیمی از هزینه اولیه ساخت سامانه حفاظت کاتدی، صرف خرید آندها می‌شود، آندها باید مقرون‌به‌صرفه باشند. بنابراین، کاهش جرم در جریان خروجی (A.year) باید تا حد ممکن کوچک‌تر باشد. مهم این است تا حد امکان جریان خروجی از آند بیشترین باشد و مقاومت آند با زمان افزایش پیدا نکند، مانند آند تیتانیوم که با اکسیدهای فلزی رسانا مانند $Fe_2O_3 - NiO$ پوشانده شده است که هرگز غیرفعال (رویین) نمی‌شود.

آند مورد استفاده در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان به دو صورت عمودی یا افقی در بستر آندی و در عمق حداقل برابر با طول آند قرار داده می‌شوند. معمولاً از ذرات زغال کک به‌عنوان مواد پرکننده اطراف آند استفاده می‌شوند. ذرات کک مقاومت بستر آندی را کاهش داده و مانع کاهش وزن آند می‌شود.

مسائلی مانند طرح محل آند، اتصالات آنها و کاهش پتانسیل در امتداد اتصالات باید قبل از قرار دادن آنها در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، مورد توجه قرار گیرند. برای پایش مؤثر سامانه، مکان‌هایی که اندازه‌گیری پتانسیل انجام خواهد شد، باید به دقت انتخاب شود.

آندهای گرافیتی

آندهای گرافیت مقرون‌به‌صرفه هستند و بنابراین، به طور معمول در آب دریا، آب‌های شیرین و در زمین استفاده می‌شوند. ازآنجاکه همه محصولات واکنش‌های آندی گرافیت گازی هستند، هیچ لایه غیرفعالی (رویین) در سطح آند تشکیل نمی‌شود. در آب‌های شیرین و در زمین، اکسیژن و دی اکسید کربن تولید می‌شود، درحالی‌که، در دریا و به خصوص در چگالی‌های جریان زیاد، به طور عمده گاز کلر همراه با اکسیژن تشکیل می‌شود. آند گرافیت برای خروجی جریان $2/5 - 3/0 A/m^2$ مناسب است که به کاهش وزن کمتر از ۰/۵ kg/A.year منجر می‌شود، درحالی‌که، خروجی جریان بیش از $4A/m^2$ در آب شیرین و بیش از جریان $10A/m^2$ در زمین، و بیش از جریان $30A/m^2$ در دریا باعث شکستن آند گرافیت خواهد شد.

آند گرافیت در مواد بستر آندی ذرات زغال کک قرار گرفته است که به خروجی یکنواخت جریان منجر می‌شود، بااین‌حال، گازهای تشکیل شده به‌عنوان نتیجه واکنش‌های آندی باید از محیط خارج شوند که با استفاده از فیلتر ذرات کک انجام می‌گیرد. به‌علاوه، اسیدهای تشکیل شده باید خنثی شوند که معمولاً این کار با افزودن آب آهک انجام می‌شود.

یک پتانسیل اضافی ۱/۷ V باید به سامانه حفاظت کاتدی اعمال شود تا گرافیت را آند سازد و فولاد را به‌عنوان کاتد نگه دارد، زیرا پتانسیل آند گرافیت ۱/۷ V است و مثبت‌تر از فولاد می‌باشد. بنابراین، در غیاب جریان اعمالی، گرافیت کاتد و فولاد آند خواهد بود.

آند آهن – سیلیکون

آندهای چدن که با ۱۴/۴٪ سیلیکون آلیاژ شده‌اند، در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان به طور گسترده استفاده می‌شوند. سیلیکون یک فیلم دی‌اکسید سیلیکون محکم روی سطح آند تشکیل می‌دهد و آند محافظت می‌کند. بااین‌حال، این فیلم مقاومت آند را افزایش نمی‌دهد چون با وجود مقاومت بسیار بالای سیلیکون خالص و تا زمانی که سطح به طور کامل با دی‌اکسید سیلیکون پوشیده نشده باشد یون هیدرونیوم (H^+) رسانایی را میسر می‌کند. این امکان با آلیاژ کردن آهن با ۱۴/۳۵٪ سیلیکون به دست می‌آید.

$$Si^{4+} + 4H_2O \rightarrow Si(OH)_4 + 4H^+$$

آند آهن- سیلیکون در آب شیرین و در زمین بسیار مقاوم و بادوام می‌باشد. کاهش وزن این آند در چگالی جریان $20A/m^2$ به مقدار ۰/۵ تا ۰/۷۵ kg/A.year است. در آب دریا، اگر چه، به دلیل تولید گاز کلر، غیرفعال (رویین) شدن لغو می‌شود، که به خوردگی حفره‌ای در سطح آند منجر می‌شود. با افزودن ۴/۵٪ کروم به این آلیاژ، آلیاژ چدن پرسیلیس (HSCI)[۱] دست می‌آید، از خوردگی حفره‌ای جلوگیری و در نتیجه، در چگالی جریان $500A/m^2$، افت وزن تا ۴۵۰ g/A.year کاهش می‌یابد. افزودن ۳٪ مولیبدن به جای کروم به این آند، استفاده از آن را در دماهای حتی بالاتر از ۱۰۰°C اجازه می‌دهد.

بزرگ‌ترین عیب آند آهن - سیلیکون این است که آنها سنگین و شکننده هستند. همچنین، اگر بستر آند خشک شود، جریان تولیدی یا بازده جریان به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

آندهای سرب – نقره

آندهای سرب حاوی ۱٪ تا ۲٪ نقره، می‌توانند جریان‌های ۵۰ تا $200A/m^2$در آب دریا تولید کنند. در ابتدا کاهش وزن این آندها در حدود ۱ A/kg است که بعد از حدود یک ماه به دلیل تشکیل لایه پراکسید سرب بر سطح آند، به ۳۰ تا ۵۰ A.year کاهش می‌یابد. لایه پراکسید سرب از تجزیه آند ممانعت می‌کند، اما به دلیل رسانا بودن این لایه، مقاومت آندی افزایش پیدا نمی‌کند، مگر اینکه جریانی بیش از $400A/m^2$دریافت شود. خروج چنین جریان زیادی به تشکیل کلرید سرب و اکسی کلریدهای سرب نارسانا در زیر لایه پراکسید سرب منجر شده که مقاومت آندی را افزایش داده و بنابراین جریان آندی کاهش می‌یابد.

دلیل افزودن نقره این است که اگر آلیاژ سرب با نقره آلیاژ نشود، سرب غیرفعال (رویین) می‌شود و کلرید سرب در آب دریا تشکیل می‌شود. نقره از غیرفعال (رویین) شدن جلوگیری می‌کند حتی اگر در محیط سولفات‌ها در کنار کلریدها وجود داشته باشند. افزایش درصد نقره به ۲٪، تشکیل پراکسید سرب را تسریع می‌کند، با پوشاندن سطح آند با ذرات زغال کک نتیجه مشابه حاصل می‌گردد. بااین‌حال، لایه پراکسید سرب نمی‌تواند در آب شیرین و زمین تشکیل شود، به‌ویژه از آن در چگالی جریان خیلی کم بهره‌برداری شود.

---

2 [illegible] 5 1

آندهای تیتانیوم با پوششی از پلاتین

آندهای تیتانیوم یا نیوبیوم پوشش داده شده با یک لایه پلاتین به ضخامت ۱۵ تا $10\mu m$ آندهایی با بازدهی بسیار بالا هستند که در آب دریا جریان‌های بسیار بالایی تا $1000A/m^2$ و در زمین با بستر آندی ذرات زغال کک $300A/m^2$ جریان تولید می‌کنند. آندهای پلاتین پوشیده شده با تیتانیوم و یا نیوبیوم، کاهش وزن بسیار کمی، تنها ۵ تا mg/A.year ۱۰ در آب دریا دارند.

آندهای تیتانیوم یا نیوبیوم پوشیده شده با پلاتین متصاعد شدن گاز کلر مقاوم هستند، بااین‌حال، آنها گران بهاء هستند و اگر پتانسیل بیش از ۸ V اعمال شود یا اگر تغییرات فرکانس یا موج‌دار شدن در دستگاه T/R به دلیل جریان ورودی متناوب ایجاد شود، پوشش پلاتین ممکن است آسیب ببیند و به غیرفعال (روییین) شدن آند منجر شود.

آندهای تیتانیوم با پوششی از اکسیدهای فلزی (□□□□□□□□□□□□)

آندهای تیتانیوم پوشش داده شده با اکسیدهای فلزی[۲۵۲]به‌عنوان مثال، با مخلوطی از $NiO + Fe_2O_3$ با نسبت معین، به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند، زیرا آنها هرگز غیرفعال (روییین) نمی‌شوند، خروجی جریان بسیار بالایی دارند و مقاومت‌شان با زمان افزایش نمی‌یابد. آنها می‌توانند در آب دریا جریان‌های تا $600A/m^2$ و در زمین با بستر آندی ذرات زغال کک تا $100A/m^2$ جریان تولید می‌کنند. ذرات زغال کک اطراف آند به‌عنوان ماده پرکننده بستر آندی استفاده می‌شوند، مقاومت را کاهش داده و در نتیجه جرم کاهش می‌یابد. سایر مواد پرکننده مورد استفاده رایج با این نوع آندها،گرافیت، زغال کک نفتی و زغال سنگ هستند.

اکسیدهای NiO و Fe_2O_3 بر سطح این آندها از طریق ترسیب[۲۵۳]پوشش داده می‌شود به‌طوری‌که آنها با تصاعد گازهای کلر و اکسیژن در سطوح آند تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند، و همچنین به اسیدهایی که مقادیر pH کمتر از ۱ دارند، حتی در چگالی‌های جریان بسیار بالا بدون قطبش، مقاوم می‌باشد. بنابراین، آنها به خصوص در اسیدها و محلول‌های حاوی مواد شیمیایی فعال ترجیح داده می‌شود.

ازآنجاکه چنین بی‌اثری[۲۵۴]کاهش وزن آندهای تیتانیوم پوشش داده شده با $NiO\%10$و $Fe_2O_3\%90$ در چگالی جریان $500A/m^2$ برابر g/A.yaear ۱/۵۶ است، درحالی‌که، این کاهش وزن برای آندهای تیتانیوم پوشش داده شده با $NiO\%40$و $Fe_2O_3\%60$ در چگالی جریان $500A/m^2$ برابر g/A.yaear ۰/۴۰ می‌باشد، با g/A.yaear ۰/۰۱ کاهش وزن آند تیتانیوم پوشش داده شده با پلاتین، g/A.yaear ۳۰ کاهش وزن آند گرافیت و g/A.yaear ۴۵۰ کاهش وزن آندهای آهن- کروم- سیلیکون تحت شرایط مشابه در چگالی جریان $500A/m^2$ در آب مقایسه شود.

مزیت استفاده از این آند نسبت به آند پوشش‌دار به پلاتین این است که پتانسیل بیش از حد این آندها به دلیل تصاعد گازهای اکسیژن و کلر در چگالی جریان بالا مانند $500A/m^2$ خیلی افزایش نمی‌یابد، زیرا پتانسیل تجزیه هر دو کلر و اکسیژن برای

---

[۲۵۲] .این آندها را با عنوان □ □ □ (□□□□□ □□□□□ □□□□□ □□□□□ □) می‌شناسیم.

2 □□□□□□□□□□□□ 5 3

2 □□□□□□□□□□□□ 5 4

آندهای تیتانیوم پوشیده شده با اکسید فلز کم است. در هر دو آندهای پوشیده شده با پلاتین و اکسید فلز، ابتدا گاز کلر در سطح آند متصاعد می‌شود؛ بااین‌حال، در آند تیتانیم پوشیده شده با پلاتین و در چگالی جریان بالا مانند $500A/m^2$، تصاعد گاز اکسیژن رخ می‌دهد. پتانسیل‌های تجزیه برای آندهای تیتانیم پوشیده شده با اکسید فلز با تغییرات چگالی جریان خیلی آرام تغییر می‌کند. این موضوع اجازه می‌دهد که بدون افزایش پتانسیل جریان اعمالی از آندهای تیتانیم جریان‌های بالا دریافت گردد، و به‌عنوان یک نتیجه، استفاده از آند کوچک‌تر و کاهش اندازه و اثر آندی ممکن شود.

مقاومت بستر آندی

مقاومت بستر آندی به طول ناحیه فعال چاه، قطر چاه، تعداد و نوع آندها، مقاومت زمین و به مواد پرکننده بستر آندی بستگی دارد. طول ناحیه غیرفعال[۲۵۵]چاه، بر مقاومت بستر آندی تأثیر ندارد. ناحیه غیرفعال در بستر آندی چاه عمیق محلی است که آندی در آن قرار ندارد و در نتیجه با شن تمیز پر شده است و تهویه گازهای تولید شده توسط واکنش‌های آندی را اجازه می‌دهد که اگر تهویه نشوند مقاومت بستر آندهای را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند.

سعی بر آن است که در سامانه‌های حفاظت کاتدی، مقاومت بستر آندی تا جایی که ممکن باشد، کاهش داده شود، چون مقاومت بالا نیازمند جریان آندی با پتانسیل بالاست، همچنین به هزینه‌های بالاتر منجر می‌شود. به هر حال، در ابتدا، جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی تعیین می‌شود، زیرا اگر جریان با شدت کم برای حفاظت کاتدی کافی باشد، ممکن است به کاهش مقاومت بستر آندی نیازی نباشد، در غیر این صورت افزایش هزینه‌ها را به دنبال خواهد داشت. بااین‌وجود، اگر جریان تعیین شده نیازمند کاهش مقاومت بستر آندی نباشد به طوری است که پتانسیل جریان اعمالی بتواند کم شود، همچنین کاهش هزینه‌های کل را نیز به دنبال دارد، پس به منظور کاهش مقابل مقاومت بستر آندی به کاهش عمر حفاظت کاتدی، اقدامات زیر می‌تواند انجام شود:

- ذرات زغال کک به‌عنوان ماده پرکننده بستر آندی استفاده شود، که اندازه مؤثر آند را افزایش می‌دهد؛
- بستر آندی در زمین با مقاومت کم اجرا شود؛
- تعداد آندها افزایش یابد، بااین‌حال، همچنین هزینه‌های کل افزایش خواهد یافت؛
- فاصله بین آند که به موازات یکدیگر به هم متصل شده‌اند، افزایش یابد؛
- تعداد آند کوچک‌تر بیشتری با جرم کل یکسان به جای چند آند بزرگ استفاده شوند؛
- آندی که نسبت طول به قطر (L/d) بالاتری دارد، ترجیح داده شوند.

فرمول دوایت برای اندازه‌گیری مقاومت آند منفرد که نسبت طول به قطر بزرگ‌تر از ۵ ($L/d > 5$) دارد و به شکل یک میله یا استوانه است، استفاده می‌شود. اول، قطر نیمی از آندهایی که سطح مقطع دایره‌ای ندارد بر اساس فرمول مربوطه محاسبه می‌شود. سپس، یک نسخه از فرمول دوایت برای محاسبه مقاومت بستر آندی تعدادی از آندها استفاده می‌شود که به موازات

2 5 5

یکدیگر متصل شده‌اند. بااین‌حال، اگر فاصله بین آندها بیش از حد طولانی باشد، مانند $s > 10m$ پس از آن نسبت سوم داخل پرانتز را می‌توان صفر در نظر گرفت و حذف شود، در نتیجه:

$$R = \frac{\rho}{2\pi \mathrm{Ln}}\left(ln\frac{8L}{d} - 1\right)$$

می‌تواند به‌صورت زیر بازنویسی شود:

$$R = R_0/n$$

که در آن n تعداد آندهاست، چون مقاومت آند منفرد که به‌صورت عمودی در یک بستر آندی قرار می‌گیرد، در فرمول زیر بیان شده است:

$$R_{\mathrm{vertical}} = \frac{\rho}{2\pi \mathrm{L}}\left(ln\frac{8L}{d} - 1\right)$$

در عمل، داشتن یک مقدار «S» بیش از ۵ متر ترجیح داده نمی‌شود، زیرا هزینه‌ها را به دلیل کابل و حفاری بیشتر، افزایش می‌دهد.

انواع بستر آندی

در سامانه‌های حفاظت کاتدی روش اعمال جریان، دو نوع بستر آندی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ یک بستر آندی چاهی کم عمق[۲۹۶](سطحی) و دیگری بستر چاهی عمیق[۲۹۷]است. در بستر آندی چاهی کم عمق، آند در چاهی به عمق حدود ۲ متر و به‌صورت عمودی یا افقی قرار می‌گیرد، سپس، با ذرات زغال ککک پوشانده می‌شود، درحالی‌که، در مورد بستر آندی چاهی عمیق، آندها در چاهی عمیق به‌صورت عمودی و در حداقل عمق ۱۵ متری چاه بستر آندی با قطر حداقل ۲۰ cm قرار داده می‌شوند، زیرا قطر کم سبب نصب سخت آندها خواهد شد. حداقل عمق ۱۵ متر مورد نیاز است، چون فقط پس از این عمق، افزایش پتانسیلی که در سطح ایجاد خواهد شد کمتر از ۲۰۰ mV می‌باشد، بنابراین، سبب تداخل نمی‌شود. بعد از نصب آندها در چاه عمیق، باقی مانده اطراف و زیر آندها با ذرات زغال ککک پر می‌شود، درحالی‌که، بخش بالاتر از سطح آندها با شن تمیز پر می‌شود که اجازه می‌دهد گازهای متصاعد شده تخلیه گردند. به بیانی دیگر، بستر آندی چاه کم عمق ممکن است باعث تغییرات پتانسیل تا ۵ V شود.

قاعدتاً، روش چهار میله‌ای ورنر[۲۵۸]برای اندازه‌گیری مقاومت لایه خاک در سطح زمین استفاده می‌شود. بااین‌حال، در مورد بستر آندی چاهی عمیق، اطراف بستر آندی معمولاً شامل لایه‌های زمین‌شناسی متعددی است و فقط خاک نیست؛ بنابراین، مقاومت زمین را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد، مگر اینکه چاه حفر گردد.

اختلاف پتانسیل ایجاد شده توسط بستر آندی در سطح زمین با استفاده از فرمول زیر اندازه‌گیری می‌شود یعنی:

---

2 [illegible] 5 6
2 [illegible] 5 7
2 Wenner’s four electrode metho5de 8

$$\Delta E = i\rho / 2\pi r$$

که i جریان خروجی آند به آمپر، ρ مقاومت زمین به ohm.cm می‌باشد، r فاصله تا محور بستر آندی می‌باشد، و ΔE اختلاف پتانسیل برحسب ولت در فاصله r از محور بستر آندی در سطح می‌باشد.

شیب پتانسیل ایجاد شده در سطح زمین به شکل یک کره است و در نتیجه، در مورد بستر آندی عمیق‌تر، اختلاف پتانسیل کمتری در سطح ایجاد می‌شود.

اگرچه نصب بستر آندی چاهی کم عمق، ارزان‌تر و آسان‌تر است، در خیلی از موارد و به دلایل زیر، بستر آندی چاهی عمیق ترجیح داده می‌شود:

۱. یک محل وسیع برای بستر آندی کم عمق مورد نیاز است، که به خصوص در مناطق شهری یا در دیگر نقاط نامتعارف، مانند مناطق کوهستانی، ممکن نیست چنین زمینی پیدا شود؛
۲. اگر مقاومت زمین بیش از حد بالا باشد، استفاده از بسترهای چاهی عمیق آندی ممکن است به کاهش مقاومت بستر آندی کمک کند؛
۳. بسترهای آندی چاهی عمیق با تغییرات اقلیمی فصلی و یا سایر تغییراتی که در نزدیک سطح اتفاق می‌افتد، مانند فعالیت‌های کشاورزی یا ساخت و سازها، تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند؛
۴. بسترهای آندی چاهی عمیق، توزیع جریان یکنواخت‌تر را اجازه می‌دهند، در نتیجه باعث ایجاد اختلاف پتانسیل کمتری در سطح می‌شود، درحالی‌که، سبب هرگونه تداخلی در سازه‌های فلزی پیرامون نمی‌شود. اثرات تداخل بسترهای آندی چاهی عمیق به طول آند و طول بخش غیرفعال یا بی‌اثر بستگی دارد که با شن پر شده است.

معایب بستر آندی چاهی عمیق عبارتند از:

۱. بستر آندی چاهی عمیق حدود ٪۲۵- ۲۰ گران‌تر از بستر آندی چاهی کم‌عمقی است که جریان یکسانی تولید می‌کند. این تفاوت هزینه با افزایش مقاومت زمین و چنانچه جریان دریافتی از آند افزایش یابد، کاهش می‌یابد؛
۲. در بستر آندی چاهی عمیق، آندی که فرسوده شده باشد را نمی‌توان با آند جدید جایگزین کرد؛
۳. پر کردن کامل بستر آندی چاهی عمیق با ذرات زغال کک دشوار است، حفره‌ها و منافذی بر جا می‌گذارد که مقاومت بستر آندی را افزایش می‌دهد. بنابراین، در ابتدا، قبل از پر کردن چاه با ذرات زغال کک از پایین به بالا، آب داخل چاه به طور کامل تخلیه می‌شود. به‌علاوه، مواد پرکننده ذرات زغال کک را با افزودن ۰/۵ kg پاک‌کننده[۲۵۹]به هر ۹۰ kg ذرات زغال کک سیال‌تر کرده، سپس ۱۰۰ L مخلوط ذرات زغال کک با آب را تهیه می‌کنند و بعد برای پر کردن چاه از پایین چاه تا بالای آنها استفاده می‌شود؛
۴. گاز متصاعد شده ناشی از واکنش‌های آندی، در داخل چاه جمع می‌شود و نمی‌تواند به‌راحتی تخلیه گردد؛ بنابراین، یک لوله تهویه برای تخلیه گازها نصب می‌شود. لوله تهویه باید به اندازه کافی برای تخلیه گاز بزرگ باشد و همچنین به اندازه کافی کوچک باشد که به‌وسیله مواد پرکننده بستر آندی به طور کامل مسدود نشود، که معمولاً اندازه قطر ۲ تا ۳ سانتی‌متر مناسب است. مسدود شدن داخل چاه می‌تواند با پمپاژ هوای فشرده به داخل چاه با استفاده از یک شلنگ و از طریق لوله تهویه باز کرد. بااین‌حال، با گذشت زمان، مقدار مشخصی از گازهای متصاعد شده هنوز محبوس می‌شوند، با شروع این مسئله از پایین چاه مقاومت آندی افزایش می‌یابد، در نتیجه، به کاهش جریان آندی تولید شده منجر می‌شود. اگر هیچ‌یک

2 5 9

از اقدامات پیشگیرانه ذکر شده، هیچ کمکی نکرد، انتقال جریان به بستر آندی قطع و واکنش‌های آندی متوقف می‌شوند. بنابراین، اگر این مسئله به دلیل گازهای جمع شده، به افزایش فشار منجر شود، باید چند روز صبر کرد، به آنها فرصت داد تا تخلیه شوند، که نتیجه کاهش فشار و بازگشت به حالت قبل است، اگر چنین موردی بود، سپس بستر آندی به عملکرد قبل باز می‌گردد. این زمان در پتانسیل پایین‌تر، برای چنین مشکل مشابه‌ای تکرار نمی‌شود. لوله تهویه همچنین می‌تواند به‌عنوان یک انتقال‌دهنده آند برای جای دادن آند در مرکز بستر آندی استفاده شود. علاوه بر این، اگر کلر به‌عنوان محصول واکنش‌های آندی متصاعد شود، کابل‌های اتصال آند باید با پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا (HMWPE) و یا اتیلن کلرو – تری فلورواتیلن (ECTFE) پوشش داده شود؛

۵. با گذشت زمان، خشک شدن مواد پرکننده بستر آندی از بالا به پایین شروع می‌شود که به کاهش تراوایی بستر آندی[۲۶]، افزایش مقاومت بستر آندی و کاهش جریان تولید شده، منجر می‌شود. تزریق آب به داخل بستر آندی چاهی عمیق با استفاده از یک شلنگ و از طریق لوله تهویه بستر آندی، اگر به موقع انجام شود، می‌تواند بستر آندی را خیس نگه دارد.

سطح مقطع کابل

برای جلوگیری از کاهش پتانسیل کاتدی، مقاومت کابل‌های اتصال آند باید کمتر از مقدار مشخصی باشد. فرمول زیر برای محاسبه مقاومت کابل‌های مسی به کار می‌رود:

$$R = 0/0175\frac{L}{A}$$

R مقاومت کابل مسی به اُهم، L طول کابل به متر و A مساحت سطح مقطع کابل به mm^2 است. بر اساس شدت جریان عبوری و همچنین عمر حفاظت کاتدی پیش‌بینی شده، L و A تعیین می‌شوند.

پروژه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان

تعداد و مراحلی که باید به ترتیب در زمان اجرای یک پروژه سامانه حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، دنبال شود، عبارتند از:

۱. چند شاخص وجود دارد که باید قبل از شروع اجرای یک پروژه سامانه حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان مشخص شوند، که عبارتند از:

- قطر خط لوله، برای مثال ۴۰ cm،
- ضخامت فلز خط لوله، برای مثال ۷ mm،
- طول خط لوله، برای مثال ۱۰ km،
- پوشش خط لوله، برای مثال، آسفالت،
- عمر برنامه‌ریزی شده سامانه حفاظت کاتدی، برای مثال ۲۰ سال،
- مقاومت زمین، برای مثال، ۳۰۰۰ ohm.cm،
- چگالی جریان بر اساس آزمایشات میدانی، برای مثال، $0/5mA/m^2$.

2 6 0

۲. سپس بر مبنای این شاخص‌ها، مساحت سطح کل که باید محافظت شود و بر اساس آن جریان کل مورد نیاز، محاسبه می‌شود.
۳. به دنبال آن، بر مبنای جریان کل مورد نیاز و مقاومت زمین تعیین می‌شود که از حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده یا اعمال جریان، به کار رود.

۴. از داده‌های موجود در منابع، مقاومت الکتریکی درونی لوله‌های فولادی در هر متر طول از متراژ لوله و ضخامت فلزی خط لوله داده شده در مرحله ۱، محاسبه می‌شود.
۵. پس از آن، از چگالی جریان مورد نیاز برای سامانه حفاظت کاتدی داده شده در مرحله ۱، مقاومت پوشش محاسبه می‌شود.
۶. بر اساس فرمول زیر، مقاومت الکتریکی درون لوله‌های فولادی از مرحله ۴ و مقاومت پوشش از مرحله ۵، ضریب میرایی محاسبه می‌شود:

$$a=\sqrt{\frac{r}{R}}$$

که در آن r مقاومت الکتریکی درونی لوله‌های فولادی در متر طول و R مقاومت پوشش در متر طول و a ضریب میرایی است.
۷. حداکثر طول خط لوله که در هر دو انتهای ایزوله می‌شود[۲۶۱]از ضریب میرایی به دست آمده در مرحله ۶ و با توجه به ولتاژهای پتانسیل داده شده در هر طرف ایزوله شده، تعیین می‌گردد.
۸. سپس، حداکثر مجاز مقاومت بستر آندی، براساس داده‌های منابع و کل جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی داده شده از مرحله ۲ محاسبه می‌شود. ازآنجاکه مقادیر موجود در منابع معمولاً برای زمین ۱۰۰۰۰ ohm.cm می‌باشد، مقدار متناظر با ضریب فاکتور به دست آمده از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$F=\sqrt{\frac{r}{10000}}$$

که r مقاومت واقعی زمین به ohm.cm است.
۹. به دنبال آن، حداقل تعداد آندهایی که برای نصب کردن مورد نیاز است از مقاومت زمین در مرحله ۱ و جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی در مرحله ۲ محاسبه می‌شود.
۱۰. سپس، جرم آند مورد نیاز بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود، که نسخه اصلاح شده فرمول گفته شده است، با توجه به اینکه عمر آند باید حداقل به اندازه عمر برنامه‌ریزی شده حفاظت کاتدی از مرحله ۱ ادامه باشد، درحالی‌که، دیگر پارامترها بر اساس انتخاب آند هستند که در منابع وجوددارند:

$$\text{(kg) Anode Weight} = \frac{\text{(year)Anode LifeTime} \times (A)\ \text{Anode Current} \times \left(\frac{\text{kg}}{A}.\text{year}\right)\text{Anode Capacity}}{Anodeefficiency}$$

۱۱. مقاومت آندها بر اساس تعداد آندهایی که به موازات یکدیگر به سیستم حفاظت کاتدی متصل هستند و همچنین بر مبنای فاصله آندها از یکدیگر بر طبق فرمول دوایت محاسبه می‌شود.

---

[۲۶۱]. این کار به‌وسیله فلنج یا اتصال عایقی انجام می‌شود.

۱۲. مقاومت بستر آندی بسته به مقاومت آندها و نوع بستر آندی مورد استفاده، یعنی بستر آندی چاهی کم عمق یا چاهی عمیق، محاسبه می‌شود.

۱۳. سپس، بر اساس مقاومت بستر آندی مرحله ۱۱ و حداقل تعداد آند مورد نیاز از مرحله ۹ و جرم آندی مورد نیاز از مرحله ۱۰ تعیین می‌شود که آند کوچک‌تر یا بزرگ‌تر نصب شود.

۱۴. بر اساس کل جریان مورد نیاز مرحله ۲ و عمر برنامه‌ریزی شده سامانه حفاظت کاتدی از مرحله ۱، سطح مقطع کابل‌های اتصال محاسبه می‌شود.

۱۵. بر اساس فرمول سطح مقطع کابل از مرحله ۱۴ و به طول کابل از مرحله ۱، مقاومت کابل محاسبه می‌شود.

۱۶. به دنبال آن، با توجه به کل جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی از مرحله ۲، مقاومت کاتد از مرحله ۵ و ۴ و مقاومت آند از مرحله ۱۵، ولتاژ جریان مستقیم تولید شده توسط دستگاه ترانسفورماتور/یک‌سوکننده با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$E=i(R_{anode}+R_{cathode}+R_{cable}) + 1/7$$

که در آن i جریان کل مورد نیاز برای حفاظت کاتدی می‌باشد.

۱۷. سرانجام، اثر تداخل سامانه حفاظت کاتد بر سازه‌های فلزی پیرامونی بر اساس ولتاژ جریان مستقیم تولید شده توسط دستگاه ترانسفورماتور/یک‌سوکننده به دست آمده از مرحله ۱۶ و طول بستر آندی که به نوع بستر آندی مورد استفاده، چاهی عمیق و یا چاهی کم عمق، به دست آمده از مرحله ۱۲ بستگی دارد، محاسبه می‌شود.

تعمیر و نگهداری سامانه حفاظت کاتدی به روش تزریق جریان

سامانه حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان باید یک‌بار در ماه برای سال اول بررسی شود که سامانه به طور کامل در سرویس است، پس از آن هر سه ماه بررسی انجام می‌شود.

اندازه‌گیری دوره‌ای و کنترل‌های کل سیستم

به منظور تعمیر و نگهداری، کنترل‌ها و اندازه‌گیری‌های زیر باید انجام شود:

- اندازه‌گیری پتانسیل خط لوله/زمین در هر دو حالت «روشن» و «خاموش»؛
- اندازه‌گیری جریان مستقیم تولید شده توسط دستگاه T/R؛
- اندازه‌گیری پتانسیل جریان مستقیم تولید شده توسط دستگاه T/R؛
- اندازه‌گیری مقاومت بستر آندی؛
- اندازه‌گیری پتانسیل خط لوله بیگانه در هر دو حالت «روشن» و «خاموش» در تقاطع با خط لوله که حفاظت کاتدی می‌شود؛
- کنترل کامل دستگاه T/R، آیا فیوزها، اتصالات کابل، دستگاه‌های اندازه‌گیری، و غیره، به طور کامل در سرویس هستند و کالیبره شده‌اند؛
- کنترل اتصال عایقی و فلنج عایقی؛

- کنترل مقاومت اتصالات جریان سرگردان، در صورت وجود.

اندازه‌گیری‌های دوره‌ای و کنترل‌های دستگاه ترانس رکتیفایر T/R

جدا از بررسی‌های دوره‌ای سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، دستگاه‌های T/R باید به طور کامل یک‌بار در سال، برای مورد زیر بررسی شوند:

- کار کردن دستگاه‌های T/R با صدای غیرطبیعی؛
- دستگاه‌های T/R برای خوردگی، کیفیت رنگ، حرارت بیش از حد باید به‌صورت عینی بررسی شود. قطعات زنگ زده ثبت و سپس دوباره رنگ شوند،
- داخل دستگاه برای وجود حشرات، مارمولک‌ها و مار بررسی شود؛
- ولت‌متر و آمپرمتر هم قرائت شود؛
- کلید قدرت جریان اعمالی به حالت خاموش تغییر حالت داده و سپس تمام اجزای دستگاه T/R برای وجود گرما بررسی شوند، چون وجود یک جزء سرد ممکن است نشان دهد که آن جزء کار نمی‌کند. قطعات خیلی گرم نیز ثبت شود؛
- تجهیزات اندازه‌گیری کالیبره شوند؛
- در صورت وجود تهویه و خنک‌کننده با هوا و تمام اتصالات دیگر تمیز شود؛
- سطح روغن دستگاه T/R با سیستم خنک‌کننده روغنی بررسی شود و اگر روغن ترانسفورماتور شفاف نبود، یا اگر رنگ شفاف ولی تاریک و ابری بود، تعویض گردد؛
- کابلی که شکسته یا عایقش سوخته تعویض گردد؛
- قطع‌کننده‌ها و کلیدهای جریان بررسی شوند و در صورت شکستگی و آسیب دیدگی جایگزین شوند؛
- کلید قدرت جریان اعمالی روشن شود و بازده دستگاه T/R با فرمول مربوطه بررسی شود. بازده دستگاه T/R باید در حدود ٪۵۰ تا ٪۶۰ باشد که با زمان کاهش می‌یابد و زمانی که بازده کمتر از ٪۲۵ باشد، کل دستگاه باید تعویض گردد.

مشکلات معمول

عمدتاً با مشکلات زیر در سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان مواجه هستیم که باید بررسی شوند:

الف) پتانسیل خط لوله/زمین پایین

وجود پتانسیل خط لوله/زمین پایین علی‌رغم کافی بودن شدت و پتانسیل جریان مستقیم تولید شده توسط دستگاه T/R، ممکن است ناشی از یکی یا چهار تا از دلایل زیر باشد:

ممکن است به دلیل افزایش سطح آب‌های زیرزمینی یا افزایش نرخ نفوذ اکسیژن، زمین بسیار خورنده شده باشد.

۱. ممکن است فلنج‌های عایقی که برای مجزا کردن خط لوله استفاده می‌شوند، مقاومت خود را از دست داده باشند.
۲. ممکن است یک جزء جدید به سیستم خط لوله اضافه شده است که جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی را افزایش می‌دهد.

۳. ممکن است یک سیستم خط لوله جدید در نزدیکی خط لوله موجود قبلی اجرا شده است.
۴. ممکن است پوشش خط لوله آسیب دیده باشد که به افزایش جریان کاتدی منجر می‌شود.

ب) پتانسیل خط لوله/زمینی خیلی زیاد

وجود پتانسیل خط لوله/زمین چه منفی زیاد و چه مثبت زیادی در مقایسه با پتانسیل استاتیک، با توجه به نرمال بودن شدت و پتانسیل جریان مستقیم تولید شده توسط دستگاه T/R، ممکن است به علت یکی یا چند تا از دلایل زیر باشد:

ممکن است پتانسیل بسیار منفی خط لوله/زمین منفی زیاد دلالت بر وجود جریان‌های سرگردان تولید شده از سامانه‌های حفاظت کاتدی اطراف یا منابع جریان مستقیم داشته باشد، که از سازه فلزی تحت حفاظت کاتدی خارج می‌شود.ممکن است پتانسیل مثبت‌تر از پتانسیل استاتیک دلالت بر وجود اتصال اشتباه باشد، زیرا معمولاً قطب مثبت منبع جریان مستقیم باید به آند و قطب منفی منبع جریان مستقیم باید به کاتد متصل شود، و در هنگامی که حفاظت جریان کاتدی اعمال می‌شود پتانسیل باید در جهت منفی افزایش یابد. در غیر این صورت، همانند مورد اتصال اشتباه، پتانسیل در جهت مثبت افزایش می‌یابد و خط لوله آند شده و خورده می‌شود.

فصل هفتم

تجهیزات حفاظت کاتدی و دیتاشیت‌ها

آندهای فداشونده[۲۶۲]

آندهای فداشونده فلزات با فعالیت شیمیایی بالایی هستند که جهت جلوگیری از خوردگی سطحی یک فلز دیگر که دارای فعالیت کمتری است به کار می‌روند.

آندهای فداشونده از یک آلیاژ فلزی دارای پتانسیل الکتروشیمیایی منفی‌تر نسبت به سازه‌ای تولید می‌شوند که باید حفاظت شود.

آندهای فداشونده در موارد زیر کارایی دارند:

۱. خطوط لوله با پوشش خوب که نیاز به جریان حفاظتی خیلی کمی دارند.
۲. رفع مشکلات مربوط به تداخل و جریان‌های سرگردان
۳. خطوط لوله کوتاه با پوشش خوب
۴. در نقاط مشخصی بر روی خطوط لوله (نقاط بحرانی) که ممکن است تنها قسمتی از خط لوله نیاز به حفاظت داشته باشد.
۵. فراهم نمودن حفاظت موقتی قسمتی از خط لوله مدفون که در شرایط خوردگی موضعی قرار دارد. مانند منطقه عبور خط لوله از عرض رودخانه.
۶. جهت حفاظت کف مخازن رو زمینی که دارای سطح وسیعی نباشند.

آند فداشونده آلومینیم

کاربرد اصلی این آندها برای حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی در آب دریا، کشتی‌ها، آبگرمکن‌ها، خطوط لوله، تانک‌های زمینی و زیر زمینی، پالایشگاه‌ها، سکوهای فراساحلی و اسکله‌های دریایی با هندسه جکتی است. برای جلوگیری از تشکیل لایه پسیو اکسید آلومینیم بر سطح آند که باعث کاهش شدید کارایی آند می‌شود، معمولاً در ترکیب شیمیایی آندهای آلومینیم از عنصری فعال‌ساز مانند جیوه یا ایندیم استفاده می‌شود. در گذشته در ترکیب شیمیایی آندهای آلومینیم بیشتر جیوه به کار برده می‌شد. اگرچه میزان جیوه موجود در آلیاژ کم بود اما با مصرف بدنه اصلی آند، این مقدار جیوه در ماده به‌جا مانده و غلظت آن افزایش می‌یافت که این پدیده مشکلات زیست محیطی بسیاری را در پی داشت. امروزه کاربرد جیوه در آند آلومینیم تقریباً منسوخ شده و از عنصر ایندیم به‌عنوان فعال‌ساز استفاده می‌شود. استانداردهای متداول آندهای آلومینیم شامل:
BS 7361 ، DNV-RP-B401، IPS-M-TP-750، NACE-RP0387، NORSOK M-503وMIL-DTL-24779B می‌باشند.

2 6 2

جدول ۷-۱ ترکیب شیمیایی آند آلومینیم برطبق استاندارد DNV-RP-B401

Element	Alloy Type 3
Zinc (%)	[illegible]
Indium (%)	[illegible]
Silicon (%)	[illegible]
Iron (%)	[illegible]
Copper (%)	[illegible]
Cadmium (%)	[illegible]
Aluminium (%)	[illegible]

اینزرت مورد استفاده در آندهای آلومینیم بر اساس استاندارد NACE-RP0387 باید از جنس فولاد معمولی باشد. طبق استاندارد BS 7361 پتانسیل مدار باز آند آلومینیم حدود ۱/۱- ولت نسبت به الکترود مرجع نقره/کلرید نقره، ظرفیت الکتروشیمیایی آن حداقل ۲۵۰۰ A.h/kg و است. راندمان آندهای آلومینیم نیز حدود ۹۰٪ می‌باشد (دستورالعمل آزمون الکتروشیمیایی آند آلومینیم و محاسبات مربوطه در استاندارد DNV-RP-B401 ذکر شده است).

جدول ۷-۲ خواص الکتروشیمیایی آند آلومینیم بر طبق استاندارد BS 7361

Electrochemical Properties	Environment: Sea water
Electrochemical Capacity (A.h/kg)	[illegible]
Open Circuit Potential (V) (Respect to Ag/AgCl Reference Electrode)	[illegible]
Efficiency (%)	[illegible]

آندهای آلومینیم مورد استفاده در صنایع دریایی، جکت‌های نفتی و سکوهای فراساحلی با استفاده از کوره ذوب آلومینیم تحت فرایند ریخته‌گری در قالب‌های فلزی در اشکال مختلف قرار می‌گیرند، که بر اساس طراحی و درخواست سفارش‌دهنده در اشکال و ابعاد مختلف ساخته می‌شود.

مزایای استفاده از آند فداشونده آلومینیم:

- نسبت به آندهای روی یا منیزیم فعال‌تر هستند.
- برخلاف آند منیزیم، آنها در آب نمک یا آب شور، خطرناک نیستند.
- آندهای آلومینیم عمر طولانی‌تری دارند
- ۲/۵ برابر از آندهای روی و منیزیم بازدهی بیشتری دارند و به همین دلیل تجهیزات را برای مدت زمان طولانی در برابر خوردگی محافظت می‌کنند.

انواع آند فداشونده آلومینیم

آند فداشونده آلومینیم از نوع دستبندی

به طور معمول آندهای دستبندی فداشونده از آلیاژهای آلومینیم ساخته می‌شوند، که البته می‌بایستی در این مورد مباحث طراحی و مهندسی مد نظر قرار داده شود. این آندها از لحاظ هزینه ساخت مقرون‌به‌صرفه بوده و برای حفاظت کاتدی خطوط لوله انتقال مدفون در خاک و حتی مغروق در آب بسیار قابل اعتماد است. آندهای دستبندی در مکان‌های ویژه تعیین شده توسط طراحی سیستم حفاظت کاتدیک مانت می‌شود و از طریق کابل‌های مسی ویژه به‌صورت الکتریکی به خط لوله متصل می‌شود. این مورد می‌بایستی مد نظر قرار داده شود که اصلی‌ترین عامل مقابله با عوامل خوردگی خط لوله در غیاب سیستم حفاظت کاتدی، حضور پوشش ضدخوردگی است. آندهای دستبندی برای محافظت از خط لوله طراحی شده‌اند که در آن ممکن است هرگونه تخلخل، حفره یا سایر خرابی‌های پوشش در حین نصب یا در طول عمر کار خط لوله رخ دهد. در شکل زیر نحوه اتصال آند دستبندی آلومینیمی را به یک خط لوله انتقال میعانات گازی مشاهده می‌نمایید.

آند فداشونده آلومینیم با کاربرد سکوهای دریایی، کشتی و مخازن نفت و آب

این آندها برای حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی در آب دریا، کشتی‌ها، آبگرمکن‌ها، خطوط لوله، تانک‌های زمینی و زیر زمینی، پالایشگاه‌ها، سکوهای فراساحلی و اسکله‌های دریایی با هندسه جکتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آند فداشونده منیزیم

آند منیزیم نسبت به سایر آندهای فداشونده دارای ولتاژ بالاتری است و بیشترین کاربرد آن در حفاظت کاتدی سازه‌های ساحلی (با مقاومت الکترولیتی بالا) می‌باشد، زیرا استفاده از روی و آلومینیم در حفاظت کاتدیک سازه‌های ساحلی غیراقتصادی

۳۰۰ | اطلس حفاظت کاتدی

است. از منیزیم به‌عنوان یک آند فداشونده برای حفاظت کاتدیک سازه‌های فلزی زیر زمینی و زیر دریایی، کشتی‌ها، زیردریایی‌ها، پل‌ها، اسکله‌ها، سازه‌های مدفون در خاک و سیستم‌های حمل و نقل زیر زمینی استفاده می‌شود.

آندهای منیزیم از لحاظ ترکیب شیمیایی و نوع کاربرد به دو دسته استاندارد (AZ63) و پتانسیل بالا(M1C) تقسیم می‌شوند.

استاندارهای متداول آندهای منیزیم شامل:

ASTM-B 843، ASTM-G 97، BS 7361، IPS-M-TP-750 وNACE-RP0387 می‌باشند.

آندهای منیزیمی مانند دیگر آندهای فداشونده بسته به نوع کابرد و درخواست کارفرما در ابعاد و اشکال مختلف طراحی و ساخته می‌شوند. مطابق استاندارد NACE-RP0387 اینزرت مورد استفاده در آندهای منیزیم باید از جنس فولاد گالوانیزه باشد.

همچنین با توجه به استاندارد BS 7361 خواص الکتروشیمیایی آند منیزیم به‌صورت جدول زیر می‌باشد:

بر اساس استانداردASTM-B 843، ترکیب شیمیایی آند منیزیم به‌صورت زیر است:

جدول ۷-۳

High Potential	Standard	Element
□0.01 max	□5.3 □□6.7	**Aluminum (%)**
□---	□2.5 □□3.5	**Zinc (%)**
□0.5 □□1.3	□0.15 □□0.7	**Manganese (%)**
□0.05 max	□0.1 max	**Silicon (%)**
□0.02 max	□0.02 max	**Copper (%)**
□0.001 max	□0.002 max	**Nickel (%)**
□0.03 max	□0.003 max	**Iron (%)**
□0.3 max	□0.3 max	**All Others (%)**
□Remainder	□Remainder	**Magnesium (%)**

مطابق استانداردNACE-RP0387 اینزرت مورد استفاده در آندهای منیزیم باید از جنس فولاد گالوانیزه باشد. همچنین با توجه به استاندارد BS 7361 خواص الکتروشیمیایی آند منیزیم به‌صورت جدول زیر می‌باشد:

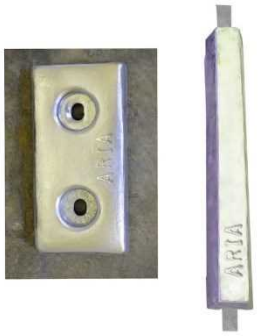
جدول ۷-۴

Electrochemical Properties	Standard	High Potential
Electrochemical Capacity (A.h/kg)	□□□□□	□□□□□
Open Circuit Potential (V) (Respect to $Cu/CuSo_4$ Reference Electrode)	□□□□	□□□□
Efficiency (%)	□□□	□□□

انواع آند فداشونده منیزیم

آند فداشونده منیزیم به همراه بکفیل

آند منیزیمی مورد استفاده برای حفاظت خطوط لوله،کف مخازن و دیگر تأسیسات مدفون، معمولاً با پشت‌بند (Backfill) به همراه کیسه کتانی می‌باشد. مواد پشت‌بند که معمولاً شامل گچ گیپسوم، بنتونیت و سدیم سولفات است، به‌سرعت رطوبت خاک را جذب کرده و باعث کاهش مقاومت الکترولیت می‌شود. بنابراین با افزایش جریان‌دهی آند، عملکرد سیستم حفاظت کاتدیک شرایط بهتری پیدا می‌کند.



آند فداشونده منیزیم با کاربرد مبدل‌های حرارتی و مخازن

آند فداشونده روی

آند روی دارای دو نوع آلیاژ دریایی (Type 1) برای به کارگیری در آب دریا و آلیاژ استاندارد (Type 2) جهت حفاظت سازه‌های شناور در آب شیرین و یا سازه‌های مدفون در خاک، در بخش حفاظت کاتدی می‌باشد. تشکیل لایه هیدروکسید در آبهای شیرین بر روی سطح آند باعث مسدود شدن جریان می‌شود، به همین دلیل آند روی برای به کارگیری در آب شور توصیه می‌شود. بنابراین برای سازه‌های دریایی مانند کشتی‌ها، مخازن، استوانه‌ها و پره‌ها بیشترین کاربرد را دارد. همچنین از آند روی برای محافظت از لوله‌کشی‌ها و مخازن زیر زمینی نیز استفاده می‌شود.

استانداردهای مورد استفاده در ساخت آندهای روی عبارتند از:
ASTM-B 418، BS 7361، DNV-RP-B401، IPS-M-TP-750
ترکیب شیمیایی آند روی بر اساس استاندارد ASTM-B 418 در جدول زیر نشان داده شده است:

جدول ۷-۵

Element	Alloy Type I	Alloy Type II
Aluminum (%)		
Cadmium (%)		
Iron (%)		
Lead (%)		
Copper (%)		
All others (%)		
Zinc (%)		

همچنن ترکیب شیمیایی آند روی بر اساس استاندارد DNV-RP-B401 در جدول زیر نشان داده شده است:

جدول ۷-۶

Element	Composition
Al (%)	
Cd (%)	≤
Fe (%)	≤
Cu (%)	≤
Pb (%)	≤
Zn (%)	

آند روی با استفاده از خواص پتانسیل الکتریکی، ظرفیت الکتروشیمیایی و کیفیت آلیاژ، از فلزات در برابر خوردگی محافظت می‌کند که بر اساس استاندارد BS 7361 ، پتانسیل مدار باز آن حدود ۱/۰۵ V- نسبت به الکترود مرجع نقره/کلرید نقره و

ظرفیت الکتروشیمیایی آن حداقل A.h/kg ۷۸۰ می‌باشد. همچنین راندمان آندهای روی حدود ۹۰٪ می‌باشد. آزمون الکتروشیمیایی آند روی بر طبق استاندارد DNV-RP-B401 انجام می‌شود و نتایج آن را می‌توان در جدول زیر مشاهده کرد.

جدول ۷-۷ خواص الکتروشیمیایی آند روی برطبق استاندارد DNV-RP-B401

Electrochemical Properties	Sea Water Environment
Electrochemical Capacity (A.h/kg)	□□□□
Open Circuit Potential (V) (Respect to Ag/AgCl Reference Electrode)	□□□□□□
Efficiency (%)	□□□

آند روی بر اساس نوع کاربرد در ابعاد و اشکال مختلفی ساخته می‌شود.

آند روی دارای مزایا و معایبی به شرح ذیل می‌باشد:

مزایا:

- عدم نیاز به منبع خارجی
- نصب آسان
- ولتاژ پایین
- هزینه‌های پایین جهت نگهداری

معایب:

- عدم کارایی در محیط‌های با مقاومت بالا
- محدودیت ظرفیت الکتروشیمیایی
- وزن بالا
- تداخل بالقوه با جریان آب

آندهای روی بسته به نوع و کاربرد آن با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله جوش، پیچ و مهره و اتصال کابل به سازه متصل می‌شوند.

انواع آند فداشونده روی

آند فداشونده روی با کاربرد مخازن نفت و آب و کاربرد دریایی و بدنه کشتی

آندهای تزریق جریان[۲۶۳]

آند تزریق جریان عنصری مؤثر در حوزه سیستم‌های حفاظت کاتدی می‌باشد که توسط علوم مرتبط با مهندسی خوردگی طراحی و تولید می‌شود. مهندسی خوردگی علوم و تخصص‌هایی را شامل می‌شود که تلاش می‌کنند فرایند خوردگی یا اکسید شدن را که تمایل ذاتی فلزات به بازگشت به اصل خود است، کاهش دهند یا به‌نوعی به تعویق بیندازند.

در روش تزریق جریان به یک منبع خارجی جهت تأمین جریان مورد نیاز برای حفاظت نیاز می‌باشد. در این روش آندها نسبت به سازه مثبت نگه داشته شده‌اند، که این عمل توسط یک منبع جریان مستقیم انجام می‌گیرد. منبع جریان یک‌سو را به این

2 6 3

ترتیب در سیستم قرار می‌دهند که قطب مثبت آن متصل به آند کمکی و قطب منفی آن به فلز دستگاه مورد نظر وصل شود. به‌طوری‌که یون‌های مثبت در داخل الکترولیت از آند به‌سمت فلز مورد نظر برمی‌گردد.

آندهای تزریق جریان از لحاظ عناصر و اشکال ساخت دارای دسته‌بندی‌های زیر می‌باشد:

۱. آند سیلیکونی یا چدن پر سیلیس[۲۶۴]
۲. آند MMO[۲۶۵]

آند سیلیکونی یا[۲۶۶]:

آندهای HSCI معمول‌ترین آندهای مورد استفاده در سیستم‌های حفاظت کاتدیک دائمی یا اعمال جریان، برای سازه‌های مدفون در خاک می‌باشند. کروم و سیلیسیم بالا در آندهای چدنی پرسیلیس ، باعث افزایش شدید مقاومت به خوردگی سازه‌های فلزی شده و می‌تواند طول عمر این سازه‌ها را تا مدت زیادی تضمین نماید.

آندهای HSCI Anode با نام تجاری آلیاژ تانتیرون (Tantiron) شناخته می‌شوند و بر اساس استانداردهای ASTM-A 518 و IPS-M-TP-750 طراحی و تولید می‌گردند. این آندها از لحاظ ترکیبات شیمیایی به دو گروه «C» و «N» تقسیم می‌شوند. تانتیرون نوع «C» به طور معمول در محیط‌های دارای خاک اسیدی و قلیائی یا آب دریا و تانتیرون نوع «N» در محیط‌های دارای خاک خنثی یا آب شیرین مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیب شیمیایی(آند HSCI)به شرح جدول ذیل می‌باشد:

جدول ۷-۸

عنصر (wt.%)	ترکیب شیمیایی	
	نوع «N»	نوع «C»
سیلیسیم	۱۴/۲۵ - ۱۴/۷۵	۱۴/۲۵ – ۱۴/۷۵
کربن	۰/۹ – ۱	۰/۹ – ۱
مولیبدن	حداکثر ۰/۲	حداکثر ۰/۲
منگنز	حداکثر ۱/۵	حداکثر ۱/۵
مس	حداکثر ۰/۵	حداکثر ۰/۵
کرم	۰	۴/۳- ۵
آهن	باقیمانده	باقیمانده

مطابق استاندارد IPS-M-TP-750 خواص فیزیکی آندهای HSCI Anode به‌صورت جدول زیر است:

2 [illegible] 6
2 [illegible] 6
2 [illegible] 6
4
5
6

جدول ۷-۹

خواص	مقدار
دانسیته	۷ - ۷/۰۵ □□□□
استحکام فشاری	حداقل□□ □ ۶۵۰
سختی	حداقل □□ ۵۰۰
مقاومت به ضربه	حداقل□ ۰/۱
مقاومت ویژه	حداکثر □□□ □□□□□□□ □ ۷۲

حداکثر دانسیته جریان خروجی و نرخ مصرف آندهای چدنی پر سیلیس در شرایط محیطی مختلف به‌صورت زیر است:

جدول ۷-۱۰

شرایط محیطی	حداکثر دانسیته جریان خروجی (A/m^2)	نرخ مصرف (Kg/A.Year)
پشت‌بند کربنی	۱۵	۰,۱
آب دریا	۱۵	۰,۳۰
آب شیرین	۱۰	۰,۱۲

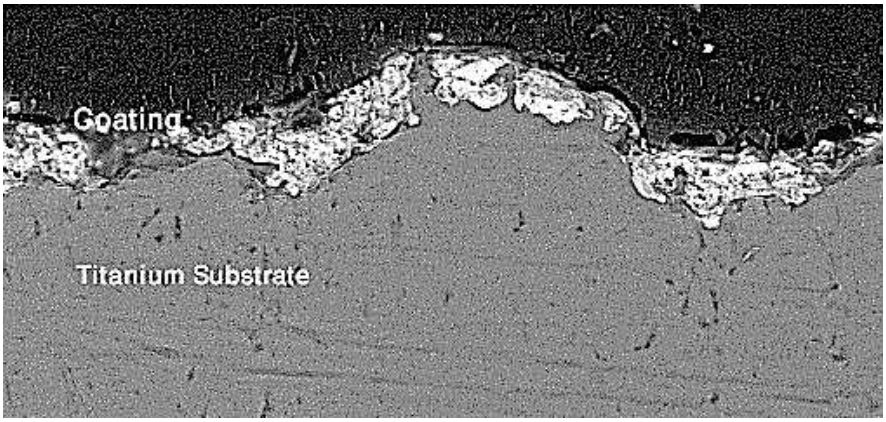
برای داشتن یک اتصال محکم و مطمئن و همچنین افت ولتاژ بسیار کم در محل اتصال کابل مسی به آند از اتصال نوع Lead Caulking استفاده می‌شود. محل اتصال کابل به آند با رزین اپوکسی پوشانده شده و به منظور جلوگیری از ورود رطوبت، یک کپ حرارتی بر روی آن قرار می‌گیرد. متداول ترین نوع آندهای (آند HSCI) در دو سایز ۶۰×۲ و ۶۰×۳ اینچ تولید می‌شوند. جریان خروجی این آندها در سایز ۶۰×۲ در پشت‌بند کربنی (زغال کک) حدود ۲ آمپر و جریان خروجی در سایز ۶۰×۳ حدود ۳ آمپر برای عمر طراحی ۲۵ سال در نظر گرفته می‌شود. بر اساس استاندارد IPS-M-TP-750 مشخصات ابعادی و وزن HSCI Anode به‌صورت جدول ۷-۱۱ زیر است:

قطر آند (□□)	قطر سر آند (□□)	طول (□□)	وزن (□□)
۵۱	۷۶	۹۱۵	۱۴,۵
۵۱	۷۶	۱۲۲۰	۱۹
۵۱	۷۶	۱۵۲۵	۲۲,۵
۷۶	۱۰۲	۹۱۵	۲۹
۷۶	۱۰۲	۱۲۲۰	۳۸
۷۶	۱۰۲	۱۵۲۵	۴۹

آندهای میکس متال اکساید یا[۲۶](□ □ □)

آندهای میکس متال اکساید یا آندهای MMO از دو قسمت زیر لایه و پوشش‌های اکسید فلزی مختلط تشکیل می‌شوند. تیتانیوم به‌عنوان زیر لایه انتخاب شده است، زیرا این فلز خواص لازم جهت دریافت پوشش برای مقابله با محیط‌های شیمیایی مهاجم را دارا بوده و برای عبور جریان رسانای مناسبی می‌باشد.

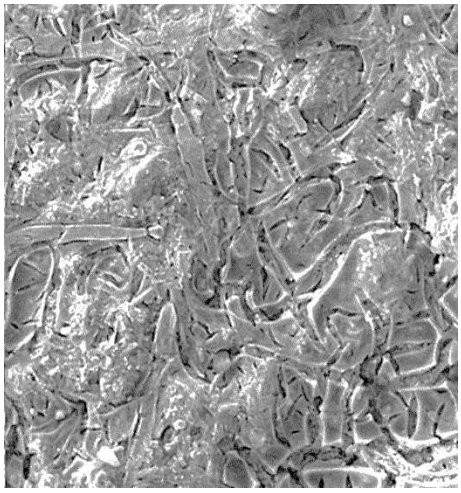
یکی دیگر از مزیت‌های تیتانیوم نسبت به دیگر فلزات جهت استفاده از آن به‌عنوان فلز زیر لایه آندهای MMO، استفاده از آن در اشکال متفاوت مانند: توری شکل، لوله‌ای، نواری، سیمی و صفحه‌ای است. پوشش‌های اکسید فلزی مختلط که روی فلز زیرلایه (تیتانیوم) آندهای MMO می‌پوشاند، در حد چند میکرون و بسیار نازک بوده که به‌صورت‌های متفاوتی بر روی فلز زیرلایه (تیتانیوم) اعمال می‌گردد. پوشش به کار رفته در آندهای MMO با توجه به نوع استفاده مشخص می‌گردد، که مواد تشکیل‌دهنده آن می‌تواند ترکیبی از دو یا چند اکسید فلزی شامل اکسیدهای ایریدیوم، تانتالوم، روتنیوم و تیتانیوم باشد.



شکل ۷-۱

2 □ □□□□□ □□□□□ □□□□□ □□□□□□ 6 7

پوشش اعمال شده وظیفه فعال‌سازی را انجام داده، به گونه‌ای که پتانسیل اضافی برای آزادسازی کلر و اکسیژن آندی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد و سپس پوشش کاتالیستی آند MMO، مقاومت اندکی را برای آند ایجاد کرده که این مقاومت کم باعث کاهش نرخ خوردگی آندهای MMO با توجه به طول عمر آنها می‌شود. نرخ مصرف آندهای MMO بسیار پایین و عددی در حدود کمتر از mg/A.Year ۱ می‌باشد، که این مقدار وابسته به شرایط محیطی و کاربرد آنهاست.



شکل ۷-۲

ساختار میکروسکوپی پوشش آندهایMMO

آندهای MMO در الکترولیت‌های مختلف دارای دانسیته جریان و عمر متفاوتی می‌باشند که در جدول ذیل به شرح آورده شده است:

جدول ۷-۱۲

نوع الکترولیت	حداکثر دانسیته جریان خروجی (A/m^2)	طول عمر (Year)
پشت‌بند کربنی	۵۰	۲۵
کک پترولیوم	۱۰۰	۲۵
آب دریا	۶۰۰	۲۵
آب شور	۱۰۰-۳۰۰	۲۵
آب شیرین	۱۰۰	۲۵

امروزه آندهای MMO به دلایل زیر کاربرد فراوانی در سیستم‌های کاتدیک دارند:

- تولید آندهای MMO در انواع و سایزهای متفاوت جهت استفاده از آنها در سیستم‌های کاتدیک متفاوت
- به کارگیری آسان

- دارای دانسیته جریان خروجی بالا
- دارای وزن کم و حمل و نقل آسان
- ثبات در حفظ ابعاد (پایداری ابعادی) به دلیل استفاده از تکنولوژی Dimensionally Stable Anode (DSA)
- پوشش‌دهی دوباره در صورت از بین رفتن پوشش اولیه
- دارای عمر بالا در دانسیته جریان‌های بالا

استفاده آندهای MMO در سیستم حفاظت کاتدیک دائمی (اعمال جریان) جهت حفاظت از سازه‌های فلزی مدفون در خاک یا مغروق در آب معمول می‌باشد. آندهای MMO قابل استفاده در سیستم حفاظت کاتدیک جهت حفاظت سازه‌های مدفون در خاک مانند: خطوط لوله (Pipeline & Piping) انتقال نفت، گاز و...، سیستم حفاظت کاتدیک External (کف مخازن) و Internal (دیواره‌ها و کف داخلی مخازن)، سازه‌های دریایی و بتونی می‌باشد.

انواع آندهای میکس متال اکساید یا MMO:

آند MMO لوله‌ای[۲۶۸]

آندهای MMO لوله‌ای جهت حفاظت کاتدیک سازه‌های مدفون در خاک یا غوطه ور در آب به دو صورت مورد استفاده قرار می گیرد:

۱. آند MMO لوله‌ای همراه با بکفیل یا پشت‌بند کربنی
۲. آند MMO لوله‌ای به‌صورت مستقیم و بدون بکفیل یا پشت‌بند کربنی

آندهای MMO لوله‌ای بر اساس سایز و نوع محیط مورد استفاده (مدفون در خاک یا غوطه ور در آب) دارای جریان خروجی و طول عمر متفاوتی می‌باشند، که در جدول ذیل آورده شده است:

جدول ۷-۱۳

محیط مورد استفاده	سایز آند (قطر × طول)	طول عمر (Year)	جریان خروجی (A)
خاک، کک و آب شیرین	۱۹ mm × ۱۲۲۰ mm (۳/۴ in × ۴۸ in)	۲۵	۷
	۲۵ mm × ۵۰۰ mm (۱ in × ۱۹/۷ in)	۲۵	۴
	۲۵ mm × ۱۰۰۰ mm (۱ in × ۳۹/۴ in)	۲۵	۸
	۲۵ mm × ۱۲۲۰ mm (۱ in × ۴۸ in)	۲۵	۳,۵
	۲۵ mm × ۱۵۰۰ mm (۱ in × ۶۰ in)	۲۵	۴,۵
	۳۱/۷۵ mm × ۱۲۲۰ mm (۱/۲۵ in × ۴۸ in)	۲۵	۱۲
آب دریا	۱۹ mm × ۱۲۲۰ mm (۳/۴ in × ۴۸ in)	۲۵	۴۵
	۲۵ mm × ۵۰۰ mm (۱ in × ۱۹/۷ in)	۲۵	۲۵

2 6 8

۲۵ mm × ۱۰۰۰ mm (۱ in × ۳۹/۴ in)	۲۵	۵۰
۳۱/۷۵ mm × ۱۲۲۰ mm (۱/۲۵ in × ۴۸ in)	۲۵	۷۵

لازم به ذکر است زیر لایه تیتانیوم آندهای MMO لوله‌ای مطابق استاندارد ASTM B338 Grade 1 or 2 مد نظر قرار داده می‌شود.

شکل ۷-۳

آند MMO وایری[۲۶۹]

آند وایری از یک سیم تک رشته با روکشی از انواع اکسیدهای فلزهای ایریدیوم، تانتالوم، تیتانیوم و روتنیوم تشکیل شده است. این نوع از آندها به طور معمول در کنار لوله‌ها و مخازن مدفون نصب می‌گردند. در برخی از موارد با نظر طراح آند وایری به‌عنوان شبکه آندی کف مخزن نیز به کار می‌رود. مشخصات و شکل ظاهری آند وایری به شرح زیر می‌باشد:

[illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]

2 [illegible] 6 9

فصل هفتم : تجهیزات حفاظت کاتدی و دیتاشیت ها | 311

شکل ۷-۴

آند وایری ممکن است به درخواست سفارش‌دهنده با بکفیل ذغال کک نیز ساخته شوند. این نوع آندها از کابل تغذیه، آند وایری، ذغال کک متالورژی، روکش محافظ و روکش توری تشکیل شده‌اند و در اصطلاح Piggy Back گفته می‌شوند.

آند MMO نواری[270]

آندهای MMO نواری جهت حفاظت کاتدیک کف مخازن ذخیره‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ایجاد تغییر در فاصله بین آندهای MMO نواری نصب شده در سیستم حفاظت کاتدیک کف مخازن جهت رسیدن به عمر طراحی مورد نظر، دارای امکان نصب آسان در تمامی نقاط موجود در زیر تانک (به آسانی بریده می‌شود)، امکان ایجاد مسیرهای گوناگون جهت رسیدن به توزیع جریان مناسب به دلیل پیوستگی MMO نواری و استفاده از آنها بدون نیاز به بکفیل کربنی از مزایای این نوع آند می‌باشد.

ابعاد و وزن آندهای MMO نواری و حداکثر دانسیته جریان و طول عمر آنها به شرح جداول ذیل می‌باشد:

جدول ۷-۱۳

پهنا	**۶٫۳۵ mm (۰٫۲۵ in)**
ضخامت	0.635 mm (0.025 in)
وزن کویل استاندارد	1.5 kg
طول کویل استاندارد	100 m
ناحیه سطحی نوار	0.014 m^2 Per/m

---

[270] Mixed Metal Oxide Ribbon Anode

جدول ۷-۱۴

محیط مورد استفاده	جریان خروجی (mA/m)	طول عمر تقریبی (Year)
بتون	۱,۵	۱۰۰
ماسه ریز	۴۲	۵۰

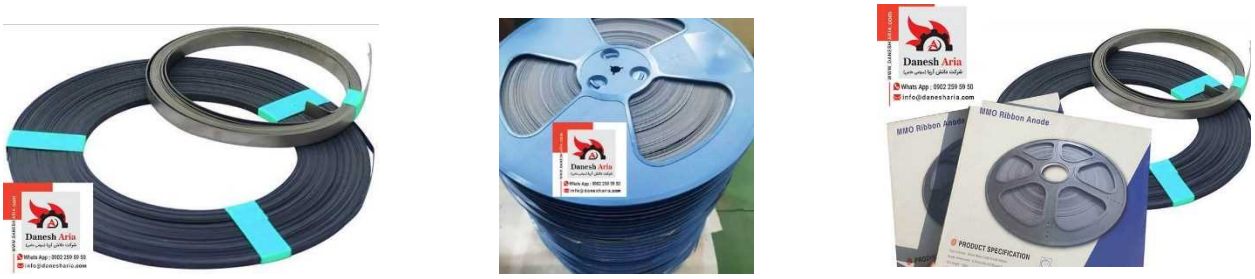
لازم به ذکر است زیر لایه تیتانیوم آندهای MMO نواری مطابق استاندارد ASTM B265 Grade 1 مد نظر قرار داده می‌شود.

نوارهای تیتانیومی[۲۷۱]

نوارهای تیتانیومی به همراه آندهای MMO نواری و توری برای حفاظت سطح زیرین مخازن ذخیره که بر روی سطح خاک نصب شده‌اند و همچنین سازه‌های بتنی استفاده می‌شوند. جهت کاهش مقاومت الکتریکی آند، این نوارها به آند جوش داده می‌شوند.

ابعاد استاندارد:

عرض	ضخامت	وزن
□□□□□□	□ □□□□	□□□□□□



شکل ۷-۵

2 7 1

ترانسفورمر رکتیفایر[۲۷۲]

ترانسفورمر رکتیفایر از اجزا اصلی تشکیل‌دهنده سیستم حفاظت کاتدی با روش تزریق جریان بوده که وظیفه آن یک‌سوسازی برق متناوب و تزریق جریان الکتریکی به سازه‌های تحت حفاظت می‌باشد. یک‌سوسازی برق متناوب در ترانسفورمر رکتیفایر توسط نیمه‌هادی‌ها صورت می‌پذیرد، جهت تأمین ولتاژ خروجی از ترانسفورماتور اصلی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه ترانسفورمر رکتیفایر به‌صورت دائم کار می‌باشند، در خصوص نوع خنک‌کنندگی و تابلو ترانسفورمر رکتیفایر مشخصات و شرایط محیطی در مراحل ساخت مد نظر قرار می‌گیرد. با توجه به پیشرفت علم فناوری و نیاز صنعت، تکنولوژی ساخت و کنترل ترانسفورمر رکتیفایر نیز پیشرفت چشمگیری نموده است. بدین صورت که هر روز شاهد ابداعات بسیار زیادی در این صنعت، از قبیل ساخت ترانسفورمر رکتیفایرهای هوشمند، فتوولتائیک و... می‌باشیم. در این بخش به بررسی و معرفی ترانسفورمر رکتیفایرها می‌پردازیم.

مشخصات عمومی ترانسفورمر رکتیفایر

در سیستم‌های حفاظت کاتدی با روش تزریق جریان[۲۷۳]به منظور تزریق جریان الکتریکی به سازه‌های تحت حفاظت از ترانسفورمر رکتفایرها استفاده می‌شود. اصول کار ترانسفورمر رکتیفایر یک‌سو کردن برق متناوب ورودی، تزریق و تثبیت جریان به سازه تحت حفاظت می‌باشد. (تبدیل برق ورودی متناوب به خروجی DC).

شکل ۷-۶ نمای ظاهری ترانسفورمر رکتیفایرها با خنک‌کنندگی روغن

ترانسفورمر رکتیفایرهای حفاظت کاتدی مناسب برای کار در شرایط محیطی مختلف نظیر: مرطوب، غبارآلود، نمک‌زار، داخل اتاق برق و... به‌صورت دائم کار تحت بار کامل با قرار گرفتن در شرایط زیر ساخته شده می‌شوند:

حداکثر دما با سایه‌بان: ۵۰ درجه سانتی‌گراد

حداکثر دمای سطوح فلزی که به طور مستقیم در معرض تابش نور خورشید قرار دارند: ۸۰ درجه سانتی‌گراد

حداکثر رطوبت نسبی: ۹۵ درصد

سطح ایزوکرونیک: ۶۰ (بروز ۶۰ روز صاعقه در سال)

---

2 7 2

2 7 3

غلظت غبار تقریبی: ۷۰ الی ۱۴۰۰ میلی‌گرم بر مترمکعب

ترانسفورمر رکتیفایرها و تمامی تجهیزات جانبی آن می‌بایست در شرایط کاری ذکر شده ضمانت شده و مطابق استانداردهای BS,IEC,IPS,IGS,NPCS ساخته شوند.

انواع سیستم‌های خنک‌کننده ترانسفورمر رکتیفایر

- خنک‌کنندگی با روغن (ONAN)

به منظور بالا بردن قابلیت اطمینان دستگاه در شرایط سخت، ترانسفورمر رکتیفایرها با خنک‌کنندگی روغنی ساخته می‌شوند. در این نوع از ترانسفورمر رکتیفایرها پل یک‌سوساز و فیلترهای مورد نظر داخل روغن غوطه‌ور بوده، روغن داخل مخزن مجهز به نمایشگر سطح، دمای روغن و رطوبت‌گیر (سیلیکاژل) می‌باشد. این نوع سیستم خنک‌کنندگی را ONAN می‌نامند (در برخی موارد جهت خنک کردن روغن از فن استفاده می‌شود که این سیستم به اختصار ONAF نامیده می‌شود).

- خنک‌کنندگی هواخنک (AN)

با توجه به شرایط استفاده از ترانسفورمر رکتیفایرها ممکن است توان دستگاه آن‌قدر پایین باشد که در نتیجه ساخت ترانسفورمر رکتیفایر با آن توان و خنک‌کنندگی روغنی مقرون‌به‌صرفه نباشد. این نوع ترانسفورمر رکتیفایرها به طور معمول در رنج‌های ۱۰ تا ۵۰ ولت و ۵ تا ۳۰ آمپر ساخته می‌شوند، ولی براساس تقاضا طراحی و تولید ترانسفور رکتیفایرهای هواخنک در توان‌های بالاتر نیز امکان‌پذیر می‌باشد. این نوع سیستم خنک‌کنندگی را AN می‌نامند.

درجه حفاظت ترانسفور رکتیفایرهای روغنی و هواخنک IP42 تا IP65 (مطابق درخواست سفارش‌دهنده) در نظر گرفته می‌شود.

اطلاعات الکتریکی

- ورودی برق متناوب (AC)

ورودی دستگاه با توجه به توان نامی آن می‌تواند تک‌فاز یا سه فاز باشد. ولتاژ ورودی در دستگاه‌های تک‌فاز ۲۲۰/۲۳۰ ولت، ۵۰ هرتز و در نوع سه فاز ۳۸۰/۴۰۰ ولت، ۵۰ هرتز می‌باشد. دستگاه می‌بایست به گونه‌ای طراحی و ساخته شود که تا ۱۰ درصد نوسان در ولتاژ برق ورودی خللی در عملکرد آن به وجود نیاورده و آسیبی به آن نیز وارد نشود.

- برق خروجی یک‌سو (DC)

ترانسفورمر رکتیفایرهای بازار در رنج‌های مختلف از ۲ الی ۲۵۰ ولت و ۵ الی ۵۰۰ آمپر مطابق درخواست سفارش‌دهنده ساخته می‌شود.

مطابق استاندارد ترانسفورمر رکتیفایرهای مذکور قابلیت جریان‌دهی به سیستم حفاظت کاتدی در دمای محیطی ۲۰- الی ۵۰+ درجه سانتی‌گراد را دارا می‌باشند.

ترانسفورماتور

در طراحی و ساخت ترانسفورماتور اصلی دستگاه نکات زیر لحاظ شده است:

- استفاده از آهن ترانسفورماتور با چگالی میدان مغناطیسی بالا به منظور کاهش تلفات و محدود کردن افزایش دمای ترانسفورماتور.
- شیلد الکترواستاتیک بین سیم پیچ اولیه و ثانویه.
- عایق‌کاری ترانس در نقاط حساس از جمله نزدیکی هسته به‌صورتی اجرا می‌شود که حداقل تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد در مقابل افزایش دما مقاوم باشند.
- کلیه عایق‌ها در برابر ولتاژ ۲۰۰۰ ولت، ۵۰ هرتز حداقل به مدت یک دقیقه می‌بایست مقاومت نمایند.
- در انواع مختلف ترانسفورمر رکتیفایر، حداقل راندمان ترانسفورماتور اصلی ۹۵ درصد در نظر گرفته می‌شود.
- کلاس عایقی موجود در بازار مطابق درخواست سفارش‌دهنده و شرایط و محیط نصب از نوع H,F,E,B,A می‌تواند باشد.

در ترانسفور رکتیفایرهای روغنی، ترانسفورماتور دستگاه به طور کامل در داخل روغن غوطه‌ور بوده و به گونه‌ای طراحی شده است که افزایش دمای قسمت‌های مختلف آن در حالت دائم کار از مقادیر زیر تجاوز نکند:

- حداکثر افزایش دمای سیم‌پیچ ۵۰ درجه سانتی‌گراد
- حداکثر افزایش دمای قسمت بالای روغن ۴۵ درجه سانتی‌گراد

رکتیفایر (یک‌سوساز)

اجزا تشکیل‌دهنده یک‌سوکننده از نوع سیلیکون می‌باشد. مدار یک‌سوکننده از نوع پل تمام موج بوده و راندمان آن در مجموع حداقل ۹۰ درصد است. یک‌سوکننده توسط واریستور در مقابل سرج‌های اضافه ولتاژ و به‌وسیله فیوز سریع در مقابل سرج‌های اضافه جریان حفاظت می‌شوند. در ترانسفورمر رکتیفایرهای روغنی نیمه‌هادی‌ها به طور کامل داخل مخزن روغن غوطه‌ور می‌گردند.

در ترانسفورمر رکتیفایرهای اتو ترانسفورمری پل یک‌سوساز تمام دیودی بوده و در نوع الکترونیک از پل یک‌سوساز تمام موج نیمه کنترل شونده (نیمه تریستوری) یا تمام کنترل شونده (تمام تریستوری) بهره‌گیری می‌شود.

روش‌های مختلف کنترل ترانسفورمر رکتیفایر

ترانسفورمر رکتیفایرهای حفاظت کاتدی بسته به شرایط کار و طراحی سیستم، با کنترل‌های زیر طراحی و ساخته می‌شوند.

- کنترل اتوترانسفورمری (Regavolt)

در این نوع ترانسفورمر رکتیفایرها یک اتوترانسفورمر متغیر (واریاک) در مدار اولیه ترانسفورماتور، دستگاه نصب می‌گردد. توسط این اتوترانسفورمر، ولتاژ اولیه ترانسفورماتور اصلی بین صفر تا حداکثر قابل تنظیم بوده، بنابراین ولتاژ ثانویه

ترانسفورماتورنیز بین صفر تا حداکثر رنج نامی تغییر می‌یابد، در نتیجه در صورت استفاده از پل یک‌سوساز دیودی ولتاژ خروجی یک‌سو شده نیز به همین ترتیب قابل تنظیم خواهد بود.

مزیت این نوع از ترانسفورمر رکتیفایرها تنظیم پیوسته ولتاژ خروجی از صفر تا حداکثر نامی آن می‌باشد. با توجه به شرح عملکرد ترانسفورمر رکتیفایر اتوترانسفورمری این دستگاه‌ها از نوع ولتاژ ثابت محسوب شده که جریان مورد نیاز با تنظیم ولتاژ تأمین خواهد گردید. ضعف عمده این ترانسفورمر رکتیفایرها این است که با تغییر مقاومت الکتریکی معادل سیستم حفاظت کاتدی (به هر دلیل مانند: بارندگی، خشکی الکترولیت خاک و...) به دلیل تثبیت ولتاژ در رنج تنظیمی میزان جریان تغییر یافته که در نتیجه نیاز به تنظیم مجدد ترانسفورمر رکتیفایر می‌باشد.

- کنترل الکترونیک با یک‌سوساز تریستوری

در این نوع از ترانسفورمر رکتیفایرها از پل یک‌سوساز تریستور استفاده می‌شود و به طور معمول یک‌سوساز از نوع تمام موج و نیمه کنترل یا تمام کنترل شونده بوده که در ثانویه ترانسفورماتور کاهنده نصب می‌گردد و با تغییر زاویه آتش تریستورها توسط مدار کنترل الکترونیک، توان خروجی دستگاه تغییر خواهد یافت.

در رکتیفایرهای تریستوری بسته به نیاز و شرایط بهره‌برداری می‌توان کنترل را بر مبنای جریان (Current Source) یا تثبیت ولتاژ (Voltage Source) در نظر گرفت.

- کنترل ولتاژ (Constant Voltage)

در ترانسفورمر رکتیفایرهای ولتاژ ثابت، واحد کنترل الکترونیک از ولتاژ خروجی بازخورد (فیدبک) گرفته و با تغییر در ولتاژ ورودی و جریان خروجی، ولتاژ خروجی را در مقدار تنظیم شده قبلی تثبیت می‌نماید. ضعف ترانسفورمر رکتیفایرهای ولتاژ ثابت مانند ترانسفورمر رکتیفایرهای اتوترانسفورمری می‌باشد. بدین صورت که کاهش جریان تزریقی (در اثر افزایش مقاومت زمین) مشکل عدم حفاظت کاتدی و در صورت افزایش جریان تزریقی (در اثر کاهش مقاومت معادل سیستم تحت حفاظت) موجب صدمه دیدن پوشش سازه تحت حفاظت کاتدی خواهد شد.

- کنترل جریان (Constant Current)

به‌منظور برطرف نمودن مشکل بازدید و تنظیم ترانسفورمر رکتیفایرهای ولتاژ ثابت، ترانسفورمر رکتیفایرهای با جریان ثابت و کنترل الکترونیکی (AMP-O-MATIC) ساخته و به بازار عرضه گردیده است. در ترانسفورمر رکتیفایرهای جریان ثابت، با تغییر مقاومت معادل سیستم تحت حفاظت، میزان جریان خروجی تغییر نیافته و ثابت مانده و این امر باعث تغییر ولتاژ خروجی ترانسفورمر رکتیفایر خواهد شد. بدین صورت اگر بنا به دلایلی مقاومت معادل سیستم تحت حفاظت افزایش یابد برای تثبیت جریان تزریقی، ولتاژ خروجی متناسب با مقاومت معادل مدار افزایش می‌یابد. تثبیت جریان خروجی به‌وسیله واحد کنترل الکترونیک و با تغییر زاویه آتش تریستورها انجام می‌پذیرد. واحد کنترل الکترونیک با نمونه‌گیری از جریان خروجی دستگاه (به‌وسیله یک شنت نمونه‌گیر) هرگونه تغییر در مقدار جریان تنظیم شده را تشخیص داده و با تغییر زاویه آتش تریستورها، جریان خروجی را در مقدار تنظیم شده تثبیت می‌نماید. درصورتی‌که به دلیل تغییر شرایط محیطی (به طور مثال تغییر فصل)

مقاومت معادل سیستم تحت حفاظت افزایش یابد، ولتاژ خروجی تا ۱۰ درصد بیشتر از ولتاژ نامی دستگاه در جهت تثبیت جریان ترانسفورمر رکتیفایر افزایش یافته و از تغییر جریان تزریقی تنظیم شده جلوگیری می‌نماید.

- کنترل الکترونیکی/اتوترانسفورمری (اتوماتیک/دستی)

به‌منظور افزایش قابلیت اعتماد ترانسفورمر رکتیفایرهای کنترل الکترونیک و اطمینان از تضمین خروجی دستگاه در مواقع بروز مشکل در واحد کنترل الکترونیک این نوع ترانسفورمر رکتیفایر توصیه می‌گردد.

ازآنجایی‌که، ترانسفورمر رکتیفایرهای حفاظت کاتدی به طور معمول در شرایط آب و هوایی بد و در نقاط دوردست نصب می‌شوند و اشکال در سیستم کنترل الکترونیک آنها موجب وقفه زمانی جهت تعمیر ترانسفورمر رکتیفایرهای مذکور در زمان خرابی آنها شده، در نتیجه باعث عدم حفاظت کاتدی سازه مذکور و نهایتاً خسارت‌های جبران‌ناپذیر می‌گردد. در این شرایط استفاده از ترانسفورمر رکتیفایرهای کنترل الکترونیکی/اتوترانسفورمری مقرون‌به‌صرفه می‌باشد. بدین ترتیب در صورت بروز مشکل در واحد کنترل الکترونیک خروجی دستگاه قطع نشده و ترانسفورمر رکتیفایر به‌وسیله اتو ترانسفورمر کارکرد خود را ادامه خواهد داد.

در این نوع از ترانسفورمر رکتیفایرها یک دستگاه واریاک در اولیه ترانسفورماتور اصلی نصب شده و پل یک‌سوساز نیز از نوع تریستوری می‌باشد، درعین‌حال، مداری بر روی بخش یک‌سوساز تعبیه گردیده و در مواقعی که ترانسفورمر رکتیفایر در حالت رگاولتی قرارداده شود تریستورها مانند دیود عمل نموده و با تغییر اتوترانسفورمر، خروجی دستگاه نیز تغییر می‌یابد. شایان ذکر است اتوترانسفورمر دستگاه در حالت کنترل الکترونیک نیز در مدار بوده و تنظیم خروجی به‌صورت هم‌زمان توسط اتوترانسفورمر و واحد کنترل الکترونیک قابل انجام است.

- ترانسفورمر رکتیفایر کنترل هوشمند (Smart)

با توجه به اینکه پیشرفت فناوری میکروپروسسورها و کاربرد وسیع آن در صنایع مختلف به خصوص کنترل و حفاظت، بسیار چشمگیر و قابل توجه بوده و همچنین کارشناسان و متخصصین حفاظت کاتدی نیز همواره در پی بهره‌گیری از روش و ابزارهای نو برای بهبود سیستم‌های حفاظت کاتدی بوده‌اند، در همین راستا از قابلیت برنامه‌ریزی و ذخیره اطلاعات، همچنین دریافت گزارش‌های مختلف از میکروپروسسورها استفاده نموده و ضمن افزایش قابل توجه دقت حفاظت، افزایش طول عمر تجهیزات مورد حفاظت، صرفه‌جویی در بازرسی‌های دوره‌ای میدانی کارشناسان کاتدی، دسترسی سریع به اطلاعات و ارقام را فراهم آورده‌اند.

سیستم حفاظت کاتدی هوشمند، جهت نصب در مجتمع‌های پالایشگاهی، نیروگاه‌ها، صنایع پتروشیمی، خطوط لوله بین شهری و... بسیار ایدئال می‌باشد. در سیستم مذکور پتانسیل نقاط مختلف سیستم نسبت به الکترولیت خاک به‌صورت دائم (توسط نیم پل ثابت) به ترانسفورمر رکتیفایر منتقل شده و دستگاه به‌وسیله کنترل‌کننده هوشمند با تنظیم جریان خروجی، ولتاژ کلیه نقاط تحت تست در محدوده معیار حفاظت کاتدی قرار می‌دهد. قسمت‌های اصلی این سیستم‌ها عبارتند از:

- ترانسفورمر رکتیفایر با کنترل میکروپروسسوری یا میکروکنترلری
- نیم پیل ثابت (الکترودهای مرجع دائمی)

شکل ۷-۷

ترانسفورمر رکتیفایر هوشمند کنترل تک رفرنس (Constant Potential)

در سیستم‌های حفاظت کاتدی هوشمند تک رفرنس، به‌منظور تنظیم جریان تزریقی از یک نیم پیل دائم بهره‌گیری می‌شود. بدین ترتیب که با سنجش پیوسته پتانسیل سازه تحت حفاظت کاتدی نسبت به الکترولیت در تماس با سازه، جریان خروجی ترانسفورمر رکتیفایر تنظیم می‌گردد. اساس کار واحد کنترل ترانسفورمر رکتیفایر هوشمند، کنترل پیوسته پتانسیل رفرنس مرجع و بر اساس آن تغییر عرض پالس و زاویه آتش تریستورها که نتیجه آن تغییر جریان خروجی می‌باشد، فرایند این عمل تثبیت پتانسیل رفرنس مرجع در محدوده معیار حفاظت کاتدی می‌باشد.

ترانسفورمر رکتیفایر هوشمند کنترل چند رفرنس:

در سیستم‌های حفاظت کاتدی هوشمند چند رفرنس، به منظور تنظیم جریان تزریقی از چند نیم پیل دائم جهت بازخورد (فیدبک) پتانسیل به واحد کنترل بهره‌گیری می‌شود. واحد میکروپروسسوری این ترانسفورمر رکتیفایرها از ۴ بخش زیر تشکیل شده است:

۱. واحد دریافت‌کننده نمونه‌های ورودی (پتانسیل‌های نیم پیل‌های دائم)
۲. واحد پردازش ورودی
۳. واحد خروجی نمایشگرها
۴. واحد خروجی آنالوگ

واحد ورودی قابلیت دریافت و پردازش نمونه‌ها را دارد. واحد پردازش ابتدا تمامی نمونه‌ها را از ورودی دریافت نموده، سپس با توجه به میزان پتانسیل‌های نیم پیل‌ها نمونه خروجی آنالوگ را افزایش یا کاهش می‌دهد. این عملکرد باعث تنظیم نمونه‌ها در بهترین حالت می‌گردد.

در حالتی که پتانسیل نیم پیل‌ها در محدوده معیار حفاظتی قرار گیرند خروجی ثابت باقی می‌ماند. در طی این فرایند، واحد پردازش، اطلاعات مورد نیاز را از طریق نمایشگر به کاربر انتقال می‌دهد. اگر در زمان کارکرد سیستم حفاظت کاتدی، میزان

پتانسیل نمونه‌ها تغییر یابد، واحد پردازش بلافاصله با تغییر خروجی واحد آنالوگ، سیستم حفاظت کاتدی را با شرایط جدید نمونه‌ها تطبیق می‌دهد.

یکی از خصوصیات ترانسفورمر رکتیفایرهای هوشمند، امکان ارتباط سریال بر اساس استاندارد RS485 می‌باشد. این ارتباط امکان ایجاد یک شبکه با توپولوژی Bus را فراهم آورده است. بر اساس این توپولوژی همه دستگاه‌های ترانسفورمر رکتیفایر از طریق یک ارتباط دو سیمه به یکدیگر متصل شده و در نهایت به یک دستگاه سرور (که سرور مذکور توانایی تبادل اطلاعات و کنترل با رایانه دارد) متصل می‌شوند.

هریک از ترانسفورمر رکتیفایرها دارای یک آدرس مختص به خود در داخل سرور اصلی می‌باشند. شروع هر ارتباطی همواره از سرور خواهد بود، به این صورت که ابتدا سرور یک سیگنال که محتوی آدرس واحد مورد نظر برای برقراری ارتباط است را بر روی Bus قرار می‌دهد. بنابراین آدرس توسط تمامی واحدها دریافت شده و واحدی که آدرس ارسالی از سرور با آن برابر باشد آماده دریافت اطلاعات بعدی می‌نماید و سیگنال بعدی حاوی فرمان دریافت و ارسال اطلاعات بوده، سپس امکان ارسال فرمان‌های دیگر را فراهم می‌آورد.

با روند ذکر شده در بالا امکان دریافت گزارش‌های مختلف از وضعیت سیستم حفاظت کاتدی و پتانسیل رفرنس‌ها فراهم می‌باشد. همچنین امکان فرمان به هریک از ترانسفورمر رکتیفایرها و در نتیجه تنظیم پتانسیل رفرنس‌ها در محدوده حفاظت امکان‌پذیر می‌گردد.

تبادل اطلاعات از طریق تلفن ثابت (در صورت امکان) و سیم کارت تلفن همراه نیز امکان‌پذیر می‌باشد، در همین خصوص یک واحد واسطه (Interface) به واحد کنترل‌کننده متصل شده و از طریق تماس تلفنی اطلاعات و فرمان‌های مربوطه منتقل می‌گردد.

ترانسفورمر رکتیفایرهای هوشمند دارای وضعیت Local و Remote بوده، در حالت Remote کنترل سیستم حفاظت کاتدی توسط سرور انجام پذیرفته و در حالت Local تنظیم مورد نیاز در محل ایستگاه‌ها و توسط اپراتور صورت می‌گیرد.

مخزن و تابلو ترانسفورمر رکتیفایر

ترانسفورمر رکتیفایرها مناسب نصب در هرگونه شرایط محیطی اعم از: داخل اتاقک، در فضای آزاد، داخل محیط منطقه خطر و... مطابق استاندار IEC60144 ساخته می‌شوند. جهت حفاظت و رنگ‌آمیزی بدنه این دستگاه‌ها با توجه به درخواست سفارش‌دهنده از پوشش‌های رنگ مایع آلکیدی، الکترواستاتیک پودری، صنعتی و اپوکسی، گالوانیزه و... استفاده می‌شوند.

در شرایطی که محیط نصب ترانسفورمر رکتیفایرها دارای خورندگی زیادی باشد (کنار اسکله‌ها یا روی شناورها) معمولاً مخزن یا تابلو ترانسفورمر رکتیفایر از جنس استنلس استیل ساخته می‌شود. ترانسفورمر رکتیفایرهای مناسب نصب در فضای آزاد، دارای سایه‌بان برای جلوگیری از صدمات شرایط محیطی به بدنه ترانسفورمر رکتیفایر می‌باشند. بر روی بدنه ترانسفورمر رکتیفایرها با خنک‌کنندگی روغن یک عدد رطوبت‌گیر روغن و نشان‌دهنده سطح روغن تعبیه گردیده و دارای نمایشگر مدرج دمای روغن نیز می‌باشند.

تابلوی کنترل و حفاظت

جهت حفاظت اجزا تشکیل‌دهنده ترانسفورمر رکتیفایر از قبیل: ترانسفورماتور اصلی، بخش یک‌سوساز و... از تجهیزاتی جهت کنترل برق ورودی استفاده می‌گردد که در صورت بروز خطا از اعمال آن و در نتیجه آسیب به دستگاه جلوگیری نماید. همچنین در خروجی نیز تجهیزاتی تعبیه گردیده که دستگاه را در برابر خطاهایی مانند صاعقه، برگشت جریان، جریان‌های ناشی از جوشکاری و... محافظت می‌کند. درعین‌حال، جهت نمایش پارامترهای مورد نیاز در ورودی و خروجی از ادوات اندازه‌گیری نیز استفاده می‌شود. در زیر به شرح تجهیزات مذکور می‌پردازیم.

- تایمر قطع و وصل: مطابق استانداردهای سیستم حفاظت کاتدی، معیار سنجش پتانسیل حفاظتی، لحظه قطع منبع تزریق جریان به سازه تحت حفاظت می‌باشد (Instant Off Potential). در نتیجه ترانسفورمر رکتیفایر مطابق استاندارد می‌بایست دارای یک تایمر قطع و وصل جهت خروجی دستگاه، با قابلیت تنظیم زمان قطع و وصل از صفر تا ۳۰۰ ثانیه باشد. بر روی دستگاه کلیدی برای تعیین عملکرد دستگاه در حالت تایمر یا دائم در نظر گرفته می‌شود.
- حفاظت: موارد زیر جهت حفاظت بخش‌های مختلف ترانسفورمر رکتیفایرها مورد استفاده قرار می‌گیرند:
  - کلید اتوماتیک (MCCB) در ورودی برق متناوب و خروجی DC (بر اساس تقاضای سفارش‌دهنده)
  - رله کنترل فاز (مونیتور سه فاز) جهت جلوگیری از آسیب به ترانسفورمر رکتیفایر در صورت بروز خطا در برق ورودی متناوب
  - فیوز فوق سریع مناسب با مشخصات ترانسفورمر رکتیفایر
  - برقگیر از نوع واریستور اکسید فلزی MOV
  - فیلتر و سلف جهت جلوگیری از حالت‌های گذرای ناشی از کلید زنی
  - حفاظت یک‌سوساز خروجی در برابر اتصال کوتاه با استفاده از محدودکننده جریان الکترونیک
  - فیوز مخصوص جهت حفاظت واحد کنترل
  - فیوز محافظ ولت‌متر DC
  - در صورت درخواست متقاضی نصب رله اضافه جریان برای محافظت در برابر اضافه بار
- تجهیزات اندازه‌گیری: به طور معمول یک ولت‌متر در ورودی (در دستگاه‌های سه فاز سلکتور سویچ نیز اضافه می‌گردد)، ولت‌متر و آمپرمتر به همراه شنت در خروجی یک‌سوساز نصب می‌گردد. مطابق درخواست سفارش‌دهنده نصب تجهیزات اندازه‌گیری دیگر مانند آمپرمتر به همراه CT در ورودی و... انجام می‌پذیرد.
- اتصالات و سیم‌کشی داخلی: تمامی بخش‌های فلزی داخل تابلو ترانسفورمر رکتیفایر به ترمینال ارت دستگاه متصل می‌شوند. محل ترمینال‌های ورودی و خروجی به‌صورتی انتخاب گردیده که اتصال‌ها به سهولت انجام گیرد. تمامی اتصالات داخلی با سیم افشان با حداقل سطح مقطع ۱/۵ میلی‌مترمربع به همراه تگ‌نامبر مربوطه انجام می‌گیرد.
- فیلتر خروجی: در صورت نیاز و درخواست سفارش‌دهنده، در خروجی یک‌سوساز صافی سلفی یا سلفی/خازنی نصب خواهد شد.

ترانسفورمر رکتیفایرهای چند مداره (چند کاناله)

به جهت حذف مقاومت‌های متغیر از مدار سیستم حفاظت کاتدی (بالانس نمودن سیستم حفاظت کاتدی دارای مقاومت‌های متغیر در برخی موارد بسیار مشکل و دردسرساز می‌باشد) از تقسیم توان خروجی ترانسفورمر رکتیفایر در واحدهایی با ظرفیت کمتر (با قابلیت کنترل خروجی مجزا) استفاده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، در یک دستگاه ترانسفورمر رکتیفایر، چند دستگاه با ظرفیت کمتر قرار داده شده که هریک امکان اعمال حفاظت و تنظیم به‌صورت جداگانه را دارا می‌باشند.

در برخی موارد جهت حفاظت از خوردگی سازه‌های مدفون در الکترولیت جریان کمی مورد نیاز می‌باشد که درعین‌حال، سازه‌های مذکور دارای تعدد بوده و هر سازه می‌بایست دارای کنترل جداگانه‌ای باشد. در این شرایط استفاده ترانسفورمر رکتیفایرهای چندکاناله توصیه می‌گردد.

شکل ۷-۸

ترانسفورمر رکتیفایر ضد انفجار

با توجه به شرایط محیطی مجتمع‌های نفت، گاز، پتروشیمی و... برخی از ترانسفورمر رکتیفایر می‌بایست در داخل منطقه خطر (Hazardous Area) نصب شوند. این امر مستلزم ساخت ترانسفورمرهای مناسب نصب در این شرایط محیطی با رعایت استانداردهای مربوطه می‌باشند.

ترانسفورمر رکتیفایرهای مذکور مطابق استاندارد IEC60079 ساخته می‌شوند. در این نوع دستگاه‌ها ترانسفورماتور اصلی و بخش یک‌سوساز و فیلترهای مربوطه داخل مخزن روغن دستگاه غوطه‌ور شده، برای رعایت کلاس حفاظتی این بخش از ترانسفورمر رکتیفایر از کلاس حفاظتیEX-O استفاده می‌گردد. تجهیزات حفاظتی، واحدکنترل الکترونیک، اندازه‌گیری و... داخل باکس‌های مربوطه با کلاس حفاظتی Exd (بر اساس درخواست سفارش‌دهنده ممکن است کلاس حفاظتی متفاوت باشد) نصب می‌شوند. تجهیزات اندازه‌گیری مانند: آمپرمتر، ولت‌متر و... در داخل باکس‌های ضدانفجار دارای صفحه نمایش شفاف نصب می‌گردند. ورود و خروج کابل‌های ترانسفورمر رکتیفایر با استفاده از گلندهای ضدانفجار با همان کلاس Exd انجام می‌پذیرد.

ترانسفورمر رکتیفایرهای ضدانفجار می‌توانند از نظر کنترلی هریک از انواع ذکر شده در بخش‌های قبلی را شامل شوند. بنابراین بر اساس نیاز پروژه این نوع رکتیفایرها نیز دارای کنترل الکترونیک یا هوشمند حتی چند کاناله خواهند بود.

شکل ۷-۹

سیستم‌های کنترل و پایش از راه دور حفاظت کاتدی

جهت اطمینان از عملکرد صحیح سیستم‌های حفاظت کاتدی، همواره لازم است در فواصل زمانی معین اندازه‌گیری‌های دوره‌ای از پارامترهای مختلف سیستم انجام شود.

با توجه به پهنه جغرافیایی و تنوع اقلیمی مناطق مختلف کشور و عبور خطوط انتقال نفت، گاز و... در مناطق کوهستانی، کویری یا جنگلی و الزام سرکشی به ایستگاه‌های حفاظت کاتدی جهت اندازه‌گیری مقادیر، همواره با مشکلات خاص و صرف هزینه‌های زیاد روبه‌رو است.

با استفاده از سیستم‌های کنترل و پایش از راه دور می‌توان بدون حضور در محل همواره به‌صورت دائمی عملکرد سیستم حفاظت کاتدی را پایش نموده و از درستی عملکرد آن اطمینان حاصل کرد. با بهره‌برداری از این سیستم‌ها مشکلات و هزینه‌های بازرسی دوره‌ای جهت ثبت، کنترل مقادیر و هزینه‌های پرسنلی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. این تکنولوژی به فرد کنترل‌کننده این امکان را می‌دهد که بتواند به‌صورت هم‌زمان چند ایستگاه مختلف حفاظت کاتدی را از یک مکان، مورد کنترل و بررسی قرار داده و مسائل و مشکلات سیستم را به‌سرعت کشف و رفع نماید.

- پایش

پارامترهای مختلفی از دستگاه ترانسفورمر رکتیفایر و سیستم حفاظت کاتدی قابل اندازه‌گیری و انتقال به مرکز کنترل هستند. سیستم پایش می‌تواند بدون توجه به نوع دستگاه و شرکت سازنده آن و بدون هیچ‌گونه محدودیتی بر روی انواع مختلف ترانسفورمر رکتیفایر نصب گردد.

برخی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری و پایش عبارتند از:

- Vac: ولتاژ ورودی ترانسفورمر رکتیفایر (۰ – ۵۰۰ ولت)
- Iac: جریان ورودی ترانسفورمر رکتیفایر (۰ – ۳۰۰ آمپر)
- Vdc: ولتاژخروجی ترانسفورمر رکتیفایر (۰ – ۳۰۰ ولت)
- Idc: جریان خروجی ترانسفورمر رکتیفایر (۰ – ۳۰۰ آمپر)
- Vref: پتانسیل تجهیزات مورد حفاظت نسبت به الکترود مرجع (۰ – ۵ ولت)
- Oil Temp: دمای روغن

- Oil Level: اعلام کاهش سطح روغن از حداقل پیش‌بینی شده

- کنترل

کنترل از راه دور بر روی دستگاه‌هایی که مجهز به سیستم پایش از راه دور می‌باشند، امکان‌پذیر است. این امر بدین دلیل است که کنترل بدون ابزار نظارتی می‌تواند خطراتی را متوجه سیستم نماید. همچنین بعد از تغییرات در پارامترهای کنترلی، بازخورد (فیدبک) از سیستم جهت اطلاع کاربر از وضعیت جدید لازم و ضروری می‌باشد.

آنچه به‌عنوان پارامترهای اصلی ترانسفورمر رکتیفایر قابل کنترل می‌باشد به شرح زیر است:

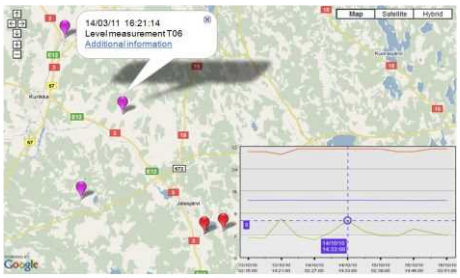
- قطع و وصل سیستم از راه دور
- قابلیت کنترل و تنظیم جریان خروجی یا تنظیم ولتاژ خروجی ترانسفورمر رکتیفایر
- قابلیت تنظیم ولتاژ رفرنس نیم پیل‌ها و در نتیجه کنترل هوشمند ولتاژ و جریان خروجی ترانسفورمر رکتیفایر

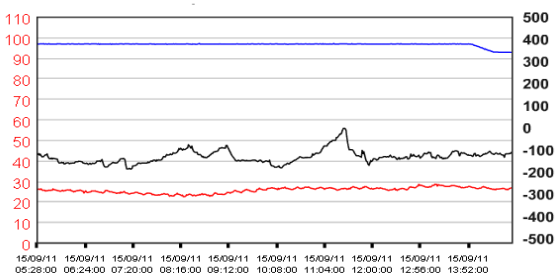
مزایای عمومی سیستم پایش و کنترل از راه دور

- کنترل، اندازه‌گیری و ذخیره‌سازی پارامترهای ترانسفورمر رکتیفایرها و پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله الکترودهای مرجع و مقایسه آنها با یکدیگر
- تنظیم اتوماتیک جریان و ولتاژ ترانسفورمر رکتیفایر
- پیشگیری از خطاهای انسانی
- صرفه‌جویی در زمان و هزینه به جهت حذف بازدیدهای دوره‌ای
- امکان قطع وصل ترانسفورمر رکتیفایرهای متعدد به‌صورت هم‌زمان
- امکان نمایش محل جغرافیایی ایستگاه‌ها در نقشه به‌وسیله سخت‌افزار GPS/GPRS

قابلیت‌های نرم‌افزاری:

- ایجاد شناسنامه کامل از ایستگاه‌های حفاظت کاتدی
- اعلام اخطار در صورت بروز نقص کلی در سیستم حفاظت کاتدی
- ارسال خطاهای احتمالی سیستم توسط شبکه GSM
- جمع‌آوری و ذخیره اطلاعات
- امکان ارسال اطلاعات از طریق کامپیوتر و اینترنت
- اعلام خطر در صورت تغییر پارامترها نسبت به مقادیر از پیش تعیین شده
- تهیه آرشیو مستقل از اطلاعات مربوط به هر ایستگاه و امکان مقایسه اطلاعات
- برقراری ارتباط و ذخیره‌سازی اطلاعات به‌صورت دوره‌ای و اتوماتیک (بدون نیاز به کاربر)
- امکان ارائه داده‌ها به‌صورت نرم‌افزاری و نمایش به شکل‌های گوناگون از قبیل: فایل، نمودار، جدول چارت و... .





شکل ۷-۱۰

روش‌های ارتباط با سیستم پایش و کنترل

- پورت سریال (RS 232, Modbus, Shared Bus)
- مودم و خط تلفن (Modem)
- فیبر نوری (Optical Fiber)
- شبکه‌های محلی (LAN/ TCP/IP)
- موبایل (GSM Mobile/GPRS)
- موبایل ماهواره‌ای (Satellite Mobile)
- فرکانس‌های بی‌سیم (RF Link)

سیستم‌های پایش از دور امکان اضافه شدن قابلیت‌های سفارشی مانند: اندازه‌گیری جریان آندها به‌صورت مجزا و قابلیت‌های دیگر را دارا می‌باشد.

شکل ۷-۱۱

لوازم جانبی سیستم حفاظت کاتدی[۲۷۴]

در سیستم حفاظت کاتدی تجهیزات جانبی نیز با کاربردهای مختلف وجود دارد. تجهیزات سیستم حفاظت کاتدی را می‌توان به شرح ذیل نام برد:

- انواع الکترودهای مرجع
- کک پترولیوم و کک متالورژی
- انواع پلاریزیشن سل جامد و مایع
- ترانسفورمر رکتیفایر، باند باکس، تست پوینت و مارکر
- زینک ارتینگ سل یا زینک الکترود
- انواع اسپارگپ معمولی و ضدانفجار
- کابل کاینار (HMWPE/PVDF)
- انواع کیت عایقی
- مفصل‌های رزینی
- سیستم‌های کنترل و پایش

کاربردهای تجهیزات سیستم حفاظت کاتدی را می‌توان به شرح ذیل نام برد:

اتصالات، ایزوله کردن سازه‌های زیرزمینی و روزمینی از همدیگر، پایش سیستم حفاظت کاتدی، کاهش صدمات ناشی از صاعقه، کاهش نشتی جریان اعمالی به سازه‌ها، کاهش مقاومت زمین و اعمال جریان به آندها و سازه‌های مدنظر.

الکترودهای مرجع[۲۷۵]

الکترود مرجع مس/سولفات مس[۲۷۶]

تولید الکترودهای مرجع مس/سولفات مس به دو صورت قابل حمل و ثابت می‌باشد. نوع متحرک با داشتن پراب (گیره سوسماری) برای بسیاری از کاربردها مناسب است، درحالی‌که، نوع ثابت فقط در کف مخازن و در مجاورت ترانس رکتیفایرهای هوشمند و... استفاده می‌شود.

ابعاد الکترود مرجع ممکن است متناسب با کاربرد انتخاب شود، ولی به منظور جلوگیری از پلاریزاسیون در طول تست‌ها، ناحیه سطحی الکترود مس در تماس با محلول سولفات مس باید به اندازه کافی بزرگ باشد. درجه خلوص الکترود مس می‌بایستی از مس بالای ۹۹/۹٪ انتخاب شود و به منظور حذف تمامی آثار اکسید و گریس، تمیز شده و در محلول سولفات مس اشباع شده غوطه‌ور گردد. برای حفظ حالت اشباع محلول می‌توان به آن سولفات مس جامد اضافی افزود. لایه متخلخل انتهای

---

2 [illegible] 7 [illegible] 4
2 [illegible] 7 5
2 [illegible] Cu/CuSo4 7 6

الکترودهای مرجع نوع متحرک وظیفه اتصال الکتریکی با محیط را برعهده دارند و رطوبت آن توسط نفوذ محلول سولفات مس حفظ می‌شود.

همچنین اتصال الکتریکی در الکترودهای مرجع نوع ثابت با محیط توسط کل بدنه سفالی متخلخل ایجاد شده و به واسطه وجود پشت‌بند[۲۷۷] معمولاً حاوی ۷۵٪ گیپسوم، ۲۰٪ بنتونیت و ۵٪ سولفات سدیم و یا به نسبت ۵۰٪-۵۰٪ گیپسوم-بنتونیت) اطراف آن، همواره رطوبت حفظ می‌شود.

در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی از الکترود مرجع الکترود مرجع مس/سولفات مس (متحرک و ثابت) جهت استفاده در خاک‌های فاقد یون کلر استفاده می‌شود.

مطابق استاندارد BS 7361 اختلاف پتانسیل الکترود مرجع مس/سولفات مس نسبت به الکترود استاندارد هیدروژن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (V) 0.32+ می‌باشد.

الکترود مرجع نقره/کلرید نقره[۲۷۸]

الکترود مرجع نقره/کلرید نقره از یک الکترود نقره تشکیل می‌شود که سطح آن توسط روش‌های حرارتی یا الکترولیتی با کلرید نقره پوشش داده شده است. این الکترود از پایداری بالایی برخوردار می‌باشد. از الکترود مرجع نقره/کلرید نقره در آب دریا یا آب‌های رودخانه‌ای شور به طور مستقیم استفاده می‌شود. همچنین در کاربردهای دیگر مانند فولاد در بتن، از الکترود مرجع نقره/کلرید نقره/کلرید پتاسیم استفاده می‌شود.

به‌منظور محافظت مکانیکی از الکترودهای مورد استفاده در آب دریا آنها را در محفظه‌های مخصوص قرار داده و جهت برقرار شدن تماس با الکترولیت، سوراخ‌هایی بر روی این محفظه‌ها ایجاد می‌شود. این الکترودها پیش از استفاده باید به‌مدت چند ساعت در آب دریا غوطه‌ور شوند. به‌منظور جلوگیری از اتصال کوتاه شدن انتهای کابل الکترودها به‌خوبی عایق می‌شود.

در صورت عدم استفاده از الکترودهای مرجع نقره/کلرید نقره، باید در محلول اشباع کلرید پتاسیم نگه داشته شوند.

مطابق استاندارد BS 7361 اختلاف پتانسیل الکترود مرجع نقره/کلرید نقره/آب دریا نسبت به الکترود استاندارد هیدروژن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (V) 0.25+ می‌باشد.

شکل ۷-۱۲

2 7 7

2 7 8

الکترود مرجع روی/ سولفات روی[۲۷۹]

در خاک‌های حاوی یون کلر، استفاده از الکترودهای مرجع مس/سولفات مس امکان‌پذیر نبوده و به‌جای آن از الکترودهای مرجع روی/سولفات روی استفاده می‌گردد. این الکترودها از لحاظ ساختاری کاملاً شبیه به الکترودهای مرجع مس/سولفات مس بوده ولی، با این تفاوت که الکترود روی با درجه خلوص بالا در محلول سولفات روی اشباع شده غوطه‌ور می‌گردد.

معمولاً استفاده از یک الکترود مرجع فلزی با هدف اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل، در تماس مستقیم با الکترولیت اطراف سازه، منطقی به نظر نمی‌رسد، ولی الکترود مرجع روی در آب دریا برای بسیاری از کاربردها مناسب است. این الکترود مرجع ارزان‌تر از الکترود مرجع نقره/کلرید نقره بوده و به‌عنوان جایگزین آن به کار می‌رود مگر اینکه به درجه بالایی از پایداری نیاز باشد.

در تولید الکترودهای مرجع روی، از شمش روی با درجه خلوص بالا (حداقل ۹۹/۹٪ با حداکثر میزان آهن ۰/۰۰۱۴٪) استفاده می‌گردد. برای اتصال، از کابل مسی با روکش مقاوم به یون کلر (HMWPE/PVDF) و با سطح مقطع ۱۰ mm^2 یا ۱۶ mm^2 استفاده شده و این کابل به هسته فولادی داخل الکترود جوش داده می‌شود. محل اتصال کابل مسی و میله فولادی با رزین اپوکسی پوشانده می‌شود.

دقت اندازه‌گیری پتانسیل با استفاده از الکترود مرجع نقره/کلرید نقره در آب دریا حدود ۵ ± میلی‌ولت و با استفاده از الکترود مرجع روی در آب دریا حدود ۳۰ ± میلی‌ولت می‌باشد.

شکل ۷-۱۳

کابل مقاوم به کلر (کاینار)[۲۸۰] (HMWPE/PVDF)

در شرایطی که نیاز به بهبود مقاومت نسبت به خوردگی باشد، به‌عنوان مثال در بسترهای عمیق، استفاده از کابل‌های دارای دو پوشش Kynar/HMWPE توصیه می‌شود. به طور تجربی، اصلی‌ترین علت عدم کارایی سیستم حفاظت کاتدی در چاه‌های عمیق، کابل آند می‌باشد. با اعمال جریان مثبت در آندهای حفاظت کاتدی، مقدار زیادی گاز کلر تولید می‌شود که این گاز مخرب بوده و باعث تخریب عایق کابل و در نتیجه منجر به خرابی کابل مسی و در نهایت از دست رفتن آند در سیستم حفاظت کاتدی می‌شود.

---

2 7 9
2 8 0

در کابل‌های دارای دو روکش (HMWPE/PVDF)، روکش خارجی که از HMWPE استاندارد تشکیل شده است، سبب ایجاد خواص فیزیکی بسیار مطلوبی نظیر مقاومت به سایش می‌شود. لایه داخلی که مقاومت بسیار بالایی در مقابل یون کلر دارد، از یک دیواره همگن PVDF فلوئورو پلیمری (PVDF) تشکیل شده است. همچنین Kynar مقاوم به بسیاری از مواد شیمیایی نظیر اسید هیدروکلریک و اسید سولفوریک است.

کابل کاینار گونه‌ای از کابل است که از سیم‌های مسی آنیل شده و محبوس در یک ساختار عایقی دوگانه تشکیل شده است. مقصود از عایق دوگانه، ساختاری از عایق است که از یک لایه بیرونی و یک لایه درونی تشکیل شده است. این کابل از سه جزء اصلی تشکیل شده است:

- سیم‌های مسی بازپخت‌شده
- عایق درونی PVDF
- عایق بیرونی HMWPE
- هسته مسی کابل کاینار؛ مس آنیل شده

شکل ۷-۱۴

بازپخت یا به‌عبارتی Annealing شامل مجموعه تکنیک‌هایی است که در آن ماده‌ای را به یک دمای خاص رسانده، در آن دما با تداوم حرارت‌دهی تثبیت کرده و سپس با استفاده از سرمایش به حالت نرمال برمی‌گردانند. البته باید دقت داشت که پروسه بازپخت کردن شامل طیف وسیعی از عملیات‌های حرارتی خواهد شد و بازپخت مس برای کابل کاینار، ممکن است با متدهای متفاوتی انجام شود؛ اما کلیات این عملیات ثابت است. اما چرا از مس بازپخت‌شده در ساخت کابل کاینار استفاده می‌شود.

مس بازپخت‌شده، مزایای متعددی دارد. این ماده نرم‌تر شده و به‌تبع آن میزان کمتری از شکنندگی را در برابر تغییر حالت یا نیروی خارجی از خود نشان می‌دهد. این بدان معنی است که بافت کابل کاینار یا کابل با روکش HMWPE/PVDF برای شکل‌دهی و استفاده در فضاهایی نیازمند انعطاف‌پذیری بالا، یک گزینه ایدئال خواهد بود. از سوی دیگر مطابق برخی شواهد

علمی، پروسه بازپخت مس، ضمن تغییر در تفکیک و اندازه دانه‌ها، تغییر خواص الکتریکی را به همراه دارد. به بیانی دیگر بازپخت مس به بهبود میزان رسانایی آن کمک شایانی می‌کند.

- لایه درونی عایق کابل کاینار؛ ساخته‌شده از ماده‌ای به اسم PVDF

لایه درونی ساختار عایق کابل کاینار، از ماده‌ای به نام PVDF ساخته می‌شود. پوشش کاینار یا ماده‌ای به نام PVDF، در اصل ماده‌ای است از جنس فلوئوروپلمیرها که دارای مقاومت شیمیایی استثنایی هستند. مقاومت شیمیایی ماده PVDF در حضور موادی مانند کلر، اسید سولفوریک و اسید کلریدریک مثال‌زدنی است و اتفاقاً همین موضوع برگ برنده کاینار است. پیش از پرداختن به لایه بیرونی کابل کاینار، شایان ذکر است که ماده کاینار گاهی تحت عنوان (PVDF) نیز شناخته می‌شود؛ به همیت علت کابل مذکور را گاهی تحت عنوان کابل (PVDF) نیز می‌شناسند.

- لایه بیرونی عایق کابل کاینار؛ استفاده از پلی‌اتیلن

این لایه از کابل کاینار از ماده پلی‌اتیلن ساخته می‌شود. پلی‌اتیلن یا به عبارتی (HMWPE) با وزن مولکولی بالا، مقاومت دی‌الکتریک بسیار بالایی داشته و همچنین در برابر رطوبت، مقاومت بسیار قابل توجهی نشان می‌دهد. آمیزه‌ای از این دو خاصیت، همان علتی است که پلی‌اتیلن را به ماده‌ای مناسب برای ساخت عایق بیرونی تبدیل کرده است. دقت داشته باشید که از نظر فنی گاهی این لایه از عایق را تحت عناوینی مانند (Jacket) یا (Sheath) نیز معرفی می‌کنند.

مقاومت کابل کاینار HMWPE/PVDF در برابر مواد شیمیایی

البته مقاومت بالای کابل HMWPE/PVDF صرفاً محدود به تغییرات دمایی نبوده و در برابر طیف گسترده‌ای از مواد شیمیایی مانند اسیدهای ارگانیک یا غیرارگانیک، بازها، الکل‌ها، حلال‌های هالوژنه و همچنین هیدروکربن‌های آلیفاتیک و آروماتیک و خصوصاً یون کلر یا اسید کلریدریک مقاومت مثال‌زدنی دارد. اغلب کابل‌های عادی که از این سیستم عایق‌بندی بهره نمی‌برند، حتی ممکن است با یکی از مواد شیمیایی فوق، به مشکل برخورده و در بلندمدت یا کوتاه‌مدت دچار نقصان شوند. با این وجود یکی از اصلی‌ترین کاربرد کابل HMWPE/PVDF، در محیط‌هایی با سطح بالایی از مواد شیمیایی نامطلوب و محیط‌های خورنده با حضور یون کلر، خود را نشان می‌دهد. به همین علت اغلب اصلی‌ترین کاربرد کابل HMWPE/PVDF را تأسیسات آندی می‌دانند که در بستر زمینی و چاهی و در تماس با گازهای کلر و هیدروژن هستند. بسترهایی که معمولاً از آندهای MMO استفاده می‌شود. لازم به ذکر است در بسترهای چاهی با حضور آند MMO که معمولاً در فرایند حفاظتی یون کلر و هیدوژن آزاد می‌شود و می‌تواند موجب ایجاد اسید کلریدریک که بسیار خورنده است گردد، از کابل کاینار استفاده می‌گردد تا مقاومت بالایی به یون کلر داشته باشد و آندهای MMO از کابل خود جدا نشده و اتصال قطع نگردد. بهترین کابل‌ها در این مصارف همین کابل کاینار می‌باشد.

شایان ذکر است که از کابل HMWPE/PVDF در تماس مستقیم با آب‌های شیرین یا شور نیز می‌توان استفاده کرد.

۳۳۰ | اطلس حفاظت کاتدی

کاربرد کابل کاینار HMWPE/PVDF و مزایای استفاده از آن

عموماً از کابل HMWPE/PVDF در شرایطی استفاده می‌شود که کاربر به انعطاف‌پذیری و مقاومت بالایی نیاز دارد و محیط بسیار خورنده و یون کلر در آن وجود دارد. در اینجا بدیهی است که مقصود مقاومت فیزیکی یا به‌عبارتی قدرت استحکام آن است و نه مقاومت الکتریکی! دامنه کاربرد کابل HMWPE/PVDF، بسیار وسیع‌تر از حد تصور است؛ از این کابل برای تأمین نیرو و منبع تغذیه، مصارف هوافضا و حتی مصارف مرتبط با موضوعات پزشکی نیز کاربرد دارد. همچنین به‌خاطر وزن و قطر کمتر در قیاس با نمونه‌های مشابه، از کابل HMWPE/PVDF برای نمونه‌سازی Prototyping در صفحات مدارهای عظیم و پیچیده نیز استفاده می‌شود. به‌علاوه شکل مطلوب عایق‌بندی آن موجب می‌شود که کابل کاینار یا کابل با روکش HMWPE/PVDF در دامنه وسیعی از دماهای بالا یا پایین، عملکرد و خصوصیات مثبت خود را حفظ کرده و در اصطلاح در برابر تغییرات دمایی یا به‌عبارتی حرارتی، مقاومت مطلوبی داشته باشد.

جدول ۷–۱۳ مشخصات قسمت‌های مختلف کابل‌های HMWPE/PVDF

Tinned Annealed Copper	**Conductors**
PVDF Fluoropolymer (Radiation Cross Linked Polyvinylidene Fluoride)	Insulation
HMWPE (High Molecular Weight Polyolefin) to ASTM Spec D-1248	Sheath/Jacket
Clear/Black	Colors
V 1000/600	Voltage
Maximum 150°C, Minimum Bending Minus -15°C	Operating Temperature
m x OD of Cable١ 10	Minimum Bending Radius

وزن و ابعاد سایزهای مختلف کابل‌های استاندارد:

Weight (Kg/km)	**Nominal Dia. Overall (mm)**	**RT of Sheath (mm)**	**Dia. Over Core (mm)**	**RT of Insulation (mm)**	**Maximum Dia. of Conductor (mm)**	**Size (mm^2)**
٩٦□	٨,٤٢	١,٦٥	٥,١٢	١,٠	٣,١٢	٦
١٣٥	٩,٣٥	١,٦٥	٦,٠٥	١,٠	٤,٠٥	١٠

۱۹۷	۱۰,۰٤	۱,٦٥	۷,۱۰	۱,۰	٥,۱۰	۱٦
۳۱۲	۱۲,۱۰	۱,٦٥	۸,۸۰	۱,۲	٦,٤۰	۲٥
۳۹۸	۱۳,۲۰	۱,٦٥	۹,۹۰	۱,۲	۷,٥۰	۳٥
٥٤۱	۱٥,۰۰	۱,٦٥	۱۱,۷۰	۱,٤	۸,۹۰	٥۰

شکل ۷-۱۵

تست باکس و نشانگر[۲۸۱]

از باند باکس در سیستم‌های حفاظت کاتدی جهت اتصال کابل‌های ترانس رکتیفایر به آندها و سازه‌ها استفاده می‌شود. پتانسیل خط لوله نسبت به خاک، جریان خط لوله، جریان سرگردان عبورکننده از خط لوله، مقاومت اتصالات عایقی و غیره را از طریق باند باکس می‌توان اندازه‌گیری نمود. باند باکس‌های تولید شده در «شرکت دانش آریا» بر اساس تقاضای کارفرما از ورق آهنی با ضخامت ۲ یا ۳ میلی‌متر و در دو اندازه ۱۵۰×۲۰۰×۴۰۰ و ۱۵۰×۳۰۰×۳۸۰ میلی‌متر با درجه حفاظتی IP54 ساخته می‌شوند.

قطعات و قسمت‌های مختلف باند باکس عبارتند از:

- ترمینال برنجی با پایه عایقی رزینی برای باند باکس‌های با تعداد ترمینال‌های مختلف. مثلاً چهار عدد ترمینال برنجی با پایه عایقی رزینی برای باند باکس چهار ترمیناله در داخل جعبه استفاده می‌شود.
- در باند باکس‌ها از تسمه مسی جهت اتصال ترمینال‌ها به یکدیگر استفاده می‌شود.
- جهت افزایش ضریب ایمنی و جلوگیری از سرقت دو عدد لولای مخفی مناسب بر روی بدنه نصب می‌گردد.
- مهره پیچ‌های نصب درب به بدنه از نوع خروسکی می‌باشد.
- جهت رعایت آب‌بندی IP54، دور لبه درب یک نوار پلاستیکی چسبانده می‌شود.
- جهت نصب پایه به جعبه، یک صفحه به ضخامت ۳ میلی‌متر و ابعاد ۱۲۵×۳۰۰ میلی‌متر در قسمت زیرین جعبه مطابق استاندارد با پیچ‌های گالوانیزه نصب می‌شود.

2 8 1

تست پوینت

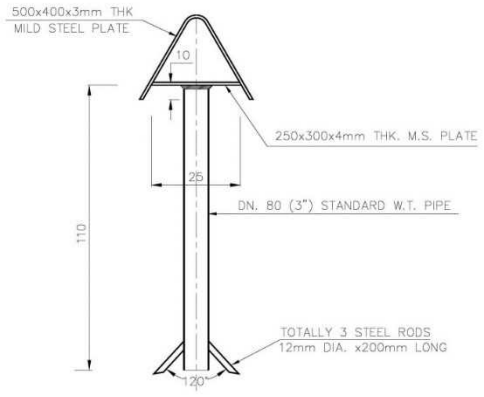
از طریق تست پوینت می‌توان پتانسیل خط لوله نسبت به خاک را اندازه‌گیری نمود. تست پوینت‌های «شرکت دانش آریا» در انواع مختلف و بر اساس سفارش کارفرمای محترم ساخته می‌شوند. پایه تست پوینت از لوله آهنی به قطر ۷۵، ۱۰۰ یا ۱۵۰ میلی‌متر (مطابق درخواست) تولید می‌شود. سایه‌بان از ورق آهنی به ضخامت ۲ یا ۳ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

قطعات و قسمت‌های مختلف تست پوینت عبارتند از:

- تعداد ترمینال برنجی (پیچ و مهره برنجی مناسب) در داخل تست پوینت مطابق درخواست نصب می‌گردد.
- برای نصب مناسب در داخل فنداسیون بتونی، سه میله آهنی به‌عنوان شاخک در پایین پایه قرار می‌گیرد.
- برای ورود و خروج مناسب و راحت کابل، یک سوراخ مناسب در پایین پایه لوله آهنی تعبیه شده است.

مارکر:

مسیر خط لوله و ابتدا و انتهای بستر حفاظت کاتدی توسط مارکر یا نشانگر مشخص می‌گردد. پایه مارکر از لوله آهنی به قطر ۷۵، ۱۰۰ یا ۱۵۰ میلی‌متر (مطابق درخواست) تولید می‌شود. سایه‌بان نیز از ورق آهنی به ضخامت ۲ یا ۳ میلی‌متر ساخته می‌شود.



شکل ۷-۱۶

از روش‌های زیر به‌عنوان پوشش یا رنگ باند باکس، تست‌پوینت و مارکرها می‌تواند استفاده می‌شود:

- گالوانیزه گرم
- انواع رنگ مخصوص کوره‌ای با زیرسازی فسفاته یا کروماته
- انواع رنگ مخصوص اپوکسی یا الکیدی با زیرسازی سندبلاست

انواع کک

نوع بکفیل مورد استفاده در سیستم حفاظت کاتدی در بسترهای زمینی، بستگی به نوع سیستم حفاظت کاتدی به کار گرفته شده دارد. با توجه به اینکه سیستم حفاظت کاتدی در دو نوع سیستم آندهای فداشونده (موقت) و سیستم آندهای تزریق جریان (دائمی) وجود دارد، لذا از دو نوع مواد بکفیل نیز استفاده می‌شود.

شکل ۷-۱۷

آندهای تزریق جریان برای حفاظت کاتدی سازه‌های زیرزمینی معمولاً توسط یک بکفیل کربنی احاطه می‌شوند. هدف از به کارگیری این بکفیل این است که:

- کاهش مقاومت محیط اطراف آند، جهت افزایش مقدار جریان تولید شده توسط آند
- افزایش سطح آند، جهت افزایش مقدار جریان
- کاهش نرخ خوردگی آند و در نتیجه افزایش طول عمر آن

بکفیل کربنی بر اساس استاندارد IPS-M-TP 750 در سه نوع کک متالورژی ۸۰٪، کک پترولیوم ۹۰٪ و کک پترولیوم ویژه ۹۵٪ وجود دارد.

ترکیب شیمیایی این سه نوع پشت‌بند در جدول زیر مشخص شده است:

جدول ۷-۱۴

	نوع ۱: ذغال کک متالورژی		**نوع ۲: ذغال کک پترولیوم**		**نوع ۳: ذغال کک پترولیوم ویژه**	
خواص شیمیایی (wt.%)	مقدار	دانسیته (□□□□)	مقدار	دانسیته (□□□□)	مقدار	دانسیته (□□□□)
کربن (حداقل)	۸۰	۸۰۰-۶۵۰	۹۰	۱۰۰۰-۷۰۰	۹۵	۱۲۰۰-۱۰۵۰
رطوبت (حداکثر)	۵		۵		۱	
خاکستر (حداکثر)	۱۵		۵		۳	
گوگرد (حداکثر)	۱		۵		۱	
مواد فرار (حداکثر)	۵		۵		۱	

ذغال کک در حالت کلی در بسترهای افقی کم‌عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد، درصورتی‌که برای به کارگیری در چاه‌های عمیق از کک پترولیوم یا پترولیوم ویژه استفاده می‌شود.

پشتبند در سیستم آندهای فداشونده

آندهای فداشونده روی و منیزیم که جهت حفاظت کاتدی سازه‌های مدفون در خاک استفاده می‌شوند، گاهی اوقات به همراه یک ماده پشت‌بند در داخل یک کیسه کتانی بسته‌بندی می‌شوند. از این مواد برای جلوگیری از تماس مستقیم آند با خاک و همچنین خوردگی موضعی آند استفاده می‌شود. همچنین از پسیو شدن آند در اثر واکنش با نمک‌های موجود در خاک جلوگیری می‌کند. این بکفیل با ایجاد محیطی با مقاومت پایین در اطراف آند، عملکرد آند را بهبود می‌بخشد. این مواد معمولاً ترکیبی از سه نوع ماده گچ گیپسوم، بنتونیت و سولفات سدیم می‌باشد و درصد ترکیبات آنها بستگی به محیط مورد استفاده دارد.

در جدول زیر انواع بکفیل بر اساس استاندارد IPS-M-TP 750 را ملاحظه می‌نمایید:

جدول ۷-۱۵

Approx. Resistivity in Ohm-Cm	Sulfate sodium %	Bentonite Clay %	Gypsum ($CaSo_4$) %		Type
			□ □□□□□□ □□□□□□	□□□□□□□	
250	□	□□	□	□□	□
250	□	□□	□	□□	□
250	□	□□	□□	□	□
50	□	□□	□	□□	□

پلاریزیشن سل[۲۸۲]

یکی از مشکلات عمده در نحوه عملکرد سیستم‌های حفاظت کاتدیک به خصوص در مجتمع‌های صنعتی متمرکز مانند پتروشیمی‌ها و پالایشگاه‌ها، نشتی جریان DC مورد نیاز محاسبه‌شده جهت حفاظت کاتدیک خطوط لوله و مخازن ذخیره، به سیستم‌های ارت می‌باشد که این موضوع موجب کاهش جریان مورد نیاز جهت پلاریزاسیون این سازه‌ها گردیده و در نتیجه، سازه‌ها به معیارهای قابل قبول پتانسیل حفاظتی مطابق با استاندارد نمی‌رسند. یکی از تجهیزات مورد استفاده جهت رفع این مشکل در سازه‌های تحت سیستم حفاظت کاتدیک، پلاریزیشن سل می‌باشد. این تجهیز با بلوکه کردن جریان DC، عبور جریان AC را امکان‌پذیر می‌کند. «گروه تحقیق و توسعه شرکت دانش آریا» شامل خبرگان و متخصصان حوزه حفاظت

2 □□□□□□□□□□□□□□□□ 8 2

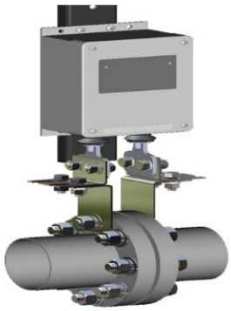
کاتدیک، موفق به تولید و انبوه‌سازی این تجهیز گردیده و تیم اجرایی این شرکت تجهیز مورد نظر را به‌صورت موفقیت‌آمیز در پروژه‌های اجرای سیستم حفاظت کاتدیک، نصب و به مرحله بهره‌برداری رسانده است.

شکل ۷-۱۷

PCR[۲۳]

PCR یا دی‌کوپلر از جمله تجهیزات مورد استفاده در سازه‌های تحت سیستم حفاظت کاتدیک می‌باشد و جایگزین پلاریزیشن سل مایع گردیده است. این تجهیز با ایجاد مقاومت بالا، جریان DC را بلوکه کرده و از طرف دیگر امکان عبور جریان AC را فراهم می‌کند. PCR در مقایسه با پلاریزیشن سل مایع، دارای مزایای بهتری می‌باشد.

ماده خطرناک KOH موجود در پلاریزیشن سل‌های مایع باعث می‌شود که این تجهیز نیاز به ونت خروجی جهت خارج شدن گاز داشته باشد، درحالی‌که PCR دارای تجهیزات الکترونیک می‌باشد. تعمیر و نگهداری دوره‌ای جهت پرکردن مایع KOH و روغن، از اقدامات لازم برای پلاریزیشن سل‌های مایع می‌باشد، درحالی‌که PCR نیاز به چنین اقداماتی ندارد.در پلاریزیشن سل‌های مایع محدوده بلوکه کردن ولتاژ تا ۱/۲ ولت می‌باشد، که پس از آن شکست رخ می‌دهد و در نهایت جریان DC عبور می‌کند، درحالی‌که، این محدوده در PCR تا ۳ ولت امکان بلوکه کردن ولتاژ را دارد.



شکل ۷-۱۸

2 [redacted] 8 3

مفصل‌های رزینی[۲۸۴]

در سیستم‌های حفاظت کاتدی جهت اتصال دو کابل به یکدیگر به منظور ادامه کابل کشی و یا به منظور گرفتن انشعاب یا جهت ترمیم کابل صدمه دیده از انواع مفصل کابل استفاده می‌گردد.

مفصل‌ها بر اساس مواد سازنده، نوع کاربرد و شکل آنها به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌گردند که هرکدام از این دسته‌ها ویژگی، خواص مزایا و معایب منحصربه‌فرد خود را دارند.

مفصل‌های رزینی می‌توانند در فضاهای باز، بسته، زیر زمین، در آب، داخل کانال‌ها و غیره مورد استفاده قرار گرفته و دارای ویژگی‌های زیر هستند:

- عایق الکتریکی بالا
- مقاومت مکانیکی بالا
- ضدآب
- ابعاد کم حجم
- امکان مشاهده داخل مفصل قبل از رزین‌ریزی
- قالب‌های پلاستیکی شفاف ضدضربه و کیفیت بالا
- مناسب برای عملیات فوری
- صرفه‌جویی در زمان و هزینه به‌واسطه مونتاژ سریع و آسان
- دهانه پرکننده بزرگ به منظور تسهیل در رزین‌ریزی
- مقاوم در برابر عوامل شیمیایی
- مقاوم در برابر عناصر قلیایی خاکی
- پایداری در برابر اشعه UV

به طور کلی مفصل‌ها در انواع مفصل حرارتی، مفصل سرد، مفصل رزینی، مفصل‌های نواری، مفصل‌های مخابراتی و مفصل‌های فشاری ولتاژ بالا تولید می‌شوند.

مفصل رزینی سه راهی

یکی از پرمصرف‌ترین انواع مفصل، مفصل رزینی می‌باشد. این مفصل به سه دسته مفصل دوراهی، مفصل سه راهی T شکل و مفصل سه راهی Y شکل که با توجه به نوع کاربرد انتخاب می‌شود. مفصل رزینی دارای دو کفه قاب پلاستیکی و مقداری ماده رزین می‌باشد، که پس از قرار گرفتن کابل‌ها و چفت شدن قاب مفصل، مواد رزینی آماده شده را درون مفصل می‌ریزیم.

2 8 4

شکل ۷-۱۹

کیت عایقی[۲۸۵]

در خطوط لوله شرط لازم برای حفظ یکپارچگی کامل سیستم حفاظت کاتدی، این است که خط لوله از نظر الکتریکی از دیگر سازه‌های مجاور عایق باشد. جلوگیری از تخلیه جریان[۲۸۶] یکی از اصلی‌ترین علل این موضوع است. در مورد خطوط لوله، دیواره چاه‌ها[۲۸۷] و سازه‌های مشابه، عایقکاری می‌تواند از طریق نصب کیت عایقی فلنج یا اتصالات عایقی انجام شود.

در مواردی که از کیت عایقی استفاده می‌شود، ماده مورد استفاده، فنولیک دارای پوششی از نئوپرن به‌صورت یک صفحه یا یک حلقه است که در نقاط تقاطع همراه با پیچ‌های دارای محافظ عایقی Sleeve نصب می‌شوند. معمولاً میان پیچ و سوراخ اطراف آن یک فضای خالی در حدود ۳ میلی‌متر وجود دارد. واشرهایی از جنس Teflon یا موادی مشابه نیز برای عایق نمودن گل پیچ و مهره آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرچند که در عمل فقط نیاز است که یکی از دو انتهای پیچ عایق شوند. در مورد Gasket بسیار مهم است از موادی استفاده شود که علاوه بر مقاومت الکتریکی بالا و استحکام مطلوب، به طور هم‌زمان قابلیت فشرده شدن در اثر محکم کردن پیچ‌ها نیز در آن وجود داشته باشد تا بتواند در برابر بروز نشتی در سیستم مقاومت نماید.

در عمل لازم است که به منظور جلوگیری از ورود آلودگی و یا رطوبت به ناحیه میان فلنج و صفحه‌ها یا زیر گل پیچ و مهره‌ها، بلافاصله پس از اعمال، بر روی سوراخ‌های موجود در محل اتصال پوشش مناسبی ایجاد گردد.

Gasket نوع E :

این نوع از Gasketها تا لبه قطر خارجی فلنج قرار می‌گیرند. دقت سوراخکاری جهت قرار گیری پیچ‌ها در حدی است که پس از نصب، فلنج به‌صورت خودکار در مرکز واقع شده و بیشترین مقاومت را در مقابل مواد خارجی ارائه نماید.

Gasket نوع F :

این نوع عایق بدون سوراخ ساخته می‌شود به‌صورتی که پس از نصب، به‌صورت مماس بر دایره داخلی پیچ‌ها قرار گیرد. قطر خارجی فلنج به‌صورتی انتخاب می‌شود که به‌صورت کاملاً محکم در محل خود قرار گرفته و کاملاً در مرکز واقع شود.

2 8 5
2 8 6
2 8 7

حفاظت بیشتر:

به سبب نفوذ مواد هادی بین صفحات فلنج و به منظور جلوگیری از ایجاد اتصال کوتاه در فلنج‌ها، توصیه می‌شود که سطح خارجی فلنج پس از نصب کیت عایقی، توسط نوار PVC چسبدار کاملاً نوار پیچی گردد. این عمل برای هر دو نوع کیت عایقی مخصوصاً نوع F پیشنهاد می‌شود.

اجزاء استاندارد کیت عایقی فلنج

در حالت عادی کیت عایقی شامل موارد زیر است:

- Gasket
- پوشش‌های عایق‌کننده پیچ‌ها (Sleeve)
- واشرهای عایق‌کننده
- واشرهای آهنی

Gasketهای دارای سطح فنولیک پوشش‌دار

ازآنجاکه، پوشش نرم و لاستیکی نئوپرن سبب ایجاد آب‌بندی مناسب می‌شود، فنولیک‌های پوشش شده با نئوپرن مدت زمان زیادی است که به‌عنوان Gasketهای استاندارد در صنایع نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این محصولات، در کارخانه ورق‌های نئوپرن به دو سطح ورق فنولیک اتصال داده می‌شوند تا سبب بهبود عملکرد عایقی الکتریکی و آب‌بندی آن شوند. دمای ایجاد اتصال (Laminate) میان فنولیک و نئوپرن در حدود ۹۰ درجه سانتیگراد است.

شکل ۷-۲۰

Spark Gap

اسپارک گپ یک قطعه الکتریکی پرکاربرد در سیستم‌های حفاظت کاتدیک می‌باشد که باعث جلوگیری از خطرات احتمالی مانند انفجار و آتش‌سوزی می‌شود و از دو بخش Spark (جرقه) و Gap (فاصله) تشکیل شده است. این تجهیز شامل دو عدد الکترود بوده که بین آنها با یک گاز پر شده و این‌گونه از هم جدا می‌شوند. اسپارک گپ‌ها در حالت عادی قطع و هیچ‌گونه فعالیتی ندارند، اما درصورتی‌که صاعقه‌ای رخ دهد، به‌سرعت فعال شده و دو شبکه را همبند می‌کنند. گاهی به اشتباه اسپارک گپ را با برقگیر یکی می‌دانند، درصورتی‌که ساختار داخلی آنها و وظایفشان باهم متفاوت است.

به طور کلی جرقه‌گیرها دو دسته هستند:

- نوع Gas Tube: در این مدل فاصله بین دو الکترود با گاز پر شده است.
- نوع Diac: فاصله بین الکترودها با یک نیمه‌هادی پر می‌شود.

دیاک یا جریان متناوب یک قطعه الکتریکی پر کاربرد است که معادل ۲ دیود چهار لایه می‌باشد. نحوه کار دیود به این صورت است که پس از رسیدن به ولتاژ شکست به هادی تبدیل شده و باعث عبور جریان می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، هنگامی که ولتاژ از حالت عادی درآمد، دو الکترود اتصال کوتاه می‌شوند. همچنین جرقه‌گیرهای مدل دیود هم نیز به همین صورت رفتار می‌کنند.

معرفی کاربردها اسپارک گپ (فشار قوی)

الکترودها در کاربردهای فشار قوی به‌صورت کروی یا بیضی هستند. این ساختار الکترودها هم عموماً بر اساس موارد زیر است:

- میدان الکتریکی یکنواخت بین دو الکترود.
- جلوگیری از ایجاد جرقه‌های نامطلوب.

یکی از مهم‌ترین موارد مصرف اسپارک گپ‌ها جلوگیری از انفجار در خطوط لوله انتقال مواد آتش‌زا است. به همین دلیل از آنها در محیط‌هایی مانند پمپ بنزین‌ها، جایگاه‌های CNG، پالایشگاه‌ها، شرکت‌های پتروشیمی و خطوط انتقال مایعات و گازهای قابل انفجار که احتمال آتش‌سوزی و انفجار وجود دارد، استفاده می‌کنند. با توجه به نقش مهمی که این قطعات دارند باید همواره آنها را بر اساس مهم‌ترین استانداردهای روز دنیا طراحی و راه‌اندازی کرد.

در این میان معتبرترین آنها، استانداردهای ATEX و BET و IEC می‌باشند.

کاربرد اسپارک گپ ها
در حفاظت کاتدیک
Danesh Aria
شرکت دانش آریا (سهامی خاص)
WWW.DANESHARIA.com
Whats App : 0902 259 59 50
info@danesharia.com
۱-محافظت اتصال عایقی دربرابر آسیب های ناشی از عبور جریان اتصالی و صاعقه
۲-محافظت شخص دربرابر آسیب های ناشی از عبور جریان اتصالی و صاعقه وقتی ناخواسته با دوسر اتصالی عایقی درتماس است
فلنج عایق
اسپارک گپ مدل OBO 480-ex
اسپارک گپ مدل OBO EX_ISG_H 350
OBO
BETTERMANN

شکل ۷-۲۱

فصل هشتم

طراحی حفاظت کاتدی

اصول طراحی حفاظت کاتدی

مقدمه

حفاظت کاتدی برای کنترل خوردگی سازه‌های فلزی مختلف در محیط‌های خورنده گوناگون به کار می‌رود، بنابراین هر سیستم فلز – محیط، نیاز به ملاحظات و بررسی‌های خاص خود را دارد. ازآنجاکه، عملکرد هر سیستم حفاظت کاتدی دقیقاً وابسته به شرایط محیطی و میزان جریان اعمالی به هر نقطه از سطح سازه است، بنابراین انجام بازرسی‌های قبل از طراحی برای تعیین شرایط سازه و محیط اطراف آن بسیار ضروری است. با استفاده از بازرسی‌های میدانی می‌تواند برآورد خوبی از نیازهای سیستم‌های حفاظت کاتدی به دست آورد. در ضمن برآورد تقریبی خوبی از توزیع جریان نیز از طریق اطلاع از تغییرات محیطی و وجود سازه‌های غریبه در اطراف سازه به دست می‌آید. سیستم حفاظت کاتدی نصب شده، در ابتدا نیاز به تنظیم اولیه برای حصول حفاظت کامل و مؤثر دارد و سپس باید این تنظیم به طور ادواری ادامه یابد تا آن حالت حفاظت کامل و مؤثر در تمام مدت حفظ گردد. در بعضی موارد، به‌ویژه در مورد وجود سازه‌های فلزی غریبه در کنار سازه تحت حفاظت، باید تغییراتی در میزان جریان و پتانسیل اولیه ایجاد گردد تا سیستم همچنان تحت حفاظت کامل و مطلوب قرار داشته باشد. باید خاطر نشان شود که طراحی و اجراء سیستم‌های حفاظت کاتدی یک روش عملی است و در خیلی از موارد نیاز است تا مطابق با شرایط خاص موجود در محیط، تنظیم‌های اولیه تغییر و تحول یابد.

روش‌های طراحی عمومی

روش‌های طراحی عمومی برای هر دو سیستم آندهای فداشونده و سیستم اعمال جریان مشابه است. در هر روش ابتدا باید میزان جریان حفاظتی مورد نیاز تعیین شود و سپس بهترین روش برای اعمال جریان به سازه مشخص شود. در اکثر موارد اجرای هر دو سیستم آندهای فداشونده و اعمال جریان امکان‌پذیر است و در نتیجه طراحی تقریبی اولیه برای هر دو نوع سیستم، آماده می‌شود تا بتوان نهایتاً مناسب‌ترین سیستم را برای کاربردهای خاص مشخص نمود.

نقشه‌ها و مشخصات

مروری بر بررسی نقشه‌ها و مشخصات سازه و محیط اطراف آن برای به دست آوردن اطلاعات لازم برای طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی ضروری است. شرایط واقعی سیستم سازه و محیط باید از هر نظر تعیین و مشخص گردد. زیرا عوامل سازه‌ای و اجرایی، برای مثال اتصال فیزیکی سازه‌های مدفون (اتصال کوتاه) می‌توانند اثرات قابل ملاحظه‌ای بر روی عملکرد سیستم حفاظت کاتدی ایجاد نمایند.

نقشه‌ها و مشخصات سازه تحت حفاظت

اندازه، شکل، نوع مواد، شرایط سطحی و نوع پوشش سازه تحت حفاظت باید به طور دقیق مشخص شود تا بتوان یک سیستم حفاظت کاتدی مؤثر و مطلوب را طراحی نمود. اندازه و شکل سازه معمولاً توسط نقشه‌های مربوطه تعیین می‌گردد. نوع مواد و شرایط سطحی سازه به خصوص وضعیت و نوع پوشش موجود بر سطح سازه نیز توسط مشخصات ارسالی از سوی سازندگان تعیین می‌شود. برای سازه‌هایی که از قبل نصب شده‌اند باید وضعیت پوشش‌ها در خلال بازرسی‌های میدانی تعیین گردد.

نقشه‌های مربوط به محل

نقشه‌های محل نصب سیستم حفاظت کاتدی باید به دقت مورد بررسی قرار گیرند تا اگر سازه‌های فلزی دیگری در نزدیکی سازه مورد نظر قرار دارند محل و موقعیت دقیق آنها تعیین گردد. وجود این سازه‌ها بر روی عملکرد سیستم حفاظت کاتدی سازه مورد نظر اثر می‌گذارد. وجود سیستم‌های حفاظت کاتدی دیگر در محل نیز باید دقیقاً شناسایی و بررسی شود زیرا این سیستم‌ها نیز می‌توانند بر روی سیستم حفاظت کاتدی سازه مورد نظر تأثیر ویژه داشته باشد. بررسی‌های نقشه محل نصب همچنین می‌تواند موقعیت قرارگیری منابع جریان متناوب (AC) برای سیستم حفاظت کاتدی اعمال جریان و موقعیت محل‌های مناسب برای بستر آندها را نیز تعیین نماید.

بازرسی‌های میدانی

معمولاً بازرسی‌های میدانی در محل نصب ضروری است تا شرایط محیطی واقعی تعیین شود. برای سازه‌های غوطه‌ور معمولاً آنالیز آب، آزمایشات اندازه‌گیری جریان و مطالعات میدانی برای اطلاع از وجود سازه‌های غریبه یا شرایط خاص دیگر ضروری است. برای سازه‌های مدفون، اطلاعات زیادی مورد نیاز است.

آنالیز شیمیایی از محیط

نمونه‌هایی از آب باید آنالیز شود تا pH، مقدار یون کلر، یون سولفات و همچنین مقاومت مخصوص آن تعیین گردد. عوامل دیگری همچون سختی آب نیز در بعضی از موارد ضروری است.

مشخصات خاک

برای سازه‌های مدفون، بررسی مشخصات خاک برای تعیین نیازهای حفاظتی سازه لازم است. عواملی همچون یون سولفات، یون کلر، یون سولفید، pH و عوامل شیمیایی دیگر بر روی میزان جریان لازم برای حفاظت سازه‌ها و معیارهای حفاظت تأثیر می‌گذارند. میزان دانسیته جریان لازم برای حفاظت سازه‌ها در محیط‌های مختلف در جداول ۱-۸ و ۲-۸ ارائه شده‌اند. معیار حفاظت در فصول قبل ارائه شده است.

۱) مقاومت مخصوص خاک مهم‌ترین عامل برای طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی برای سازه‌های مدفون است. همان‌طور که در بخش‌های بعدی نشان داده خواهد شد، میزان جریان لازم برای حفاظت، میزان خروجی جریان آندهای فداشونده و

مقاومت بستر آند سیستم اعمال جریان همگی وابسته به مقاومت مخصوص خاک می‌باشند. خورندگی خاک و مقاومت خاک با یکدیگر رابطه تنگاتنگ دارند به‌طوری که خاک با مقاومت مخصوص پایین دارای خورندگی بالاست. اگرچه اخیراً مشخص گردیده که مقاومت مخصوص خاک به تنهایی برای نشان دادن خورندگی خاک کافی نیست.

جدول ۸-۱ دانسیته جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی فولاد بدون پوشش

محیط	دانسیته جریان مورد نیاز بر حسب میلی‌آمپر بر مترمربع
خاک با مقاومت کمتر از ۱۰۰۰ اهم – سانتی‌متر	۶/۰ – ۲۵/۰
خاک با مقاومت ۱۰۰۰۰ – ۱۰۰۰ اهم – سانتی‌متر	۳/۰ – ۶/۰
خاک با مقاومت بیشتر از ۳۰۰۰۰ – ۱۰۰۰۰ اهم – سانتی‌متر	۲/۰ – ۳/۰
خاک با مقاومت بیشتر از ۳۰۰۰۰ اهم – سانتی‌متر	۱/۰ – ۲/۰
خاک شدیداً خورنده با باکتری غیر هوازی	۱۵/۰ – ۴۰/۰
آب شیرین ساکن	۲/۰ – ۴/۰
آب شیرین جاری	۴/۰ – ۶/۰
آب شیرین متلاطم	۵/۰ – ۱۵/۰
آب شیرین داغ	۵/۰ – ۱۵/۰
آب دریای ساکن	۱/۰ – ۳/۰
آب دریای مواج	۳۵/۰ – ۲۵/۰
بتن	۰/۵ – ۱/۵

جدول ۸-۲ دانسیته جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی فولاد پوشش‌دار

محیط	دانسیته جریان مورد نیاز بر حسب میلی‌آمپر بر مترمربع
خط لوله با پوشش اپوکسی یا سایر پوشش‌های با کارآیی بالا	۰/۰۰۵ – ۰/۰۰۱
خط لوله با پوشش قیر زغال سنگ مسلح	۰/۰۲۵ – ۰/۰۰۵
خط لوله با پوشش گریس به همراه باند پیچی روی آن	۰/۱۵۰ – ۰/۰۵
خط لوله با پوشش آسفالت قیری با ضخامت ۰/۵ اینچ	۰/۰۰۵ – ۰/۰۰۱
خط لوله با پوشش آسفالت کهنه یا سایر پوشش‌های کهنه	۰/۳۵ – ۰/۰۵
خط لوله با پوشش رنگی کهنه	۰/۳۰ – ۰/۱۰
کف مخزن	۲/۰ – ۰/۰۵
مخازن حاوی آب آشامیدنی سرد	۲/۰ – ۰/۰۵
مخازن حاوی آب دریای سرد	۴/۰ – ۰/۰۵
مخازن حاوی آب آشامیدنی داغ یا آب سرد متلاطم	۳/۰ – ۰/۳۰
ستون‌های فولادی غوطه‌ور در آب شیرین	۲۵/۰ – ۳/۰
ستون‌های فولادی غوطه‌ور در آب دریا	۱/۵ – ۰/۵
ستون‌های فولادی مدفون در خاک	۱/۰ – ۰/۰۵

۲) pH معیاری برای نشان دادن شرایط اسیدی یا قلیائی محلول‌ها است. pH خاک عبارت از pH آب موجود در خاک است. محدوده pH از صفر تا ۱۴ است که در آن محدوده صفر تا ۷ بیانگر محیط اسیدی و محدوده ۷ تا ۱۴ نیز بیانگر محیط قلیایی است.

۳) عوامل شیمیایی موجود در خاک همچون یون سولفید، یون سولفات، یون کلر و غیره در طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی مهم هستند. بنابراین باید نمونه‌ای از خاک محل نصب سیستم حفاظت کاتدی قبل از شرایط طراحی مورد آنالیز شیمیایی قرار گیرد.

اندازه‌گیری جریان لازم برای حفاظت

بهترین روش برای اندازه‌گیری جریان لازم برای حفاظت سازه‌های مدفون، انجام آزمایشات میدانی است. در این آزمایش‌ها ابتدا یک سیستم حفاظت کاتدی موقت نصب می‌شود. سپس جریان اعمالی و پتانسیل سازه به الکترولیت اندازه‌گیری می‌گردد تا در نهایت میزان جریان لازم برای حفاظت سازه تعیین شود.

موقعیت سازه‌های دیگر در محل

ازآنجاکه، اطلاع از وجود سازه‌های غریبه در اطراف سازه تحت حفاظت کاتدی بسیار مهم است. بنابراین انجام بازرسی میدانی برای تعیین موقعیت چندین سازه‌هایی ضروری است. سازه‌های مدفون همچون خطوط لوله دارای تغذیه‌ها و شیرها و دیگر

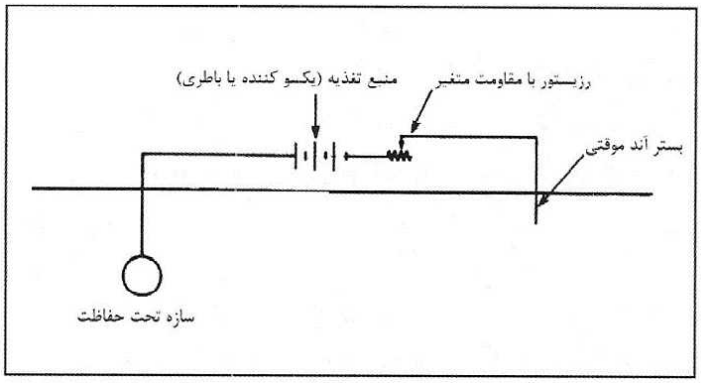
نقاط نشانه‌های سطحی توسط ردیاب‌های الکترونیکی ردیابی می‌شوند. وجود سازه‌های مدفون در محل که دارای هیچ نشانه‌های سطحی و روی زمین نیستند بسیار سخت است. بنابراین تهیه اطلاعات و نقشه‌هایی که نشان‌دهنده موقعیت کلیه سازه‌های مدفون در محل باشد، بسیار مهم است.

در دسترس بودن منابع جریان متناوب (AC)

در دسترس بودن منابع جریان AC در محل، باید بررسی گردد. اگر منابع جریان AC در دسترس نباشد، برآورد هزینه مربوط به فراهم کردن خطوط برق AC عامل تعیین‌کننده در انتخاب سیستم اعمال جریان یا سیستم آندهای فداشونده برای حفاظت کاتدی سازه مورد نظر می‌باشد.

میزان جریان لازم برای حفاظت

بهترین روش برای تعیین میزان جریان لازم برای حفاظت، اندازه‌گیری میزان جریان واقعی برای رسیدن به حفاظت کاتدی و مؤثر در یک سیستم حفاظت کاتدی موقتی است. شکل ۸-۱ یک سیستم حفاظت کاتدی موقتی را نشان می‌دهد. برای طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی سازه‌های نو، میزان دانسیته جریان لازم برای حفاظت از جداول ۸-۱ و ۸-۲ به دست می‌آید. جدول ۸-۱میزان دانسیته جریان لازم برای حفاظت سازه‌های فولادی بدون پوشش و جدول ۸-۲ میزان دانسیته جریان لازم برای حفاظت سازه‌های دارای پوشش را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۱سیستم حفاظت کاتدی موقتی جهت تعیین جریان مورد نیاز

مقدار جریان کل لازم برای حفاظت از ضرب کردن دانسیته جریان لازم برای حفاظت در سطح کل سازه تحت حفاظت به دست می‌آید. همان‌طورکه جداول ۸-۱ و ۸-۲ نشان می‌دهند میزان دانسیته جریان لازم برای حفاظت سازه‌های با پوشش خوب چندین برابر کمتر از میزان دانسیته جریان لازم برای حفاظت سازه‌های بدون پوشش می‌باشد. کاهش مقدار جریان لازم برای حفاظت در سازه‌های با پوشش خوب هزینه‌های مربوطه به مشکلات مربوط به تداخل با سازه‌های دیگر را کاهش می‌دهد.

انتخاب سیستم آندهای فداشونده یا سیستم اعمال جریان

انتخاب بین سیستم آندهای فداشونده و سیستم اعمال جریان به دو عامل مهم یعنی عامل امکان‌پذیر بودن و عامل هزینه بستگی دارد. اغلب برای یک سازه، هر دو سیستم حفاظت کاتدی طراحی می‌شود و سپس این دو سیستم با یکدیگر مقایسه شده تا

آنکه مهم مناسب‌ترین نوع است انتخاب شود. آنالیز اقتصادی برای تعیین سیستم ارزان‌تر، باید شامل ملاحظاتی همچون عمر سیستم، هزینه‌های اجرا، مواد مصرفی، نگهداری، تعویض و تعمیر باشد.

به‌طورکلی، سازه‌های با جریان لازم برای حفاظت کم و بدون تغییر (۰/۵ آمپر یا کمتر برای هر ۱۰۰ فوت طول سازه) بهتر است توسط سیستم آندهای فداشونده تحت حفاظت کاتدی قرار گیرند. سازه‌هایی که به جریان بیشتری برای حفاظت بیشتر نیاز دارند (۱ آمپر یا بیشتر برای هر ۱۰۰ فوت طول سازه) و یا سازه‌هایی که در آنها میزان جریان لازم برای حفاظت برحسب زمان به مقدار قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند، بهتر است توسط سیستم اعمال جریان تحت حفاظت قرار گیرند. از دیگر مزایای سیستم آندهای فداشونده می‌توان به هزینه پایین نگهداری سیستم، عدم ایجاد تداخل با سازه‌های دیگر به دلیل جریان پایین و همچنین وجود فاصله کم بین سازه و آند اشاره نمود. سیستم اعمال جریان معمولاً در مواقعی به کار می‌رود که به مقدار جریان بیشتری نسبت به آنچه که آندهای فداشونده توان ارائه آن را دارند به کار می‌رود. این معمولاً در مواقعی است که به دلیل مقاومت مخصوص بالای محیط، میزان جریان خروجی آندهای فداشونده محدود می‌شود یا آنکه سازه تحت حفاظت دارای سطح بزرگ و یا پوشش ضعیف است.

اصول روش طراحی برای سیستم آندهای فداشونده

برای سیستم‌های آندهای فداشونده، اولین مرحله طراحی عبارت از تعیین میزان کل جریان لازم برای حفاظت است. برای تأمین این خواسته یا باید مقدار کل جریان را توسط اندازه‌گیری جریان در محل انجام داد یا با ضرب دانسیته جریان لازم برای حفاظت در کل سطح سازه آن را محاسبه نمود. پس از آن می‌توان میزان جریان خروجی آندهای فداشونده مورد استفاده را تعیین نمود. برای انجام این محاسبات داشتن مقاومت مخصوص خاک ضروری است. بنابراین، مقاومت مخصوص خاک نقش عمده‌ای در طراحی سیستم آندهای فداشونده دارد. برای محاسبه جریان خروج آندهای فداشونده می‌توان از فرمول ارائه شده زیر استفاده کرد. در محاسبات زیر فرض می‌شود که سازه تحت حفاظت در محیطی با مقاومت مخصوص بالای ۵۰۰ اهم – سانتی‌متر قرار داشته و همچنین فاصله بین آند یا سازه نیز ۱۰ فوت باشد. در ضمن برای تعیین دقیق جریان خروجی آند فداشونده یا مجموعه‌ای از آندهای فداشونده می‌توان روش ارائه شده در بخش مربوطه استفاده نمود.

$$i=\frac{cfy}{\rho}$$

که در آن:

i: جریان خروجی یک آند تک (میلی آمپر)

c: مقدار ثابت بر اساس جدول ذیل

f: عامل اندازه آند، بر اساس جدول ۸-۳

y: عامل پتانسیل سازه، بر اساس جدول ۸-۴

ρ: مقاومت مخصوص الکترولیت برحسب اهم – سانتی‌متر

	روی	آلیاژ منیزیم استاندارد	آلیاژ منیزیم با پتانسیل بالا
□: مقدار ثابت برای حفاظت سازه با پوشش خوب	۴۰/۰۰۰	۹۶/۰۰۰	۱۲۰/۰۰۰
□: مقدار ثابت برای حفاظت سازه لخت یا با پوشش ضعیف	۵۰/۰۰۰	۱۲۰/۰۰۰	۱۹۰/۰۰۰

جدول ۸-۳ عامل‌های اندازه آند فداشونده

عامل اندازه (□)	آندها	وزن آندها برحسب پوند
آندهای استاندارد		
۰/۵۳	با پشت‌بند	۳
۰/۶۰	با پشت‌بند	۵
۰/۷۱	با پشت‌بند	۹
۱/۰۰	با پشت‌بند	۱۷
۰/۰۶	با پشت‌بند	۳۲
	با پشت‌بند - بدون پشت‌بند	
۱/۰۹	(طول) اینچ ۱۶ × (قطر) اینچ ۸	۵۰
	با پشت‌بند - بدون پشت‌بند	
۱/۲۹	(طول) اینچ ۳۱ × اینچ ۵ × اینچ ۵	۵۰
آندهای بلند		
۱/۰۱	با پشت‌بند - بدون پشت‌بند	
	اینچ ۲۶ × اینچ ۲/۷۵ × اینچ ۲/۷۵	۹
۱/۷۱	با پشت‌بند - بدون پشت‌بند	
	اینچ ۷۲ × اینچ ۱/۵ × اینچ ۱/۵	۱۰
۱/۸۱	با پشت‌بند - بدون پشت‌بند	
	اینچ ۷۲ × اینچ ۲ × اینچ ۲	۱۸
۱/۶۰	با پشت‌بند - بدون پشت‌بند	
	اینچ ۶۰ × اینچ ۲/۵ × اینچ ۲/۵	۲۰
۱/۷۲	با پشت‌بند - بدون پشت‌بند	
	اینچ ۶۰ × اینچ ۳/۷۵ × اینچ ۳/۷۵	۴۰
۱/۹۰	با پشت‌بند - بدون پشت‌بند	
	اینچ ۷۸ × اینچ ۳ × اینچ ۳	۴۲
آندهای خیلی بلند		
۲/۶۱	با پشت‌بند - بدون پشت‌بند	
	اینچ ۱۲۰ × (قطر) اینچ ۱/۶	۱۵
۴/۲۸	با پشت‌بند - بدون پشت‌بند	
	اینچ ۲۴۰ × (قطر) اینچ ۱/۳	۲۰

۲/۸۱	با پشت‌بند - بدون پشت‌بند اینچ ۱۲۰ × (قطر) اینچ ۲	۲۵

جدول ۸-۴ عامل پتانسیل سازه

پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت برحسب الکترود مرجع مس/سولفات مس	عامل پتانسیل سازه (□) برای منیزیم	عامل پتانسیل سازه (□) برای روی
-۰/۷۰	۱/۱۴	۱/۶۰
-۰/۸۰	۱/۰۷	۱/۲۰
-۰/۸۵	۱/۰۰	۱/۰۰
-۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۸۰
-۱/۰۰	۰/۷۹	۰/۴۰
-۱/۱۰	۰/۶۴	۰/۰۰
-۱/۲۰	۰/۵۰	۰/۰۰

سپس تعداد آندهای فداشونده مورد نیاز از طریق تقسیم جریان کل به مقدار جریان خروجی یک آند به دست می‌آید. عمر مورد انتظار از آند بر اساس سرعت زوال فیزیکی و مصرف نرخ ماده آند تخمین زده می‌شود. آند منیزیم با نرخ ۱۷ پوند بر آمپر در سال، آند روی با نرخ ۲۶ پوند بر آمپر در سال و آند در آلیاژ آلومینیم با نرخ ۱۱ پوند بر آمپر در سال مصرف می‌شود. ازآنجاکه، مراحل طراحی بر اساس کنترل و تنظیم سیستم استوار است. بنابراین اندازه آند و وزن آند باید طوری تنظیم شود تا بتوان سیستم را به طور بهینه طراحی نمود.

اصول طراحی سیستم حفاظت کاتدی اعمال جریان

طراحی یک سیستم براساس مراحل زیر انجام می‌گیرد.

تعیین جریان کل

اولین مرحله طراحی، یعنی تعیین جریان کل لازم برای حفاظت عیناً مانند اولین مرحله طراحی سیستم آندهای فداشونده است. در اینجا نیز جریان کل توسط اندازه‌گیری جریان در محل از طریق ضرب دانسیته جریان حاصل از جداول ۸-۱ و ۸-۲ در سطح کل سازه تحت حفاظت به دست می‌آید.

تعیین مقدار مقاومت کل

مرحله بعد در طراحی سیستم‌های اعمال جریان عبارت از تعیین مقاومت کل مدار است. این مقدار بستگی به عوامل زیادی دارد. در اکثر سیستم‌ها، مقاومت آند یا مجموعه‌ای از آندها (بستر آند) عامل کنترل‌کننده در مقاومت کل مدار است. مقاومت آندها به‌راحتی توسط افزایش تعداد آندها قابل کنترل بوده و تابعی از مقاومت مخصوص خاک است. هزینه تعداد آندهای مورد استفاده معادل با هزینه انرژی برق مورد نیاز و هزینه یک‌سوکننده است. قیمت یک‌سوکننده نیز خود به جریان و ولتاژ

مورد نیاز بستگی دارد. اگر مقاومت بستر آند کمتر از ۲ باشد آن سیستم ایدئال است. همچنین ولتاژهای بالا منجر به ورود آمدن صدمات ناگهانی به اجزای سیستم، مانند سیم‌های رابط آندها می‌شود که باید از آن تا حد امکان جلوگیری نمود.

فرمول‌های ساده شده‌ای برای محاسبه مقاومت آندهای گرافیتی با طول ۶۰ اینچ که به طور عمودی در داخل پشت‌بندی با قطر ۸ تا ۱۰ اینچ و طول ۱۰ فوت یا به طور افقی در داخل گودالی با پشت‌بندی از ذرات کک با مقطع ۱ فوت مربع و طول ۱۰ فوت و عمق ۶ فوت قرار گرفته‌اند به شرح ذیل ارائه شده‌اند. درصورتی‌که برای کاهش مقاومت مدار از تعدادی آندهای موازی استفاده شده باشد باید از فاکتور تنظیم استفاده شود تا مقاومت کل بستر آند قابل محاسبه باشد.

$$R_v = \frac{\rho F}{537} \qquad R_h = \frac{\rho F}{483}$$

که در آن:

R_v: مقاومت بستر آند عمودی

R_h: مقاومت بستر آند افقی

ρ: مقاومت مخصوص الکترولیت برحسب اهم – سانتیمتر

F: عامل تنظیم برای محاسبه آندها $(F = 1)$ برای یک آند تک و برای مجموعه آندها از جدول ۸–۵ قابل استخراج است)

جدول ۸–۵ عامل تنظیم برای مجموعه آندها

فاصله آند					
تعداد آندهای موازی	۵ فوت	۱۰ فوت	۱۵ فوت	۲۰ فوت	۲۵ فوت
۲	۰/۶۵۲	۰/۵۷۶	۰/۵۵۱	۰/۵۳۸	۰/۵۳۰
۳	۰/۵۸۶	۰/۴۶۰	۰/۴۱۸	۰/۳۹۷	۰/۳۸۴
۴	۰/۵۲۰	۰/۳۸۵	۰/۳۴۰	۰/۳۱۸	۰/۳۰۴
۵	۰/۴۶۶	۰/۳۳۳	۰/۲۸۹	۰/۲۶۷	۰/۲۵۳
۶	۰/۴۲۳	۰/۲۹۵	۰/۲۵۲	۰/۲۳۱	۰/۲۱۸
۷	۰/۳۸۷	۰/۲۶۵	۰/۲۲۴	۰/۲۰۴	۰/۱۹۲
۸	۰/۳۶۱	۰/۲۴۳	۰/۲۰۴	۰/۱۸۴	۰/۱۷۲
۹	۰/۳۳۲	۰/۲۲۲	۰/۱۸۵	۰/۱۶۶	۰/۱۵۵
۱۰	۰/۳۱۱	۰/۲۰۵	۰/۱۷۰	۰/۱۵۳	۰/۱۴۲
۱۱	۰/۲۹۲	۰/۱۹۲	۰/۱۵۸	۰/۱۴۱	۰/۱۳۱
۱۲	۰/۲۷۶	۰/۱۸۰	۰/۱۴۳	۰/۱۳۲	۰/۱۲۲
۱۳	۰/۲۶۲	۰/۱۶۹	۰/۱۳۹	۰/۱۲۳	۰/۱۱۴
۱۴	۰/۲۴۹	۰/۱۶۰	۰/۱۳۱	۰/۱۱۶	۰/۱۰۷
۱۵	۰/۲۳۸	۰/۱۵۲	۰/۱۲۴	۰/۱۰۹	۰/۱۰۱

۱۶	۰/۲۲۶	۰/۱۴۴	۰/۱۱۷	۰/۱۰۳	۰/۰۹۵
۱۷	۰/۲۱۸	۰/۱۳۸	۰/۱۱۲	۰/۰۹۹	۰/۰۹۱
۱۸	۰/۲۰۹	۰/۱۳۲	۰/۱۰۷	۰/۰۹۴	۰/۰۸۶
۱۹	۰/۲۰۲	۰/۱۲۷	۰/۱۰۲	۰/۰۹۰	۰/۰۸۲
۲۰	۰/۱۹۴	۰/۱۲۲	۰/۰۹۸	۰/۰۸۶	۰/۰۷۹
۲۲	۰/۱۸۲	۰/۱۱۴	۰/۰۹۱	۰/۰۷۹	۰/۰۷۳
۲۴	۰/۱۷۱	۰/۱۰۶	۰/۰۸۵	۰/۰۷۴	۰/۰۶۷
۲۶	۰/۱۶۱	۰/۱۰۰	۰/۰۷۹	۰/۰۶۹	۰/۰۶۳
۲۸	۰/۱۵۲	۰/۰۹۴	۰/۰۷۵	۰/۰۶۵	۰/۰۵۹
۳۰	۰/۱۴۵	۰/۰۸۹	۰/۰۷۰	۰/۰۶۱	۰/۰۵۶

روش‌های دقیق‌تری برای محاسبه مقاومت آند و دیگر اجزای مدار در بخش مربوطه آورده شده است.

تعیین ولتاژ یک‌سوکننده

با استفاده از مقاومت کل مدار و مقدار جریان لازم برای حفاظت، ولتاژ مناسب برای یک‌سوکننده از قانون اهم محاسبه می‌شود.

$$V=IR$$

که در آن:

V: ولتاژ لازم

I: جریان لازم

R: مقاومت کل مدار

در عمل از یک‌سوکننده که دارای ظرفیتی بیشتر از ولتاژ و جریان لازم برای حفاظت است استفاده می‌شود تا در صورت بالا رفتن نیاز سیستم به جریان که معمولاً در اثر زوال پوشش، افزوده شدن سطح سازه، فرسوده شدن یک‌سوکننده و دقیق نبودن محاسبات طراحی حاصل می‌شود، یک‌سوکننده قادر به تأمین جریان مورد نیاز باشد.

آنالیز عوامل طراحی

برای طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی، عوامل زیر همواره باید آنالیز شوند:

۱) مقاومت آند به الکترولیت (خروجی جریان آندهای فداشونده) : این شامل تعیین مقاومت مخصوص الکترولیت، مقاومت (خروجی جریان) یک آند تک، اثرات شکل آند، فاصله بین آندها، اثرات ترتیب قرارگیری آندها و موقعیت آندها نسبت به سازه تحت حفاظت و دیگر سازه‌های فلزی غریبه موجود در محل می‌شود.

۲) وزن آند برای داشتن عمر مورد نیاز : این برای هر سیستم حفاظت کاتدی مهم است. سرعت مصرف آندهای چدنی پر سیلیسیم معادل ۱ پوند بر آمپر در سال و سرعت مصرف آندهای گرافیتی ۲/۵ پوند بر آمپر در سال است. این دو آند از آندهای مورد استفاده در سیستم اعمال جریان هستند.

۳) استفاده از مواد پشت‌بند مخصوص در اطراف آندها : استفاده از این مواد باعث افزایش راندمان آندها شده و باید از آن استفاده شود مگر آنکه از لحاظ اقتصادی استفاده از آنها به دلیل هزینه بسیار بالا قابل توجیه نباشد. برای حفاظت کاتدی سازه‌هایی که در داخل آب غوطه‌ور هستند نیاز به استفاده از پشت‌بند در اطراف آند نمی‌باشد.

۴) اثر تغییرات فصلی بر روی مقاومت مخصوص الکترولیت : این اثر در خاک از طریق تغییرات هدایت مخصوص خاک به‌واسطه مرطوب شدن یا خشک شدن حاصل می‌شود و در آب دریا نیز به دلیل تبخیر به وقوع می‌پیوندد.
۵) مقاومت کابل : برای سیستم‌های اعمال جریان، اندازه و نوع کابل مصرفی بر اساس آنالیز اقتصادی تعیین می‌شود.
۶) تحت تأثیر بودن به آسیب‌های فیزیکی
۷) موقعیت قرار گرفتن اتصالات سازه‌ها و اتصالات عایق سازه‌ها
۸) تعداد، نوع و موقعیت ایستگاه‌های آزمایش برای تنظیم‌های اولیه و بازرسی‌های ادواری جهت نگهداری سیستم
۹) در دسترس بودن
۱۰) هزینه‌های نگهداری

تعیین اطلاعات میدانی

اطلاعات لازم برای طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی معمولاً از طریق بازرسی‌های میدانی فراهم می‌شود. علاوه بر اندازه‌گیری‌های میدانی، همچون اندازه‌گیری مقاومت مخصوص خاک، نقشه‌ها و موقعیت قرار گرفتن سازه‌های غریبه در اطراف سازه نیز باید مورد بررسی قرار گیرند. در بررسی‌های میدانی باید تعدادی از عوامل، اندازه‌گیری شوند تا بتوان سیستم حفاظت کاتدی مؤثر و مطلوب را طراحی و اجرا نمود.

روش‌های اندازه‌گیری مقاومت مخصوص الکترولیت

در خاک‌ها

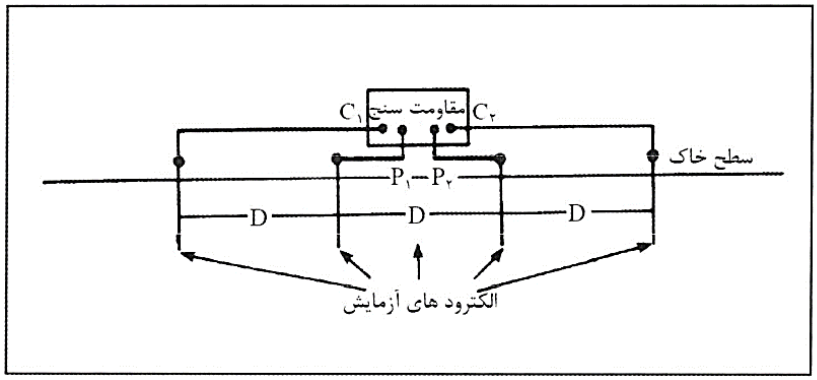
بهترین روش برای اندازه‌گیری مقاومت خاک، روش ونر، معروف به روش چهار الکترودی (مطابق شکل ۲-۸) است. در این روش، جریان مشخص بین دو الکترود اعمال می‌شود. سپس افت پتانسیل حاصله در خاک در اثر عبور جریان توسط دو الکترود دیگر اندازه‌گیری می‌شود. الکترودها باید در یک خط مستقیم در داخل خاک قرار گرفته باشند. برای اعمال جریان و اندازه‌گیری پتانسیل از وسایل ویژه استفاده می‌شود. به منظور کاهش اثرات جریان‌های سرگردان در محیط و اثرات پلاریزاسیون بر روی الکترودها در این روش از جریان متناوب استفاده می‌شود. سپس مقاومت مخصوص خاک توسط فرمول زیر محاسبه می‌شود:

۱) مقاومت مخصوص (اهم - سانتی‌متر) = ۵/۱۹۱ × فاصله بین الکترودها (فوت) × عدد اندازه‌گیری شده

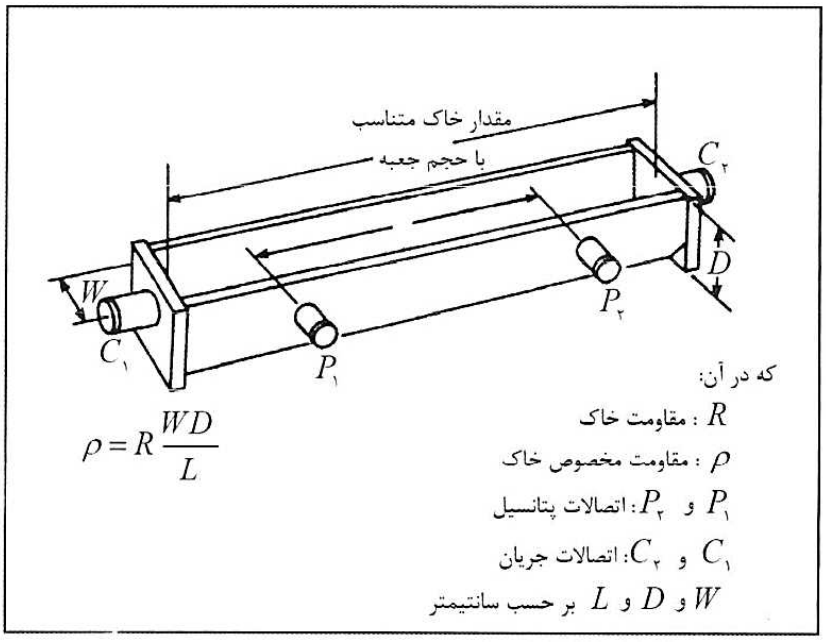
مقاومت مخصوص برحسب اهم – سانتی‌متر یا اهم بر سانتی‌مترمکعب به دست می‌آید که هر دو باهم برابرند.

۲) در روش ۴ الکترودی ونر میانگین مقاومت مخصوص خاک بین دو الکترود مرکزی و تا عمقی از زمین معادل فاصله بین الکترودها اندازه‌گیری می‌شود. اگر فاصله بین الکترودها افزایش یابد سپس میانگین مقاومت مخصوص خاک در عمق بیشتری از خاک اندازه‌گیری می‌شود. اگر با افزایش فاصله بین الکترودها، میانگین مقاومت مخصوص خاک نیز افزایش یابد سپس یک ناحیه با مقاومت مخصوص بالاتری در عمق وجود دارد. برعکس اگر با افزایش فاصله بین الکترود، میانگین مقاومت مخصوص خاک کاهش یابد، سپس یک ناحیه با مقاومت مخصوص پایین‌تر در عمق وجود دارد.

۳) در مواقعی که اندازه‌گیری مقاومت مخصوص خاک در محل امکان‌پذیر نباشد، نمونه‌هایی از خاک از عمق مناسب زمین تهیه می‌شوند و توسط وسیله‌ای موسوم به جعبه خاک، مقاومت مخصوص خاک تعیین می‌شود. این روش در شکل ۸-۳ نشان داده شده است. در این روش، جریان بین دو الکترود فلزی که در دو انتهای محفظه تعبیه شده است، اعمال می‌شود. سپس افت پتانسیل بین الکترودهای میانی اندازه‌گیری می‌شود که در خاک قرار داده شده‌اند. در این روش مقاومت مخصوص خاک بر اساس ابعاد جعبه خاک تعیین می‌گردد. به خاطر تغییراتی که در شرایط خاک در خلال نمونه‌گیری و حمل و نقل و غیره ایجاد می‌شود، نتایج حاصل از این روش نسبت به روش ۴ الکترودی ونر از دقت کمتری برخوردار است. برای حداقل کردن میزان خشک شدن نمونه‌های خاک در خلال حمل و نقل باید نمونه‌ها در داخل کیسه‌های پلاستیکی کاملاً ایزوله شده قرار داده شوند. قابل ذکر است که اندازه‌گیری‌های مقاومت مخصوص خاک که در اثر بازرسی‌های عادی زمین‌شناسی از خاک‌های کم عمق تعیین می‌شود، قابل استفاده برای محاسبات و طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی نیست.



شکل ۸-۲ اندازه‌گیری مقاومت خاک به روش ۴ الکترودی ونر



شکل ۸-۳ جعبه خاک برای تعیین مقاومت خاک

مایعات

مقاومت مخصوص مایعات نیز توسط روش چهار الکترودی قابل اندازه‌گیری است. برای مایعات همچون می‌توان هدایت مخصوص را توسط دستگاه اندازه‌گیری کرد و با توجه به آنکه هدایت مخصوص، عکس مقاومت مخصوص است، به‌راحتی می‌توان مقاومت مخصوص را تعیین نمود.

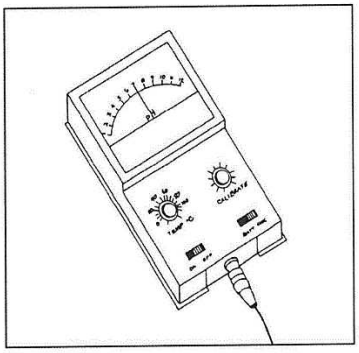
آنالیز شیمیایی محیط

pH

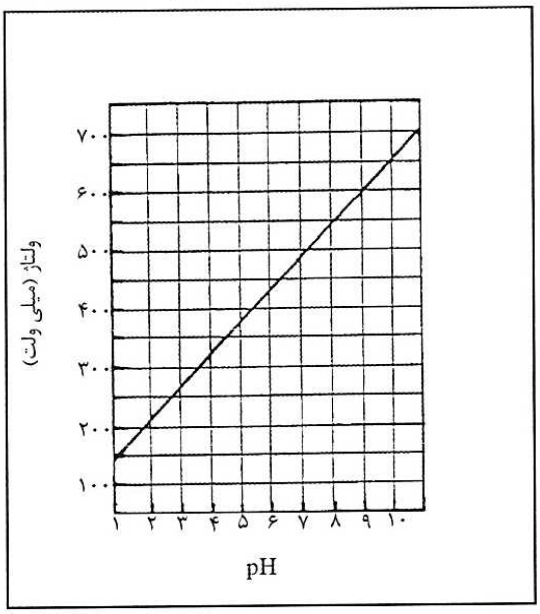
pH محیط بر روی خورندگی محیط و در نتیجه بر روی میزان جریان لازم برای حفاظت تأثیر دارد. pH را از چند روش می‌توان اندازه‌گیری نمود. روش‌های شیمیایی اندازه‌گیری pH شامل استفاده از الکترودهای اندازه‌گیری pH یا کاغذهای نمایانگر که بر اساس pH محیط تغییر رنگ می‌دهند، هستند. دستگاه اندازه‌گیری pH در واقع اختلاف پتانسیل بین یک الکترود مرجع غیرحساس به pH و یک الکترود که پتانسیل آن حساس به pH است را اندازه‌گیری می‌کند. شکل ۸-۴ یک دستگاه pH متر مناسب برای اندازه‌گیری‌های میدانی را نشان می‌دهد. از کاغذهای نمایانگر که به‌عنوان کاغذهای pH معروف هستند نیز می‌توان استفاده کرد. در این روش کاغذ توسط محلول مورد آزمایش تر می‌شود و سپس رنگ حاصله با رنگ‌های استاندارد مشخص کننده pH مقایسه و در نتیجه pH تعیین می‌شود.

pH خاک با استفاده از الکترود آنتیموان نیز قابل اندازه‌گیری است. پتانسیل فلز آنتیموان نسبت به pH حساس است. اختلاف پتانسیلی بین الکترود مرجع غیرحساس به pH و الکترود آنتیموان حساس به pH برای اندازه‌گیری pH مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری pH خاک با استفاده از این روش، الکترود آنتیموان و الکترود مس - سولفات مس را بر سطح خاک قرار می‌دهند و اختلاف پتانسیل بین دو الکترود را با استفاده از ولت‌متر الکترونیکی قرائت می‌کنند. برای حذف اثرات جریان‌های سرگردان در خاک، موقعیت الکترودها را معکوس و مجدداً پتانسیل را قرائت می‌کنند. اگر در محل، جریان سرگردان وجود نداشته باشد، باید تفاوتی بین دو عدد خوانده شده وجود نداشته باشد. اگر بین دو عدد قرائت شده بیش از ۱۰ میلی‌ولت اختلاف وجود داشته باشد باید میانگین دو عدد مورد استفاده قرار گیرد تا اثر جریان‌های سرگردان حذف شود. پتانسیل‌های قرائت شده با استفاده از نمودار ۸-۵ به pH تبدیل می‌شود.

معمولاً، pH سطح زمین از pH موجود در عمق زمین به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت است. بنابراین اندازه‌گیری pH خاک در سطح نمی‌تواند بیانگر pH خاک در عمق دفن خط لوله باشد. تمام pHها باید در عمق دفن خط لوله اندازه‌گیری شوند.



شکل ۸-۴ دستگاه pH متر



شکل ۸-۵ نمودار پتانسیل الکترود آنتیموان برحسب pH

هدایت پوشش خط لوله

استفاده از پوشش باعث کاهش خوردگی خط لوله و کاهش میزان جریان لازم برای حفاظت آن می‌شود. در طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی، شرایط پوشش‌های محافظ عاملی مهم است. برای سازه‌های مدفون، شرایط پوشش توسط آزمایش‌های الکتریکی قابل تعیین است. مقاومت الکتریکی مؤثر پوشش توسط این آزمایش‌ها به دست می‌آید. به جای آنکه اعداد این آزمایش‌ها به‌عنوان مقاومت اعلام شود می‌توان آن نتایج را معکوس کرد و پس از تبدیل به هدایت، آن را گزارش نمود. هدایت پوشش توسط دو روش خط کوتاه و خط بلند قابل اندازه‌گیری است.

روش خط کوتاه

روش خط کوتاه موقعی استفاده می‌شود که یک قسمت ایزوله شده از خط لوله برای انجام آزمایش‌ها در دسترس باشد (شکل ۸-۶). در این روش، ابتدا جریان اعمال می‌شود و سپس قطع می‌شود. تفاوت بین جریان در حالت اعمال و در حالت قطعه برابر با ΔI است. سپس تغییرات پتانسیل سازه به الکترولیت در دو حالت اعمال جریان و قطع جریان در دو ایستگاه آزمایش، قرائت می‌شود $\left(\Delta E_1 \text{ و } \Delta E_2\right)$. اگر نسبت $\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2}$ از عدد ۱/۶ بزرگ‌تر باشد از یک ضریب، موسوم به ضریب تصحیحی از جدول ۸-۶ استفاده می‌شود. در این حالت باید ضریب تصحیح در ΔE_2 ضرب شود. هدایت پوشش برحسب میکروموس بر فوت برابر خواهد بود با:

$$\frac{\Delta I \times 10^6}{\left[\left(\frac{\Delta E_1 + \frac{\Delta E_2}{2}}{2}\right)\right] \times L}$$

که در آن:

L: طول برحسب فوت

ΔE_1: تغییرات پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت در حالت قطع جریان

ΔE_2: تغییرات پتانسیل سازه نسبت به الکترولیز در حالت اعمال جریان

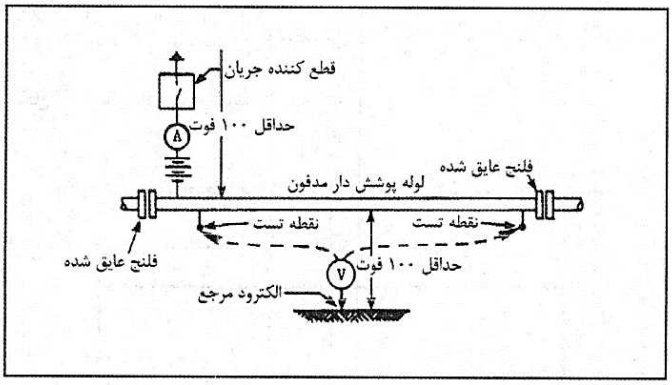
روش خط بلند

روش خط بلند زمانی استفاده می‌شود که عمل ایزوله کردن یک قسمت از سازه امکان‌پذیر نباشد یا آنکه نسبت $\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2}$ که در روش خط کوتاه عنوان شد از عدد ۳ بیشتر شود. روش استفاده از خط بلند در شکل ۸-۷ نشان داده شده است.

جدول ۸-۶ ضرایب تصحیح برای اندازه‌گیری هدایت پوشش به روش خط کوتاه

ضریب	نسبت $\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2}$
۰/۹۱۹	۱/۶
۰/۹۰۸	۱/۷
۰/۸۹۶	۱/۸
۰/۸۸۶	۱/۹
۰/۸۷۶	۲/۰
۰/۸۶۸	۲/۱
۰/۸۶۰	۲/۲
۰/۸۵۱	۲/۳
۰/۸۴۳	۲/۴

۰/۸۳۵	۲/۵
۰/۸۲۹	۲/۶
۰/۸۲۱	۲/۷
۰/۸۴۱	۲/۸
۰/۸۰۹	۲/۹
۰/۸۰۲	۳/۰



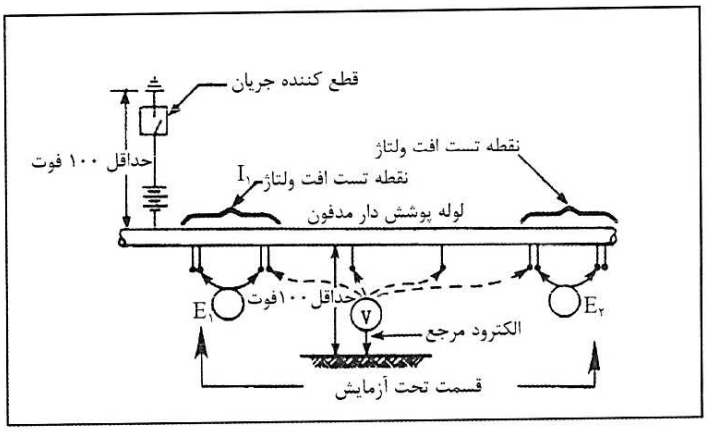
شکل ۸-۶ اندازه‌های هدایت پوشش به روش خط کوتاه

در روش خط بلند، پس از اعمال جریان آزمایش، مقدار جریان عبوری از خط لوله در دو ایستگاه آزمایش افت ولتاژ تعیین می‌شود. پتانسیل سازه به الکترولیت در دو ایستگاه آزمایش درحالی‌که، جریان اعمالی همچنان برقرار است، اندازه‌گیری می‌شود. سپس جریان آزمایش قطع می‌شود و تغییرات جریان در دو ایستگاه آزمایش افت ولتاژ $\left(\Delta \mathrm{I}_1 \text{ و } \Delta I_2\right)$ و تغییرات پتانسیل در دو ایستگاه آزمایش پتانسیل $\left(\Delta E_1 \text{ و } \Delta E_2\right)$ اندازه‌گیری می‌شود. همانند حالت روش خط کوتاه اگر $\frac{\Delta \mathrm{E}_1}{\Delta \mathrm{E}_2}$ از عدد ۱/۶ بزرگ‌تر باشد در این صورت $\Delta \mathrm{E}_2$ باید در ضریب تصحیح استخراج شده از جدول ۶ ضرب شود. اما اگر نسبت $\frac{\Delta \mathrm{E}_1}{\Delta \mathrm{E}_2}$ از عدد ۳ بزرگ‌تر باشد، بخش آزمایشی سازه باید اندازه کوتاه شود. سپس هدایت پوشش برحسب میکروموس بر فوت برابر خواهد بود با:

$$\frac{[(\Delta I_2 - \Delta I_1) \times 10^6]}{\Delta \mathrm{E}_{\mathrm{org}} \times \mathrm{L}}$$

که در آن:

L: طول برحسب فوت



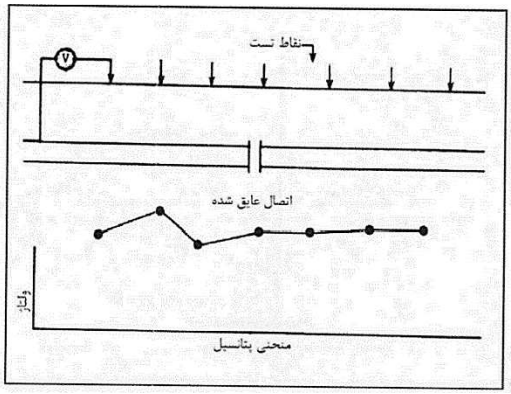
شکل ۸-۷ اندازه‌گیری هدایت پوشش به خط بلند

آزمایش پیوستگی الکتریکی سازه

برای سازه‌هایی که تابه‌حال نصب شده‌اند، برای آنکه بتوان یک سیستم حفاظت کاتدی مؤثر و دقیق را طراحی نمود، باید پیوستگی الکتریکی سازه دقیقاً بازرسی و ارزیابی شده باشد. اگر سازه پوش پیوسته نباشد یا باید با استفاده از یک رابطه موسوم به باند، پیوستگی سازه را تأمین نموده یا باید برای هریک از قسمت‌هایی که از لحاظ الکتریکی ایزوله هستند، یک سیستم حفاظت کاتدی مجزا طراحی نمود. پیوستگی سازه را می‌توان با استفاده از روش‌های زیر ارزیابی نمود.

روش اول

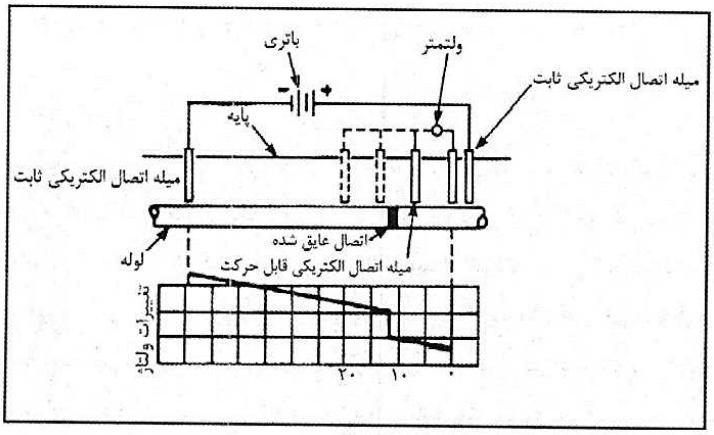
ساده‌ترین روش برای پیدا کردن محل اتصالات عایق یا محل اتصالات با مقاومت الکتریکی بالا در سازه تحت حفاظت، اندازه‌گیری پتانسیل بر روی آن است. همان‌طورکه در شکل ۸-۸ نشان داده شده است، تمام پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده که در نواحی بعد از اتصالات عایق قرار دارند، در اصل پتانسیل‌های میانگین بخش‌های بزرگ‌تری از خط لوله می‌باشند که دستگاه اندازه‌گیری به آن بخش‌ها وصل شده است. این روش تحت تأثیر وجود سازه‌های دیگر در محل و همچنین تحت تأثیر تغییرات شرایط محیط در اطراف سازه است. این روش غالباً روش مؤثری برای ارزیابی پیوستگی سازه نیست.



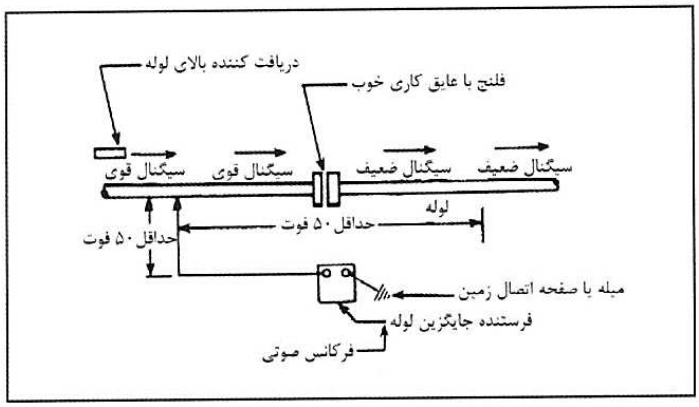
شکل ۸-۸ تست پیوستگی الکتریکی به روش پتانسیل

روش دوم

دیگر روشی قابل اعتمادتر برای آزمایش پیوستگی سازه در شکل ۸-۹ نشان داده شده است. در این روش یک جریان به سازه اعمال می‌شود و افت پتانسیل مربوطه در سازه اندازه‌گیری می‌شود. همان طور که در شکل ۸-۱۰ نشان داده شده است، محل اتصالات با مقاومت الکتریکی بالا به‌راحتی توسط این روش قابل تعیین است.



شکل ۸-۹ تست پیوستگی الکتریکی به روش افت پتانسیل



شکل ۸-۱۰ تست پیوستگی به روش جایگزین لوله

روش سوم

در این روش از دستگاه موقعیت‌یاب فرکانس صوتی استفاده می‌شود. در محل اتصالات با مقاومت الکتریکی بالا و یا در اتصالات مدار باز، اگر از یک دستگاه موقعیت‌یاب فرکانس صوتی استفاده شود سیگنال‌های آن طبق شکل ۸-۱۰ تغییر می‌کند.

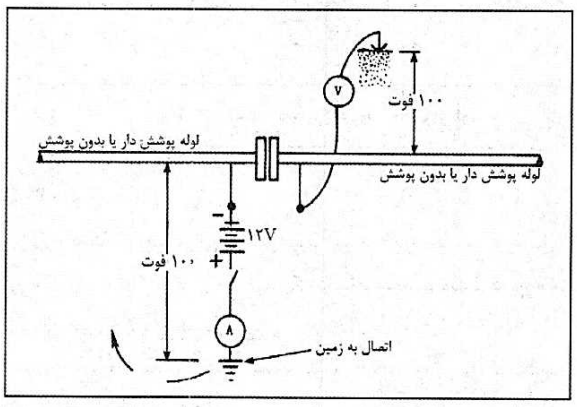
آزمایش اتصالات عایق

در بعضی مواقع برای جداسازی قسمت‌های یک سازه از اتصالات عایق استفاده می‌شود به‌طوری‌که حفاظت هر قسمت باید به طور جداگانه انجام پذیرد.

سازه‌های مدفون

برای سازه‌های مدفون تعیین مقاومت عایق اتصالات از طریق اندازه‌گیری‌های مستقیم مشکل است، زیرا هدایت مخصوص خاک به طور مؤثر اتصال را بای‌پس می‌کند. فلنج‌های عایق مدفون باید همواره به ایستگاه‌های آزمایش جداگانه برای آزمایش اتصالات مجهز باشند. چگونگی آزمایش بر روی اتصالات عایق در شکل ۸-۱۱ نشان داده شده است.

در ایستگاه آزمایش با دو سیم، جریان چندین آمپری اعمال می‌شود. اگر پتانسیل اندازه‌گیری شده بر روی قسمتی که باید ایزوله شده باشد، تغییر نکرد یا اگر با اعمال جریان، پتانسیل اندازه‌گیری شده با مقادیر منفی‌تر تغییر کرد، می‌توان نتیجه گرفت که عایق کاری مؤثر بوده است. برای آزمایش اتصالات عایق در ایستگاه آزمایش با دو سیم، از وسایل ویژه استفاده می‌شود که به‌صورت اختصاصی طراحی شده‌اند. همان‌طورکه قبلاً نشان داده شد برای بازرسی اتصالات عایق مدفون نیز از دستگاه موقعیت‌یاب فرکانس صوتی می‌توان استفاده کرد. این دستگاه‌های ویژه آزمایش، به طور تجاری نیز برای انجام آزمایشات اتصالی عایق مدفوع ساخته شده و در دسترس هستند.



شکل ۸-۱۱ آزمایش اتصالات عایق به روش ایستگاه آزمایش با دو سیم

سازه‌های روی زمین

برای اتصالات عایق سازه‌های روی زمینی از روش‌های مستقیم برای تعیین مؤثر بودن اتصالات عایق استفاده می‌شود. اگر در آزمایش‌های فوق اختلاف پتانسیل قابل ملاحظه‌ای (بیش از ۱۰۰ میلی‌ولت) بین قسمت‌های ایزوله شده وجود داشته باشد، می‌توان نتیجه گرفت که عایق کاری مؤثر بوده است. درصورتی‌که دستگاه آزمایش فلنج عایق که با فرکانس بالا کار می‌کند در دسترس باشد بهتر است از آن استفاده شود. همان‌طورکه در مورد اتصالات عایق مدفون اشاره شد، در مورد اتصالات روی زمینی نیز می‌توان از وسایل ویژه که به طور اختصاصی برای این امر طراحی شده‌اند، برای اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر استفاده کرد.

مفاهیم حفاظت کاتدی در طراحی

حفاظت کاتدی روشی برای کاهش خوردگی فلز با تبدیل آن به کاتد در پیل الکتروشیمیایی است. کاتد در پیل الکتروشیمیایی، الکترودی است که در آن کاهش (بدون خوردگی) رخ می‌دهد. پیش از اعمال حفاظت کاتدی، سازه‌ها دارای مناطق کاتدی

و آندی (مناطقی که در آنها خوردگی اتفاق می‌افتد) هستند. چنانچه تمام مناطق آندی را بتوان به مناطق کاتدی تبدیل کرد، تمام سازه به کاتد تبدیل می‌شود و خوردگی از بین خواهد رفت.

تعریف کلاسیک حفاظت کاتدی: پلاریزاسیون کاتدی تمام مناطق دارای پتانسیل نجیب (کاتدها) به فعال‌ترین مناطق (آند) بر روی سطح فلز.

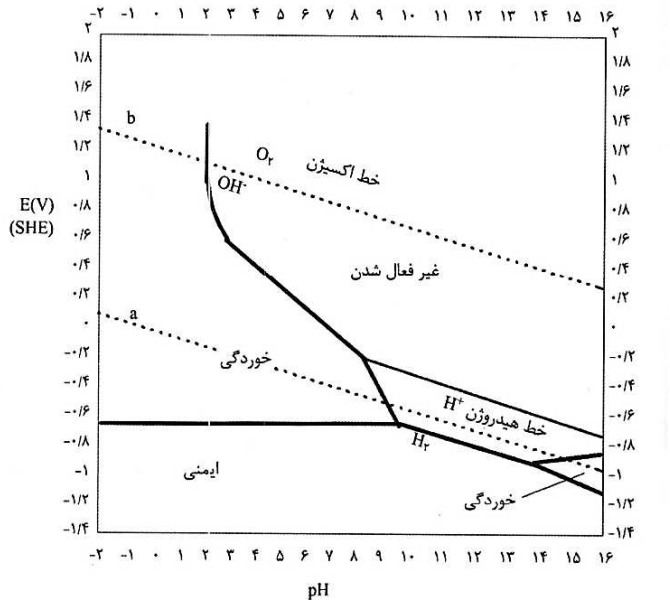
حفاظت کاتدی با تبدیل سازه به کاتد یک مدار جریان مستقیم به دست می‌آید که در آن نرخ جریان بار الکتریکی به نحوی تنظیم می‌شود تا اطمینان حاصل شود که پتانسیل پلاریزاسیون حداقل به اندازه فعال‌ترین (الکترونگاتیو) منطقه بر روی سازه است.

تعریف ترمودینامیکی حفاظت کاتدی: سازه می‌بایست تا پتانسیل پایداری ترمودینامیکی فلز سازه در محیط خاص به‌صورت کاتدی پلاریزه شود. این پتانسیل با منطقه مصونیت در نمودار پوربه (pH-Potential) مرتبط است. لازم نیست که جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی تحت این دو تعریف یکسان باشند.

انرژی

نمودار پوربه

مفهوم روابط انرژی برای کنترل خوردگی و حفاظت کاتدی ضروری است. شکل ۸-۱۲ نسخه‌ای ساده از نمودار پوربه آهن است که پتانسیل الکتریکی را به pH مرتبط می‌کند. این شکل در اصل نمودار از انرژی برحسب pH برای یک عنصر و ترکیبات آن است. نمودار ساده شده شکل ۸-۱۲، سه منطقه پایداری برای آهن را نشان می‌دهد: مصونیت، خوردگی و غیرفعال شدن.



شکل ۸-۱۲ نمودار پوربه

با فرض پسیو شدن توسط فیلم‌های Fe_2O_3 و Fe_3O_4 بر روی نمودار خط‌های نقطه‌چین a و b نیز نمایش داده شده است. خط a حد پایینی پایداری آب را نشان می‌دهد. اینها شرایطی از pH و پتانسیل هستند که در آنها یون‌های هیدروژن در آب با گاز هیدروژن در فشار یک اتمسفر در تعادل هستند. رابطه شیمیایی به این صورت است:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + e^- \qquad E_0 = 0/000 - 0/591\text{pH}$$

خط b حد بالایی پایداری آب را نشان می‌دهد. اینها شرایطی هستند که در آن گاز اکسیژن می‌تواند از آب در یکی از الکترودها آزاد شود. رابطه به این صورت است:

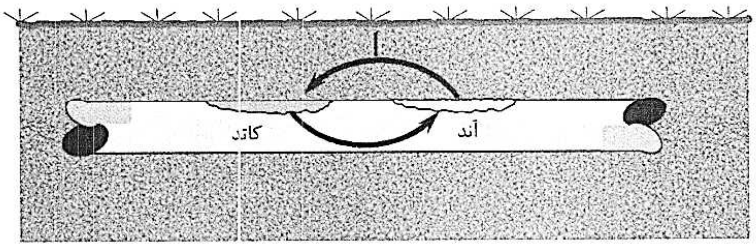
$$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^- \qquad E_0 = 1/228 - 0/0591\text{pH}$$

خطوطی که سایر مناطق روی نمودار را به هم متصل می‌کنند، نواحی پایدار ترمودینامیکی محصول را مشخص می‌کنند. پتانسیل داده شده روی این نمودار (شکل ۸-۱۲) برحسب الکترود استاندارد هیدروژن است (SHE). برای به دست آوردن پتانسیل برحسب الکترود مرجع مس/سولفات مس ۰/۳۱۶ ولت (۳۱۶ mV) از پتانسیل SHE کم کنید. لازم به ذکر است که ناحیه پایداری برای مصونیت، در پتانسیل ۰/۶۰- ولت و pH های ۲- تا ۹ قرار دارد. اگر pH بزرگ‌تر از ۹ باشد، خط به موازات خط تعادل برای آزاد شدن هیدروژن در می‌آید (خط a). بر اساس حفاظت کاتدی صحیح «بر پایه قواعد ترمودینامیک» پتانسیل آهن باید برابر با منفی‌تر از خط متصل‌کننده ناحیه پایداری آهن باشد.

در نمودار پوربه، منطقه (ناحیه) بین خطوط a و b، منطقه‌ای است که در آن آب پایدار است. در پتانسیل‌های منفی‌تر از خط a، یون‌های هیدروژن به گاز هیدروژن احیا می‌شوند. تمامی منطقه پایداری آهن در مناطق منفی‌تر از خط a قرار دارد. از نظر ترمودینامیکی، حفاظت کاتدی آهن بدون امکان احیای حداقل مقداری یون هیدروژن در سطح فلز، امکان‌پذیر نیست. معیارهای حفاظت کاتدی به غیر از pH کمتر از ۹، معمولاً از پتانسیل‌های آزاد شدن هیدروژن فراتر نمی‌روند. نمودار پوربه بیان می‌کند که جریان مورد نیاز برای حفاظت آهن (یا سایر فلزات) باید برای الکترونگاتیو نگه داشتن پتانسیل فلز، حداقل به اندازه ناحیه پایداری فلز در pH داده شده، کافی باشد.

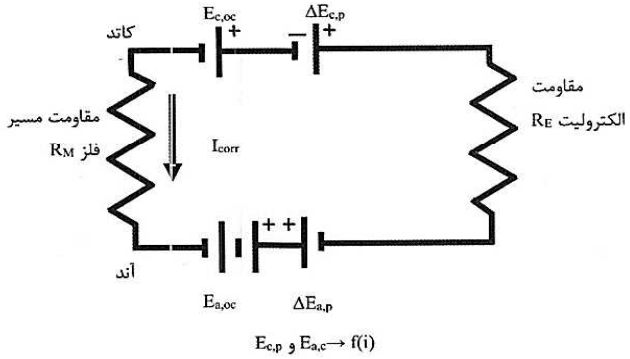
اطلاعات بیشتر در مورد نمودارهای پوربه در اطلس تعادل‌های الکتروشیمیایی در محلول‌های آبی نوشته مارسل پوربه از انتشارات NACE International موجود است.

خوردگی زمانی اتفاق می‌افتد که اتم‌های فلزی، الکترون‌های خود را از دست بدهند که این امر جریان الکترون (شار جریان منفی) به خارج از منطقه و یون‌های مثبت (محصولات خوردگی) تولید می‌کند. هدف حفاظت کاتدی تبدیل تمام سطح به یک کاتد است تا هیچ پتانسیل الکتریکی برای ایجاد واکنش الکتروشیمیایی وجود نداشته باشد و بنابراین خوردگی رخ ندهد. اعمال جریان مستقیم به یک سازه فلزی در حال خورده شدن می‌تواند سبب تبدیل تمامی آن به کاتد شود. شکل ۸-۱۳ جریان مستقیم مرتبط با فرایند خوردگی بر روی یک خط لوله فلزی مدفون یا زیر آب را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۱۳ پیل خوردگی زیرزمینی

یون‌های مثبت، همانند محصولات خوردگی، از منطقه آندی وارد محیط می‌شوند. هم‌زمان سایر یون‌های مثبت از محیط، الکترون‌ها را از سطح فلز در مناطق کاتدی پیل می‌گیرند. درحالی‌که، یون‌های مثبت در حال خنثی شدن (احیا شدن) در سطح کاتد هستند، یون‌های منفی از مجاورت کاتد به‌سمت آند حرکت می‌کنند. یون‌های مثبت و منفی در فرایند انتقال بار درگیر هستند. برای تکمیل شدن مدار، شار جریان در خود فلز انجام می‌شود. برای یک ولتاژ محرک مشخص (پتانسیل مدار باز میان آند و کاتد)، مقدار جریان توسط عواملی نظیر مقاومت محیط (غلظت یون‌های موجود در الکترولیت) و میزان پلاریزاسیون در سطح آند و کاتد، محدود می‌شود. شکل ۸-۱۴ مدار الکتریکی معادل برای پیل خوردگی ساده را نشان می‌دهد. پلاریزاسیون تابعی از چگالی جریان خوردگی، i است.



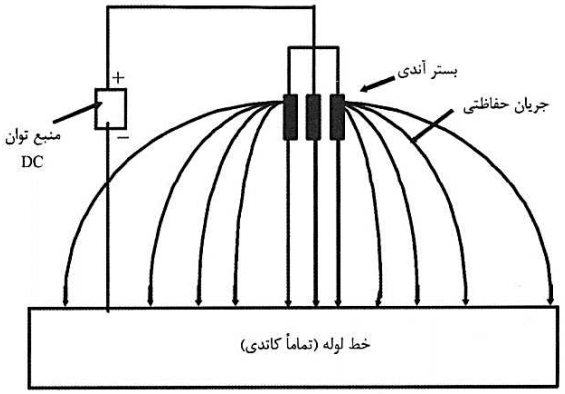
شکل ۸-۱۴ مدار الکتریکی معادل برای پیل خوردگی ساده

قطبیت نشان داده شده بر روی نمادهای معرف $E_{c,oc}$ و $E_{a,oc}$ ، نشان‌دهنده قطبیت فلز نسبت به الکترولیت در محل‌های کاتدی و آندی است. تفاوت پتانسیل کل میان پتانسیل مدار باز آند و کاتد که نیروی محرکه خوردگی است، به گونه‌ای است که کاتد نسبت به آند مثبت است (شکل ۸-۱۳).

قطبیت‌های نشان داده شده بر روی نمادهای معرف پتانسیل‌های پلاریزاسیون $E_{c,p}$ و $E_{a,p}$ ، قطبیت اثرهای پلاریزاسیون است. پتانسیل‌های پلاریزاسیون عکس پتانسیل‌های آند و کاتد هستند که پیل را تشکیل می‌دهند. نتیجه پلاریزاسیون، کاهش اختلاف پتانسیل کل میان آند و کاتد در پیل خوردگی است.

شکل ۸-۱۵ نشان‌دهنده روش پایه‌ای در اعمال حفاظت کاتدی است. قسمتی از لوله که در شکل ۸-۱۳ در حال خورده شدن بود، به کاتد تبدیل می‌شود. جریان حفاظت کاتدی می‌بایست از آند حفاظت کاتدی (معمولاً در حفاظت کاتدی زیرزمین،

بستر گفته می‌شود) که برای همین هدف ایجاد شده، به درون محیط وارد شود. طبق تعریف، مواد مورد استفاده در بسترها، آند هستند و تبدیل جریان الکتریکی به یون‌های مثبت در بستر رخ می‌دهد.



شکل ۸-۱۵حفاظت کاتدی یک خط لوله مدفون

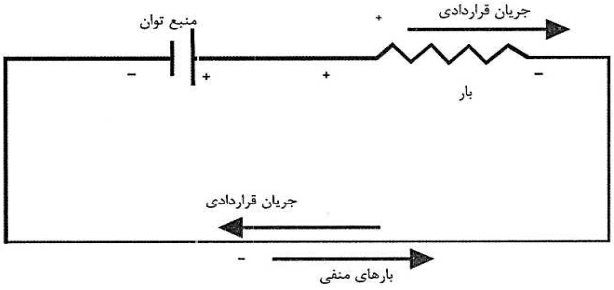
قطبیت و قرارداد علائم

برای جلوگیری از سردرگمی لازم است تا از یک قرارداد علائم استاندارد برای مدارهای الکتریکی استفاده شود. پایه قرارداد علائم، فرض حرکت بار مثبت است. جهت جریان بر اساس این فرض تعیین می‌شود که حمل‌کننده بارها مثبت هستند. این فرض به نام جریان قراردادی شناخته می‌شود. جهت جریان قراردادی برعکس جهت جریان بار منفی است. پیش فرض همواره جریان قراردادی است مگر اینکه به‌صورت مشخص ذکر شود.

با توجه به قرارداد بالا برای جهت جریان، از دو قانون برای تعیین قطبیت ولتاژ می‌توان استفاده کرد. این قوانین تنها برای مدارهای خارج از منبع تغذیه به کار برده می‌شوند:

- قانون ۱: جهت جریان قراردادی (مثبت) از خروجی ولتاژ مثبت دستگاه تولیدکننده توان (منبع) است.
- قانون ۲: جهت جریان قراردادی (مثبت) به‌سمت خروجی جریان مثبت دستگاه مصرف‌کننده توان (بار) است.

قطبیت و قراردادهای علائم در شکل ۸-۱۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۸-۱۶ قطبیت و قرارداد علایم

مقاومت‌ها مثال‌هایی از دستگاه‌های مصرف‌کننده توان هستند، توان با تولید حرارت مصرف می‌شود. کابل‌ها، مقاومت آند به زمین، مقاومت خط لوله به زمین و مقاومت خطی خط لوله، مثال‌هایی از عناصر مقاومتی مدار در زمینه خوردگی هستند. منابع تغذیه یکی از انواع انرژی را در درون خود به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. یک‌سوکننده‌ها، منابع تغذیه خورشیدی، پیل‌های خوردگی سامانه‌های آند گالوانیک مثال‌هایی از منابع تغذیه در حفاظت کاتدی هستند.

قراردادهای اندازه‌گیری و گزارش پتانسیل الکترود

دو الکترود که هریک از عنصری فلزی احاطه شده توسط الکترولیت پیوسته تشکیل و توسط هادی الکتریکی متصل شده‌اند، پیل گالوانیک را به وجود می‌آورند. ممکن است الکترولیت‌ها از نظر شیمیایی اما مرزی مشترک داشته باشند یا ممکن است الکترودها در یک الکترولیت مشترک غوطه‌ور باشند. هریک از الکترودها به همراه الکترولیت احاطه کننده آن نیم پیل نامیده می‌شود. یک سازه فلزی در تماس با خاک یا سایر الکترولیت‌ها در واقع یک نیم پیل است، هرچند ممکن است تعداد زیادی پیل‌های موضعی (آند و کاتد) روی سطح فلز وجود داشته باشند. برای اندازه‌گیری پتانسیل نیم پیل یک سازه، نیم پیل دومی با پتانسیل نیم پیل پایدار مورد نیاز است. پتانسیل اندازه‌گیری شده سازه نسبت به نیم پیل مرجع پایدار، اطلاعات مورد نظر را تأمین می‌کند. چهار جزء برای گزارش اندازه‌گیری پتانسیل نیم پیل مورد نیاز است: قطبیت، بزرگی، واحد اندازه‌گیری و مرجع/برای مثال ۸۵۰ volts CSE– به معنی منفی ۰/۸۵۰ در واحد ولت است، زمانی که نسبت به یک الکترود مرجع مس/سولفات مس اندازه‌گیری شود. چنانچه یکی از چهار جزء اندازه‌گیری پتانسیل نادیده گرفته شوند یا گزارش نشوند، اندازه‌گیری مشکل می‌شود.

تمام پتانسیل‌های نیم پیل می‌بایست نسبت به یک مرجع استاندارد، نظیر مرجع مس/سولفات مس (CSE)، اندازه‌گیری شوند. بنابراین ضروری است که همواره مرجع استفاده شده برای اندازه‌گیری پتانسیل نیم پیل ذکر شود. برای مثال پتانسیل حفاظتی اندازه‌گیری شده برای یک خط لوله فولادی مدفون را می‌توان به‌صورت ۰/۸۵۰– ولت نسبت به مرجع مس/سولفات مس اشباع شده (CSE) گزارش کرد. اغلب این پتانسیل به‌صورت ۰/۸۵۰– ولت لوله به خاک گزارش می‌شود.

اگرچه ممکن است که این بهترین روش گزارش‌دهی نباشد، اما در زمینه خوردگی، به‌صورت کلی پذیرفته شده است که «لوله به خاک» به معنی «پتانسیل لوله نسبت به مرجع مس/سولفات مس اشباع شده در تماس با خاک» است. در جدول ۸–۷ فهرستی از الکترودهای مرجع معمول به همراه پتانسیل نیم پیل استاندارد آنها و عوامل تبدیل آورده شده است.

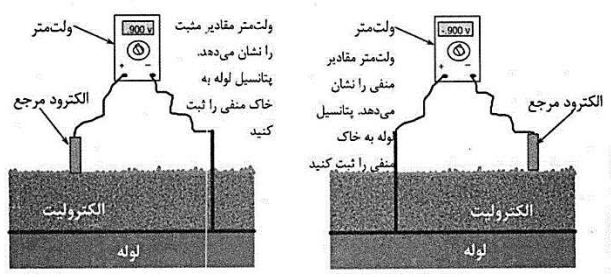
جدول ۸–۷ پتانسیل‌های مرجع استاندارد و عوامل تبدیل

الکترود	پتانسیل (□) در $25°C$ $E°$	ضریب دمایی $(mV/°C)$
$H_2/H^+(SHE)$□	۰/۰۰۰	+۰/۸۷
Ag/AgCl/1 M KCl□	+۰/۲۳۵	+۰/۲۵
Ag/AgCl/0/6 M KCl (آب دریا)	+۰/۲۵	
Ag/AgCl/0/1 M KCl□	+۰/۲۸۸	+۰/۲۲
$Hg/Hg_2Cl_2/sat.KC(SCE)$□	+۰/۲۴۱	+۰/۲۲

$Hg/Hg_2Cl_2/1M\ KCl$	+۰/۲۸۰	+۰/۵۹
$Hg/HG_2Cl_2/0/1M\ KCl$	+۰/۳۳۴	+۰/۷۹
$Cu/CuSO_4sat$	+۰/۳۱۶	+۰/۹۰

در تمامی موارد، پتانسیل مورد نظر، پتانسیل الکترود داده شده نسبت به یک مرجع مشخص در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. لازم به ذکر است که این پتانسیل، پتانسیل مرجع نسبت به نیم پیل داده شده مورد نظر نیست. در نگاه اول ممکن است به نظر آید که این پتانسیل‌ها یکسان هستند، ولی آنها یکسان نیستند. اگرچه هر دو پتانسیل اندازه عددی یکسانی دارند، یکی از پتانسیل‌ها مقدار منفی پتانسیل دیگر است. بنابراین به منظور گزارش پتانسیل مورد نظر با قطبیت صحیح، می‌بایست آن را به‌صورت پتانسیل الکترود مورد نظر نسبت به یک مرجع مشخص گزارش داد.

برای اندازه‌گیری پتانسیل نیم پیل مورد نظر نسبت به یک مرجع مشخص، مرجع باید به خروجی منفی ولت‌متر متصل باشد تا نمایشگر ولت‌متر قطبیت صحیح را مشخص کند. این مطلب توسط علائم «common» یا «reference» بر روی خروجی منفی بسیاری از ولت‌مترها تائید شده است. ازآنجاکه، اکثر نمایشگرهای دیجیتال می‌توانند مقادیر مثبت یا منفی را مشخص کنند، اتصال مرجع به خروجی منفی مشکلی را به وجود نمی‌آورد. به هر حال ازآنجاکه، نمایشگرهای آنالوگ تنها می‌توانند مقادیر مثبت را نشان دهند، اتصال مرجع به خروجی منفی، درصورتی‌که مقادیر اندازه‌گیری منفی باشند، می‌تواند سبب انحراف نشانگر به‌سمت مقادیر منفی شود. ازآنجاکه، جلوی حرکت نشانگر به‌سمت مقادیر منفی گرفته شده است، سیم مرجع باید به خروجی مثبت ولت‌متر انتقال داده شود تا بزرگی پتانسیل در این مورد تعیین شود. سپس مقادیر باید به‌صورت منفی گزارش شوند. شکل ۸-۱۷ را ببینید.



شکل ۸-۱۷ اندازه‌گیری پتانسیل لوله به خاک

به‌صورت خلاصه، زمانی که از ولت‌متر دیجیتال با قابلیت نمایش مقادیر مثبت و منفی استفاده می‌شود، چنانچه مرجع به خروجی منفی متصل شده باشد، قطبیت صحیح برای گزارش نمایشگر مشخص می‌شود، زمانی که از ولت‌متر آنالوگ استفاده شود که فقط قابلیت نمایش مقادیر مثبت را دارد، مرجع را به خروجی، جهت ایجاد اندازه‌گیری مثبت متصل کنید. چنانچه برای ایجاد مقادیر مثبت، مرجع به خروجی مثبت متصل باشد، اندازه‌گیری‌ها باید با قطبیت منفی گزارش شوند.

با فرض جریان قراردادی و پتانسیل گزارش شده به‌صورت الکترود مورد نظر برحسب مرجع مشخص، علائم تمامی پتانسیل‌ها مطابق گزارش اتحادیه بین‌المللی شیمی محض و کاربردی[۲۸۸] خواهد بود که به‌عنوان توافق استکهلم شناخته می‌شود.[۲۸۹] همچنین این استاندارد گزارش به‌صورت کلی علائم در زمینه خوردگی را پذیرفته است.

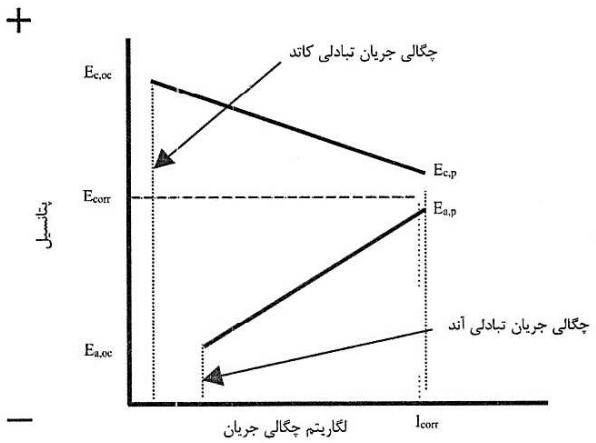
پلاریزاسیون

با ادامه شار جریان، پلاریزاسیون در آند و کاتد به وجود می‌آید. پلاریزاسیون اختلاف پتانسیل مناطق آندی و کاتدی را کاهش می‌دهد و طبق قانون اهم، جریان و نرخ خوردگی افت می‌کنند تا یک تعادل میان تأثیرات پلاریزاسیون و دپلاریزاسیون به دست آید. عوامل دپلاریزه کردن شامل این عوامل است:

- اکسیژن حل شده
- تغییرات غلظت یون
- جریان آب
- دما
- pH پایین

پلاریزاسیون همواره در خلاف جهت شار جریانی که آن را به وجود می‌آورد، رخ می‌دهد. زمانی که آند و کاتد یک پیل خوردگی به هم متصل می‌شوند، جریان بین آنها به وجود می‌آید. این جریان باعث خواهد شد تا پتانسیل آند به پتانسیل کاتد نزدیک شود. همچنین پتانسیل کاتد نیز به پتانسیل آند نزدیک خواهد شد. اختلاف ولتاژ میان الکترودهای پلاریزه شده تا نزدیک شدن به یک پتانسیل حالت پایدار مخلوط (E_M) کاهش می‌یابد و این تا زمانی است که تأثیر پلاریزه کننده جریان دقیقاً با تأثیرات دپلاریزه کننده خارجی برابر شود. پتانسیل مخلوط جایی میان پتانسیل‌های پلاریزه شده دو الکترود است. اختلاف پتانسیل میان پتانسیل‌های پلاریزه شده آند و کاتد، ولتاژ محرکه پیل خوردگی است. جریان در این حالت پایدار، به‌عنوان جریان خوردگی (I_{corr}) سامانه تعریف می‌شود. نمودار پلاریزاسیون یا نمودار ایوانس[۲۹۰] در شکل ۱۸–۸، مفهوم پلاریزسیون پیل خوردگی را بهتر نشان می‌دهد.

2 [illegible] 8 8
2 [illegible] 8 9
2 [illegible] 9 0



شکل ۸–۱۸ نمودار پلاریزاسیون (ایوانس) پیل خوردگی

پتانسیل الکترودها پیش از شار جریان، پتانسیل‌های مدار باز نامیده می‌شوند. این پتانسیل‌ها $(E_{c,oc} \quad E_{a,oc})$ ، پتانسیل‌های آند و کاتد پیش از متصل شدن آنها به یکدیگر است (مدار کوتاه). تحت شرایط مدار باز تنها جریانی که به الکترود وارد یا از آن خارج می‌شود، جریان تبادلی است. جریان تبادلی سرعتی است که در آن بارهای مثبت یا منفی، زمانی که یک الکترود در الکترولیت به تعادل پویا می‌رسد. به سطح آن وارد یا از آن خارج می‌شوند. در شرایط تعادلی هیچ شار جریان خالصی در الکترود وجود ندارد. میزان چگالی جریان تبادلی تابعی از ماده الکترود مشخص و الکترولیت است که به‌صورت کلی میزان اندکی است. مثال‌هایی تحت شرایط پلاریزاسیون اکتیواسیون در جدول ۸–۸ آورده شده است.

به‌صورت‌کلی پلاریزاسیون مربوط به تخلیه واکنش‌دهنده‌ها و تجمع محصولات واکنش است. هر عاملی که سبب تجمع محصولات واکنش یا تخلیه واکنش‌دهنده‌ها شود، پلاریزاسیون را افزایش می‌دهد. برعکس هر عاملی که سبب برداشته شدن محصولات خوردگی یا تجدید واکنش‌دهنده‌ها شود، پلاریزاسیون را کاهش می‌دهد. سه نوع پلاریزاسیون الکتروشیمیایی وجود دارد: مقاومتی، اکتیواسیون (فعال‌سازی) و غلظتی.

پلاریزاسیون مقاومتی

پلاریزاسیون مقاومتی که افت ولتاژ در خاک نیز نامیده می‌شود، بسیار شبیه مفهوم مقاومت در مدار الکتریکی است. انتقال بار در الکترولیت از طریق یون‌های موجود در محلول است. هرچه یون‌ها، از هر نوعی، بیشتر باشند، انتقال بار ساده‌تر و اندازه میدان الکتریکی ناشی از انتقال بار، کمتر خواهد بود. اختلاف پتانسیل درون الکترولیت و در طول فیلم‌های لایه مرزی که توسط انتقال بار ایجاد شده‌اند (معادل شار جریان از درون یک مقاومت) پلاریزاسیون مقاومتی نامیده می‌شود. ازآنجاکه، پلاریزاسیون مقاومتی بخشی از افت ولتاژ می‌شود، حائز اهمیت است. افت ولتاژ می‌بایست در اندازه‌گیری پتانسیل سازه به پیل مرجع در نظر گرفته شود.

از نظر ریاضی پلاریزاسیون مقاومتی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در واقع همان قانون اهم است.

$$\eta_r = \mathrm{IR}_P$$

که در این رابطه:

η_r: پلاریزاسیون مقاومتی (ولت)

I: جریان در حال شار در پیل (آمپر)

R_P: مقاومت اندازه‌گیری شده

برای مطالعه بیشتر موضوع پلاریزاسیون مقاومتی به کتاب جنبه‌های نظری و آزمایشگاهی سینتیک[۱][۲] مراجعه کنید.

پلاریزاسیون اکتیواسیون (فعال‌سازی)

پلاریزاسیون اکتیواسیون توسط عوامل تأخیری درون خود واکنش ایجاد می‌شود. برای مثال آزاد شدن گاز هیدروژن در کاتد را در نظر بگیرید، سرعتی که در آن یون‌های هیدروژن به گاز هیدروژن احیا می‌شوند تابعی از عوامل مختلفی از جمله سرعت انتقال الکترون به یون‌های هیدروژن در سطح فلز است. بنابراین برای این واکنش، سرعت ذاتی است و به فلز خاص و دمای سامانه بستگی دارد. در حقیقت گستره وسیعی از فلزات با توانایی مختلف برای انتقال الکترون به یون‌های هیدروژن وجود دارند که در نتیجه آن سرعت آزاد شدن هیدروژن از سطح فلزی مختلف، کاملاً متفاوت است.

پلاریزاسیون اکتیواسیون معمولاً در الکترولیت‌هایی غالب است که واکنش‌دهنده‌ها بسیار زیاد هستند ویا برداشت محصولات درگیر در واکنش الکتروشیمیایی به‌سرعت و سهولت انجام می‌گیرد. معادله پلاریزاسیون اکتیواسیون به این صورت است.

$$\eta_a = \pm\beta \log \frac{i}{i_0}$$

که در این معادله

η_a: پلاریزاسیون اکتیوسیون (ولت)

β: ثابت تافل (ولت)

i: چگالی جریان در سطح الکترود $(\mathrm{A/m^2})$

i_0: چگالی جریان تبادلی $(\mathrm{A/m^2})$

$1 \times 10^{-6}\mathrm{A/m^2}$ و β (شیب) ۱۲۰ mv/decade of current- است.

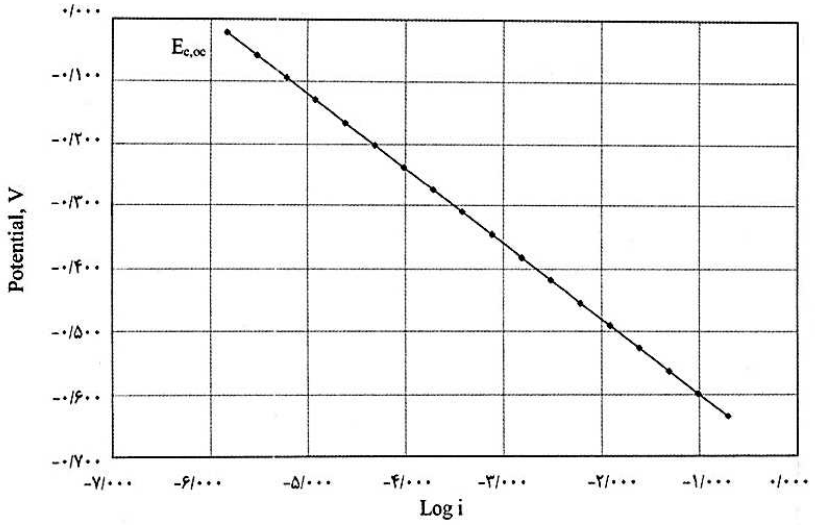
به یاد داشته باشید: $\log x^n = n\log x$

برای مثال: $log\ 1\ 0^{-2} = -2\ log\ 1\ 0 = -2(1) = -2$

در این رابطه (که معمولاً به آن رابطه تافل گفته می‌شود)، چنانچه جریان قراردادی از الکترود به الکترولیت حرکت کند، ثابت تافل (شیب خط) مثبت است. در این صورت اکسیداسیون در سطح در حال وقوع است و این محل آند است. پتانسیل پلاریزاسیون با افزایش چگالی جریان بر روی سطح الکترود در جهت مثبت حرکت می‌کند. به‌صورت برعکس زمانی که جریان قراردادی از الکترولیت به الکترود جریان می‌یابد، ثابت تافل منفی است. در این مورد احیا بر روی سطح رخ می‌دهد.

[2] Klaus J. Vetter ''Electrochemical Kinetics Theoretical and Experimental Aspects'', Academic Press, New York, London,

میزان ثابت تافل با واکنش الکتروشیمیایی مشخص، شیمی الکترولیت و سطح الکترود تغییر می‌کند. مثال‌های بسیاری از میزان ثابت تافل در جدول ۸-۹ آورده شده است.



شکل ۸-۱۹ نمودار پلاریزاسیون اکتیواسیون برای یک واکنش احیا

جدول ۸-۹ مثال‌هایی از ثابت تافل برای آزاد شدن هیدروژن از محلول‌های آبی[۲۹۲]

فلز	الکترولیت	دما $(°C)$	$\beta(\mathrm{mV})$
□□□	0/01 N HCl	۲۰	- ۹۱
□□	0/001 N NaOH	۲۰	- ۱۰۳
□□	0/01 N HCl	۲۰	- ۱۲۲
□□	0/02 N NaOH	۲۰	- ۱۴۴
□□	0/01 N HCl	۲۰	- ۱۱۸
□□	0/01 N NaOH	۲۰	- ۱۱۷

چگالی جریان تبادلی نیز تابعی از واکنش الکتروشیمیایی مشخص، شیمی الکترولیت و سطح الکترود است. این مقدار نشان‌دهنده سادگی انجام یک واکنش خاص است. هرچه این مقدار بزرگ‌تر باشد، انجام واکنش ساده‌تر می‌شود. چگالی جریان‌های تبادلی برای واکنش آزاد شدن هیدروژن در اسید سولفوریک رقیق در جدول ۸-۸ آورده شده است.[۲۹۳] $-\log i_0$ برای آزاد شدن هیدروژن بر روی سطح آهن 0/01 N HCl ، $6/29\mathrm{A.cm^2}$و در 0/01 N NaOH ، $6/62\mathrm{A.cm^2}$ است.

جدول ۸-۸ چگالی جریان‌های تبادلی i_0 برای واکنش آزاد شدن هیدروژن در اسید سولفوریک $1\ \mathrm{mol/dm^2}$

فلز	$i_0(\mathrm{A.cm^2})$	$-\log i_0(\mathrm{A.cm^2})$

2 [illegible]
2 [illegible]

□□□	8×10^{-4}	۳/۱
□□	$6/3 \times 10^{-6}$	۵/۲
□□	6×10^{-9}	۸/۲
□□	1×10^{-12}	۱۲/۰
□□□	5×10^{-13}	۱۲/۳

پلاریزاسیون غلظتی

پلاریزاسیون غلظتی به تأخیر در یک واکنش الکتروشیمیایی در نتیجه تغییرات غلظتی در محلول در مجاورت سطح فلز اشاره دارد. برای مثال در واکنش آزاد شدن هیدروژن، تصور کنید که غلظت یون‌های هیدروژن در محلول نسبتاً پایین است و واکنش با سرعت تقریباً بالایی در حال انجام است. واکنش کاتدی با مصرف یون‌های هیدروژن، منطقه بسیار نزدیک به سطح فلز را از این یون‌ها تهی می‌کند. تحت این شرایط، واکنش توسط نرخ نفوذ یون‌های هیدروژن به سطح فلز کنترل می‌شود.

پلاریزاسیون غلظتی معمولاً در الکترولیت‌هایی غالب است که غلظت واکنش‌دهنده‌ها کم است، برای مثال محلول‌های رقیق، یا زمانی که محصولات واکنش تجمع پیدا می‌کنند، برای مثال محیط‌های راکد، رابطه پلاریزسیون غلظتی به این صورت است:

$$\eta_c = 2/3 \frac{\mathrm{RT}}{\mathrm{nF}} \log \frac{(i_L\text{-i})}{i_L}$$

که در این رابطه:

η_c: پلاریزاسیون غلظتی (ولت)

R: ثابت جهانی گازها $(1/98\mathrm{cal/gm.equiv.,°K})$

T: دمای مطلق $(°\mathrm{K})$

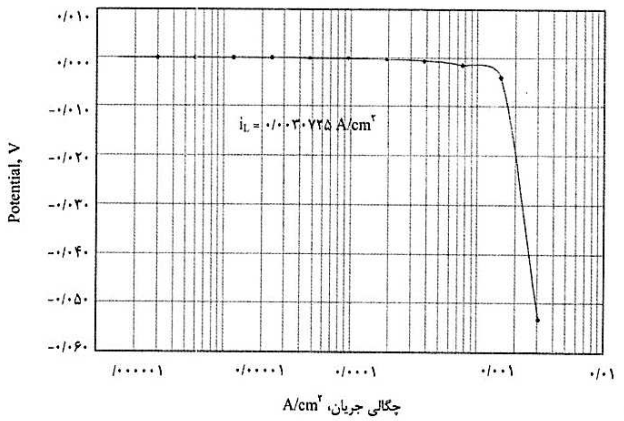
N: تعداد الکترون‌های درگیر در واکنش

F: ثابت فارادی (۹۶۵۰۰۰ coulombos/equiv.)

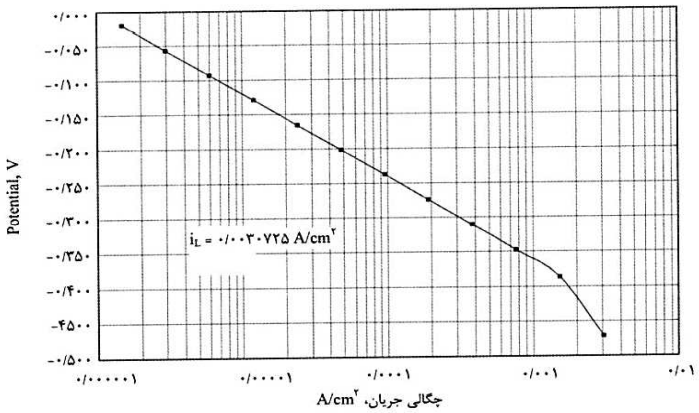
i_L: چگالی جریان محدودکننده نفوذ $(\mathrm{A.cm^2})$

I: چگالی جریان به / از سطح $(\mathrm{A.cm^2})$

بر اساس این رابطه واضح است که چگالی جریان محدودکننده زیاد، منجر به پلاریزاسیون غلظتی بسیار کمی خواهد شد. شکل ۲۰-۸ تأثیر چگالی جریان محدودکننده بر پلاریزسیون را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۲۰ نمودار تأثیر چگالی جریان بر پلاریزاسیون غلظتی $i_L = 0/003725\text{A.cm}^2$

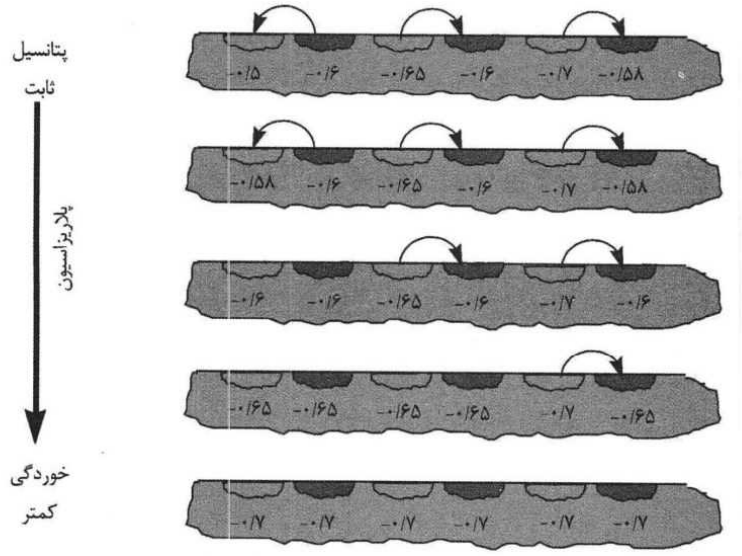


شکل ۸-۲۱ تأثیر پلاریزاسیون اکتیواسیون و غلظتی $i_L = 0/003725\text{A.cm}^2$

ارتباط پلاریزاسیون و حفاظت کاتدی

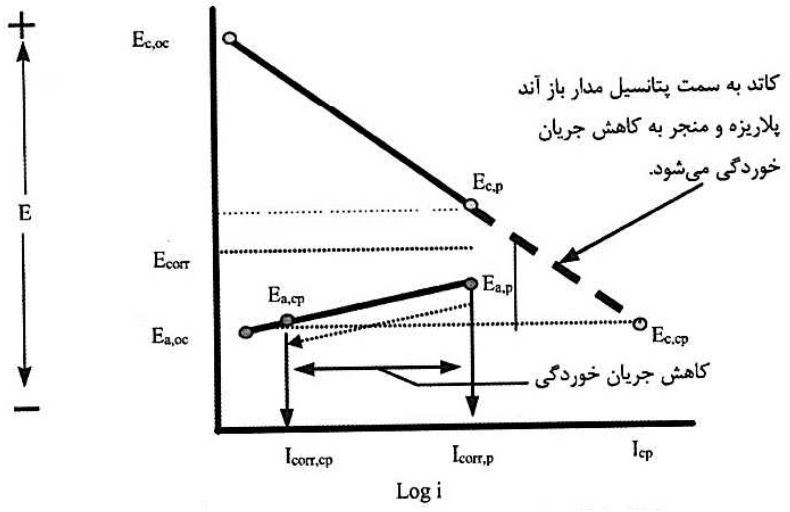
پلاریزاسیون جزئی از حفاظت کاتدی است. به یاد داشته باشید که پلاریزاسیون تغییری در پتانسیل در نتیجه شار جریان است. زمانی که جریان از الکترولیت به فلز شار می‌کند، واکنش‌های احیا رخ می‌دهند. محصولات این واکنش‌ها، ترکیب شیمیایی الکترولیت در فصل مشترک الکترولیت/سازه را تغییر می‌دهند. تغییر شیمی و تغییر پتانسیل ناشی از آن در فصل مشترک، پلاریزاسیون نامیده می‌شود. زمانی که جریان حفاظت کاتدی قطع می‌شود، مشابه اضمحلال ولتاژ در خازن، پلاریزاسیون نیز به تدریج کم می‌شود.

زمانی که یک سازه پلاریزه می‌شود، پتانسیل آن به‌سمت الکترونگاتیو شدن تغییر می‌کند. پلاریزاسیون به روش مرحله‌ای رخ می‌دهد که در آن ابتدا مناطق مثبت‌تر یا کاتدی پلاریزه می‌شوند. زمانی که پتانسیل اولین نقاط کاتدی با پتانیل سایر نقاط برابر می‌شود، پلاریزاسیون در سایر نقاط نیز آغاز می‌شود. توضیح ساده‌تر شکل ۸-۲۲ به درک بهتر این موضوع کمک می‌کند.



شکل ۸-۲۲ پلاریزاسیون یک سازه

برای متوقف کردن خوردگی می‌بایست تمام نقاط کاتدی موجود، به‌صورت الکترونگاتیو تا پتانسیلی برابر با منفی‌ترین پتانسیل مدار باز موجود در سازه پلاریزه شوند. پلاریزاسیون یک سازه به‌وسیله اعمال جریان خارجی به دست می‌آید که بزرگی این جریان به رفتار حفاظت کاتدی بستگی دارد. عوامل تأثیرگذار بر میزان جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی کافی یک سازه، در ادامه بحث خواهند شد. نمودار ایوانس در شکل ۸-۲۳ نشان‌دهنده پلاریزاسیون کاتد به‌سمت پتانسیل مدار باز آند یک پیل خوردگی، بر روی یک سازه با استفاده از آند حفاظت کاتدی است. پلاریزاسیون کاتدها به‌سمت پتانسیل مدار باز آندها معیار صحیحی برای از بین بردن خوردگی است. اما برای اهداف عملی، تعیین پتانسیل مدار باز فعال‌ترین منطقه آندی غیرممکن است. ازآنجاکه، پیل‌های خوردگی معمولاً میکروسکوپی هستند و پتانسیل اندازه‌گیری شده، پتانسیل‌های خوردگی هستند، بسیار محتمل است که اندازه‌گیری‌های اولیه، میانگین پتانسیل‌های خوردگی چندین پیل خوردگی باشند. بنابراین چندین معیار جایگزین که بعداً مورد بحث قرار خواهند گرفت، برای کمک به دستیابی به معیار صحیح، توسعه یافتند.



شکل ۸-۲۳ پلاریزاسیون کاتد به‌سمت فعال‌ترین منطقه آندی

عوامل مرتبط با جریان مورد نیاز

مقدار جریان مورد نیاز برای تأمین حفاظت کافی به مساحت سطح تحت حفاظت و رفتار پلاریزاسیون سازه در محیط خود بستگی دارد.

مساحت سطح

در یک محیط، جریان مورد نیاز به‌صورت مستقیم با مساحت سطح متناسب است. هرچه سطحی که قرار است حفاظت شود مساحت بیشتری داشته باشد، جریان مورد نیاز بیشتر می‌شود. برای مثال یک سطح پوشش داده شده، جریان کمتری از یک سطح بدون پوشش نیاز دارد. یک سازه دارای پوشش، تنها به جریان حفاظتی در عیوب پوشش[۲۹۴]نیاز دارد. برای در نظر گرفتن یک مثال عملی، محاسبات زیر در مورد یک پوشش غیرایدئال را در نظر بگیرید:

اطلاعات داده شده:

ابعاد خط لوله	طول: ۱۶۱۰۰ متر (۱۰ مایل)
قطر خارجی خط لوله	□□ ۲۱/۹۰ (□□ ۸/۶۲۵)
کارایی پوشش	۹۸٪ (درصدی از سطح که کاملاً توسط پوشش محافظت شده)
چگالی جریان مورد نیاز (بر اساس محیط)	$i = 32\text{mA.cm}^2(3\text{mA/ft}^2)$

محاسبات:

2 □□ □□□□□□□ 9 4

مساحت سطح $A_s=\pi dL$

که در این رابطه:

A_s: مساحت سطح خط لوله

d: قطر خارجی خط لوله (m)

L: طول خط لوله (m)

$A_s=\pi(0/2190m)(16100m)$

$A_s = 11100m^2$

رابطه جریان مورد نیاز: $I=I\ A_s$

که در این رابطه:

I: جریان مورد نیاز (برای سطح بدون پوشش)

A_s: مساحت سطح (m^2)

$A533 = \ 3m00111\ (3m/A230/0\ (= I$

جریان مورد نیاز (برای سطح پوشش داده شده)

$I=I\ A_s$ %bare

$I = (0/320A/m^2)(11100m^2)(0/02)$

$I = 7/1A$

پاسخ پلاریزاسیون به جریان

در مورد یک پیل خوردگی، پلاریزاسیون چه از نوع کاتدی، آندی یا هر دو، مطلوب است، زیرا جریان خوردگی را کاهش می‌دهد. در یک سامانه حفاظت کاتدی، عواملی که تمایل به دپلاریزه کردن یک سطح فلزی دارند، نیاز به جریان حفاظت کاتدی را افزایش می‌دهند.

معیارها، نگهداری و مدیریت حفاظت کاتدی

در یک الکترولیت پیوسته، پلاریزه کردن کاتد به‌صورت الکترونگاتیو، می‌تواند خوردگی را کم کند. زمانی که کاتدها تا پتانسیلی برابر یا منفی‌تر از پتانسیل منفی‌ترین آند روی سطح فلز تحت حفاظت پلاریزه شوند، خوردگی به‌صورت کامل متوقف می‌شود. عوامل متعددی وجود دارند که بر نرخ خوردگی و متقابلاً بر جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی تأثیر می‌گذارند. عوامل مهم‌تر در جدول ۸–۱۰ آورده شده‌اند.

پتانسیل منفی‌ترین نقطه آندی روی سطح سازه‌ای که قرار است حفاظت شود، معیار صحیح برای دستیابی به حفاظت کاتدی کامل است. متأسفانه این پتانسیل $(E_{a,oc})$ را نمی‌توان به طرز معنی‌داری اندازه‌گیری یا محاسبه نمود. به‌علاوه، اندازه و محل این پتانسیل با زمان و شرایط محیط تغییر می‌کند. معیارهای دیگری برای حفاظت توسعه یافته‌اند که برخی از آنها در جدول ۸–۱۱ آورده شده‌اند.

جدول ۸–۱۰ عوامل درگیری در جریان مورد نیاز برای دستیابی به حفاظت کاتدی

عوامل تأثیرگذار بر جریان مورد نیاز	
مساحت سطح	آلیاژ فلزی درگیر
رطوبت	فعالیت میکروبیولوژی

□□ محیط	حرکت نسبی در سطح مقطع فلز محیط
دما	میزان هوادهی در محیط

جدول ۸-۱۱ انواع معیارهای حفاظت کاتدی

انواع معیارهای حفاظت کاتدی
پتانسیل
تغییر پلاریزاسیون
E log i
جهت جریان سازه/الکترولیت

هریک از این معیارها، مزایا و محدودیت‌هایی دارند که مهندس خوردگی برای رسیدن به سطح مطلوب حفاظت کاتدی، می‌بایست مد نظر قرار دهد. تغییراتی در این معیارها وجود دارد و توافق جهانی، برای مثال در مورد اعتبار یا کارایی آنها جود ندارد. NACE استانداردهایی با توافق جامع برای حفاظت کاتدی سامانه‌های فلزی زیرزمینی یا زیرآبی، سطوح داخلی مخازن ذخیره‌سازی آب، سازه‌های بتنی مسلح روزمینی، سکوهایی دریایی و تجهیزات فراوری تخصصی مختلف، ارائه داده است.
شماره تعدادی از استانداردهای قابل دسترس NACE در جدول ۸-۱۲ آورده شده است. این استانداردها شامل معیارهایی کاربردی برای انواع مشخص سازه و محیط هستند.
استاندارد D۱۰۴ American Water Works Association (AWWA) «حفاظت کاتدی اعمال جریان با کنترل خودکار» معیار ۸۵۰- تا ۱۰۵۰- میلی ولت پتانسیل پلاریزه شده نسبت به الکترود مرجع سولفات مس/مس را تشخیص می‌کند.
مؤسسه نفت آمریکا (API) در ۶۵۱ Recommended Practice «حفاظت کاتدی مخازن ذخیره‌سازی نفت زیرزمینی» به استاندارد ۱۶۹، NACE RP برای حفاظت کاتدی خارجی و استاندارد ۰۵۷۵ NACE RP و ۰۳۸۸ RP برای حفاظت کاتدی داخلی ارجاع داده است. این استاندارد حاوی اطلاعات تکمیلی در این خصوص است.
۱۶۳۲ API Recommended Practice «حفاظت کاتدی مخازن ذخیره‌سازی نفت زیرزمینی و سامانه‌های لوله‌کشی» شامل معیارهایی مشابه با استاندارد ۰۲۸۶ NACE RP است.

جدول ۸-۱۲ استانداردهای NACE International برای اعمال حفاظت کاتدی

کنترل خوردگی خارجی در سامانه‌های لوله‌کشی فلزی زیرزمینی یا زیر آب	□□۰۱۶۹

کنترل خوردگی سکوهای دریایی ثابت مرتبط با تولید نفت	□□۰۱۷۶
حفاظت کاتدی تصفیه‌کننده نورد کاغذ و خمیر	□□۰۱۸۰
کاربرد حفاظت کاتدی برای لوله‌های جداره چاه	□□۰۱۸۶
حفاظت کاتدی بیرونی برای کف مخازن ذخیره‌سازی فلزی روزمینی	□□۰۱۹۳
حفاظت کاتدی با استفاده از آند گالوانیک برای سطوح زیرآبی داخلی مخازن فولادی ذخیره‌سازی آب	□□۰۱۹۶
کنترل خوردگی سامانه مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی توسط حفاظت کاتدی	□□۰۲۸۵
حفاظت کاتدی فولاد تقویت شده در سازه‌های بتنی در معرض هوا	□□۰۲۹۰
حفاظت کاتدی اعمال جریان برای سطوح زیرآبی داخلی مخازن فولادی ذخیره‌سازی آب	□□۰۳۸۸
سامانه‌های حفاظت کاتدی داخلی در مخازن تحت فشار عملیات نفت	□□۰۵۷۵

معیارهای صنعتی و بین‌المللی بسیاری در متون مختلف منتشر شده‌اند. در زیر به برخی از این استانداردها به‌صورت خلاصه پرداخته شده است.

- **نروژی**

طراحی حفاظت کاتدی Det Norske Veritas Industrie Norge AS (DNV) RP B۴۰۱. معیارها:

۱) فولاد کربنی و کم‌آلیاژ در آب دریای هوادهی شده: ۸۰۰ mV- نسبت به مرجع نقره/کلراید نقره

۲) در محیط‌های بی‌هوازی: ۹۰۰ mV- نسبت به مرجع نقره/کلرید نقره.

استاندارد Norsok الزامات مشترک حفاظت کاتدی، MCR-503.

۸۰۰ mV- تا ۱۰۵۰ mV- نسبت به الکترود مرجع آب دریا نقره/کلرید نقره.

- **توسعه نفتی عمان (PDO-65-12)**

حداقل ۸۵۰ mV- پتانسیل خاموش لحظه‌ای نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس[۲۴۵]. از پتانسیل‌های منفی‌تر از ۱۲۰۰ mV CSE- اجتناب کنید (خاموش).

- **شرکت ملی نفت ابوظبی (ADNOC)**

فولاد در خاک:

- پتانسیل خاموش لحظه‌ای ۹۵۰ mV CSE- تا ۱۱۵۰-
- پتانسیل خاموش لحظه‌ای ۹۰۰ mV SSC- تا ۱۱۰۰-

2 [illegible] 9 5

فولاد در بتن:

- پتانسیل خاموش لحظه‌ای mV CSE ۷۰۰- تا ۱۱۰۰-
- پتانسیل خاموش لحظه‌ای mV SSC ۶۵۰- تا ۱۰۵۰-

فولاد آب:

- پتانسیل خاموش لحظه‌ای mV CSE ۸۵۰- تا ۱۰۵۰-
- پتانسیل خاموش لحظه‌ای mV SSC ۸۰۰- تا ۱۰۰۰-

- **بریتانیایی**

حفاظت کاتدی، بخش ۱، آیین‌نامه کاربردهای خشکی و دریایی، بخش 1: 1991، BS 7361، Standards BSI (British Standard Institution). معیارهای این استاندارد به این شرح هستند:

	پتانسیل، □□□ خاک و آب شیرین	پتانسیل، آب دریا نقره/کلرید نقره
آهن و فولاد محیط هوازی	□□ ۸۵۰	□□ ۸۰۰
آهن و فولاد محیط بی‌هوازی	□□ ۹۵۰	□□ ۹۰۰
سرب	□□ ۶۰۰	□□ ۵۵۰
آلومینیم بیشترین حد مجاز	□□ ۹۵۰ □□ ۱۲۰۰	□□ ۹۰۰ □□ ۱۱۵۰
آلیاژهای مس	□□ ۵۰۰ تا ۶۵۰	□□ ۴۵۰ - ۶۹۰۰

معیار برای فولاد در بتن در معرض اتمسفر، اضمحلال پلاریزاسیون حداقل mV ۱۰۰ در ۴ ساعت یا کمتر است.

آیین‌نامه پوشش محافظ سازه‌های آهنی و فولادی در مقابل خوردگی، ۱۹۷۷ - BS ۵۴۹۵

حفاظت سازه‌ها در مقابل صاعقه، ۱۹۸۵: BS۶۶۵۱

- **کانادایی**

استاندارد ۹۶ - Z۶۶۲، CSA، «سامانه‌های خط لوله گاز و نفت» مرجع CGA، روش توصیه شده OCC-۱[296] «کنترل خوردگی خارجی روی سامانه‌های لوله‌کشی فلزی مدفون یا زیرآبی» را مرجع معیارها و روش‌ها قرار داده است. معیارها مشابه روش توصیه شده NACE هستند.

استاندارد CSA-z۱۶۹ در مورد حفاظت کاتدی آلومینیم است.

- **استرالیایی**

مؤسسه استاندارد استرالیا، استاندارد شماره ۲۸۳۲. این استاندارد دارای سه بخش است. بخش ۱ به لوله‌ها، کابل‌ها و کانال‌ها می‌پردازد. ممنوع بخش ۲ سازه‌های مدفون متراکم است و عنوان بخش ۳ سازه‌های زیرآبی ثابت است، معیارهای فهرست شده با NACE RP۰۱۶۹ یکسان هستند.

- **ژاپنی**

2 [illegible] 9 6

دستورالعمل محافظت در برابر خوردگی و تعمیر برای سازه‌های فلزی بندر و لنگرگاه، مؤسسه توسعه مناطق ساحلی خارجی ژاپن، ۱۹۹۸. این سند معیارهای حفاظت کاتدی فولاد در آب دریا را به‌صورت زیر فهرست می‌کند:

۷۷۰ mV– نسبت به الکترود کالومل اشباع

۷۸۰ mV– نسبت به کلرید نقره/نقره

۸۵۰ mV– نسبت به مرجع مس/سولفات مس

این سند، چگالی جریان حفاظتی را به‌صورت زیر فهرست می‌کند:

	مناطق پاک، mA/m^2	مناطق آلوده، mA/m^2
آب دریا	۱۰۰	۱۳۰ تا ۱۵۰
سنگ دریا	۵۰	۶۵ تا ۷۵
لجن دریا	۲۰	۳۰
خاک	۱۰	۱۰

انجمن تخصصی بندر ژاپن، بخش ۱، بحث و معیارهای فناوری تأسیسات بندرگاه. این سند معیارها و جریان مورد نیاز یکسانی را مشابه موارد ذکر شده در بالا فهرست می‌کند.

انجمن لوله‌کشی آب ژاپن، دستورالعمل حفاظت کاتدی برای لوله آب فولادی پوشش داده شده، ۹۵– ۰۵۰– WSP. این سند معیار ۸۵۰ mV– نسبت به پیل مرجع مس/سولفات مس را بیان می‌کند.

همانند تمام استانداردها، استفاده کنند می‌بایست با مراجع قانونی تماس گرفته تا آخرین نسخه را به دست آورد.

- **آلمانی**

DIN 30676

معیارهای حفاظت کاتدی را به‌صورت زیر آورده است:

ماده	دما $°C$ ، یا الکترولیت	پتانسیل حفاظتی میلی‌ولت برحسب □□□
مواد آهنی کم آلیاژ یا آلیاژ نشده	زیر ۴۰	۸۵۰–
مواد آهنی کم آلیاژ یا آلیاژ نشده	بیشتر از ۶۰	۹۵۰–
مواد آهنی کم آلیاژ یا آلیاژ نشده	محیط بی هوازی	۹۵۰–
مواد آهنی کم آلیاژ یا آلیاژ نشده	خاک‌های ماسه‌ای، Ω $\rho > 500$	۷۵۰–
فولاد زنگ نزن با $C_r \geq 16\%$	خاک و آب شیرین و کمتر از ۴۰	۱۰۰–
فولاد زنگ نزن با $C_r \geq 16\%$	خاک و آب شیرین و بیشتر از ۴۰	۳۰۰–
فولاد زنگ نزن با $C_r \geq 16\%$	آب شور	۳۰۰–
مس، آلیاژهای مس- نیکل		۲۰۰–

سرب		-۶۵۰
آلومینیم	آب شیرین	-۸۰۰
آلومینیم	آب شور	-۹۰۰
فولاد در تماس با بتن		-۷۵۰
فولاد گالوانیزه		-۱۲۰۰

معیارهای پتانسیل

بر اساس یک معیار پتانسیل، مقدار انتخاب شده، اندکی از منفی‌ترین پتانسیل آند که ممکن است بر روی سازه موجود باشد، منفی‌تر است. بر همین اساس معیار پتانسیل، همان‌طور که در جدول ۸-۱۳ مشخص شده است، تابعی از فلز و محیط است. به دلیل وابستگی شدید معیارهای پتانسیل به محیط، توافقی کلی در مورد معیارهای پتانسیل برای حفاظت کاتدی فلزات، به‌جز آهن و فولاد در محیط‌های هوازی، وجود ندارد.

جدول ۸-۱۳ معیارهای پتانسیل از منابع حفاظت کاتدی برای بعضی از فلزات و آلیاژها

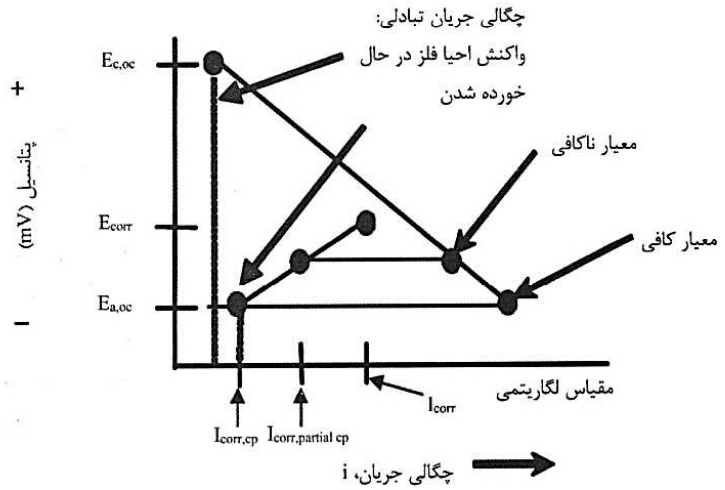
فلز/آلیاژ	معیار پتانسیل □□ نسبت به □□□
آهن یا فولاد در شرایط هوازی	-۸۵۰
آهن یا فولاد در شرایط بی‌هوازی	-۸۵۰ تا -۱۰۲۰
فولاد زنگ نزن سری ۳۰۰	-۶۵۰
سرب	-۶۰۰ تا -۶۵۰
مس	-۵۰۰

معیارهای پتانسیل ذکر شده در جدول ۸-۱۳ نباید بدون در نظر گرفتن شرایط محیط استفاده شوند. منابع دیگر، مقادیری متفاوت و در واقع یک محدوده معیارهای حفاظت را گزارش می‌دهند. برای مثال، منابع ژاپنی پتانسیل حفاظتی را برای سرب mV ۷۱۰- و برای فولاد mV ۱۰۰۰- نسبت به مرجع مس/سولفات مس گزارش می‌کنند. محققان بریتانیایی معتقدند پتانسیل حفاظتی برای آلومینیم می‌تواند بین mV ۹۵۰- و mV ۱۲۰۰- نسبت به CSE تغییر کند. محققان آمریکایی پیشنهاد کرده‌اند که خوردگی ناچیزی روی فولاد در معرض شرایط متفاوت خاک، زمانی رخ می‌دهد که فولاد تا mV ۸۵۰- نسبت به CSE به‌صورت کاتدی پلاریزه شده باشد. اعتبار این معیارهای پتانسیل با افزایش دما کاهش می‌یابد. معمولاً معیار پتانسیل برای جبران افزایش دما، باید منفی‌تر باشد. در صورت وجود فعالیت باکتری بی‌هوازی احیاکننده سولفات (SRB) نیز باید پتانسیل الکترونگاتیوتر باشد.

در کاربرد معیارهای پتانسیل، جدای از سازه، پتانسیل باید به‌صورت مقدار پلاریزه شده تفسیر شود. اندازه‌گیری‌های سازه به الکترولیت برای مقایسه با معیار انتخاب شده باید عاری از خطای افت ولتاژ باشد. این اندازه‌گیری را می‌توان با قرار دادن الکترود مرجع در نزدیکی سازه انجام داد. روش دیگر اندازه‌گیری پتانسیل بلافاصله بعد از قطع جریان حفاظت کاتدی است،

یعنی پس از اینکه افزایش جریان گذرا به دلیل قطع جریان از بین رفت و قبل از اینکه میزان قابل توجهی دپلاریزه شدن رخ دهد.

جایی که پتانسیل‌های آندی پایدار بر روی سازه کمتر از حد معمول الکترونگاتیو هستند، استفاده از معیار پتانسیل می‌تواند سبب حفاظت بیش از حد شود. برعکس، حتی زمانی که سازه تا معیارهای انتخاب شده، پلاریزه شده باشد نیز یک جریان خوردگی باقیمانده، هرچند کوچک می‌تواند وجود داشته باشد. در هریک از این موارد، زمانی که معیار انتخاب شد، برای راحتی بررسی تنها نیاز است تا پتانسیل‌های پلاریزه شده سازه با مقدار معیار مقایسه شوند.



شکل ۸-۲۴ معیار پتانسیل تا حدی مثبت‌تر از پتانسیل مورد نیاز برای حفاظت کامل.

معیارهای پتانسیل NACE International

استاندارد NACE RP۰۱۶۹ معیاری از پتانسیل را به‌عنوان یکی از معیارها برای ارزیابی عملکرد سامانه حفاظت کاتدی ارائه می‌دهد. روش توصیه شده ۱- ۱- ۲- ۲- ۶ این معیار ولتاژ را ارائه می‌دهد: پتانسیل منفی (کاتدی) حداقل ۸۵۰ mV در زمان اعمال حفاظت کاتدی. این پتانسیل نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس، زمانی که الکترود با الکترولیت در تماس است، اندازه‌گیری می‌شود. افت ولتاژها، به‌جز افت ولتاژ در مرز سازه به الکترولیت، باید برای تفسیر صحیح این اندازه‌گیری ولتاژ در نظر گرفته شوند.

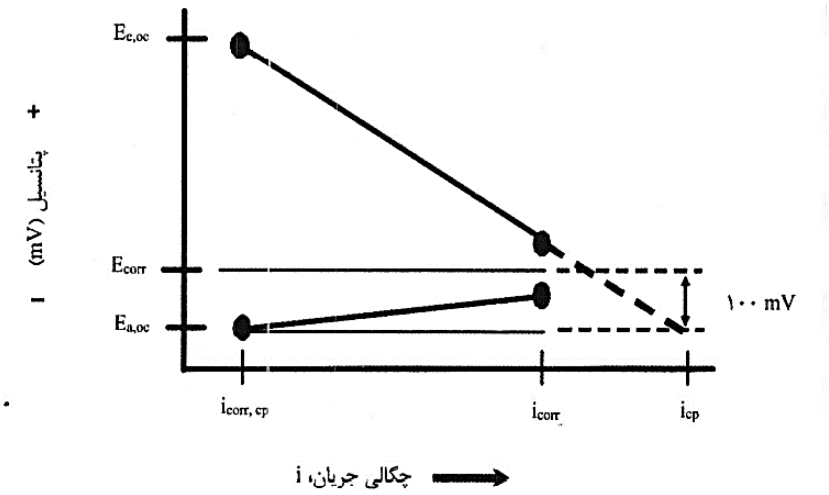
در نظر گرفتن سایر افت ولتاژها می‌تواند شامل این موارد باشد: اندازه‌گیری یا محاسبه افت ولتاژ؛ بررسی تاریخچه عملکرد سامانه حفاظت کاتدی، ارزیابی مشخصات فیزیکی و الکتریکی لوله و محیط و تعیین اینکه شواهد فیزیکی از خوردگی وجود دارد یا خیر.

استاندارد NACE RP۰۲۸۵ معیارهای پتانسیل مشابهی را ارائه می‌دهد.

پتانسیل سازه به خاک اندازه‌گیری شده مجموعی از پتانسیل خوردگی، میزان پلاریزاسیون و افت ولتاژ است. اگر افت ولتاژ از اندازه‌گیری‌ها حذف شود، چه از طریق قطع جریان یا هر روش معتبر دیگری، مقدار باقیمانده بیان‌کننده پتانسیل پلاریزه شده سازه است. پتانسیل پلاریزه شده (در اساس تعریف RP۰۱۶۹) «پتانسیل در فصل مشترک سازه/الکترولیت و مجموع پتانسیل خوردگی و پلاریزاسیون کاتدی است». به بیان دیگر، ازآنجاکه، بند ۱- ۱- ۲- ۲- ۶ از NACE RP۰۱۶۹ الزام می‌کند که «افت ولتاژ غیر از آنچه در مرز سازه به الکترولیت وجود دارد را برای تفسیر صحیح می‌بایست در نظر گرفت». بند ۲- ۱- ۲- ۲- ۶ تعیین «پتانسیل پلاریزه شده» را لازم می‌داند، این دو معیار به سادگی دو بیان متفاوت از یک معیار هستند.

معیارهای تغییر پلاریزاسیون

در حال حاضر یک معیار تغییر پلاریزاسیون، ۳- ۱- ۲- ۲- ۶، برای سازه‌های آهنی مورد قبول است: ۱۰۰ mV- تغییر پتانسیل پلاریزاسیون در اعمال این معیار تصور می‌شود که پیل‌های خوردگی روی سازه، تحت کنترل کاتدی در حال عملکرد هستند؛ بنابراین پتانسیل خوردگی سازه (E_{corr}) در مقدار نزدیک به پتانسیل مدار باز آند $(E_{\text{a,oc}})$ (کمتر از ۱۰۰ mV) است، همان‌طور که در شکل ۸-۲۵ مشخص شده است.



شکل ۸-۲۵ پیل خوردگی تحت کنترل خوردگی (پتانسیل خوردگی نزدیک به پتانسیل مدار باز آند)

اگر پتانسیل خوردگی، ۱۰۰ mV در جهت منفی پلاریزه شود، دستیابی به حفاظت در نظر گرفته می‌شود. برای اعمال این معیار نیاز است تا پتانسیل‌های خوردگی سازه قبل از روشن کردن سامانه حفاظت کاتدی ثبت شوند و سپس پتانسیل‌های پلاریزه شده در همان محل‌ها پس از وارد عمل شدن سامانه اندازه‌گیری شوند. ازآنجاکه، پلاریزاسیون تابعی از زمان است. زمان دادن به سامانه حفاظت کاتدی برای عملکرد، پیش از بررسی پتانسیل پلاریزه شده، می‌تواند به خصوص در مورد سازه‌های بدون پوشش مفید باشد. تمام پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده بعد از روشن شدن سامانه، می‌بایست عاری از افت ولتاژ باشند تا بتوان مقایسه معتبری نسبت به پتانسیل‌های خوردگی انجام داد. چنانچه داده‌های پتانسیل خوردگی خط مبنا پیش از روشن شدن سامانه ثبت نشده باشند، می‌توان سامانه حفاظت کاتدی را خاموش کرد تا به سازه اجازه داده شود تا دپلاریزه شود و پس از آن داده‌های

خط مبنا قابل دستیابی است. یکی از معایب این روش این است که سازه برای مدت زمان طولانی بدون حفاظت می‌ماند. اگر پیل‌های خوردگی سازه تحت کنترل آندی عمل کنند، ممکن است که هیچ‌یک از معیارهای جابه‌جایی پتانسیل معتبر نباشند.

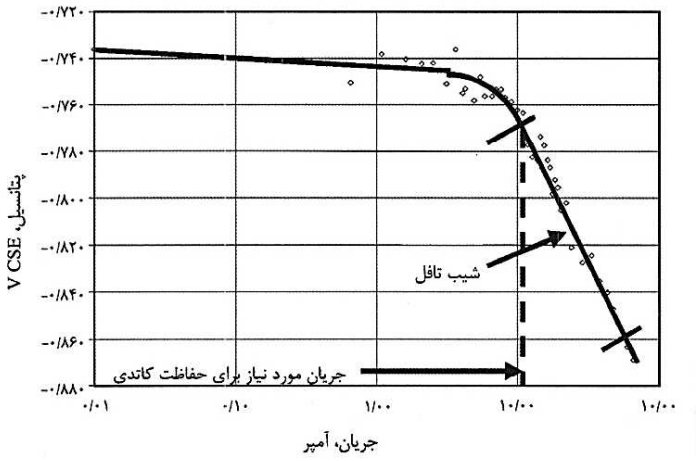
معیار E log i

اگرچه استاندارد NACE RP ۰۱۶۹ و RP۰۲۸۵ معیارهای E log i را برای حفاظت کاتدی به رسمیت نمی‌شناسند، این معیارها در گذشته مؤثر بوده‌اند و ممکن است هنوز در موقعیت‌های خاصی مؤثر باشند که روش‌های مستقیم‌تر قابل اعمال نیستند.

برای کاربرد معیار E log i می‌بایست منحنی پلاریزاسیون کاتدی سازه را رسم نمود. داده‌های لازم برای نمودار را می‌توان از طریق اعمال جریان‌های آزمایشی با اندازه‌های افزایشی و اندازه‌گیری پتانسیل پلاریزه شده سازه در هر مقدار جریان آزمایشی جداگانه، به دست آورد.

در انجام این آزمایش چند عامل مهم هستند. فاصله زمانی بین اندازه‌گیری‌ها می‌بایست تا حد امکان یکسان نگه‌داشته شوند تا انحراف ناشی از تغییر پلاریزاسیون با زمان حذف شود. محدوده جریان آزمایشی می‌بایست تا حداقل ۱۰ برابر جریان تخمین زده شده برای حفاظت افزایش یابد. به‌علاوه، پتانسیل اندازه‌گیری شده باید به دلیل افت ولتاژ اصلاح شود تا پتانسیل پلاریزه شده به دست آید. سپس داده‌ها روی کاغذ نیمه لگاریتمی رسم می‌شوند (شکل ۸-۲۶). این نموداری از داده‌های عملی از آزمایشی روی چاه نفت است.

در محیط‌های تقریباً هوازدایی شده، همانند لوله‌های جداره چاه، معمولاً منحنی پلاریزاسیون، رفتار خطی (تافل) با افزایش جریان آزمایش نشان می‌دهد. معمولاً یک خط مستقیم مماس بر قسمت تافل منحنی رسم می‌شود و به‌سمت محور عمودی امتداد می‌یابد. تفسیرهای متعددی از این امتداد تافل ارائه شده است. معمول‌ترین تفسیر از منحنی E log i این است که جریان در نقطه‌ای که خط مماس بر شیب تافل از داده‌ها جدا می‌شود، به‌عنوان جریان لازم برای دستیابی حفاظت کامل در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۸-۲۷ این جدا شدن در جریان تقریبی ۱۱ آمپر رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که شیب تافل تقریباً V/dec ۰/۱۱۵- و در انطباق مناسبی با مقادیر گزارش شده برای احیای H^+ بر روی آهن است. همان‌طور که گفته شد، جریان تعیین شده برای حفاظت توسط معیار E log i تقریباً ۱۱ آمپر است.

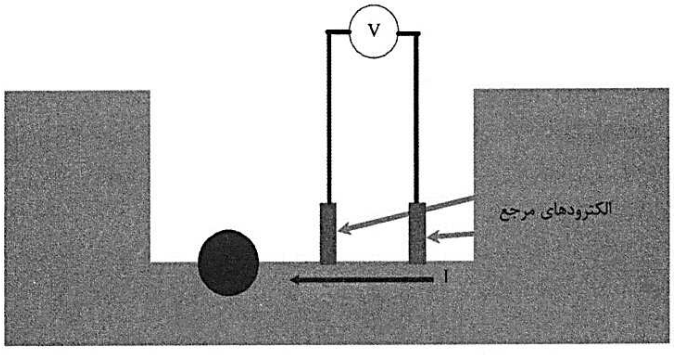


شکل ۸-۲۶ پلاریزاسیون E log i نشان‌دهنده رفتار تافل

اعتبار معیار E log i به دستیابی به رفتار تافل وابسته است. این رفتار اغلب بر روی سازه‌های در معرض محیط هوازدایی شده رخ می‌دهد که سرعت پیل خوردگی توسط پلاریزاسیون اکتیواسیون در واکنش احیا شدن یون‌های هیدروژن کنترل می‌شود. رفتار تافل برای سازه‌های در معرض محیط‌های هوادهی شده مورد انتظار نیست، زیرا در این محیط‌ها سرعت پیل خوردگی توسط پلاریزاسیون غلظتی کنترل می‌شود (نفوذ اکسیژن به مناطق کاتدی که احیا رخ می‌دهد). گاهی اوقات این معیار برای لوله‌های جداره چاه‌های عمیق اعمال می‌شود که در آنها محیط مشخصاً هوازدایی شده است. اگر بتوان نشان داد که این معیار، نتایج موفقیت‌آمیزی داشته است، ممکن است همچنان مورد استفاده قرار بگیرد. در بسیاری از مواردی که معیار E log i برای برقراری تنظیمات جریان اولیه برای حفاظت کاتدی استفاده شده است، معیارهای پتانسیل پلاریزه شده نسبت به مرجع استاندارد و ۱۰۰ mV تغییر نیز بعد از مدت کوتاهی از عملکرد به دست می‌آیند.

معیارهای جهت جریان سازه/الکترولیت

درحالی‌که، استانداردهای NACE، RP۰۱۶۹ و RP۰۲۸۵ معیارهای جهت جریان سازه به الکترولیت را صحیح نمی‌دانند، این معیارها در گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند و تحت شرایط خاص معتبر شناخته می‌شوند. برای معیار جهت جریان الکترولیت به ساره برای حفاظت کاتدی نیاز است که تمام نقاط آندی روی سازه از ابتدا شناسایی شوند. پس از آن، درصورتی‌که بتوان نشان داد که جریان خالص (حفاظتی) از الکترولیت به سازه در تمام نقاط آندی از پیش تعیین شده وجود دارد، می‌توان گفت که حفاظت کاتدی برقرار شده است. جریان با استفاده از یک جریان‌سنج که به دو الکترود متصل است، اندازه‌گیری می‌شود. یکی از این الکترودها باید در نزدیک‌ترین فاصله ممکن از نقطه آندی قرار داده شود، همان‌گونه که در شکل ۸-۲۷ نشان داده شده است.



شکل ۸-۲۷ استفاده از دو الکترود مرجع برای نشان دادن وجود جریان خالص از الکترولیت به سازه در نقاط آندی از پیش تعیین شده

این استاندارد به دلیل مشکل در تعیین تمام نقاط آندی بر روی سازه در حال خورده شدن، دارای مزیت بحث برانگیزی است. علاوه بر این، محل نقاط آندی با زمان تغییر می کند و معمولاً برای مهیا کردن شرایط انجام آزمون صحیح، لازم است حفاری صورت گیرد.

بدون توجه به معیار مورد استفاده، عامل مهم این است که از دستیابی به حفاظت کاتدی کافی، اطمینان حاصل شود (سازه دیگر با نرخ غیرقابل پذیرشی خورده نمی‌شود). در بعضی سازه‌ها، نظیر مخازن ذخیره‌سازی آب و محفظه چگالنده‌ها، می‌توان از قطعه آزمون استفاده کرد تا به‌صورت دوره‌ای، موفقیت نسبی معیار حفاظت کاتدی را ارزیابی کرد. قطعه‌های آزمون مورد استفاده باید از نوع فلز مورد استفاده در سازه باشند.

سایر معیارها

آلومینیم

آلومینیم فلز فعالی است که در غیاب لایه سطحی اکسید محافظ، به‌صورت مستقیم با آب واکنش می‌دهد. تشکیل سریع و ماندگاری لایه اکسید است که به آلومینیم اجازه استفاده در بسیاری از کاربردهای معمول که در معرض محیط‌های آبی قرار دارد را می‌دهد.

معیار حفاظت کاتدی آلومینیم بر اساس NACE RP۰۱۶۹

حداقل ۱۰۰ mV پلاریزاسیون کاتدی بین سطح سازه و الکترود مرجع پایدار که در تماس با الکترولیت است، آلومینیم آمفوتر است، به این معنی که تحت شرایط اسیدی و بازی خورده می‌شود. برای جلوگیری از تجمع قلیا بر روی سطح که می‌تواند نرخ خوردگی را افزایش دهد، پتانسیل پلاریزاسیون نباید ۱۲۰۰ mV- که بین سطح لوله و الکترود مرجع مس/سولفات مس اندازه‌گیری شده، بیشتر شود. به همین ترتیب چنانچه pH محیط بالاتر از ۸ است، بیش از اعمال حفاظت کاتدی می‌بایست موقعیت را ارزیابی کرد. فلزهای آمفوتر را می‌بایست از سایر فلزهای سامانه، عایق و به‌صورت جداگانه حفاظت کرد.

مس

معیار حفاظت کاتدی مس براساس NACE RP۰۱۶۹

- حداقل ۱۰۰ mV پلاریزاسیون کاتدی بین سطح سازه و الکترود مرجع پایدار که در تماس با الکترولیت قرار دارد.
- در مورد لوله‌کشی فلزات غیرهمجنس – ولتاژ منفی برابر با آندی‌ترین فلز، بین سطح تمام لوله‌ها و الکترود مرجع پایدار.

سازه‌های بتنی تقویت شده

استاندارد NACE RP۱۰۰ «حفاظت کاتدی خطوط لوله استوانه‌ای بتنی دارای تنش»، ایجاد یا از بین رفتن ۱۰۰ mV پلاریزاسیون با محدوده حفاظت کاتدی ۱۰۰۰ mV CSE- به منظور جلوگیری از تشکیل هیدروژن و تردی هیدروژنی احتمالی در فولادهای با استحکام بالا از بیان می کند. معیار ۱۰۰ mV پلاریزاسیون برای اکثر سازه‌های بتنی تقویت شده مورد قبول است.

خلاصه معیارها

برای حفاظت کاتدی لازم است پتانسیل‌های خوردگی (E_{corr}) روی سازه در جهت الکترونگاتیو پلاریزه شوند. حفاظت کامل زمانی به دست می‌آید که پتانسیل‌های سازه تا منفی‌ترین پتانسیل آندی مدار باز روی سازه $(E_{a,oc})$، پلاریزه شوند. ازآنجاکه، $E_{a,oc}$ به روش معنی‌داری قابل اندازه‌گیری نیست، ایجا معیارهایی برای حفاظت کاتدی ضروری است. معیارهای متعددی برای حفاظت کاتدی وجود دارند و هریک از آنها دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند. این معیارها در جدول ۸-۱۴ خلاصه شده‌اند.

جدول ۸-۱۴ مزایا و محدودیت‌های معیارهای حفاظت کاتدی

معیار	مزایا	محدودیت‌ها
پتانسیل	سادگی اعمال	فرض می‌کند که پتانسیل انتخاب شده حداقل به اندازه $E_{a,oc}$[1] منفی است. معمولاً به اصلاح افت ولتاژ نیاز دارد.
□□ تغییر پلاریزاسیون	پتانسیل پلاریزه شده را اندازه‌گیری می‌کند (بدون خطای افت ولتاژ)، از حفاظت بیش از حد جلوگیری می‌کند.	نیاز به اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی و پلاریزه شده دارد. احتمالاً برای پیل‌های خوردگی موضعی تحت کنترل آندی معتبر نیست.
E log i□	جریان مورد نیاز تقریباً پایینی می‌دهد.	در محیط‌های هوادهی شده معتبر نیست. به روش آزمون دقیقی نیاز دارد.
جریان سازه به الکترولیت	به‌صورت نظری حفاظت کامل را فراهم می‌آورد.	تعیین و آزمایش محل‌های خوردگی موجود مشکل است. محل‌های آندی ممکن است با زمان تغییر کنند.

(۱) پتانسیل مدار باز آند بر روی سطحی که به‌صورت آزاد در حال خورده شدن است.

ملاحظات افت ولتاژ

تعیین و اصلاح خطای افت ولتاژ

همان‌طور که پیش از این به‌صورت خلاصه بحث شد، اندازه‌گیری پتانسیل برای مقایسه با معیارها، عموماً دارای خطاهای است که توسط افت ولتاژ ایجاد شده‌اند، به خصوص در الکترولیت. علاوه بر این می‌بایست برای زمان اندازه‌گیری و برآورد داده‌های میدانی، بزرگی خطاهای افت ولتاژ را تعیین و به‌صورت صحیح جبران کرد. بر همین اساس تعدادی روش معمول برای تعیین و اصلاح خطای افت ولتاژ وجود دارد:

- الکترود مرجع را نزدیک سطح فلزی فاقد پوشش سازه تحت اندازه‌گیری قرار دهید. برای سازه‌های پوشش‌دار، الکترود مرجع را باید در کنار یکی از عیوب پوشش قرار داد.
- الکترود مرجع را در زمین دور قرار دهید تا حداکثر خطای افت ولتاژ را شامل شود، سپس این خطا را از پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده، زمانی که مرجع نزدیک‌تر به سازه قرار داده شده، کسر کنید.
- جریان را قطع کنید و پتانسیل را پیش از اینکه مقدار قابل توجهی دپلاریزه شدن رخ دهد، اندازه‌گیری کنید (معمولاً پتانسیل «خاموش لحظه‌ای» نامیده می‌شود).
- جریان را به‌صورت مرحله‌ای کاهش دهید و هم‌زمان تغییرات پتانسیل سازه به الکترولیت و شیب ولتاژ سطحی ناشی از آن را اندازه‌گیری کنید. منحنی که از این داده‌ها به وجود می‌آید تا جریان صفر برون‌یابی شده تا خطای کل افت ولتاژ در پتانسیل سازه به الکترولیت در جریان کل شناسایی شود.
- از قطعه‌های آزمون[۲۹۷] و پروب‌ها[۲۹۸] استفاده کنید.

در برخی موقعیت‌ها چنانچه جریان ویا مقاومت کوچک باشند، می‌توان از خطای افت ولتاژ چشم‌پوشی کرد. مقاومت مسیر جریان، تابعی از مساحت سطح مقطع، مقاومت ویژه و طول مسیر است. پیش از چشم‌پوشی از افت ولتاژ، می‌بایست بزرگی آن را برای تأئید ناچیز بودن، محاسبه کرد.

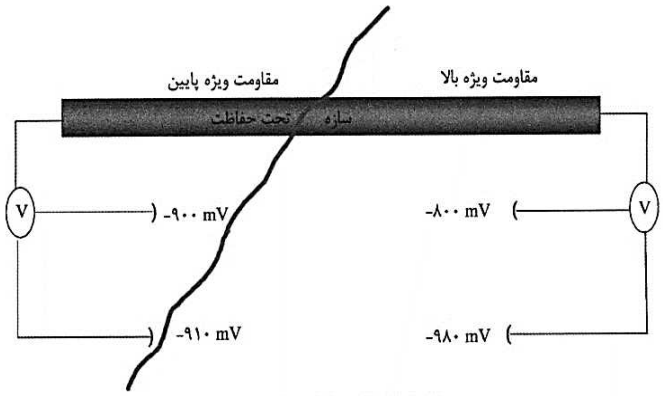
الکترود مرجع نزدیک سازه

قرار دادن الکترود مرجع در نزدیکی سازه خطای افت ولتاژ[۲۹۹] در الکترولیت را متناسب با فاصله الکترود از سطح کاهش می‌دهد. متأسفانه در سازه‌های زیرزمینی، به غیر از نقاط ورود و خروج سازه به خاک، این روش قابل اعمال نیست. همچنین در مورد سازه‌های پوشش داده شده، معمولاً نمی‌توان الکترود را نزدیک‌تر از نقطه‌ای دقیقاً خارج پوشش قرار داد و اکثراً افت ولتاژ در طول پوشش ایجاد می‌شود.

الکترود مرجع در زمین دور

اگر الکترود مرجع در زمین دور از سازه قرار داده شود، پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده در زمان اعمال جریان شامل حداکثر خطای افت ولتاژ می‌شوند. بر همین اساس با تعیین حداکثر مقدار بین الکترود مرجع قرار داده شده در سطح لوله و زمین دور، این مقدار را می‌توان از پتانسیل‌های لوله به خاک خوانده شده بعدی، مادامی که چگالی جریان و مقاومت مسیر تقریباً قابت باشند، کسر کرد. زمانی که شرایط ثابت است این روش احتمالاً منجر به اصلاح زیاد نتایج پتانسیل و در نتیجه احتیاط بیش از حد خواهد شد.

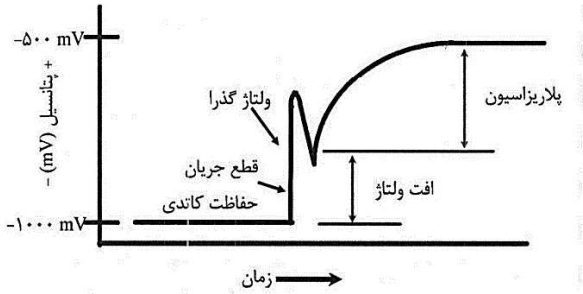
2	9	7
2	9	8
2	9	9



شکل ۸-۲۸ افت ولتاژ در زمین دور

قطع جریان

مؤثرترین روش برای حذف خطاهای افت ولتاژ، صفر کردن جریان در اندازه‌گیری پتانسیل «خاموش لحظه‌ای» و در نتیجه صفر کردن ولتاژ ناشی از آن است. به‌صورت معمول افت ولتاژ برابر با صفر به‌وسیله قطع موقت شار جریان و اندازه‌گیری لحظه‌ای پتانسیل سازه به دست می‌آید. ازآنجاکه، سازه با گذشت زمان دپلاریزه می‌شود، این پتانسیل می‌بایست به‌سرعت خوانده شود. به هر حال ممکن است افزایش ولتاژ ناگهانی ناشی از اثرات خازنی و القایی وابسته به قطع جریان حفاظت کاتدی وجود داشته باشد. پتانسیل «خاموش لحظه‌ای» می‌بایست بعد از حذف افزایش ولتاژ ناگهانی و قبل از اینکه مقدار قابل توجهی دپلاریزه شده در سازه رخ دهد، اندازه‌گیری شود، همان‌گونه که در شکل ۸-۲۹ نشان داده شده است.



شکل ۸-۲۹ حذف افت ولتاژ توسط قطع جریان

ان روش مزیت دیگری دارد که افت ولتاژ در مسیر فلزی را نیز حذف می‌کند. بر روی سازه‌های دارای منابع متعدد جریانی که بر میزان پتانسیل خوانده شده مؤثر هستند، ممکن است قطع تمام منابع یا قطع همه آنها به‌صورت هم‌زمان مشکل باشد. ازآنجاکه، افت ولتاژ در هر منطقه‌ای مجموع تأثیر جریان اعمالی همه منابع است، افت ولتاژ کلی را می‌توان با جمع کردن اثر هریک به‌صورت جداگانه، محاسبه کرد:

$$\mathrm{IR}_x = I_1 R_{x,1} + I_2 R_{x,2} + I_3 R_{x,3} + \cdots + I_n R_{\mathrm{x,n}}$$

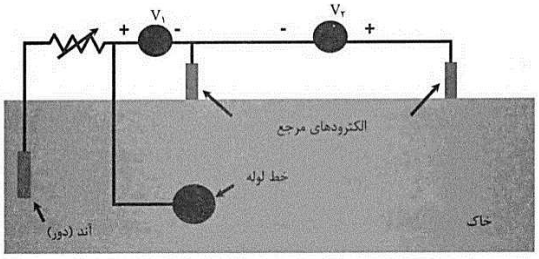
که در این رابطه:

IR_x: افت ولتاژ کل در منطقه X برحسب ولت

I_n: جریان در منبع «n» برحسب آمپر
$R_{x,n}$: تغییر پتانسیل در «X» به‌ازای آمپر در «n»

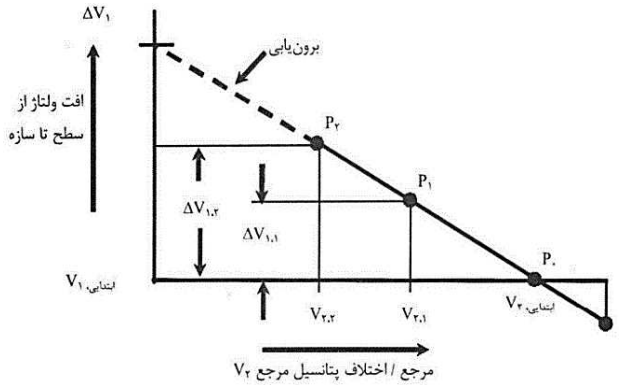
کاهش جریان گام‌به‌گام

زمانی که چندین منبع جریان وجود دارند و عملاً آنها را نمی‌توان به‌صورت هم‌زمان قطع کرد، می‌توان از روش کاهش جریان گام به گام استفاده کرد. همان‌طور که در شکل ۸-۳۰ نشان داده شده است، پتانسیل سازه به الکترولیت و شیب ولتاژ سطحی اندازه‌گیری می‌شوند.



شکل ۸-۳۰ روش جریان گام‌به‌گام برای اصلاح افت ولتاژ

پس از اینکه پتانسیل‌های V_1 و V_2 اندازه‌گیری شدند، جریان کاهش یافته و پتانسیل‌ها مجدداً اندازه‌گیری می‌شوند. تغییر پتانسیل سازه در نتیجه کاهش جریان بر روی محور عمودی و شیب سطح جدید بر روی محور افقی رسم می‌شوند (شکل ۸-۳۱ را ببینید). اتصال این مقادیر نقطه P_1 را به وجود می‌آورد. با ادامه کاهش جریان به I_2، I_3 و...، یک سری نقاط P_1، P_2و.... توسط مقادیر ΔV_2، ΔV_3 و.... ایجاد می‌شود. در نهایت برون‌یابی این مقادیر تا جریان صفر، منجر به تقاطع با جریان روی محور y در مقداری برابر با افت ولتاژ کل در اندازه‌گیری پتانسیل اولیه V_1 می‌شود که به همین طریق می‌توان آن را اصلاح کرد. این روش را باید برای هر یک از منابع جریان انجام داد که در نقطه مورد نظر دارای اثر هستند.



شکل ۸-۳۱ برون‌یابی کاهش جریان مرحله‌ای برای تعیین و اصلاح افت ولتاژ

این روش خطاهای افت ولتاژ فلز را تشخیص نخواهد داد.

استفاده از قطعه‌های آزمون و پروب‌ها

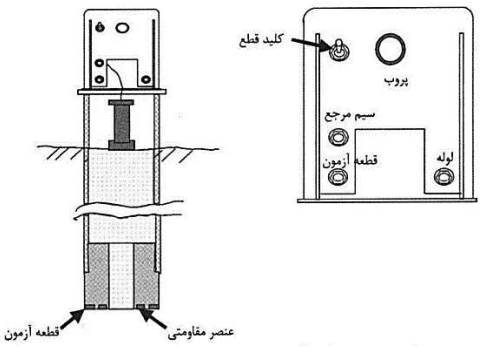
گاهی اوقات از قطعه‌های آزمون برای به حداقل رساندن خطاهای افت ولتاژ استفاده می‌شود. جنس و محیط قرارگیری قطعه‌های آزمون با سازه تحت حفاظت یکسان و به این سازه متصل هستند. در این روش جریان قطعه آزمون کوچک است و افت ولتاژ حداقل می‌شود. قرار دادن قطعه آزمون به‌نحوی که بتوان الکترود مرجع را بسیار نزدیک به آن قرار داد، افت ولتاژ را حتی کمتر نیز می‌کند. در برخی موارد قطعه‌ای آزمون با الکترودهای مرجع دائمی در کنار آنها دفن می‌شوند. نزدیکی الکترود مرجع به نمونه فلزی در قطعه آزمون، امکان اندازه‌گیری پتانسیل با حداقل افت ولتاژ را فراهم می‌کند.

پروب‌ها عناصر مقاومتی هستند که دارای جنس یکسان با سازه هستند. همانند قطعه آزمون، آنها نیز به سازه تحت حفاظت متصل می‌شوند. اگر خوردگی روی پروب رخ دهد، مقاومت الکتریکی آن افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری مقاومت با زمان مشخص خواهد کرد که آیا خوردگی توسط سامانه حفاظت کاتدی کنترل شده است یا خیر؟

اگرچه مبنای این روش جدید نیست، استفاده از قطعه‌های آزمون و پروب‌ها برای حداقل کردن خطای افت ولتاژ اخیراً بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. بااین‌وجود، این روش بر اساس فرض‌های بسیاری است که ممکن است در بسیاری از موارد مناسب یا نامناسب باشند. احتمالاً قابل تأمل‌ترین فرض این است که فلز پروب کاملاً یکسان با فلز درون سازه به حفاظت کاتدی پاسخ خواهد داد.

تعدادی «ایستگاه آزمون» پایش حفاظت کاتدی مخصوص در دسترس هستند. اکثر آنها با یک قطعه آزمون که ساخته می‌شوند از طریق کابل‌کشی ایستگاه آزمون به لوله تحت حفاظت متصل می‌شوند. ایستگاه آزمون به نحوی قرار داده می‌شود که قطعه آزمون در نزدیکی خط لوله در خاکی مشابه پشت‌بند اطراف لوله جای گیرد. یک الکترود مرجع در پایه ایستگاه آزمون یا در خاک نزدیک قطعه آزمون قرار داده می‌شود تا اندازه‌گیری را میسر کند. قطعه آزمون برای یک لحظه از لوله جدا و پتانسیل آن خوانده می‌شود. این روش ضرورتاً اجازه می‌دهد تا پتانسیل قطعه آزمون نسبت به الکترود مرجع و در نتیجه پتانسیل لحظه‌ای خاموش هم ارز سطح لوله، عاری از خطای افت ولتاژ باشند، زیرا هر دوی آنها باید در پتانسیل یکسانی پیش از زمان اندازه‌گیری باشند.

برخی از این ایستگاه‌های آزمون، همراه با پروب خوردگی نوع مقاومتی هستند که در پایه آنها قرار داده شده است. پروب به خط لوله متصل شده و دارای سطح حفاظت کاتدی یکسانی با لوله است. اگر خوردگی در حال وقوع باشد، پروب مقاومتی شرایط را با نشان دادن مقاومت بالاتر با زمان، منعکس خواهد کرد. شکل ۸-۲۳ یکی از انواع ایستگاه آزمون مخصوص که شامل مشخصات ذکر شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۲۳ ایستگاه آزمون مخصوص برای پلیش حفاظت کاتدی

مزایا و محدودیت‌های روش‌های مختلف اصلاح افت ولتاژ در جدول ۸-۱۵ خلاصه شده‌اند.

جدول ۸-۱۵ خلاصه‌ای از روش‌های اصلاح افت ولتاژ

روش	مزایا	محدودیت‌ها
زمین دور	حداکثر خطا را محاسبه می‌کند.	به مقاومت ویژه چگالی جریان ثابت نیاز دارد.
مرجع نزدیک سازه	دقت	ممکن است به حفاری نیاز داشته باشد.
قطع جریان	دقت	مشکلات قطع جریان منابع متعدد. افزایش ناگهانی. دپلاریزه شدن.
کاهش جریان گام‌به‌گام	قابل کاربرد در جایی که منبع متعدد جریان وجود دارد.	زمان‌بر و غیرمعتبر برای خطوط لوله متعدد
قطعه‌های آزمون و پروب	دقت پتانسیل	بررسی رفتار فلز در حفاظت کاتدی

عوامل تأثیرگذار بر طراحی حفاظت کاتدی

مقدمه

این بخش به عوامل فراوانی می‌پردازد که طراحی سامانه‌های حفاظت کاتدی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. پیش از اینکه طراحی حفاظت کاتدی آغاز شود، باید به تمام عوامل احتمالی محیطی و سازه‌ای توجه شود که طراحی را تحت تأثیر قرار خواهند داد.

عوامل محیطی

رطوبت

بدون رطوبت هیچ‌یک از واکنش‌های الکتروشیمیایی خوردگی و حفاظت کاتدی نمی‌توانند رخ دهند. برای مثال، آب کاملاً منجمد جلوی مهاجرت یون‌ها را می‌گیرد و یخ مقاومت ویژه بسیار بالایی دارد. خاک کاملاً خشک که در موارد نادری دیده می‌شود، بار الکتریکی را عبور نمی‌دهد. رطوبت نه تنها می‌تواند دارای ترکیبات شیمیایی باشد که یون‌های لازم برای انتقال بار را فراهم می‌کند، بلکه می‌تواند شامل اکسیژن محلول باشد که پلاریزاسیون را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نیز سایر گازها مانند دی اکسید کربن و دی اکسید گوگرد که pH را کاهش می‌دهند.

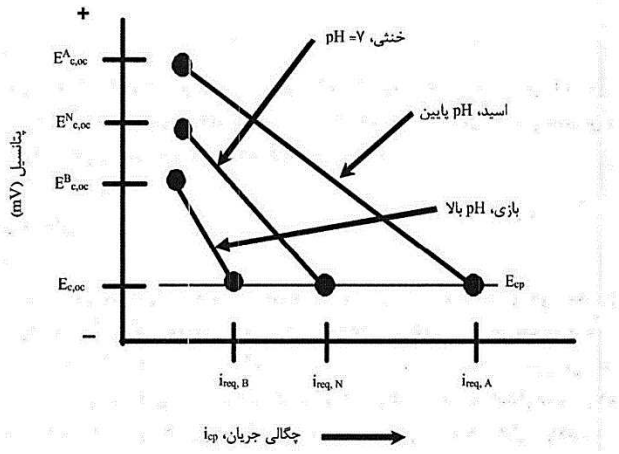
بافت خاک

بافت خاک (اندازه ذرات) از این نظر مهم است که بر سهولت نفوذ مایعات و گازها در خاک اثر می‌گذارد. تفاوت‌های بافت خاک می‌تواند پیل‌های مختلف و خورنده را به وجود آورد. این مناطق که کمبود اکسیژن حل شده دارند، نسبت به مناطق هوادهی شده، آند می‌شوند. خاک رس و لجن شرایط بی هوازی را فراهم می‌آورند که برای توسعه گونه‌های میکروبیولوژیک خاصی که خوردگی پیش رونده تولید می‌کنند، مناسب هستند.

pH

به‌صورت کلی جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی در اسیدها از بازها و محیط‌های خنثی بیشتر است. دو پدیده این افزایش را توضیح می‌دهند: ۱)تغییر پتانسیل مدار باز کاتد در جهت مثبت

۲) کم شدن شیب منحنی پلاریزاسیون کاتدی سازه که در شکل ۸-۳۳ نشان داده شده است. کم شدن شیب منحنی پلاریزاسیون به این منحنی است که جریان بیشتری برای تغییر پتانسیل پلاریزاسیون سطح در یک مقدار ثابت نیاز است.



شکل ۸-۳۳ اثر pH محیط بر چگالی جریان مورد نیاز برای حفاظت

با افزایش اسیدی بودن، شیب پلاریزاسیون کاتدی سازه به دلیل افزایش غلظت یون‌های هیدروژن قابل احیا (H^+) کم می‌شود. رابطه pH با غلظت یون‌های هیدروژن به این صورت است:

$$H^+ + e^- \rightarrow H$$

$$\mathrm{pH}=\log\frac{1}{[H^+]}$$

هرچه غلظت یون‌های هیدروژن $[H^+]$ بیشتر باشد، pH کمتر می‌شود.

جدول ۸-۱۶ غلظت یون‌های هیدروژن و هیدروکسل به‌صورت تابعی از pH

pH	H^+	OH^-
۰	10^0	10^{-14}
۲	10^{-2}	10^{-12}
۴	10^{-4}	10^{-10}
۶	10^{-6}	10^{-8}
۸	10^{-8}	10^{-6}
۱۰	10^{-10}	10^{-4}
۱۲	10^{-12}	10^{-2}
۱۴	10^{-14}	10^0

pH یک الکترولیت (خاک یا آب) به‌ندرت خنثی است. این به دلیل حضور گونه‌های مختلف یونی در الکترولیت در نتیجه هیدرولیز نمک‌ها است (کربنات سدیم، سولفات آمونیم و غیره). بسته به ماهیت نمک، pH می‌تواند در جهت قلیایی یا اسیدی تغییر کند. برای مثال سولفات آمونیم (نمک اسید) که به‌عنوان کود شیمیایی استفاده می‌شود، تمایل دارد تا pH خاک را کاهش می‌دهد. بتن که pH آن تقریباً ۱۳ است، اثر بازدارندگی بر خوردگی فولاد دارد و جریان مورد نیاز را کاهش می‌دهد.

دما

افزایش دما به دلیل افزایش نرخ نفوذ گونه‌های احیا شونده به مناطق کاتدی و کاهش پلاریزاسیون غلظتی، اثر دپلاریزه کننده دارد. به همین ترتیب، نرخ واکنش احیا افزایش می‌یابد، بنابراین سطح پلاریزاسیون کاهش و جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی افزایش می‌یابد (شکل ۸-۳۴).

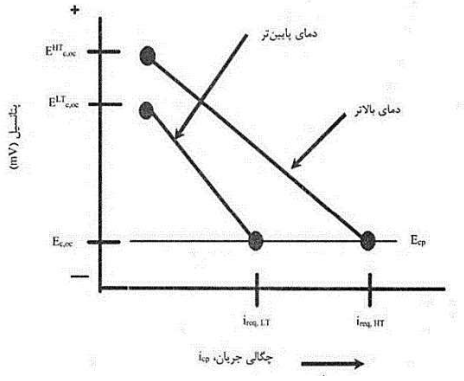
علاوه بر این افزایش دما یونیزاسیون را افزایش خواهد داد. با افزایش یونیزاسیون، هدایت الکتریکی الکترولیت افزایش می‌یابد که در نتیجه جریان خوردگی و میزان جریان حفاظت کاتدی مورد نیاز برای حفاظت کافی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این به دلیل افزایش سرعت واکنش‌های الکتروشیمیایی، پلاریزاسیون اکتیواسیون کاهش می‌یابد.

میزان اکسیژن

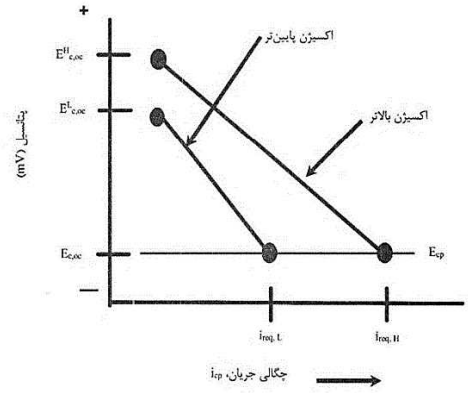
اکسیژن و سایر اکسید کننده‌ها جریان مورد نیاز را افزایش می‌دهند که این در نتیجه کم شدن شیب پلاریزاسیون کاتدی است. برای مثال اکسیژن در واکنش احیای کاتدی شرکت می کند:

$$۲H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$$

و به این وسیله پلاریزاسیون را کاهش می‌دهد. این اثر در شکل ۸-۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۸-۳۴ تأثیر دما بر جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی



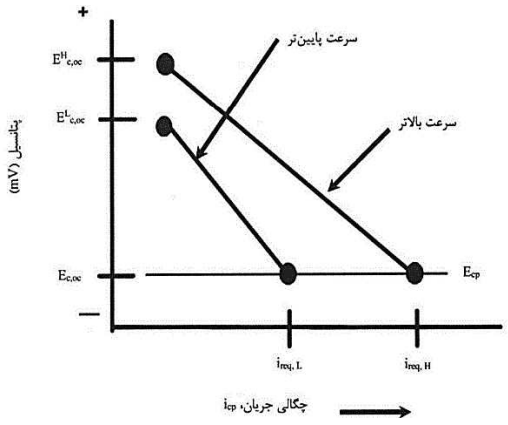
شکل ۸-۳۵ اثر اکسیژن بر جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی

به همین ترتیب، سازه‌ها در خاک‌هایی که به‌خوبی هوادهی شده‌اند، مانند شن و ماسه، به جریان حفاظت کاتدی بیشتری از سازه‌هایی که توسط خاک‌های نسبتاً هوازدایی شده احاطه شده‌اند، مانند خاک رس، احتیاج دارند. انحلال‌پذیری اکسیژن در آب سرد از آب گرم بیشتر است؛ بنابراین محیط‌های آب سرد دارای تماس با هوا، جریان مورد نیاز بیشتری از آب‌های گرم دارند.

حرکت

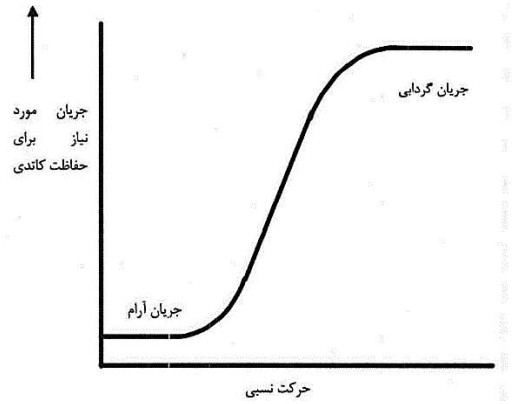
افزایش حرکت نسبی میان الکترولیت و سازه سبب افزایش جریان مورد نیاز می‌شود. این امر عمدتاً به دلیل افزایش میزان دسترسی به گونه‌های قابل احیا در سطح سازه و افزایش نرخ واکنش احیای ناشی از آن است. این اثر که در شکل ۸-۳۶ نشان

داده شده است، در سازه‌هایی نظیر پروانه کشتی‌ها، اسکله‌ها، سازه‌هایی دریایی در معرض جریان آب دریا یا جزر و مد و در سطوح داخلی محفظه‌های آب چگالنده‌ها بروز می‌یابد.



شکل ۸-۳۶ تأثیر حرکت نسبی بر جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی

به هر حال جریان مورد نیاز ضرورتاً تابعی خطی از سرعت سیال نیست. در سیال با جریان آرام برخلاف جریان گردابی، جریان مورد نیاز کمتر است (شکل ۸-۳۷).



شکل ۸-۳۷ اثر جریان آرام و گردابی بر جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی

برای مثال، یک کشتی در حرکت به جریان حفاظت کاتدی بیشتری از یک کشتی در حال سکون نیاز دارد؛ به همین ترتیب پاشنه کشتی به جریان بیشتری از سینه کشتی نیاز دارد.

فعالیت‌های میکروبیولوژیک

فعالیت میکروبیولوژیک می‌تواند نرخ خوردگی فلز را به چندین روش شامل خوردگی در اثر محصولات جانبی باکتری‌ها، تشکیل پیل‌های اختلاف هوادهی و دپلاریزه کردن افزایش دهد. در مورد باکتری‌های احیاکننده سولفات، دو نظریه شامل: دپلاریزه کردن با برداشتن هیدروژن محصول واکنش و تولید سولفید آهن و واکنش‌های دربرگیرنده فسفر وجود دارد. دپلاریزه

کردن شامل برداشت هیدروژن از کاتد می‌شود که سرعت واکنش آندی را افزایش می‌دهد. تشکیل سولفید آهن، یون‌های آهن را از بین می‌برد که این نیز آند را دپلاریزه می‌کنند.

واکنش‌های داده شده در جدول ۸-۱۷ این مطلب را نشان می‌دهد:

جدول ۸-۱۷ رابطه واکنش‌های مرتبط با SRB

یونیزه شدن آب	$8H_2O \rightarrow 8OH^- + 8OH^-$
خوردگی آهن	$4Fe \rightarrow 4Fe^{++} + 8e^-$ (آند)
تشکیل هیدروژن	$8H^+ + 8e^- \rightarrow 8H$ (کاتد) جذب سطحی شده
برداشت هیدروژن	$8H^+ + 8e^- \rightarrow 8H$ (دپلاریزه شده)
واکنش‌های ثانویه	$Fe^{++} + S^- \rightarrow FeS \downarrow$ (آند)
	$3Fe^{++} + 6(OH)^- \rightarrow 3Fe(OH)_2$ (آند)

به دلیل اثر دپلاریزه کننده باکتری‌ها، معیارهای معمول حفاظت کاتدی اعمال نمی‌شوند. تحقیقات نشان داده است که در حضور باکتری‌ها، فولاد می‌بایست تا پتانسیل حداقل ۹۵۰ mV CSE- پلاریزه شود.

سازه

سازه‌ها اثر مهمی بر حفاظت کاتدی دارند. برخی از مهم‌ترین ملاحظات به این شرح‌اند:

- مواد مورد استفاده در ساخت
- روش تولید
- هندسه سازه و همسایه‌های آن
- پوشش محافظی که ممکن است وجود داشته باشد.
- عایق سازی الکتریکی از سازه‌های دیگر یا در خود سازه
- الزامات اتصال الکتریکی به زمین

مواد مورد استفاده در ساخت

موقعیت الکتروشیمیایی

اتصالات دو فلزی منبع مشخصی از اختلاف انرژی هستند. این اختلاف پتانسیل موجب خوردگی گالوانیک می‌شود. پتانسیل الکتریکی فلزات مختلف که در ساخت استفاده شده‌اند باید از طریق اعمال حفاظت کاتدی برابر شوند. اجزایی که کمترین فعالیت را دارند باید تا پتانسیل فعال‌ترین اجزا پلاریزه شوند. استفاده از بست‌های فولادی برای اتصال ورق‌های بزرگ مسی نامطلوب است، زیرا در این حالت نیاز است که تمامی سطح مس تا پتانسیلی برابر پتانسیل بست‌های کوچک فولادی پلاریزه شوند. تفاوت پتانسیل‌ها و در برخی موارد موقعیت‌های نسبی فعالیت فلزی می‌توانند با محیط تغییر کنند.

3 W.P. Iverson, ''Mechanism of Anaerobic Corrosion of Steel by Sulfate Reducing Bacteria'', Materials Performance, March

برخی از آلیاژها (به‌عنوان مثال فولادی‌های زنگ نزن) می‌توانند پتانسیل‌هایی را نشان دهند که بسته به شیمی و عوامل دیگر محیط، فعال[302] یا غیرفعال[303] هستند. به‌صورت کلی فولادهای زنگ نزن برای حفظ غیرفعال بودن به حضور اکسیژن وابسته هستند. جدولی از فلزها و آلیاژهای رایج در آب دریا به ترتیب فعالیت گالوانیک آنها از کاتدی به آندی در جدول ۸–۱۸ نشان داده شده است.

جدول ۸–۱۸ سری‌های گالوانیک فلزها و آلیاژها در آب دریا در $25°C$[304]

فلز یا آلیاژ	پتانسیل ([illegible]) ([illegible])
آند منیزیم (خلوص بالا)	‎-۱/۶۵
آند استاندارد [illegible] ۳ [illegible] ۶ [illegible] (اختصاصی)	‎-۱/۵۰
آند آلومینیم (اختصاصی)	‎-۱/۱۰
آند روی ([illegible] ۱۸۰۰۱ – [illegible])	‎-۱/۰۳
آلیاژهای آلومینیم	‎-۰/۶۵ تا ‎-۰/۹۰
چدن ۲٪ نیکل	‎-۰/۶۸
ادامه جدول ۸–۱۸	
فلز یا آلیاژ	پتانسیل ([illegible]) ([illegible])
چدن	‎-۰/۶۱
فولاد کربنی	‎-۰/۶۱
فولاد کم آلیاژ استحکام بالا	‎-۰/۶۰
فولاد زنگ نزن ۴۳۰ (فعال)	‎-۰/۵۷
فولاد زنگ نزن ۳۰۴ (فعال)	‎-۰/۵۳
فولاد زنگ نزن ۴۱۰	‎-۰/۵۲
[illegible] نوع ۱	‎-۰/۴۷
برنز	‎-۰/۴۰
برنج زرد	‎-۰/۳۶
مس	‎-۰/۳۶
برنج نیروی دریایی[305]	‎-۰/۳۰ (11/9°C)

302 [illegible]
303 [illegible]
304 [illegible]
305 [illegible]

فصل هشتم : طراحی حفاظت کاتدی | 397

برنج آلومینیم	-۰/۲۹
کاپرونیکل ۱۰ – ۹۰، Fe ۱/۴)	-۰/۲۹ (۱۷°C)
کاپرونیکل ۱۰ – ۹۰، Fe ۰/۸۲)	-۰/۲۸
کاپرونیکل ۳۰ – ۷۰، Fe ۰/۴۵)	-۰/۲۵
کاپرونیکل ۳۰ – ۷۰، Fe ۰/۵۱)	-۰/۲۴ (۱۷°C)
کاپرونیکل ۱۰ – ۹۰، Fe ۱/۴)	-۰/۲۴ (۶°C)
کاپرونیکل ۱۰ – ۹۰، Fe ۱/۵)	-۰/۲۲ (۲۴°C)
کاپرونیکل ۳۰ – ۷۰، Fe ۰/۵۱)	۰/۲۲ (۶°C)
فولاد زنگ نزن ۴۳۰ (پسیو)	-۰/۲۲
کاپرونیکل[306] ۳۰ – ۷۰، Fe ۰/۵۱)	-۰/۲۰ (۲۶/۷°C)
نیکل	-۰/۲۰
فلز یا آلیاژ	پتانسیل (V) Ag-AgCl ref)
فولاد زنگ نزن ۳۱۶ (فعال)	-۰/۱۸
اینکونل[307]	-۰/۱۷
فولاد زنگ نزن ۴۱۰ (پسیو)	-۰/۱۵
نقره	-۰/۱۳
تیتانیم (غیر فعال)	-۰/۰
فولاد زنگ نزن ۳۰۴ (پسیو)	-۰/۰۸
هستلوی C[308]	-۰/۰۸
مونل[309]	-۰/۰۸
فولاد زنگ نزن ۳۱۶ (پسیو)	-۰/۰۶
گرافیت	+۰/۲۵
پلاتین	+۰/۲۶

حساسیت به خسارت هیدروژنی

هیدروژن اتمی تولید شده روی سطح فلز به‌وسیله حفاظت کاتدی یا خوردگی می‌تواند با فلزهای مشخصی واکنش دهد تا تشکیل هیبریدهای فلزی دهد یا می‌تواند درون فلز نفوذ کند. این اتم هیدروژن می‌تواند به چندین روش سبب ایجاد خسارت

---

[306] Cupronickel

[307] Inconel

[308] Hastelloy

[309] Monel

در فلزات شود. این روش‌ها شامل تاول‌زنی، تشکیل ذرات ترد، تردی با تسهیل ترک‌برداری خوردگی تنشی است. تردی فلز می‌تواند سبب تشکیل ترک شود که با رشد آن سازه دچار شکست می‌شود. مثال‌هایی از فلزهایی که به‌صورت نامطلوبی تحت تأثیر نفوذ هیدروژن قرار می‌گیرند به این شرح هستند:

- فولاد کربنی با استحکام کششی نهایی بیشتر از ۲۰۰ ksi (۱۳۸۰ MPa)
- فولاد کم آلیاژ (برای مثال ۴۱۳۰، ۴۳۴۰، D۶AC) بالای ۲۰۰ ksi (۱۳۸۰ MPa)
- فولاد زنگ نزن مارتنزیتی
- فولاد زنگ نزن رسوب سختی شده (شرایط عملیات حرارتی خاص)
- برخی از آلیاژهای آلومینیم سری ۲۰۰۰
- برخی از آلیاژهای آلومینیم سری ۷۰۰۰ (به جز عملیات حرارتی T۷۳)
- برخی از آلیاژهای آلومینیم ریخته‌گری
- برخی از آلیاژهای مس تحت شرایط سختی خاص
- آلیاژهای منیزیم
- تیتانیم (تشکیل ذرات هیبرید تیتانیم)

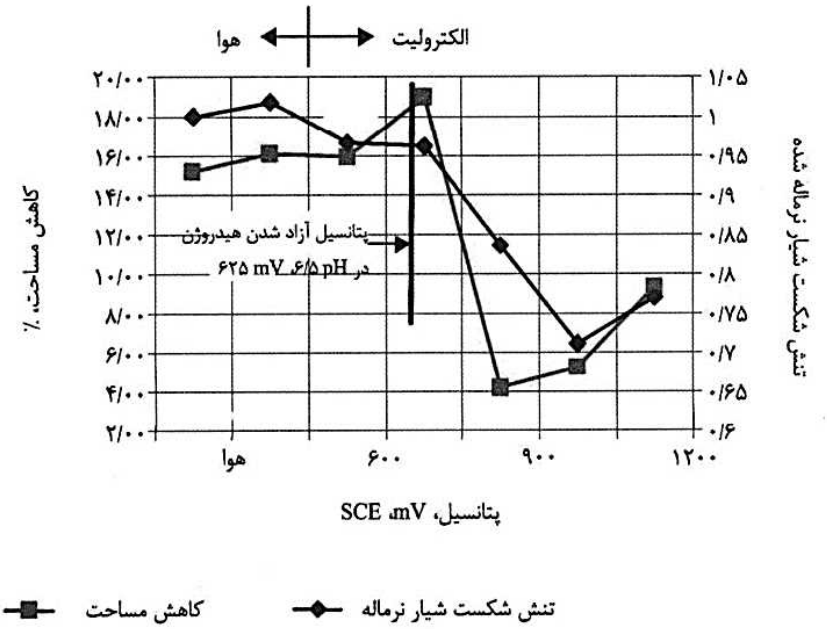
شکل ۸–۳۸ اثر هیدروژن بر قابلیت چکش‌خواری فولاد را نشان می‌دهد. این آزمایش‌ها بر روی کابل‌های آویزش پل با استحکام کششی بالا در آب با pH ۶/۵ انجام شده است. نمونه‌های آزمایش برای ایجاد متمرکز کننده تنش، شیاردار شدند. نمودار درصد کاهش در مساحت و تنش شکست شیار نرماله شده برحسب پتانسیل را نشان می‌دهد. تنش شکست نرماله شده، تنش شکست در هوا تقسیم بر تنش شکست تحت شرایط آزمایش است. پس از اینکه نمونه‌ها برای خارج کردن هیدروژن باقیمانده در فلز، در هوا حرارت داده شدند، در شرایط خوردگی آزاد (E_{corr}) و همچنین با پتانسیل کنترل شده کمتر از E_{corr} غوطه‌ور شدند. بنابراین استحکام و چکش خواری فولاد زمانی که هیدروژن نفوذ نکرده است، به دست می‌آید. کاهش شدیدی در قابلیت چکش‌خواری در پتانسیل‌های فعال‌تر از پتانسیل آزاد شدن هیدروژن بروز می‌کند.

برخی شرایط تنش داخلی و کار سرد می‌توانند فلزی را که به‌صورت عادی مقاوم است، به خسارت هیدروژنی حساس کنند، مانند فولاد کربنی با استحکام پایین. برای اطلاعات بیشتر به Metals Handbook جلد ۱۳ خوردگی، ویرایش ۹و ASM International، Materials Park، OH، ۱۹۸۷ مراجعه کنید.جلوگیری از تردی هیدرونی به نگه داشتن پتانسیل کمتر از پتانسیل آزاد شدن هیدروژن بستگی دارد که این نیز به pH وابسته است. رابطه کلی برای پتانسیل واکنش $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ توسط پوربه[۳] ارائه شده است:

$$E_0 = 0/0591\text{pH}$$

که در این رابطه E_0 پتانسیل آزاد شدن هیدروژن (در مقیاس هیدروژن) برحسب ولت است.

3 [illegible]



شکل ۸-۳۸ درصد کاهش در مساحت و تنش شکست شیار نرماله شده برحسب پتانسیل

به‌صورت مشخص، هرچه pH بیشتر باشد، پتانسیل منفی‌تری برای تولید هیدروژن نیاز است. برای مثال، در خاک یا آب با pH خنثی ۷، $E_0 = -0.414$ ولت (SHE) یا ۰/۷۳۰ ولت (CSE) است. در محیطی با pH ۱۲، برای مثال در بتن، هیدروژن در $E_0 = -0/709$ ولت (SHE) یا ۱/۰۲۵- ولت (CSE) تولید می‌شود.

پتانسیل پلاریزه شده برای آلومینیم باید مثبت تر از ۱۲۰۰ mV (CSE) نگه داشته شود تا از خوردگی قلیایی جلوگیری شود (به بخش فلزهای آمفوتر در زیر مراجعه شود)؛ به هر حال برای آلیاژهای حساس، پتانسیل محدودکننده ممکن است مثبت‌تر باشد. پتانسیل محدود کننده برای تیتانیم ۷۰۰ mV- (نقره - کلرید نقره) است تا از تشکیل هیدرید جلوگیری کند. سطوح حفاظت بیش از حد در بعضی از مدارک معیارهای حفاظت کاتدی بحث می‌شوند و ممکن است تا حدودی با این پتانسیل‌ها متفاوت باشند. برای بتن پیش فشرده، از پتانسیل‌های پلاریزه شده منفی‌تر از ۱۰۰۰ mV (CSE) باید اجتناب شود. در طراحی سامانه‌های حفاظت کاتدی باید مواظب موادی بود که به تردی هیدروژنی یا هیدرید شدن حساس هستند. این موارد برای محدود کردن پتانسیل سازه به الکترولیت به پایین‌تر از پتانسیل آزاد شدن هیدروژن استفاده می‌شوند.

فلزهای آمفوتر

بعضی از فلزها (به خصوص آلومینیم و سرب) مستعد خوردگی در محیط‌های اسیدی و قلیایی هستند که این امر می‌تواند کارایی حفاظت کاتدی را تحت تأثیر قرار دهد. حفاظت بیش از حد در فلزهای آمفوتر، pH در فصل مشترک فلز/الکترولیت را افزایش خواهد داد. در pH بالا اکسیدهای محافظ تشکیل شده روی این فلزها حل شده و فلز می‌تواند مستقیماً با آب واکنش دهد که سبب خوردگی سریع می‌شود. فلز روی در شرایط قلیایی که pH بزرگ‌تر از ۱۲/۵ است، خورده می‌شود. آلومینیم در تمام شرایط قلیایی خورده نمی‌شود. نرخ خوردگی آلیاژ آلومینیم ۱۱۰۰ در هیدروکسید سدیم و کربنات سدیم در pH بیشتر

از ۹ به سرعت افزایش می‌یابد. جایی که فلزهای آمفوتر حضور دارند باید از پتانسیل‌هایی که pH بالا ایجاد می‌کنند، اجتناب کرد. روش توصیه شده NACE RP ۰۱۶۹ - ۹۶ توصیه می‌کنند که پتانسیل آلومینیم تحت حفاظت کاتدی از ۱۲۰۰ mV- (CSE) بیشتر نشود. شکل ۸-۳۹ اثر pH بر خوردگی روی را نشان می‌دهد.

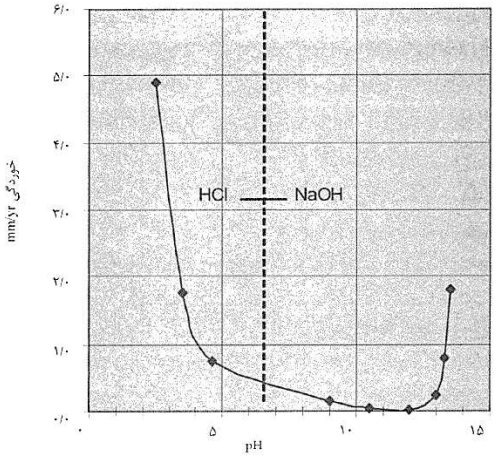
خلاصه‌ای از اثر مواد بر طراحی حفاظت کاتدی

مواد مورد استفاده در ساخت نقشی اساسی در طراحی حفاظت کاتدی ایفا می‌کنند. احتیاط‌های خاص ذکر شده اثری مستقیم بر موفقیت یا ایمنی حفاظت کاتدی بر یک سازه مشخص یا بخشی از آن دارند.

تأثیر ترکیبی مواد و محیط

ترک‌برداری خوردگی تنشی

ترک‌برداری خوردگی تنشی (SCC)، ترک‌برداری یک فلز تنش کششی (تنش اعمالی خارجی یا تنش باقیمانده داخلی) در حضور محیطی خوردنده است. محیط خورنده‌ای که سبب SCC می‌شود، معمولاً خاص است. مثال‌هایی از برخی از فلزهای حساس به SCC در جدول ۸-۱۹ آورده شده است.



شکل ۸-۳۹ اثر pH بر خوردگی روی[۳۱۱]

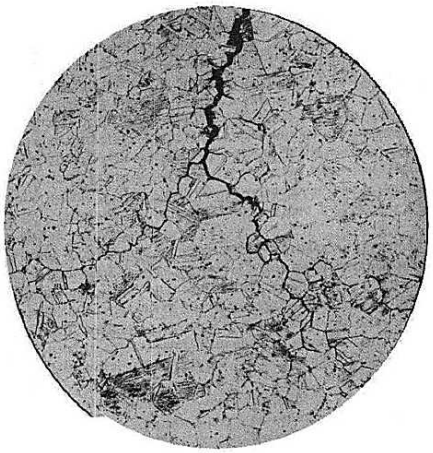
جدول ۸-۱۹ فلزهای حساس به SCC

فولاد کربنی	کربنات‌های آبی، نیترات‌ها، هیدروکسیدهای آبی
مس	آمین‌ها، آمونیاک، نیترات‌ها و نیتریت‌ها، بخار آب

3 [illegible]

آلومینیم	کلریدها
فولادهای زنگ نزن سری ۲۰۰ و ۳۰۰	کلریدها، هیدروکسیدها، سولفیدها همراه با کلریدها
فولادهای زنگ نزن سری ۴۰۰ (مارتنزیتی)	هیدروکسیدها، نیتریت‌ها، سولفیدها همراه با کلریدها
تیتانیم	محلول‌های کلردار

ترک از یک نقص روی سطح فلز مانند حفره خوردگی، آخال درون فلز یا سایر افزایش دهنده‌های تنش آغاز می‌شود. شکل ۸-۴۰ ترک‌برداری خوردگی تنشی شاخه‌دار معمولی را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۴۰ ترک برداری خوردگی تنشی برنج

حفاظت کاتدی، به دلیل توقف فرایند خوردگی، ترک‌برداری خوردگی تنشی را در بسیاری از محیط‌ها به‌صورت کلی کاهش داده یا حذف می‌کند، هرچند فولاد کربنی به SCC در هیدروکسیدها و کربنات‌ها حساس است. دو نوع متفاوت از خوردگی تنشی خطوط لوله در خاک شناسایی شده است. در مقادیر pH بین ۶/۵ و ۷/۵، SCC ترادانه‌ای[1][2]وسیله تشکیل هیدروژن ایجاد می‌شود. در مقادیر pH بین ۸ و ۱۰/۵، SCC مرزدانه‌ای می‌تواند رخ دهد. در مقادیر pH بالاتر، تولید هیدروژن متوقف شده یا کاهش می‌یابد و فولاد شروع به تشکیل یک لایه نازک محافظ می‌کند، اما تخریب این لایه نازک محافظ[1][3]به دنبال آن خوردگی فولاد در معرض قرار گرفته، باعث رشد ترک می‌شود. ترک‌برداری خوردگی تنشی به شرایط زیر وابسته است.

- کربنات‌ها و بی کربنات‌ها در فصل مشترک فلز که از واکنش دی اکسید کربن موجود در خاک با هیدروکسید تشکیل شده از واکنش حفاظت کاتدی به وجود می‌آیند. این شرایط موضعی در فصل مشترک فلز – الکترولیت است و به شیمی الکترولیت وابسته نیست.

1 2
3 1 3

- محدوده پتانسیلی در سطح فلز بین ۵۲۵ mV- و ۷۲۵ mV- (CSE). محدوده پتانسیل ثابت نیست و با افزایش pH، پتانسیل کاهش یافته (اندکی منفی‌تر می‌شود) و دامنه کوچک‌تر می‌شود.
- حفره‌های پوشش و مناطق با پوشش جدا شده روی لوله
- دمای سطح لوله بین $22°C$ و $90°C$ (۷۲°F و $195°F$)
- سطح تنشی بیشتر از ۶۰ درصد تنش تسلیم حداقلی مشخص[۳۱۴]
- ساختار متالورژیک و شرایط سطحی نیز می توانند بر وقوع SCC مؤثر باشند.
- وجود پوسته‌های نورد سطح لوله، احتمال SCC را افزایش می‌دهد.

استفاده مؤثر از حفاظت کاتدی وقوع خوردگی، به خصوص خوردگی حفره‌ای که می‌تواند به‌عنوان مناطق اولی برای SCC عمل کند را کاهش خواهد داد. استاندارد NACE RP ۰۱۶۹ اخطار می‌دهد که نباید از پتانسیل‌های منفی‌تر از ۸۵۰ mV CSE- ، زمانی که فشار خط لوله و شرایط برای SCC مساعد هستند، فراتر رفت.

روش‌های ساخت

مکانیکی

شرایط مکانیکی اتصال اجزای روی یک سازه می‌تواند بر حساسیت آن به خوردگی و اعمال حفاظت کاتدی تأثیرگذار باشد. اتصال‌های مکانیکی بدون در نظر گرفتن سایر عوامل، لزوماً هادی‌های الکتریکی خوبی نیستند. اغلب لایه نازکی از محصولات خوردگی (اکسیدها) بین اجزای متصل تشکیل عایق الکتریکی می‌دهند. شیارهای تولید شده توسط روش‌های مکانیکی اتصال می‌توانند سبب ایجاد محیط‌های خورنده شوند. منطقه درون یک شیار معمولاً دارای اکسیژن حل شده پایینی است و به آند یک پیل اختلاف هوادهی تبدیل می‌شود. اثر شیارها در خوردگی اغلب توسط پلاریزه کنترل می‌شود. روش‌های مکانیکی به‌صورت کلی برای سازه‌ای که قرار است حفاظت کاتدی بر آن اعمال شود، مطلوب نیستند.

جوشکاری ذوبی

جوشکاری از پیوستگی الکتریکی یک قسمت از سازه به قسمت دیگر آن اطمینان می‌دهد. جوش‌های ذوبی کامل در مقایسه با جوش‌های گوشه‌ای، مقاومت به خوردگی بیشتر دارند و برای استفاده مؤثر طولانی‌مدت از حفاظت کاتدی مناسب هستند.

خلاصه‌ای از تأثیرات ساخت بر طراحی حفاظت کاتدی

مهندس طراح باید در مورد روش‌های تولید به کار رفته در ساخت سازه‌ای که او حفاظت کاتدی را برای آن طراحی می‌کند، دانش کاملی داشته باشد. اغلب ایجاد اتصال اضافی برای پیوستگی الکتریکی در برخی از روش‌های ساخت مورد نیاز است.

پیوستگی الکتریکی و مقاومت خطی

روش‌های اتصال

3 1 4

همان‌طور که در بخش روش‌های ساخت ذکر شد، اتصال مکانیکی ممکن است سبب ایجاد اتصال‌های ناپیوسته الکتریکی در یک بخش نسبت به سایر قسمت‌ها شود. لوله‌های پیچ شده و واحدهای لوله‌کشی که با پیچ یا سایر اتصالات مکانیکی متصل شده‌اند، اغلب مقادیر زیادی مقاومت خطی در خط لوله ایجاد می‌کنند. ممکن است حتی اتصالات مکانیکی به‌صورت اتصالات عایق الکتریکی نیز عمل کنند.

زمانی که حفاظت کاتدی را برای فولاد تقویت کننده در سازه بتنی مسلح در نظر می‌گیریم، ضروری است تا یکپارچگی الکتریکی در اجزای فلزی مختلف ثابت شود. اگر برخی از فولادهای تقویت‌کننده از نظر الکتریکی متصل نباشند، جریان حفاظتی را دریافت نمی‌کنند و ممکن است در معرض تداخل خورنده قرار بگیرند.

مقاومت ویژه

مقاومت ویژه خاصیت یک ماده است که مقاومت آن را در برابر شار بار الکتریکی تعریف می‌کند. مقاومت ویژه یک ماده را می‌توان با اندازه‌گیری مقاومت در طول و مساحت سطح مقطع مشخص، تعیین کرد.

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

که در این رابطه:

ρ: مقاومت ویژه

R: مقاومت اندازه‌گیری شده در طول نمونه

A: مساحت سطح مقطع نمونه

L: طول نمونه

مقاومت خطی یک سازه به‌صورت مستقیم با مقاومت ویژه ماده متناسب است، از رابطه بالا:

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

هرچه مقاومت ویژه بزرگ‌تر باشد، مقاومت در واحد طول افزایش می‌یابد. زمانی که سطح مقطع کوچک باشد یا طول هادی جریان بزرگ‌تر باشد، مقاومت ویژه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

ضخامت فلز

مساحت سطح مقطع فلز در یک جز، تأثیر مهمی بر مقاومت خطی دارد. در این مورد، مقاومت به‌صورت معکوس با مساحت سطح مقطع فلز هادی متناسب است. لوله‌ای با جداره نازک نسبت به لوله‌ای با همان جنس و جداره ضخیم‌تر، مقاومت الکتریکی بیشتری در واحد طول دارد.

خلاصه‌ای از اثر یکپارچگی الکتریکی بر طراحی حفاظت کاتدی

طراحی

اگر قرار باشد حفاظت کاتدی برای یک سازه طولانی اعمال شود، مخصوصاً در محیط‌های با هدایت بالا (مقاومت ویژه پایین)، یکپارچگی الکتریکی آن عامل مهمی است. زمانی که جریان روی سازه فلزی طولانی تجمع می‌کند، جریان در طول سازه

تولید افت ولتاژ می‌کند. این افت ولتاژ با افزایش شار جریان افزایش می‌یابد. به این اثر میرایی[۳۱۵] گفته می‌شود. در طراحی سامانه‌های حفاظت کاتدی برای خطوط لوله طولانی یا سامانه‌های با پیکربندهای آند موازی طویل، میرایی – عاملی اساسی است. حالت دوم زمانی اتفاق می‌افتد که لازم باشد جریان برای آندهای دور از طرق کابل‌های طویل تأمین شود.

هندسه

زمانی که یک سازه از اجزای زیادی تشکیل شده باشد، مانند منطقه‌ای از شمع‌های پی،[۳۱۶] یک قسمت از سازه می‌تواند مانع رسیدن جریان حفاظتی کافی به بخشی دیگر شود. حضور سازه‌های دیگر در مجاورت با عبور آنها از سازه‌ای که قرار است حفاظت شود را می‌بایست در طراحی حفاظت کاتدی در نظر گرفت. جریان سرگردان از سامانه حفاظت کاتدی ممکن است تأثیر نامطلوبی بر سازه‌های مجاور داشته باشد. این اثر ممکن است به محل آند حفاظت کاتدی یا نواقص پوشش محافظ سازه وابسته باشد. این نواقص سبب ایجاد مناطق موضعی تبادل جریان با سازه‌های نزدیک خواهند شد.

شیب ولتاژ از منابع جریان و چاه‌ها[۳۱۷]

افزایش ولتاژ زمین در هر نقطه، X، که توسط ورود یا خروج جریان به زمین از طریق یک آند عمودی با آغاز از سطح زمین ایجاد می‌شود، در رابطه زیر[۳۱۸] داده شده است:

$$V_r = \frac{\rho \mathrm{I}}{2\pi \mathrm{L}} \ln\left[\frac{\mathrm{L}+(L^2+\mathrm{X}_r^2)^{0/5}}{X_r}\right]$$

که در این رابطه:

I: جریان منتقل شده (توسط آند) به زمین (آمپر)

ρ: مقاومت ویژه میانگین زمین (ohm-m)

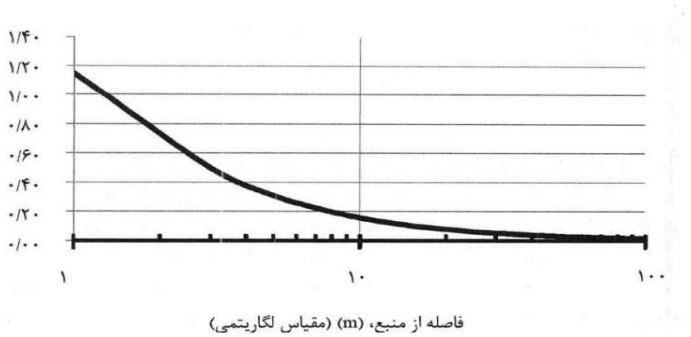
L: طول میله زیر سطح (متر)

X_r: فاصله (متر) از مرکز آند تا نقطه x

V_r: افزایش ولتاژ در x (ولت) نسبت به زمین دور

شکل ۸-۴۱ نموداری از افزایش ولتاژ به ازای آمپر جریان، اطراف یک آند میله‌ای عمودی در عمق ۲ متری خاک است.

3 [illegible] 1 5
3 [illegible] 1 6
3 [illegible] 1 7
3 [illegible] 1 8



شکل ۸-۴۱ افزایش ولتاژ (ولت/آمپر) اطراف میله ۲ متری فرو برده شده در خاک با مقاومت ۱۰ ohm-m

اگر X_r بزرگ‌تر از ۱۰ برابر L باشد، رابطه به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$V_r = \frac{0/161\rho}{X_r}$$

از این رابطه ساده شده مشخص است که افزایش ولتاژ (V_r) به‌صورت معکوس با فاصله (X_r) از منبع جریان (آند) یا چاه (فلز بدون پوشش روی سطح کاتدی) متناسب است. نسبت افزایش ولتاژ در یک نقطه (X_r) با فاصله دور از آند عمودی به افزایش ولتاژ آند که نسبت به زمین دور اندازه‌گیری شده را می‌توان با استفاده از معادله نرخ افزایش ولتاژ در (I) آمپر تخمین زد:

$$V_r = \frac{\rho I}{2\pi L}\ln\left[\frac{L+(L^2+X_r^2)^{0/5}}{X_r}\right]$$

رابطه دوایت برای یک میله عمودی در (I) آمپر ضرب می‌شود:

$$V{=}IR = \frac{\rho I}{2\pi L}\left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right]$$

انجام تقسیم‌ها نتیجه می‌دهد:

$$\frac{V_r}{IR} = \frac{\left[\frac{L+(L^2+X_r^2)^{0/5}}{X_r}\right]}{\left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right]}$$

که در این رابطه:

V_r: افزایش ولتاژ به ازای آمپر در از آند (ولت)

IR: ولتاژ بین آند و زمین دور در جریان ۱ آمپر

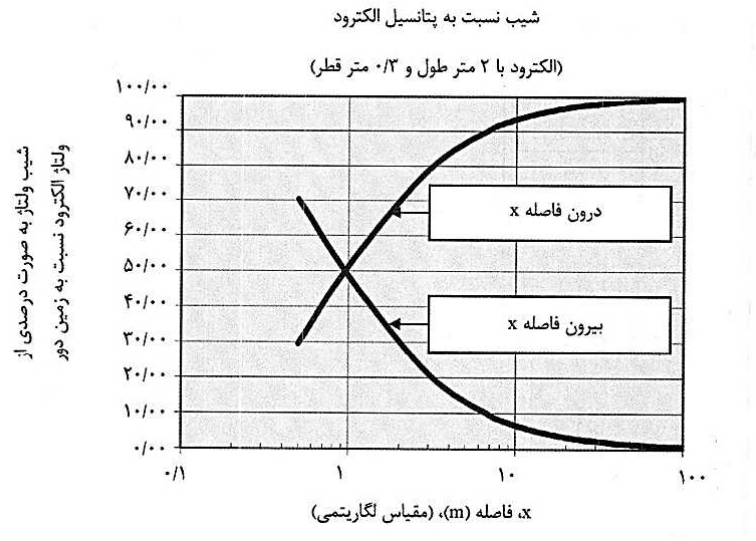
X_r: فاصله از آند

L: طول آند زیر سطح (متر)

d: قطر آند (متر)

لازم به ذکر است که این رابطه از مقاومت ویژه و جریان مستقل است. این رابطه اجازه می‌دهد که تخمین‌هایی در مورد «دوری» نسبی یک آند نسبت به سازه در محیط انجام شود.

شکل ۸-۴۲ نموداری است که شیب ولتاژ در خاک را به‌صورت درصدی از ولتاژ الکترود نسبت به زمین دور نشان می‌دهد. همچنین درصد شیب ولتاژ الکترود که با فاصله از الکترود کاهش می‌یابد، نشان داده شده است.



شکل ۸-۴۲ شیب ولتاژ به‌صورت درصدی از پتانسیل الکترود نسبت به زمین دور

تخمین جریان مورد نیاز

طراحی سامانه حفاظت کاتدی احتیاج به برخی تخمین‌ها از جریان مورد نیاز برای تأمین حفاظت سازه‌ها دارد. انجام کارهای پایه‌ای یکی از مهم‌ترین بخش‌های فرایند طراحی است. می توان از بسیاری اشتباه‌های پرهزینه با انجام کارهای مقدماتی احتیاطی اجتناب کرد. این مورد به خصوص در مورد سامانه‌های پیچیده یا غیرمعمول صدق می‌کند.

جریان مورد نیاز

تخمین جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی پیش از ساخت سازه شامل تعدادی از فرض‌ها می‌شود. این روش به شرح زیر است:

- به دست آوردن اطلاعات کلی در مورد محیط
- چنانچه جریان مورد نیاز برای ماده در آن محیط ثبت شده است، از آن استفاده کنید.
- چنانچه شرایط محیط یا عملیات، غیرمعمول یا سؤال برانگیز است، آزمایش‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی با مساحت سطح معلوم از ماده، تحت شرایط محیطی که قرار است مواجه شود، انجام دهید.
- مساحت کل فلزی که با محیط تماس خواهد داشت را تخمین بزنید. اگر قرار است پوشش‌های محافظ همراه با حفاظت کاتدی استفاده شوند، در نظر بگیرید که چه مقدار از سازه توسط پوشش محافظت نمی‌شود.
- جریان کل مورد نیاز برای حفاظت کاتدی را یا استفاده از رابطه زیر محاسبه کنید:

$$I_t=A_s i$$

که در این رابطه:

I_t: کل جریان مورد نیاز

A_s: سطح فلز بدون پوشش

i: چگالی جریان مورد نیاز

جدول ۸-۲۰ راهنمایی برای تخمین بزرگی چگالی جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی در چندین محیط است.

آزمایش‌های میدانی

زمانی که یک سازه در شکل نهایی خود در محل قرار گرفت، به‌صورت کلی ممکن است بتوان آزمایش‌های جریان مورد نیاز را انجام داد. مزیت این‌گونه آزمایش‌ها، تولید داده‌ها بر روی سازه حقیقی است و شامل فرض‌هایی مانند کارایی پوشش محافظ و سایر عوامل نمی‌شود. تمامی سازه‌هایی که برای اعمال حفاظت کاتدی طراحی شده‌اند (به‌عنوان مثال خطوط لوله پوشش‌دار و عایق الکتریکی) را می‌توان آزمایش کرد. سازه‌های در برگیرنده اتصال میانی با اجزای فلزی خارج از منطقه حفاظت مطلوب برای آزمایش مشکل‌تر هستند.

آزمایش جریان مورد نیاز به‌صورت کلی در برگیرنده نصب سامانه آند دائمی یا موقت است. هدف وارد کردن جریان به زمین در نقطه‌ای است که بستر (آند) در آنجا قرار خواهد گرفت. برای سازه‌های بزرگ، برای نمونه یک قسمت معرف را می‌توان برای مرحله آزمایش اولیه انتخاب کرد. سپس منبع توان مناسبی (باتری‌ها، یک‌سوکننده‌های آزمایشی یا سامانه مولد موتوری) بین سازه و بستر آزمایشی متصل می‌شوند (شکل ۸-۴۳). جریان آزمایشی بین سازه و بستر اعمال و تأثیرات آن روی سازه اندازه‌گیری می‌شود.

آزمایش‌هایی که می‌توان اجرا کرد شامل:

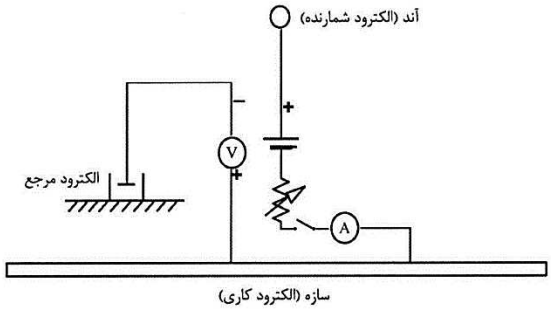
- آزمایش الکتروشیمیایی برای تغییر پلاریزاسیون
- تجزیه‌وتحلیل شبکه برای تعیین توزیع جریان روی لوله و سامانه کابلی
- آزمایش‌هایی برای تعیین اتصال زمین[۱۹] بر[۳] روی سازه‌های عایق شده
- تعیین محل دائمی بهینه برای منطقه بستر آندی
- تأثیرات تداخلی احتمالی بر روی سازه‌های دیگر

جدول ۸-۲۰ مقادیر معمول جریان مورد نیاز برای فولاد بدون تأثیرات منفی گالوانیک در چندین محیط

محیط	چگالی جریان مورد نیاز mA/ft^2
فولاد بدون پوشش:	
خاک بایر خنثی	۴/۲ – ۶۱/۱
خاک خنثی کاملاً هوادهی شده	۲۱/۵ – ۳۲/۳
خاک خشک کاملاً هوادهی شده	۲۶/۹ – ۱۶/۱

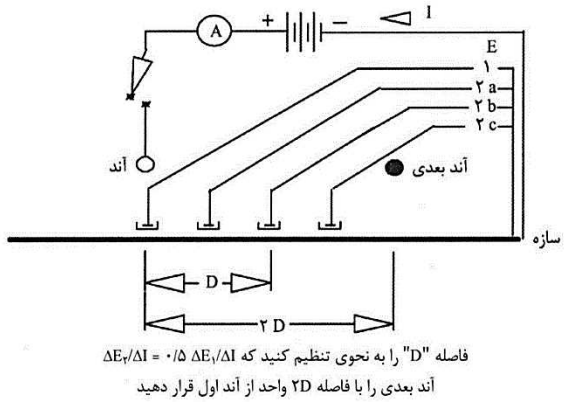
3 1 9

خاک مرطوب، شرایط متوسط /شدید	۲۶/۹ – ۶۴/۶
خاک به‌شدت اسیدی	۵۳/۸ – ۱۶۱/۴
خاک پشتیبانی کننده باکتری احیاکننده سولفات فعال	۴۵۱/۹
گرم شده در خاک (برای مثال خط تخلیه آب داغ)	۵۳/۸ – ۲۶۹/۰
بتن خشک	۵/۴ – ۱۶/۱
بتن مرطوب	۵۳/۸ – ۲۶۹/۰
آب شیرین ساکن	۵۳/۸
آب شیرین متحرک	۵۳/۸ – ۶۴/۶
آب شیرین به‌شدت متلاطم و دارای اکسیژن حل شده	۵۳/۸ – ۱۶۱/۴
آب داغ	۵۳/۸ – ۱۶۱/۴
آب آلوده دهانه رودخانه	۵۳۸/۰ – ۱۶۱۴/۰
آب دریا	۵۳/۸ – ۲۶۹/۰
شیمیایی، اسید یا قلیا در مخازن فرایند	۵۳/۸ – ۲۶۹/۰
محفظه‌های مبدل گرمای آب با لوله‌ها و ورق‌های غیرآهنی	۱۳۴۵/۰ کلی
فولادهای به‌خوبی پوشش شده: خاک‌ها	 ۰/۰۱ – ۰/۲



شکل ۸-۴۳ مدار آزمایش جریان مورد نیاز

چنانچه فقط قسمتی از یک سازه طولانی (لوله یا سیم) برای تعیین تأخیر جریان اعمالی تحت آزمایش است، یک آزمایش محدود امکان‌پذیر است. یک روش برای تعیین فاصله گذاری آندها در طول چنین سازه‌ای در شکل۸-۴۴ نشان داده شده است.



شکل ۸-۴۴ آزمایش جریان مورد نیاز برای سامانه آند توزیع شده

یک آند آزمایشی در فاصله‌ای قابل قبول عمود بر سازه‌ای که قرار است حفاظت شود، قرار داده می‌شود. این فاصله ممکن است توسط محدودیت‌های فیزیکی (برای مثال مسیر دسترسی تجهیزات داخلی) تحمیل شود. سپس یک الکترود مرجع روی سازه در نقطه‌ای مقابل آند آزمایشی قرار داده می‌شود. تغییر پتانسیل سازه به خاک به ازای آمپر از جریان آزمایش (اتصال ولتاژ زمین، $R_{1,I}$) اندازه‌گیری می‌شود:

$$R_{1,I} = \Delta V_1/\Delta I = (V_{1\,on}\text{-}V_{1\,off})/(I_{on}\text{-}I_{off})$$

که در این رابطه:

$R_{1,I}$: تغییر در پتانسیل سازه به خاک در نقطه ۱ به ازای آمپر از جریان

ΔV_1: تغییر ولتاژ در نقطه ۱

ΔI: تغییر در جریان آزمایش

سپس الکترود مرجع در طول سازه حرکت داده می‌شود تا تغییر در ولتاژ (ΔV_2) تولید شده توسط جریان (I) برابر $0/5 \times$ $R_{1,I}$ شود. سپس آند دوم در فاصله ۲D از آند اول قرار داده می‌شود. آندهای بعدی در طول سازه در فاصله ای برابر ۲D نصب می‌شوند. تقریب نسبتاً دقیقی از جریان مورد نیاز برای حفاظت یک چنین سازه‌ای را می‌توان با نصب سه تا پنج آند آزمایشی به این شیوه به دست آورد. سپس آزمایش‌های پلاریزاسیون کاتدی برای تعیین مقدار جریان مورد نیاز به منظور دستیابی صحیح به معیارهای حفاظت، مقابل آند مرکزی گروه انجام می‌شود. جریان برای کل سازه و تعداد آندهای مورد نیاز را می‌توان پس از این محاسبه کرد.

مثال ۸-۱

«رشته‌های هم مرکز»[۳۲۰] یک کابل الکتریکی زیرزمینی در حال خورده شدن است. قرار است حفاظت کاتدی برای ۹۱۴ متر (۳۰۰۰ فوت) از این کابل با استفاده از تعدادی از آندها که در طول خط کناره[۳۲۱]قرار داده شده، اعمال شود. کارشناس فنی

3 2 0
3 2 1

خوردگی از روشی که در شکل۸-۴۴ توضیح داده شد، استفاده می‌کند تا فاصله بین آندها را تعیین کند. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که آندها با فاصله مرکزی ۹/۱ متر (۳۰ فوت) نیازها را برآورده می‌کنند:

$$\Delta V_2/\Delta I = (0.5\Delta V_1/\Delta I) \quad \text{در نقطه D} = ۴/۶\text{m}(15\text{ft})$$

سپس کارشناس فنی، ردیفی از آندهای آزمایشی شامل ۵ میله پایه‌ای که با فاصله ۹/۱ متری (۳۰ فوت) از مرکز یکدیگر در زمین فرو برده شده‌اند را برپا می‌کند. سپس هر پنج میله با استفاده از میگر[۲](آزمون مقاومت عایق) زمین آزمایش می‌شوند تا مقاومت هر میله به رشته محافظ کابل تعیین شود. مقاومت اندازه‌گیری شده همه میله‌ها در محدوده ۱۵ درصدی یکدیگر است. این آزمایش اطمینان می‌دهد، زمانی که میله‌ها به‌صورت یک آند آزمایشی به هم متصل شده‌اند، میزان برابری از جریان از هر میله تخلیه خواهد شد.

سپس میله‌ها به هم متصل می‌شوند تا تشکیل یک آند آزمایشی در طول ۴۵/۷ متر (۱۵۰ فوت) از کابل را بدهند. با استفاده از یک مدار که مشابه آنچه در شکل ۸-۴۳ آورده شده است، کارشناس فنی آزمایش $E \log i$ را انجام می‌دهد. آغاز شیب تافلی در جریان ۱۵۰ mA رخ می‌دهد. جریان و تعداد آند کل مورد نیاز برای حفاظت ۹۱۴ متر (۳۰۰۰) فوت از رشته محافظ چقدر است؟

مرکز آندها باید در فاصله ۹/۱ متری (۳۰ فوت) از یکدیگر قرار گیرند، بنابراین تعداد آندهای مورد نیاز برابر است با: ۱۰۱=۱+ ۹,۱ ÷ ۹۱۴ آند.

خروجی جریان میانگین هر آند در آزمایش در خروجی کل مورد نیاز ۱۵۰ mA برابر است با: $150\text{mA} \div 5 = 30\ \text{mA}$

جریان کل مورد نیاز برای حفاظت ۹۱۴ متر (۳۰۰ فوت) از طول کابل برابر است با: $30\text{mA} \times 101 = 3030\ \text{mA} = 3\text{A}$.

عوامل طراحی و محاسبات سیستم حفاظت کاتدی

داده‌های موجود

اولین قدم در طراحی حفاظت کاتدی، جمع‌آوری داده‌ها است. یک روش برای دسته‌بندی داده‌ها تهیه خلاصه داده‌ها و فهرست است.

خلاصه نمودن داده‌ها

خلاصه‌ای منظم از داده‌ها نقطه شروع خوبی برای کار طراحی است. خلاصه می‌بایست شامل اطلاعات زیر باشد:

- تاریخچه
- عمر طراحی سازه
- مساحت سطوحی که قرار است حفاظت شوند.
- مواد ساخت

3 □□□ □□□□□□ 2 2

- ساخت
- پوشش‌های محافظ
- عایقی الکتریکی
- خواص محیط (الکتریکی و شیمیایی)
- موارد مهم در عملکرد
- متون مرتبط
- شیوه‌های ممکن عملکرد

تخمین جریان مورد نیاز

جریان مورد نیاز را می‌توان با استفاده از داده‌های میدانی ویا داده‌های آزمایشگاهی تخمین زد.

یکپارچگی الکتریکی

یکپارچگی الکتریکی می‌بایست در عناصر یک سازه که قرار است حفاظت شود، برقرار باشد.

جداسازی الکتریکی

سازه‌ای که قرار است به‌وسیله حفاظت کاتدی حفاظت شود، در هر جا که ممکن است می‌بایست از نظر الکتریکی از سایر سازه‌ها عایق شود.

جریان‌های سرگردان

اثرات جریان سرگردان در مرحله طراحی می‌بایست در نظر گرفته شود.

عمر متوسط سازه

ازآنجاکه، عمر مفید مورد انتظار سازه و همچنین طول عمر اجزای سامانه حفاظت کاتدی با صرفه اقتصادی کلی حفاظت مرتبط هستند، می‌بایست در نظر گرفته شوند.

پایش و نگهداری

برای کنترل خوردگی موفقیت‌آمیز، پایش و نگهداری سامانه‌های حفاظت کاتدی ضروری است.

توزیع جریان حفاظت کاتدی

چگونگی توزیع جریان از آند سامانه و در طول سطوح یک سازه تحت حفاظت می‌بایست بررسی شود.

منبع توان

انتخاب یک منبع توان مناسب به در دسترس بودن، میزان جریان مورد نیاز و محیط بستگی دارد.

ایمنی

تمام استانداردهای الکتریکی و ایمنی کاربردی در طراحی حفاظت کاتدی می‌بایست رعایت شوند.

تداخل با سازه‌های دیگر

ممکن است حفاظت کاتدی باعث اثرات جانبی نامطلوبی بر سایر سازه شود.

نتایج محصولات جانبی حفاظت کاتدی

در مناطقی که آندها و کاتدها با مواد فرایند (آب آشامیدنی، محصولات غذایی و غیره) تماس برقرار کنند، ممکن است اثرات جانبی نامطلوب وجود داشته باشد.

اقتصاد

ملاحظات اقتصادی شامل این موارد می‌شود:

- هزینه‌های نصب
- مصرف برق
- تعویض اجزا و نگهداری

محاسبات

جریان مورد نیاز

تخمین از مساحت سطح بدون پوشش

جریان مورد نیاز بر اساس مساحت سطح بدون پوشش مورد انتظار، همواره در معرض خطاست.

عوامل متعددی وجود دارند که بر نتایج اثر می‌گذارند.

عوامل زیر را در نظر بگیرید:

- مساحت سطح کل در تماس با خاک یا الکترولیت دیگر
- خواص عایقی هر پوشش محافظی
- عواملی که ممکن است به پوشش محافظ در حین نصب آسیب بزنند.
- عمر مورد انتظار پوشش تحت شرایط عملکرد
- درصد شمول مورد انتظار توسط پوشش محافظ
- تجربه‌های قبلی از اعمال کننده‌های پوشش و پیمانکارهای ساخت
- چگالی جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی فلز (های) درون محیط.

در انتها، جریان مورد نیازی که انتظار می‌رود به محاسبه مساحت بدون پوشش فلز در تماس با الکترولیت و ضرب این مقدار در «بهترین تخمین» از چگالی جریان برای شرایط حاضر بستگی دارد. روش دیگری برای سازه‌های پوشش شده عایق الکتریکی (لوله‌ها، مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی و غیره) وجود دارد که در آن داده‌هایی از سامانه‌های حفاظت کاتدی حاضر در دسترس است. این روش نیازمند داده‌ها موضعی قابل اعتماد در مورد موارد زیر است:

- هدایت نشتی مورد انتظار (زیمنس بر واحد مساحت) در خاک ohm.cm ۱۰۰۰ برای دسته‌ای از پوشش‌ها (اپوکسی، نوار پلی اتیلن و غیره) و نوع عملکرد (خطوط لوله انتقال، توزیع گاز، مخزن سوخت)
- مقاومت ویژه خاک در محیط عملکرد

- تغییر مورد نیاز در پتانسیل سازه به الکترولیت برای تولید پلاریزاسیون لازم برای رسیدن به معیار حفاظت کاتدی. این میزان، تغییر آنی در پتانسیل یک سازه عایق شده است که نسبت به نقطه‌ای در «زمین دور» در زمان عملکرد حفاظت کاتدی سنجیده می‌شود. این مقدار، معیاری برای حفاظت نیست. به هر حال تحت مجموعه‌ای از شرایط عملکرد و محیط، تغییری در پتانسیل تخمین خوبی از جریان مورد نیاز برای برآورده کردن معیار مورد قبول فراهم می‌کند.

این روش با استفاده از یک مثال به‌خوبی درک می‌شود:

مثال ۸-۲

شرکت گاز در نظر دارد تا ۳۰۴۹ متر (۱۰۰۰۰ فوت) خط اصلی توزیع فولادی پوشش شده با قطر ۵/۱ cm (۲ اینچ) در طرح توسعه جدید نصب کند. مقاومت ویژه میانگین خاک در منطقه ۵۰۰۰ ohm.cm است. مهندس خوردگی در نظر دارد تا جریان تقریبی لازم برای حفاظ کاتدی لوله‌ها را تخمین بزند. داده‌های زیر از تجربه در این تأسیسات در مورد جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی به دست آمده است:

- هدایت نشتی مخصوص میانگین g برای سرویس از نوع توزیع، $2/14 \times 10^{-3} S/m^2$ در خاک ۱۰۰۰ ohm.cm است.
- تغییر پتانسیل میانگین (ΔV) اندازه‌گیری شده نسبت به زمین دور برای دستیابی به حفاظت، ۰/۲۵- ولت است.

محاسبات

مساحت سطح کل لوله پیشنهاد شده:

$$A_s=\pi dL = \left(5.1cm \times \frac{3.1416}{100} cm/m\right)/3049m = 488m^2$$

هدایت نشتی تخمینی برای لوله نو در خاک ۱۰۰۰ ohm.cm:

$$G=g'A = 2.14 \times 10^{-3}\ S/m^2 \times 488m^2 = 1.04\ Siemens$$

ازآنجاکه، مقاومت عکس هدایت است:

$$\frac{1}{1.04} S = \text{مقاومت به زمین دور}$$

$$0.96\ ohm$$

مقاومت به زمین دور تخمین زده شده در خاک ۵۰۰۰ ohm.cm: (مقاومت به‌صورت مستقیم به مقاومت ویژه متناسب است).

$$96ohms \times 5 = 4/8\ Ohms$$

جریان تخمینی برای تغییر پتانسیل لوله به زمین دور به میزان ۰/۲۵- ولت از قانون اهم $(I = E/R)$:

$$I = \frac{0.250\ volts}{4.8\ ohms} = 0.052 \quad \text{آمپر}$$

جدول ۸-۲۱ محدوده‌های هدایت پوشش برای لوله‌کشی در انواع مختلف سرویس‌ها در خاک ۱۰۰۰ ohm-cm را نشان می‌دهد.

از آزمایش‌های میدانی

آزمایش‌های میدانی قابل اعتمادترین راه برای تخمین جریان مورد نیاز بر روی یک سازه موجود است. چنانچه سازه از نظر الکتریکی جدا و دارای پوششی عایق باشد (لوله‌های مدفون و مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی)، تعیین جریان مورد نیاز به‌صورت مستقیم ممکن خواهد بود. یک آند موقت (بستر) ساخته شده و منبع توان قابل حمل (باتری، مولد یا یک‌سوکننده) بین سازه و آند متصل می‌شود. در صورت امکان، آند آزمایشی می‌بایست در محل مناسب برای نصب دائمی یا نزدیکی آن قرار داده شود.

مثال ۸-۳

سامانه لوله‌کشی توزیع سوخت یک فرودگاه قرار است تحت حفاظت کاتدی قرار گیرد. لوله‌کشی دارای پوشش و شامل ۱۵۲۴ متر (۵۰۰۰ فوت) لوله ۲۰/۳ سانتی‌متری (۸ اینچ) و کوچک‌تر است. این سامانه از محوطه مخازن در یک گوشه از فرودگاه تا شیرهای سوخت در مجموعه خروجی ادامه دارد. تمام اتصال‌ها به سازه‌های دیگر شامل مخازن سوخت، پمپ‌ها و سازه‌های متصل به زمین از نظر الکتریکی جدا شده‌اند. شیرهای سوخت از لوله‌ها عایق نشده‌اند و دارای یک میله اتصال به زمین هستند که به آنها متصل شده است. ازآنجاکه، اکثر لوله‌ها زیر توقفگاه بتنی هستند، تنها نقطه استفاده برای قرار دادن آند حفاظت کاتدی در انتهای تغذیه‌کننده نزدیک محوطه مخازن است. مقاومت ویژه میانگین خاک ohm.cm ۴۰۰۰ است. یک مهندس خوردگی چطور ممکن است جریان مورد نیاز برای حفاظت این سامانه سوخت‌رسانی را تعیین کند؟

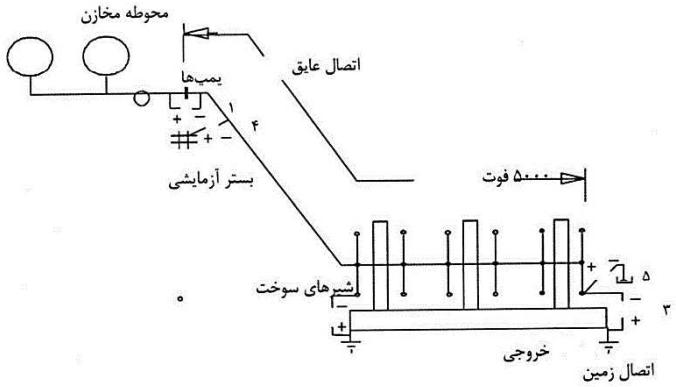
جدول ۸-۲۱ هدایت نشتی لوله به زمین مخصوص، معلول برای پوشش‌های محافظ عایق در خاک ohm.cm

خطوط لوله طویل با اتصال‌های کم	هدایت مخصوص میانگین پوشش	
	g^2 Siemens/ft^2	g^2 Siemens/m^2
کیفیت کار		
عالی	$< 1 \times 10^{-5}$	$> 1 \times 10^{-4}$
خوب	5×10^{-5} تا 1×10^{-5}	1×10^{-4} تا 5×10^{-4}
متوسط	1×10^{-4} تا 5×10^{-5}	5×10^{-4} تا 1×10^{-3}
ضعیف	$> 1 \times 10^{-4}$	$> 1 \times 10^{-3}$
لوله بدون پوشش (۲ تا ۱۲ اینچ) (۵ تا ۳۰ سانتی‌متر)	2×10^{-2} تا 4×10^{-3}	2×10^{-2} تا 4×10^{-2}
توزیع گاز با اتصال‌های زیاد	هدایت مخصوص میانگین پوشش	
	g^2 Siemens/ft^2	g^2 Siemens/ft^2
کیفیت کار		
عالی	$< 5 \times 10^{-5}$	$< 5 \times 10^{-4}$
خوب	1×10^{-4} تا 5×10^{-5}	1×10^{-3} تا 5×10^{-4}

متوسط	1×10^{-4} تا 5×10^{-4}	1×10^{-3} تا 5×10^{-3}
ضعیف	$> 5 \times 10^{-4}$	$> 5 \times 10^{-3}$
لوله بدون پوشش (۲ تا ۱۲ اینچ) (۵ تا ۳۰ سانتی‌متر)	4×10^{-3} تا 2×10^{-2}	4×10^{-2} تا 2×10^{-1}

قدم ۱. جداسازی الکتریکی و یکپارچگی الکتریکی لوله‌کشی را بررسی کنید.

- نقاطی را تعیین کنید که بتوان تماس الکتریکی به لوله‌کشی را برقرار نمود (شیرهای سوخت‌رسانی، شیرهای خطوط، چند راهه‌های روزمینی و غیره). طرح ساده‌ای از سامانه را آماده کنید. شکل ۸-۴۵.



شکل ۸-۴۵ طرح‌بندی محوطه مخازن

مقاومت لوله به زمین را اندازه‌گیری کنید. در این مورد ازآنجاکه، محوطه مخازن دارای پمپ‌های متصل به زمین است و در قیاس با سامانه لوله‌کشی مقاومت بسیار کمتری نسبت به زمین دور دارد، مقاومت الکتریکی در طول اتصال عایق الکتریکی در محوطه مخازن، مقاومت لوله به زمین دور را تقریب می‌زند با استفاده از ضمائم روی هر سمت اتصال عایق (خروجی ۱ از شکل ۸-۴۵)، مقاومت $R_{1,1}$؛ ۰/۸۰ ohm اندازه‌گیری شد. مساحت سطح کل لوله‌کشی تقریباً $1000m^2$ (۱۰۵۰۰ فوت مربع) است. مقاومت ۰/۸۰ اهم برابر هدایت ۱/۲۵ زیمنس است. هدایت ویژه میانگین به‌ازای واحد مساحت پوشش (در خاک Ohm-cm ۴۰۰۰) برابر است با:

$$g' = 1.25S \div 1000m^2 = 1.25 \times 10^{-3} S/m^2 (1.210^{-4}\ S/ft^2)$$

یا

$$g' = 1.25 \times 10^{-3}\ S/m^2 \times 4 = 10^{-3} S/m^2 \qquad \text{در خاک } 1000\ ohm\ cm$$

براساس جدول ۸-۲۱ این مقدار با پوشش کیفیت متوسط در لوله‌کشی نوع توزیعی با اتصال‌های زیاد برابر است. با در نظر گرفتن اینکه شیرهای سوخت دارای میله‌های اتصال زمین هستند، تماس الکتریکی به سازه اصلی متصل به زمین لازم نیست.

- جداسازی و پیوستگی لوله‌کشی را بررسی کنید. جریان را در خروجی ۱ (شکل ۸-۴۵) اعمال کرده و تغییر ولتاژ را بین لوله‌کشی و اتصال الکتریکی زمین در منطقه خروجی اندازه‌گیری کنید. مقادیر پیوست الکتریکی برای $R_{2.1}$ و $R_{3.1}$ به ترتیب ۰/۷۵ volt/A و ۰/۷۰ volt/A است. ضمیمه «ط»: تحلیل شبکه DC برای توضیح پیوست‌های الکتریکی را مشاهده کنید.

چنانچه لوله‌کشی به یک سازه متصل به زمین، مدار کوتاه شده باشد، مقاومت لوله به زمین معمولاً بسیار کمتر از ۰/۱ اهم خواهد بود. اگر لوله دارای اتصال عایقی ناشناخته بین محوطه مخازن و خروجی باشد، $R_{2.1}$و $R_{3.1}$ بسیار کمتر از $R_{1.1}$ خواهد بود.

قدم ۲. جریان مورد نیاز برای حفاظت لوله‌کشی را تعیین کنید.

- میله‌های فولادی را در محوطه مخازن در زمین فرو کنید تا تشکیل بستر آندی آزمایشی بدهد (خروجی ۴، شکل۸-۴۵)
- چنانچه به‌صورت معمول تغییر پتانسیلی به میزان ۰/۳۰۰- ولت بین لوله و زمین برای پلاریزه کردن لوله‌های فولادی پوشش شده در منطقه مورد نیاز باشد و مقادیر کوپلینگ الکتریکی[۳۳] $0/70\ \text{volt}/\text{A}$باشد، بنابراین جریان مورد نیاز تخمینی برای حفاظت لوله‌کشی در خروجی ۳ (بر اساس قانون اهم) برابر خواهد بود با:

$$I = 0/300\ \text{volt}/0/70\ \text{volt}/\text{A} = 0/429$$ آمپر

- پتانسیل لوله به خاک را در محل شیر سوخت با استفاده از الکترود مرجع مس/سولفات مس که در نزدیکی شیر قرار داده شده است، اندازه‌گیری کنید. در صورت امکان پیل مرجع را در چاله شیر لوله[۳۴]و[۳۲]در تماس با خاک محلی قرار دهید.
- ۰/۴۵۰ آمپر جریان آزمایش را در بستر اعمال و پتانسیل نسبت به مرجع را در خروجی ۵ بررسی کنید. شار جریان را قطع و پتانسیل خاموش لحظه‌ای[۳۵](E_P) را به‌صورت دوره‌ای تا زمانی که تغییر در پتانسیل پلاریزه شده با زمان به صفر برسد، اندازه‌گیری کنید $(\Delta \mathrm{E}_P/\Delta \mathrm{t} \to 0)$. سپس جریان طراحی را به این صورت محاسبه کنید:

$$I_{\mathrm{CP}} = \frac{100\ \text{mv.I test}}{\Delta \mathrm{E}_P}$$

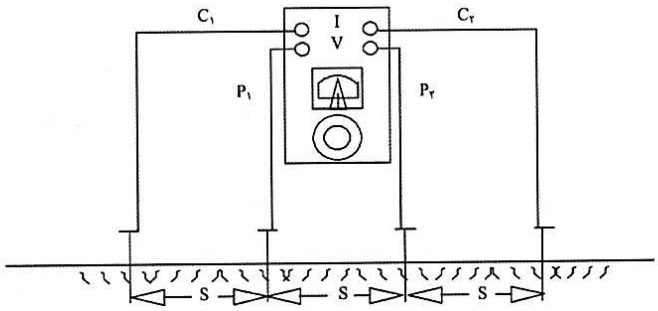
بر روی سازه‌های گسترده که جداسازی نشده‌اند، ممکن است انجام تعدادی از آزمایش‌های محلی و برون‌یابی نتیجه‌ها تا سازه کل، ضروری باشد.

مقاومت آند به زمین

کلیات

3 2 3
3 2 4
3 2 5

محاسبه مقاومت الکتریکی سامانه‌های آند به زمین دور، عموماً با استفاده از روابط ریاضی دوایت[3] انجام می‌شود. این رابطه به همراه روابط دیگر در مثال‌های توضیحی بعداً در این فصل استفاده خواهند شد. سازنده‌های آندها اغلب جداول یا نمودارهایی مخصوص اندازه و شکل آندهای خود تأمین می کنند. در اکثر موارد، مقاومت ویژه میانگین خاک (یا الکترولیت دیگر) برای انجام این محاسبات مورد نیاز است. مقدار مقاومت ویژه مورد استفاده می‌بایست بیانگر مقاومت ویژه حجمی مؤثر بر آند باشد.یک راه معمول برای به دست آوردن مقاومت ویژه استفاده از روش چهار میله ونر است (ASTM G۵۷ – ۷۸) چهار میله فلزی با فاصله یکسان در خطی مستقیم درون خاک فرو می‌شوند. منبع جریان دستگاه به میله‌های خارجی و خروجی‌های اندازه‌گیری ولتاژ به دو میله داخلی متصل می‌شوند. این آرایش در شکل ۸–۴۶ نشان داده شده است.



شکل ۸–۴۶ اندازه‌گیری مقاومت ویژه چهار میله ونر

مقاومت ویژه = $2\pi sR$

که در این رابطه:

s= به‌صورت سانتی‌متر

R= مقاومت به‌صورت اهم

مقاومت (اهم) به‌صورت مستقیم از دستگاه خوانده می‌شود. مقاومت ویژه خاک با استفاده از عبارت زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho = 2\pi sR$$

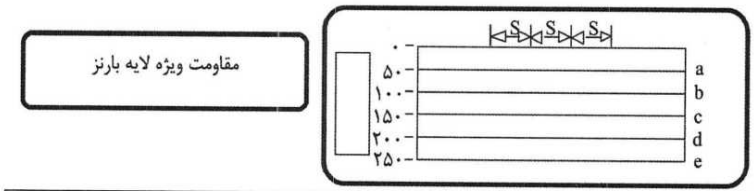
چنانچه فاصله به فوت اندازه‌گیری شود در آن صورت عبارت به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\rho = 191/5sR$$

وسایل اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک به این روش به‌صورت گسترده‌ای در دسترس هستند. فاصله بین میله‌ها می‌بایست به نحوی انتخاب می‌شوند که اندازه‌گیری، منعکس کننده میانگین مقاومت ویژه حجمی برای اندازه بستر آندی باشد. فاصله بین میله‌ها می‌بایست به اندازه عمیق بستر آندی باشد. این امر به خصوص زمانی مهم است که مقاومت ویژه با عمیق تغییر کند. برای آندهای عمیق (در زیر بحث شده است)، مقاومت ویژه را می بایست یا با استفاده از نمونه‌های به دست آمده از حفاری چاه در

[3] H. B. Dwight, ''Calculation of Resistance to Ground'', Elec. Eng., 55, 1319

منطقه یا با روش تحلیل لایه بارنز[۳۲۷] تخمین زد. مثالی در واحدهای انگلیسی که در شکل ۸-۴۷ نشان داده شده است را در نظر بگیرید.



شکل ۸-۴۷ نمایه مقاومت ویژه لایه بارنز

فاصله میله-ها (□) فوت	مقاومت (□) اهم	هدایت (۱/□) زیمنس	لایه	هدایت لایه زیمنس	مقاومت لایه اهم	مقاومت ویژه لایه اهم سانتی‌متر
۵۰	۰/۵۰	۲/۰۰	□□	$2-2=0$	۰/۵	۴۷۸۸
۱۰۰	۰/۴	۲/۵۰	□	$2.5-2.0=0.5$	۲/۰	۱۹۱۵۱
۱۵۰	۰/۳۵	۲/۸۶	□	$-2.5-0.36=2.86$	۲/۸	۲۶۸۱۰
۲۰۰	۰/۲۰	۵/۰۰	□	$-2.86-2.14=5.0$	۰/۴۷	۴۵۰۰
۲۵۰	۰/۱۰	۱۰/۰۰	□□	$10-5=5$	۰/۲	۱۹۱۶

در این تصویر نمایه‌ای از لایه‌های خاک هرکدام به عمق ۵۰ فوت (۱۵/۲ متر) و با مقاومت ویژه میانگین متفاوت، ارائه شده است. اندازه‌گیری سطحی از مقاومت کل (R_T) با استفاده از روش چهار میله ونر با فاصله میله ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ فوت (۱۵/۲، ۳۰/۴، ۴۵/۶، ۶۰/۸ و ۷۶ متر) مقادیر مقاومت نشان داده شده را نتیجه می‌دهد. اولین عدد مقاومت «خوانده» شده توسط دستگاه به‌عنوان میانگین برای لایه خاکی با ۵۰ فوت عمق است. دومین عدد مقاومت اندازه‌گیری شده در لایه اول است که با مقاومت «دیده» شده در لایه از عمق ۵۰ فوت تا عمق ۱۰۰ فوت موازی شده است. افزایش ۵۰ فوت دیگر به فاصله میان میله‌ها، لایه سومی را به موازات دو لایه اول اضافی می‌کنید. این فرایند را می‌توان تا زمانی که دستگاه دارای حساسیت لازم برای حل تفاوت‌های اندک میان مقاومت‌های کلی اندازه‌گیری شده است، ادامه داد. معادله‌ای که به ما اجازه محاسبه مقاومت-های موازی را می‌دهد به این صورت است:

$$1/R_T = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_{3.} + \cdots + 1/R_n$$

یا به فرم هدایت:

3 □□□□□□□□ 2 7

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_n$$

زیمنس :

برای محاسبه مقاومت میانگین هر لایه (n)، هدایت $(1/R_T)$ اندازه‌گیری شده در فاصله میله‌ای که بیانگر تمام خاک بالای لایه مورد نظر است را از هدایتی که شامل لایه مورد نظر می‌شود، کسر کنید. در مثالی که در شکل ۸-۴۷ نشان داده شده است، مقاومت لایه بین ۲۰۰ و ۲۵۰ فوت را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$G_e = G_{T250} + G_{T200}$$

یا

$$1/R_e = 1/R_{T250} + 1/R_{T200}$$

$$1/R_e = 1/01 - 1/02 = 5 \text{ زیمنس}$$

اهم

ازآنجاکه، لایه میان ۲۰۰ و ۲۵۰ فوت، ۵۰ فوت ضخامت دارد، مقاومت ویژه لایه را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$\rho=191 \text{ sR}$

$\rho=191/5 \times 50 \times 0/2 \text{ Ohm-cm}$

در زمان اندازه‌گیری مقاومت ویژه عمق‌های بیشتر از ۱۵ متر (۵۰ فوت) باید نسبت به روش‌های آزمایش، تجهیزات و زمین‌شناسی زیرسطحی مراقب بود.

بسترهای معمول

اکثر بسترهای معمول یا از بستر افقی مستقیم مشابه طول لوله یا ردیفی از آندهای عمودی کوتاه در خط مستقیم شکل شده‌اند. مقاومت بستر افقی را می‌توان با استفاده از رابطه دوایت برای میله (یا لوله) عمودی در خاک تخمین زد.

$$\mathrm{R}=\frac{\rho}{2\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{4L}{d}\right)+ln\left(\frac{L}{h}\right)-2+\frac{2h}{L}\right)$$

که در این رابطه:

ρ: مقاومت ویژه میانگین خاک ohm-m

L: طول بستر (متر)

d: قطر بستر (متر)

h: عمق تا مرکز بستر (متر)

چنانچه مقاومت ویژه به جای ohm-m به ohm-cm داده شده است، رابطه اغلب به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\mathrm{R}=\frac{\frac{\rho}{100}}{2\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{4L}{d}\right)+ln\left(\frac{L}{h}\right)-2+\frac{2h}{L}\right)$$

یا

$$\mathrm{R}=\frac{0/005\rho}{2\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{4L}{d}\right)+ln\left(\frac{L}{h}\right)-2+\frac{2h}{L}\right)$$

اگر هر یک از عوامل بالا در واحد صحیح نباشند، آنگاه عوامل تصحیحی در جای مناسب می‌بایست استفاده شوند. برای مثال اگر قطر، d، به سانتی‌متر و L و h به متر و ρ به ohm-cm باشند، در این صورت:

$$\mathrm{R}=\frac{0/005\rho}{2\pi\mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{400L}{d}\right)+ln\left(\frac{L}{h}\right)-2+\frac{2h}{L}\right)$$

در هنگام استفاده از هر رابطه‌ای، واحدها را بررسی کنید. بسیاری از مثال‌های این کتاب از معادله‌های خاص به جای شکل کلی روابط استفاده می‌کنند که شامل عوامل تبدیل می‌شوند.

مثال ۸-٤

مقاومت بستر آندی افقی با قطر ۳۰/۵ سانتی‌متر (۱۲ اینچ)، طول ۱۵/۲ متر (۵۰ فوت) و مقاومت ویژه میانگین ۴۰۰۰ ohm-cm را تخمین بزنید. عمق بستر آندی را ۱/۲ متر (۴ فوت) فرض کنید.

از رابطه دوایت برای میله افقی (معادله کلی):

$$\mathrm{R}=\frac{\rho}{2\pi\mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{4L}{d}\right)+ln\left(\frac{L}{h}\right)-2+\frac{2h}{L}\right)$$

$$\mathrm{R}=\frac{4000\mathrm{ohm\text{-}cm}}{\frac{100\frac{\mathrm{cm}}{m}}{2\pi(15/2m)}}\left(ln\left(\frac{4(15/2m)}{\frac{5/30\mathrm{cm}}{100\frac{\mathrm{cm}}{m}}}\right)+ln\left(\frac{15/2m}{1/2m}\right)-2+\frac{2(12m)}{15/2m}\right)$$

$$R=0/419\mathrm{ohm}(ln(199)+ln(12/7)-2+0/158)$$

$$R=0/419\mathrm{ohm}(5/99)$$

$$R=2/51\mathrm{ohm}$$

چنانچه بستر آندی از گروهی از آندهای عمودی کوتاه در یک ردیف تشکیل شده باشد، معادله ساند[۳۲۸] تقریب خوبی از مقاومت به زمین دور را فراهم می‌آورد.

$$R_N=\frac{\rho}{2\pi\mathrm{NL}}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1+\frac{2L}{S}+ln(0/656N)\right)$$

که در این رابطه:

R_N: مقاومت بستر (اهم)

3 [illegible] 2 8

ρ: مقاومت ویژه میانگین خاک (ohm.cm)

N: تعداد آندهای موازی

L: طول یک آند (متر)

d: قطر آند (متر)

S: فاصله میان آندها در بستر آندب (متر)

مثال ۸-۵

مقاومت یک بستر آندی با طول ۱۵/۲ متر (۵۰ فوت) در خاک ohm-cm ۴۰۰۰ زمانی که بستر شامل ۶ آند عمودی با قطر ۰/۳۰۵ متر (۱۲ اینچ) و با فاصله مرکز به مرکز ۳/۰۵ متر (۱۰ فوت) است را تخمین بزنید. آندها دارای طول ۱/۵۲ متر (۵ فوت) و پوشش اسمی ۰/۴۶ متر (۱۸ اینچ) هستند. (لازم به ذکر است که معادله ساند عمق آندها زیر سطح را در نظر نمی‌گیرد). با استفاده از حالت کلی معادله ساند و انجام اصلاحات برای واحدها:

$$R_N = \frac{\rho}{2\pi \mathrm{NL}}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2L}{S} + ln(0/656N)\right)$$

$$R_N = \frac{4000\mathrm{ohm\text{-}cm}}{2\pi 6(1/52m)100\frac{\mathrm{cm}}{m}}\left(ln\left(\frac{8\times 1/52m}{0/305}\right) - 1 + \frac{2\times 1/52m}{3/05m}ln(\times 0/6566)\right)$$

$$R_N = 0/698\mathrm{ohm}(ln(39/9) - 1 + 0/997\, ln(3/94))$$

$$R_N = 0/698\mathrm{ohm}(4/05)$$

$$R_N = 2/83\mathrm{ohm}$$

آند عمودی

معادله دوایت برای یک تک میله یا لوله به زمین دور:

$$R_V = \frac{\rho}{2\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1\right)$$

که در این رابطه:

ρ: مقاومت ویژه (ohm-cm)

L: طول آند (cm)

d: قطر آند (cm)

نکته: این رابطه فرض می‌کند که L>>d.

در این رابطه، طول میله به اندازه L متر از سطح زمین به‌سمت پایین امتداد می‌یابد. در عمل، L نشان دهنده طول فعال آند در یک سامانه آند عمیق است. بالای قسمت فعال آند ممکن است در فاصله‌ای زیر سطح باشد. برای تخمین‌ها عملی مقاومت آند به زمین دور، به نظر نمی‌رسد که نادیده گرفتن اثر لایه بین سطح زمین و بالای آند فعال، خطای چشمگیری ایجاد کند.

مثال ۸-٦

مقاومت ویژه نشان داده شده در شکل ۸-۴۷ را در نظر بگیرید. مقاومت یک آند عمیق با قطر ۲۰/۳ سانتی‌متر (۸ اینچ) به زمین دور را، چنانچه قسمت فعال بین ۴۵/۷ و ۷۶/۲ متر (۱۵۰ و ۲۵۰ فوت) زیر سطح قرار گرفته باشد، تخمین بزنید.

حل:

مقاومت ویژه میانگین خاک را در منطقه‌ای که عنصر فعال آند قرار خواهد گرفت، محاسبه کنید (لایه‌های d و e):

هدایت e + d: $(G) = 50/S + 2/14S = 7/14S$

مقاومت لایه‌ها: $R = (1/7/14S) = 0/14\text{ohm}$

$\rho = 2\pi sR$

$$\rho = 2 \times 3 \times 304\text{cm} \times 0/14\text{ohm} = 2680\text{ohm-cm}$$

لازم به ذکر است که ۳۰۴۸ cm (۱۰۰۰ فوت) در معادله بالا ضخامت کل لایه‌های d و e است.

با استفاده از معادله دوایت برای میله عمودی:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1\right)$$

$$R = \frac{2680\text{ohm-cm}}{2\pi(30/48m)100\frac{\text{cm}}{m}}\left(ln\left(\frac{8 \times 30/48m}{0/203m}\right) - 1\right)$$

$$R = 0/140\text{ohm}(6/09) = 0/852\text{ohm}$$

که در این رابطه:

ρ: مقاومت ویژه میانگین خاک (۲۶/۸ ohm-cm)

L: طول فعال آند (۳۰/۴۸ متر)

d: قطر آند (۰/۲۰۳ متر)

آندهای توزیعی

آندهای توزیعی معمولاً در نزدیکی سازه‌های قرار داده می‌شوند که برای حفاظت از آن طراحی شده‌اند. این نزدیکی به کاهش مقاومت مؤثر بین آند و سازه تمایل دارد؛ بنابراین تخمین مقاومت آند به زمین دور با استفاده از معادله ساند محافظه کارانه است. ممکن است در سامانه‌های آند توزیعی، مقاومت طولی کابل اصلی، عاملی اساسی باشد، میرایی ولتاژ و جریان در طول سیم تغذیه آند را می‌بایست در نظر گرفت. محاسبات میرایی، به تخمین از هدایت میانگین یک واحد از طول سامانه آند توزیعی نسبت به زمین نیاز دارد. این محاسبات همچنین به میزان مقاومت خطی سیم تغذیه آند (مدار) نیاز دارند. اگر آندهای تکی در سامانه آند توزیعی با فاصله زیاد از هم قرار داده نشوند، اثر مدار موازی[۳۲۹]ٔ وجود خواهد آمد. میدان مغناطیسی تولید شده توسط شار جریان از یک آند، میدان و در نتیجه خروجی جریان تمام آندهای مجاور دیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اثر متقابل، مقاومت مؤثر هر آند را به بیش از مقاومت یک آند در مقاومت ویژه خاک افزایش می‌دهد. برای مثالی در خاک ۵۰۰۰ ohm-cm به جدول ۸-۲۲ مراجعه کنید.

$$R_N = \frac{\rho}{2\pi NL}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2L}{S} + ln(0/656N)\right)$$

ساند

که در این رابطه:

R_N: مقاومت بستر (اهمی)

ρ: مقاومت ویژه میانگین خاک (ohm-cm)

N: تعداد آندهای موازی

L: طول یک آند (متر)

d: قطر آند (متر)

S: فاصله میان آندها در بستر آندی (متر)

جدول ۸-۲۲ اثر مدار موازی

S (متر)	R_a (اهم)	R میانگین/آند (اهم)
۰/۵	۴/۸۰۰	۹۶/۰
۱/۰	۲/۷۵۱	۵۵/۰
۱/۵	۲/۰۶۹	۴۱/۴
۲/۰	۱/۷۲۷	۳۴/۵
۲/۵	۱/۵۲۲	۳۰/۴
۳/۰	۱/۳۸۶	۲۷/۷

3 2 9

۳/۵	۱/۲۸۸	۲۵/۸
۴/۰	۱/۲۱۵	۲۴/۳
۴/۵	۱/۱۵۸	۲۳/۲
۵/۰	۱/۱۱۳	۲۲/۳
۵/۵	۱/۰۷۵	۲۱/۵
۶/۰	۱/۰۴۴	۲۰/۹

اغلب برای فواصل بیش از ۶ متر (۲۰ فوت) اثر مدار موازی در نظر گرفته نمی‌شود. هدایت میانگین، G برای آند معمولی $0/305 \times 1/52$ متری (1×5 فوت) با فاصله ۶ متر یا بیشتر در خاک ۶۰۰۰ ohm-cm برابر است با:

$G = 1/R_a = 0/048$ Ohms زیمنس

با فرض اینکه واحد طول یک سامانه آند شامل یک آند به اضافه طول کابل اصلی بین آندها است، هدایت واحد این سامانه آند، g میانگین هدایت یک آند، G، است که در بالا محاسبه شده است. اگر سیم مسی شماره ۴ AWG (۰/۸۲ / ۱۰۰۰ m) استفاده شود و فاصله آندها ۱۵ متر (۴۹/۲) فوت باشد، مقاومت واحد سیم برابر است با:

$$r = (0/82\text{ohms}/1000\text{m}) \times (15\text{m/unit}) = 0/0123\text{ohm/unit}$$

در جایی که واحد طول برابر ۱۵ متر است.

مقاومت بین انتهای ورودی یک گذرگاه آند توزیعی طویل و زمین دور با این رابطه محاسبه می‌شود:

$$R=R_G \coth(ax)$$

که در این رابطه:

$(r/g)^{0/5}=R_G$ (مقاومت مخصوص)

$(rg)^{0/5} = \alpha$ (ثابت میرایی)

x= واحد مسافت (تعداد واحدها) از انتهای باز

$\coth(ax) =$ کتانژایت هایپربولیک

مثال ۸-۷

مقاومت در انتهای تغذیه‌کننده ۱۰۰۰ متر (۳۲۸۰ فوت) گذرگاه آند توزیعی طویل را نسبت به زمین دور محاسبه کنید. این گذرگاه، سیم مسی شماره ۴ AWG (۰/۸۲ ohm / ۱۰۰۰ m)، فاصله آندها ۱۵ متر (۵۰ فوت)، هر آند دارای طول ۱/۵۲ متر (۵ فوت) و قطر ۰/۳ متر (۱ فوت) و مقاومت ویژه میانگین خاک ۵۰۰۰ ohm-cm است.

حل:

هر آند و ۱۵ متر (۵۰ متر) سیم گذرگاه را یک واحد در نظر بگیرید. تعداد کل واحدها در این سامانه برابر است با:

$$x = (1000/15) = 66$$

از جدول ۸-۲۲ و محاسبات نشان داده شده برای ۶ m به‌عنوان تقریبی منطقی:

$$g = 0/048 \text{ Siemens/unit}$$

$$r = 0/0123\ \text{ohm/unit}$$

بنابراین:

$$R_G = \left(\frac{r}{g}\right)^{0/5} = \left(\frac{0/0123\ \text{ohm}}{0/048S}\right)^{0/5} = 0/506$$

$$\alpha = (\text{rg})^{0/5} = (0/0123\ \text{ohm} \times 0/048S)^{0/5} = 0/024$$

$$\text{Rso} = R_G \text{coth}(\text{ax}) = 0/506\text{ohm}\ coth(0/024 \times 66)$$

$$\text{Rso} = (0/506\text{ohm})(1/088) = 0/551\ \text{Ohm}$$

اگر میرایی قابل توجه نبود، مقاومت ۶۶ آند زمانی که نسبت به زمین دور اندازه‌گیری می‌شود، چه میزان خواهد بود؟

$$R_s = \frac{1}{66g} = \frac{1}{0/048 \times 66S} = 0/316\text{ohm}$$

مقاومت کاتد به زمین

از ویژگی‌های تخمین زده شده پوشش

محاسبه مقاومت کاتد به زمین، آن چیزی بود که ضرورتاً در زمان محاسبه جریان مورد نیاز برای پایین آوردن پتانسیل نسبت به زمین به مقدار مشخص، انجام شد. برای مرور مجدد:

- کل مساحت سطح سازه را محاسبه کنید.
- از تجربیات عملیات ساخت و مشخصات پوشش، هدایت نشتی کل برای سازه را محاسبه کنید.
- مقدار عکس هدایت کل (۱/G) را برای به دست آوردن مقاومت سازه به زمین دور در نظر بگیرید.

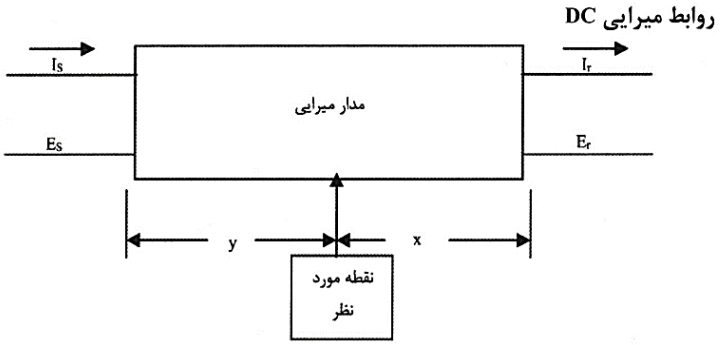
تخمین از آزمایش‌های میدانی

همانند سامانه‌های آند توزیعی، ممکن است میرایی در تعیین مقاومت سازه به زمین درگیر باشد. اندازه‌گیری مقاومت میان یک سازه عایق شده الکتریکی و هر سازه‌ای که به شیوه مناسب به زمین متصل شده باشد، مقاومت تقریبی کاتد به زمین دور را خواهد داد. مثال ۸-۳ از این روش استفاده کرده است. روش دیگر اعمال جریانی آزمایشی میان سازه و بستر آندی آزمایش یا دائمی و اندازه‌گیری پیوست الکتریکی سازه به زمین $(\Delta V/\Delta A)$ در چندین منطقه روی سازه است. الکترود مرجع مورد استفاده برای به دست آوردن تغییر پتانسیل زمین می‌بایست به اندازه کافی از سازه دور باشد به‌نحوی‌که افزایش فاصله بیش از آن منتج به تغییر بیشتر در مقدار پیوست الکتریکی نشود. میانگین چندین مقدار پیوست الکتریکی، مقاومت سازه (کاتد) به زمین دور خواهد بود، مگر اینکه میرایی قابل توجهی درگیر باشد.

مقاومت کل مدار DC

مقاومت آند به سازه

مقاومت آند به سازه مجموع تقویت آند و سازه به زمین دور است. در مورد سازه بدون پوشش یا با پوشش ضعیف و آندهای با فاصله کم، مقاومت آند به سازه از مجموع مقاومت‌ها به زمین دور کمتر خواهد بود.



ثابت میرایی یا انتشار $\alpha = \sqrt{\mathrm{rg}}$

مقاومت مخصوص (اهم) $R_G = \sqrt{\frac{r}{g}}$

مقاومت خطی واحد، اهم بر واحد طول R

هدایت واحد به زمین، (واحد طول /S) G

تعداد واحدها طول از انتها دریافت کننده X

تعداد واحدهای طول از انتهای فرستنده Y

	روابط کلی
E_r = پتانسیل انتهای دریافت کننده	۱) $\mathrm{E}=\mathrm{E}_r\cosh(\mathrm{ax})+\mathrm{R}_G I_r\sinh(\mathrm{ax})$
I_r = جریان انتهای دریافت کننده	۲) $\mathrm{E}=\mathrm{E}_r\cosh(\mathrm{ax})+\left(\frac{E_r}{R_G}\right)\sinh(\mathrm{ax})$
E_s = پتانسیل انتهای فرستنده	۳) $\mathrm{E}=\mathrm{E}_s\cosh(\mathrm{ay})-\mathrm{R}_G I_s\sinh(\mathrm{ay})$
I_s = جریان انتهای فرستنده	۴) $\mathrm{I}=\mathrm{I}_s\cosh(\mathrm{ay})-\left(\frac{E_s}{R_G}\right)\sinh(\mathrm{ay})$
R_{so} = مقاومت خط باز	۵) $R_G = R_{\mathrm{so}}\coth(\mathrm{ax})$
R_{ss} = مقاومت خط کوتاه شده	۶) $R_G = \sqrt{R_{\mathrm{so}}R_{\mathrm{ss}}}$

شکل ۸-۴۸ روابط میرایی

این مورد اغلب در زمانی است که آندها برای حفاظت اجزا در تجهیزات فرایندی یا برای حفاظت «نقطه خطر»[۳۳]در سامانه‌های لوله‌کشی مدفون، استفاده می‌شود.

سایر منابع مقاومت

اتصال‌های الکتریکی، سیم و مقاومت داخلی در سامانه‌های توان ممکن است شامل مقداری مقاومت باشند. چنین مقاومت‌هایی به‌صورت سری با مقاومت‌های آند به زمین و سازه به زمین قرار دارد.

میرایی جریان

روابط تنها در جایی اعمال می‌شوند که محیط دارای مقاومت ویژه تقریباً یکنواختی باشد.

میرایی سامانه آند

مثال ۸-۷ اثر میرایی بر مقاومت ورودی یک آند طویل توزیعی را نشان می‌دهد. رابطه ریاضی برای تغییر ولتاژ در هر نقطه «y» بین انتهای باز گذرگاه آند[۳۳]و زمین دور:

$$E = E_s \cosh(ay) - (I_s R_G)\sinh(ay)$$

که در این رابطه:

$E_s =$ تغییر ولتاژ در انتها ورودی گذرگاه آند

$I_s =$ جریان ورودی به گذرگاه آند

$\alpha =$ ثابت میرایی

$R_G =$ مقاومت مخصوص

y= تعداد واحدهای طول از انتهای ورودی گذرگاه آند

مثال ۸-۸

در مثال ۸-۷، درصورتی‌که ولتاژ بین سازه و گذرگاه آند در محل یک‌سوکننده در زمان روشن بودن آن ۱۵ ولت و در زمان خاموش بودن آن ۳ ولت باشد، جریان خروجی تقریبی آندی که در ۱۰۰۰ متری یک‌سوکننده قرار گرفته چه مقدار خواهد بود؟ فرض کنید که مقاومت میان سازه و زمین دور و میرایی روی سازه ناچیز است.

حل:

باز به ولت در منبع (E_s) برابر است با: $E_{0on}\text{-}E_{0oof} = 15 - 3 =$ 12volts

از مثال ۷-۸:

R_G اهم $= 0/506$

$\alpha = 0/024$

3 [illegible] 3 0

3 [illegible] 3 1

$0/551 = R_{\text{ss}}$ اهم

در این سامانه:

واحدهای طول تا نقطه مورد نظر (۶۶ = y)

$$1000/15 = 66$$

$$\mathrm{E}=\mathrm{E}_s\cosh(\alpha y) - (I_s R_G)\sinh(\mathrm{ay}) = 12volts/0/551ohms = 21/8A$$

$$I_s = E_0/R_{\text{so}}$$

$$E = 12\text{volts}\, cosh(1/584) - (21/8A \times 0/506\text{ohm})\, sinh(1/584)$$

$$E = (12\text{volts} \times 2/54) - (11/03\text{volts} \times 2/33) = 4/78\text{volts}$$

ازآنجاکه، هدایت میانگین یک تک آند از مثال ۸–۷، ۰/۰۴۸ زیمنس است، جریان از آند نزدیک به موقعیت ۱۰۰۰ متر:

$$\mathrm{I}=\mathrm{Eg}$$

$I = 4/78\text{volts} \times 0/048S = 0/229$ آمپر

این میزان چگونه با جریان خروجی میانگین از آندهای نزدیک به انتهای تغذیه کننده گذرگاه مقایسه می‌شود؟ $I = 12/0\text{volt} \times 0/048S =$؟

$0/576A$

میرایی سازه

میرایی جریان روی سازه‌ای طویل مشابه مسیر آند طولانی است که در مثال‌های ۸–۷ و ۸–۸ توضیح داده شد. چنانچه سازه بسیار طولانی یا دارای هدایت نشتی میانگین بالا به زمین دور باشد، مقاومت در هر جهت از منبع توان حفاظت کاتدی تقریباً برابر R_G (مقاومت مخصوص) خواهد بود. برای سازه‌های کوتاه‌تر و سازه‌های با هدایت نشتی کم، مقاومت در هر جهت از منبع توان با استفاده از رابطه متعلق به خطوط انتها باز که در مثال ۸–۷ استفاده شد، داده خواهد شد. این مفهوم در مثال‌های بعدی شرح داده می‌شود.

مثال ۸–۹

یک خط لوله فولادی جوشکاری شده ۲۰/۳ سانتی‌متری (۸ اینچ) (مقاومت خطی = ۰/۰۲۸۷ اهم در ۱۰۰۰ متر) که دارای هدایت نشتی پوشش مخصوص، g، با میانگین اندازه‌گیری شده $7/5 \times 10^{-5}$ است را در نظر بگیرید. خط لوله دارای طول ۳۲۲۰۰ متر با اتصالات عایق در هر انتها است. میانگین مقاومت ویژه خاک در تمام منطقه ohm-cm ۱۰۰۰۰ است. مقاومت کاتد (سازه) به زمین دور از مرکز خط که منبع توان در آنجا قرار گرفته، در هر جهت چه مقدار است؟ رابطه میان چگالی

جریان دریافت شده توسط لوله در هر انتها (۱۶۱۰۰ متر از منبع توان) به مقدار دریافت شده در نزدیکی منبع توان در وسط خط لوله، چه خواهد بود؟

حل:

یک واحد طول را ۱۰۰۰ متر در نظر بگیرید.

داده‌ها:

$0/0287 \text{ohms/unit} = r$

قطر لوله (d) = ۲۰/۳ سانتی‌متر (۰/۲۰۳ متر)

g- هدایت نشتی مخصوص $7/5 \times 10^{-5} \text{S/m}^2$ در خاک ۱۰۰۰۰ ohm.cm

$$g = \pi dLg'$$

$$g = \pi(0/203m)(1000m)(7/5 \times 10^{-5}\text{S/m}^2) = 0/0478\text{S/unit}$$

$$\alpha = (rg)^{0/5} = 0/037$$

$$R_G = (r/g)^{0/5} = 0/775\text{ohms}$$

از رابطه ۵ شکل ۸-۴۸

$$R_{so} = R_G \coth(\alpha x)$$

$x = 16100/1000 = 16/1$ واحد طول

$R_{so} = 0/775\text{ohms} \coth(0/037 \times 16/1) =$ اهم

$1/45$

مقاومت سازه به زمین دور برابر است با

۱/۴۵ ÷ ۲ ohms $= 0/73$ اهم

از رابطه ۳ (شکل ۸-۴۸):

$$E = E_s \cosh(\alpha y) - R_G I_s \sinh(\alpha y)$$

۱ ولت تغییر در پتانسیل لوله به زمین دور در منبع توان را فرض کنید:

$$I_s=E_sR_{so} = 1.0\ \text{v} \div 1.45\Omega = 0.69\text{A}$$

$$\alpha\text{y}=0.037 \times 16.1 = 0.596$$

$$\text{E} = 1.0\ \text{v}\coth(0.569) - (0.775\Omega \times 0.69)\sinh(0.569)$$

$$\text{E} = 1.183\text{V} - 0.338\text{V} = 0.845\text{volt}$$

$$\text{E}=E_s = 0.845$$

ازآنجاکه، چگالی جریان دریافت شده در سطح لوله از زمین، با تغییر ولتاژ اندازه‌گیری شده نسبت به زمین متناسب است:

$$i_r = 0/845 i_s$$

لازم به ذکر است که تمام محاسبات میرایی جریان در زمان صفر و در غیاب پلاریزاسیون الکتروشیمیایی معتبر است. تغییرات پتانسیل لوله به زمین دور که درمعادله‌های میرایی محاسبه شده، مجموع افت ولتاژهای بین لوله در نقطه مورد نظر و زمین دور است که توسط شار جریان منبع ایجاد شده‌اند.

عمر سامانه

آندهای فداشونده

تمام اجزای سامانه حفاظت کاتدی دارای طول عمر محدود هستند. اجزای یک‌سوکننده، عایق سیم و آندها با زمان از بین می‌روند. آندهای فداشونده در فرایند تولید جریان مصرف می‌شوند. ظرفیت آمپر ساعت (با ضریب کارایی برای ماده آند به خصوص) به ما اجازه می‌دهد تا میزان وزن مورد نیاز از فلز آند برای تأمین تعداد داده شده آمپر ساعت از جریان را تعیین کنیم. در تخمین طول عمر برای سامانه حفاظت کاتدی آند گالوانیک، این موارد را در نظر بگیرید:

- دمای میانگین سالانه محیط و اثر دما بر پتانسیل آند، جریان مورد نیاز و مقاومت مدار
- مقاومت مدار آند
- مقاومت مدار سازه و رفتار آن با زمان
- ولتاژ کاری کل شامل پلاریزاسیون کاتد و آند

مثال ۸-۱۰

آزمایشی میدان نشان می‌دهد که ۰/۳۷۵ آمپر برای حفاظت یک قسمت پوشش شده از لوله مورد نیاز است. در این جریان، لوله تا ۰/۹۰۰- ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس پلاریزه می‌شود. لوله دارای مقاومت ۰/۸ اهم، اندازه‌گیری شده نسبت به زمین دور است. تجربه نشان می‌دهد که مقاومت به تدریج در طول چند سال آینده کاهش یافته و در حدود نصف مقدار کنونی (۰/۴ اهم) ثابت می‌شود. با این فرض که همان تغییر پتانسیل لوله به زمین دور، حفاظت را نگه خواهد داشت، چند آند منیزیم پتانسیل بالا ۷/۷ کیلوگرمی (۱۷ پوندی) برای حفاظت این قسمت از لوله مورد نیاز خواهد بود؟ طول عمر مفید مورد انتظار چقدر خواهد بود؟

حل:

تغییر پتانسیل در حال حاضر برابر است با: $E = 0/375A \times 0/80\text{ohm} =$

$0/30\text{volt}$

جریان طولانی مدت مورد نیاز برای حفظ تغییر پتانسیل ۰/۳۰ ولتی برابر است با:

$$I = 0/30\text{volt}/0/40\text{ohm} = 0/75A$$

اطلاعات تأمین‌کننده آند بیان می‌کند که در خاک ۵۰۰۰ ohm-cm، یک آند منیزیم پتانسیل بالا ۰/۴ آمپر (۴۰ mA) به یک سازه پلاریزه شده تا ۰/۸۵ ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس، خروجی خواهد داد. داده‌ها اشاره می‌کنند که سازه دارای مقاومت به زمین ناچیز و در نتیجه عاری از افت ولتاژ است. مقاومت یک تک آند منیزیم پتانسیل بالا (۱/۷۵- ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس) نسبت به زمین دور را می‌توان محاسبه کرد:

$R_a = (1/75\ \text{V} - 0/85V)/0/40A =$ اهم

$22/5$

با فرض اینکه این قسمت از لوله تا ۰/۹۰۰- ولت نسبت به CSE پلاریزه باقی خواهد ماند، ولتاژ محرکه موجود برای سامانه آند گالوانیک برابر خواهد بود با:

$E_{\text{net}} = -1/75\ \text{V-}(-0/900V) = -0/850$ ولت

مقاومت مدار کل که اجازه عبور جریان ۰/۷۵ آمپری را در ولتاژ محرکه ۰/۸۵ ولت می‌دهد برابر است با:

$\text{R}_\text{t} = 0.85\text{V} \div 0.75\text{A} = 1.133$ اهم

ازآنجاکه، تخمین زده شده که مقاومت لوله به زمین ۰/۴ اهم شود، مقاومت گروه آندهای فداشونده می‌بایست برابر باشد با:

$R_{\text{a.g}} = 1/133\Omega - 0/4\Omega = 0/73$ اهم

فرض کنید که برای جلوگیری از اثر مدار موازی بتوان آندها را با فاصله از یکدیگر قرار داد، تعداد آندهای مورد نیاز برای رسیدن به مقاومت بستر مورد نیاز برابر است با:

$$\text{N}=\text{R}_a/\text{R}_{\text{a.g}}$$

$\text{N} = 22.5\Omega/0.73\Omega = 30.8(31)$ آند

وزن کل منیزیم در سامانه آند برابر خواهد بود با:

۳۱ آند × ۷.۷ kg ÷ ۲۳۹ کیلوگرم = آند کیلوگرم

خروجی آمپر ساعت کل سالانه برابر خواهد بود با:

$365\text{d/yr} \times 24\text{hr/d} \times 0/75A = 6570$ آمپر ساعت بر سال

ظرفیت آمپر ساعت سامانه آند (با فرض 1100A-hrs/kg) برابر است با:

$239\text{kg} \times 1100\text{A-hrs/kg} = 262900$ آمپر ساعت

عمر آند به این ترتیب تخمین زده می‌شود:

$262900\text{A-hrs}/6570\text{A-hrs/yr} = 40$ سال

توجه: ظرفیت آمپر – ساعت/کیلوگرم برای آندهای منیزیم به چگالی جریان و پشت‌بند مخصوص مورد استفاده در حین نصب بستگی دارد. طول عمر واقعی ممکن است متفاوت باشد. همچنین، ضریب کارایی (درصد قابل استفاده آند) در محاسبات بالا وارد نشده است.

نکات احتیاطی برای طراحی حفاظت کاتدی

مقدمه

سیستم‌های حفاظت کاتدی به اعمال جریان‌های الکتریکی جهت مقابله با تمایل طبیعی فلزات برای مراجعت به ترکیب اولیه خود در طبیعت وابسته هستند. علاوه بر خطراتی که برای کار با سیستم‌های برقی وجود دارد، سیستم‌های حفاظت کاتدی ممکن است از طریق عبور جریان در مسیرهای ناخواسته باعث تشدید خوردگی سازه‌های دیگر شوند که در مجاورت سازی تحت حفاظت قرار دارند. اعمال پتانسیل‌های بیش از حد نیاز موجب آسیب به سیستم‌های حفاظت کاتدی می‌شود. اعمال پتانسیل‌های کمتر از حد نیاز، موجب حفاظت ناکافی در سازه می‌شود و در این حالت نرخ خوردگی سازه کمتر از نرخ خوردگی سازه در حالت بدون حفاظت می‌شود.

ولتاژها و جریان‌ها اضافی (بیش از حد نیاز)

میزان جریان عبوری در مسیرهای ناخواسته در اطراف سازه، بستگی به میزان کل جریان اعمالی به سازه تحت حفاظت کاتدی دارد. بنابراین مسائل و مشکلات حفاظت کاتدی سازه‌های دارای پوشش خوب که به جریان کمتری برای حفاظت احتیاج دارند، بسیار کمتر از حفاظت کاتدی سازه‌های فاقد پوشش و یا با پوشش ضعیف که به جریان بیشتری نیاز دارند، می‌باشد. درصورتی‌که پتانسیل اعمالی به سازه‌های تحت حفاظت منجر به آسیب به پوشش سازه‌ها و باعث تردی هیدروژنی نیز نشود، اعمال جریان‌های اضافی باعث زوال و خوردگی در سازه‌های تحت حفاظت نمی‌شود ولی باعث حملات موضعی بر سازه‌های اطراف می‌شود.

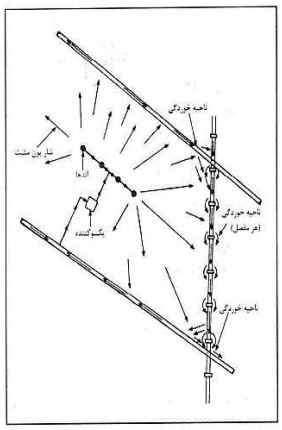
تداخل

عبور جریان در مسیرهای ناخواسته که منجر به حملات خوردگی در سازه‌های اطراف می‌شود به تداخل موسوم است. سازه‌های اطراف نیز سازه‌های غریبه نامیده می‌شوند. در شکل‌های ۸-۴۹ و ۸-۵۰ مکانیزم‌های دو نوع از شرایطی که منجر به تداخل می‌شوند، نشان داده شده‌اند. در شکل ۸-۴۹ جریان‌های ناخواسته از داخل دو خط لوله در مجاورت سازه‌های تحت حفاظت عبور می‌کنند.

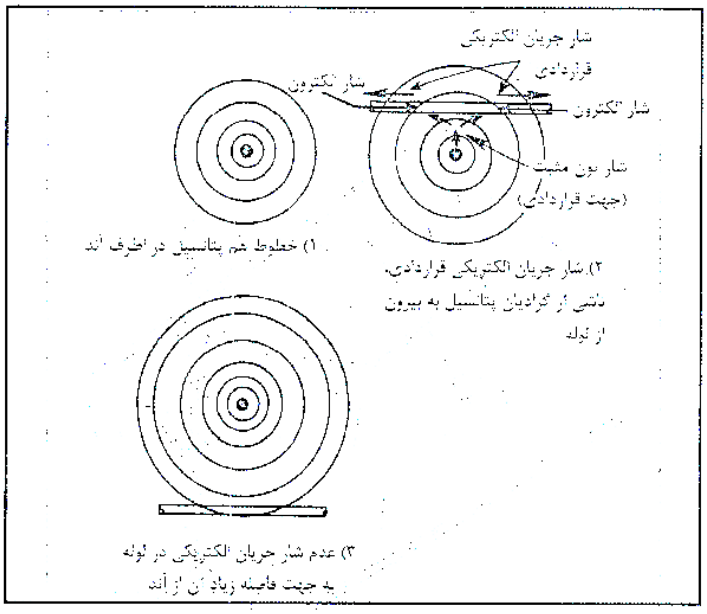
خوردگی در مناطقی که یون‌های مثبت از سطح فلز به داخل محیط وارد می‌شوند تشدید می‌شود اگرچه خوردگی معمولاً بر سطح فلز تحت حفاظت تشدید نمی‌شود، ولی اثرات تداخلی معروف به تداخل آندی باعث می‌شود تا توزیع جریان حفاظتی بر سازه تحت حفاظت ناهماهنگ شده و میزان جریان حفاظتی در بعضی از نقاط سازه کمتر از حد لازم برای حفاظت کامل شود. خوردگی معمولاً در نقاطی به وقوع می‌پیوندد که از آن نقاط جریان سازه را ترک کرده و وارد محیط می‌شود. در بعضی از مدل‌های الکتریسیته از جهت عبور یون‌های مثبت در الکترولیت برای نشان دادن جهت عبور بارهای مثبت فرضی در مسیرهای

فلزی استفاده می‌شود. این در واقع برای نشان دادن جهت جریان استاندارد است. در تکنیک حفاظت کاتدی، از عبور جریان استاندارد به طور وسیعی استفاده می‌شود و در واقع نشان دادن مسیر عبور یون‌های (مثبت) از داخل الکترولیت در سیستم‌های حفاظت کاتدی برای ابهام‌زدایی و رفع هرگونه تناقض است. نشان دادن عبور جریان‌های یونی و الکترونی در تمام سیستم‌های حفاظت کاتدی بر روی بهتر توضیح دادن آنچه که در حین فرایندها اتفاق می‌افتد مفید است.

در شکل ۸-۵۰، وجود گرادیان پتانسیل در اطراف یک آند سیستم اعمال جریان، منجر به عبور جریان به سازه غریبه در مجاورت آند می‌شود. این جریآنکه به جریان استاندارد یا جریان یون مثبت موسوم است و در طول لوله (لوله فرضی) جریان می‌باید تا به نقطه آندی برسد. در این نقطه جریان لوله را ترک می‌کند و وارد الکترولیت می‌شود. در این نقطه خوردگی شدید به وقوع می‌پیوندد.



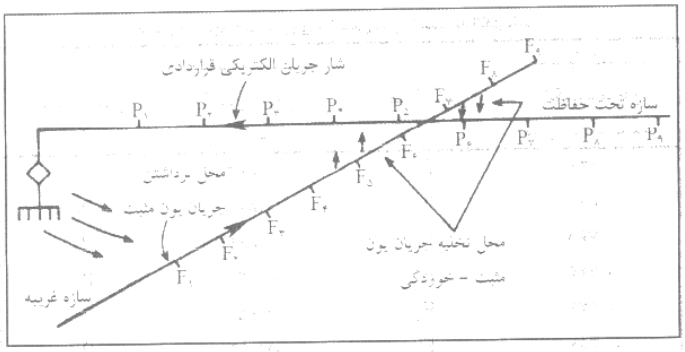
شکل ۸-۴۹ تداخل به واسطه سیستم حفاظت کاتدی از نوع جریان



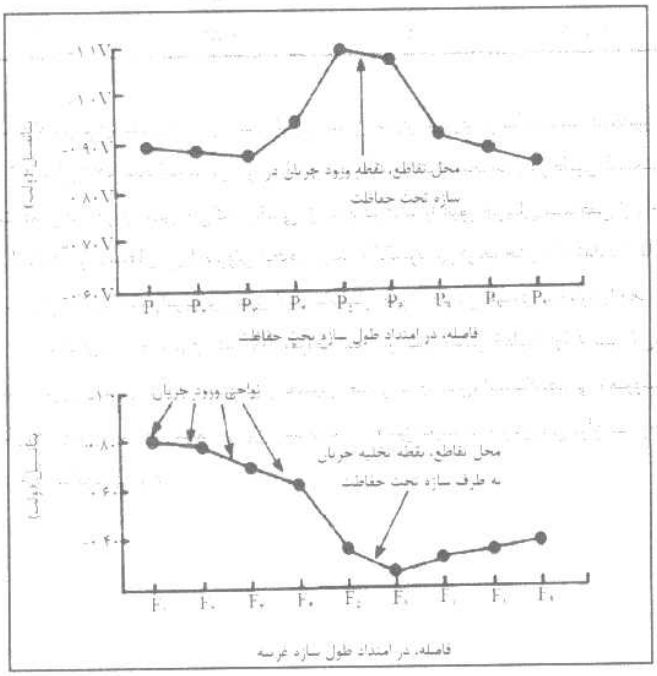
شکل ۸-۵۰ تداخل ناشی از گرادیان‌های پتانسیلی

تشخیص تداخل

تداخل سیستم حفاظت کاتدی از طریق اندازه‌گیری پتانسیل سازه به الکترولیت و همچنین میزان جریان عبوری از سازه و در نتیجه، افت ولتاژ ناشی از عبور جریان از مقاومت الکتریکی سازه قابل تشخیص است. شکل ۸-۵۱ نشان‌دهنده وقوع تداخل است. این شکل نشان‌دهنده مواضعی است که در آنها پتانسیل سازه به الکترولیت اندازه‌گیری می‌شود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل سازه به الکترولیت در آزمایش‌های تداخل، در جدول ۸-۲۳ و همچنین شکل ۸-۵۲ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۸-۵۲ نشان داده شده است، موقعیت سازه غریبه توسط اثرات آن بر روی سازه تحت حفاظت تعیین می‌شود. به همین ترتیب با اندازه‌گیری پتانسیل بر روی سازه غریبه به راحتی می‌توان نقاط کاتدی (نقاط دریافت جریان) و نقاط آندی (نقاط خروج جریان) را بر روی آن تعیین نمود.



شکل ۸-۵۱ آزمایش تداخل

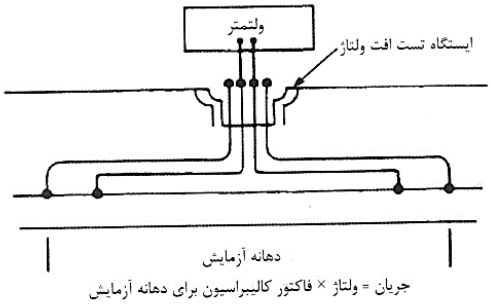


شکل ۸-۵۲ آزمایش تداخل از نمودار پتانسیل‌ها

جدول ۸-۲۳ نتایج اندازه‌گیری پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت

نقطه آزمایش	پتانسیل نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس	نقطه آزمایش	پتانسیل نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس
P_1	-۰/۸۸۳	F_1	-۰/۸۳۲
P_2	-۰/۸۷۶	F_2	-۰/۸۱۰
P_3	-۰/۸۶۴	F_3	-۰/۷۶۵
P_4	-۰/۹۲۷	F_4	-۰/۷۴۶
P_5	-۱/۰۵۸	F_5	-۰/۴۲۱
P_6	-۱/۰۱۲	F_6	-۰/۳۸۶
P_7	-۰/۸۸۱	F_7	-۰/۴۰۵
P_8	-۰/۸۵۴	F_8	-۰/۴۱۳
P_9	-۰/۸۳۶	F_9	-۰/۴۱۹

روش میدانی دیگر برای تعیین تداخل، اندازه‌گیری میزان جریان عبوری از سازه است. همان‌طور که در شکل ۸-۵۳ نشان داده شده است، این روش شامل اندازه‌گیری افت پتانسیل در طول قسمتی از سازه است که از آن جریان عبور می‌کند. بخشی از سازه در ابتدا با عبور جریان مشخص از داخل آن کالیبره می‌گردد که با استفاده از سیم‌های رابط بیرونی انجام می‌شود. حال با استفاده از فاکتور کالیبراسیون می‌توان با اندازه‌گیری‌های بعدی افت پتانسیل، میزان جریان عبوری از سازه را محاسبه نمود. این اندازه‌گیری به آزمایش‌های افت IR معروف است. در طول مسیر خطوط لوله طولانی، به منظور اندازه‌گیری میزان جریان عبوری و تعیین تغییرات جریان، ایستگاه‌هایی معروف به ایستگاه‌های آزمایش تعبیه می‌شوند. در این ایستگاه‌ها با تعیین تغییرات جریان می‌توان به وجود تداخل در خطوط لوله پی برد.



شکل ۸-۵۳ اندازه‌گیری شار جریان در سازه

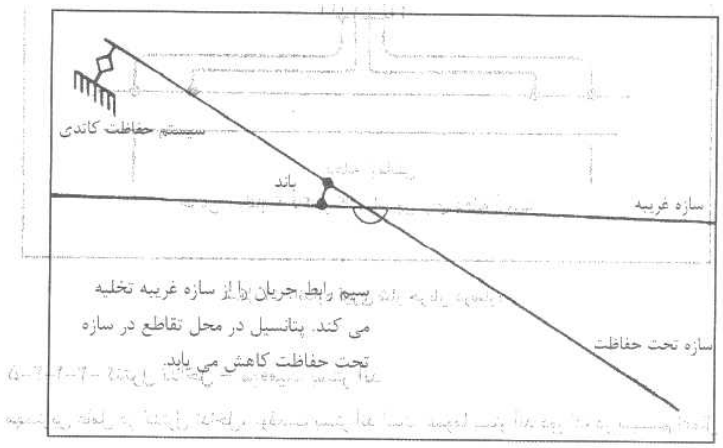
کنترل تداخل - موقعیت بستر آند

مهم‌ترین عامل در کنترل تداخل، موقعیت بستر آند است. عموماً بستر آند دور که در سیستم اعمال جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد مشکلات تداخل بیشتری در مقایسه با سیستم آندهای فداشونده ایجاد می‌کنند که در آنها آندها در فاصله نزدیک‌تری

از سازه قرار دارند. در این مورد پتانسیل محرکه کم آندهای فداشونده (حدود ۱ ولت یا کمتر) نیز دخیل است. بنابراین در تعیین محل بسترهای آند دور در سیستم اعمال جریان باید به اثرات تداخلی آن بر سازه‌های غریبه توجه خاص مبذول نمود.

کنترل تداخل از طریق مرتبط کردن سازه‌ها به یکدیگر

یک روش جهت کنترل تداخل، مرتبط کردن سازه تحت حفاظت به سازه غریبه می‌باشد. سیم رابط با مقاومت پایین و یا مقاومت بالا می‌باشد. شکل ۸-۵۴ روش اصلاح تداخل را با استفاده از سیم رابط نشان می‌دهد. در واقع توسط مرتبط نمودن دو خط لوله به یکدیگر ضرورتاً هر دو خط لوله تحت حفاظت قرار می‌گیرند. در این‌گونه موارد لازم است تا یک ایستگاه آزمایش در محل ارتباط دو خط لوله تعبیه شود. در این ایستگاه می‌توان با انجام آزمایش از پیوستگی رابطه و همچنین میزان جریان عبوری از آن مطلع گردید. به طور کلی بهتر است تا در محل تقاطع خطوط لوله و اصولاً هر محلی که در آن احتمال تداخل در آینده وجود دارد، ایستگاه کنترل و آزمایش تعبیه شود. بدین ترتیب به‌راحتی می‌توان در هر زمان و در صورت نیاز دو خط لوله متقاطع را به یکدیگر مرتبط نمود و همچنین بر روی آنها آزمایش‌های لازم را انجام داد.

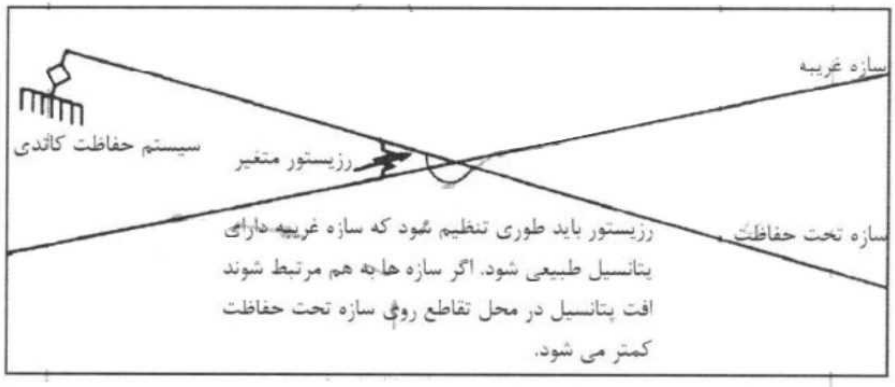


شکل ۸-۵۴ کنترل تداخل از طریق مرتبط کردن سازه‌ها به یکدیگر

کنترل تداخل - استفاده از رزیستور

روش ارتباط مستقیم سازه‌ها اغلب روش مطلوبی نیست زیرا یا سیستم حفاظت کاتدی موجود قادر به تأمین جریان لازم برای حفاظت دو سازه نمی‌باشد و یا آنکه سازه غریبه و سازه تحت حفاظت در مالکیت یک سازمان نمی‌باشند. قابل ذکر است که میزان جریان اعمالی به سازه غریبه باید به حداقل مقدار ممکن افزایش یابد. در این حالت از یک رزیستور در بین دو سازه استفاده می‌شود. حال باید مقاومت این رزیستور طوری تنظیم شود تا میزان جریان اعمالی به سازه غریب به حدی باشد تا پتانسیل آن به همان میزان اولیه که در غیاب سازه تحت حفاظت قرار داشت، برسد. شکل ۸-۵۵ این حالت را نشان می‌دهد. شکل ۸-۵۶ نیز چگونگی اندازه‌گیری پتانسیل بر روی هر دو سازه را نشان می‌دهد ایستگاه‌های آزمایش معمولاً در محل این رزیستورها نصب شده تا عملیات تنظیم و اصلاح‌سازی به‌راحتی قابل انجام باشد. این رزیستورها معمولاً یا به طور تجاری و استاندارد تهیه

می‌شوند و یا آنکه باید در محل از سیم نایکروم (نیکل - کروم دار) به طول مناسب بریده و بعد آن را به شکل فنری در آورده و به‌عنوان رزیستور استفاده نمود.



شکل ۸-۵۵ کنترل تداخل از طریق باند مقاومتی

تنظیم رزیستور برای اصلاح تداخل، از طریق نصب یک باند مقاومتی موقتی انجام می‌شود. بدین ترتیب جریان عبوری از رزیستور و تغییرات پتانسیل حاصله به‌وسیله باند مقاومتی موقتی اندازه‌گیری می‌شود مقدار صحیح جریان باند از طریق فرمول‌های زیر قابل تعیین می‌باشد.

$$\frac{\Delta E_t}{I_d} = \frac{\Delta E_r}{I_t}$$

$$I_t = \frac{(\Delta E_t \times I_d)}{\Delta E_t}$$

که در آنها:

I_t: مقدار صحیح جریان آند

I_d: میزان جریان عبوری از باند موقتی

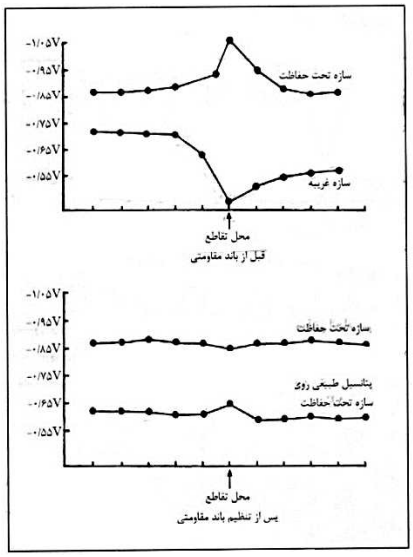
ΔE_r: $E_{fn}-E_{fr}$= تغییرات پتانسیل لازم برای حذف تداخل

ΔE_t: $E_{fn}-E_{frd}$= تغییرات پتانسیل حاصله با استفاده از باند موقتی

E_{fn}: پتانسیل طبیعی سازه غریبه

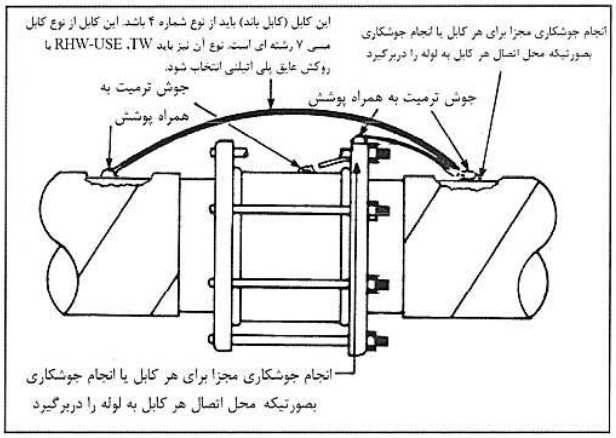
E_{fr}: پتانسیل سازه غریبه بدون استفاده از باند

E_{frd}: پتانسیل سازه غریبه با استفاده از باند موقتی



شکل ۸-۵۶ تأثیرات باند روی پتانسیل‌های سازمان تداخل

برای یک باند دائمی، میزان مقاومت رزیستور برای حالتی که پتانسیل سازه غریبه در محل تقاطع با سازه خودی در حال اندازه‌گیری است، تنظیم می‌شود. در این حالت، میزان مقاومت زمان اصلاح شده است که پتانسیل سازه غریبه معادل E_{fn} (پتانسیل طبیعی) باشد. از باندینگ نیز همانند آنچه که در شکل ۸-۵۷ نشان داده شده است برای تضمین پیوستگی سازه‌های مدفون در خاک استفاده می‌شود. استفاده از باندینگ هم برای پیشگیری از تداخل و هم برای صحیح کار کردن سیستم‌های حفاظت کاتدی مفید می‌باشد.

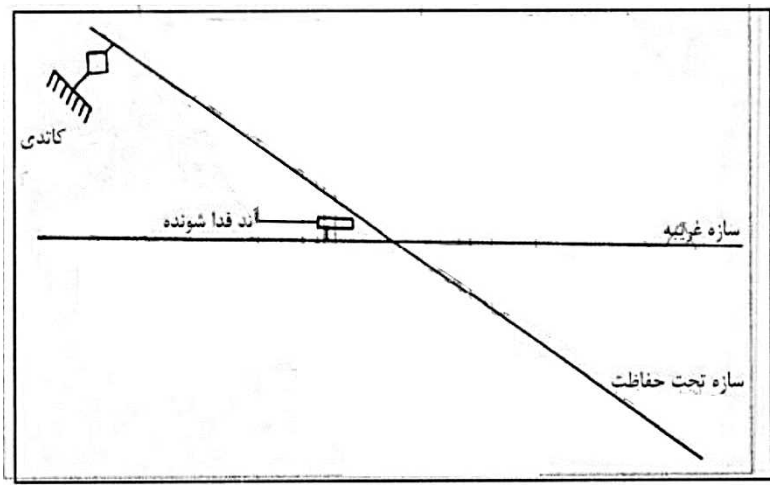


شکل ۸-۵۷ استفاده از باندینگ برای ایجاد پیوستگی

کنترل تداخل با استفاده از آندهای فداشونده

در بعضی موارد برای کنترل تداخل، از نصب آندهای فداشونده بر روی سازه‌های غریب استفاده می‌شود. با استفاده از این روش پتانسیل سازه غریبه در مجاورت سازه تحت حفاظت به اندازه پتانسیل سازه تحت حفاظت یا منفی‌تر از آن در محل تقاطع می‌رسد. بدین ترتیب یک جریان در جهت عکس جریان تداخلی در سازه غریبه اعمال می‌شود. اگر سازه غریبه دارای پوشش

خوبی باشد، آند منیزیم به‌خوبی تمام جریان‌های تداخلی را خنثی می‌کند. اگر سازه غریبه دارای پوشش ضعیف و یا بدون پوشش باشد و یا آنکه جریان تداخلی بزرگ باشد، نصب آند در محل تقاطع، مقدار جریان تداخلی در محل تقاطع را کاهش می‌دهد یا حذف می‌کند، اما جریان تداخلی همچنان در سازه غریبه در دو سمت محلی که آند وصل شده است، جریان می‌یابد. به طور خلاصه وجود آند فداشونده بر روی سازه غریبه در محل تقاطع بسیار مفید است و در بعضی مواقع نیز کاملاً مشکلات و مسائل تداخلی را رفع می‌کند. البته در بعضی موارد نیز قادر به حل مشکل به طور کامل نیست و باید از اتصالات مقاومتی نیز هم‌چنان استفاده شود. شکل ۸-۵۸ چگونگی استفاده از آند فداشونده برای کنترل مسائل تداخلی را نشان می‌دهد. اندازه آند باید طوری طراحی شده باشد که بتواند جریان بیش از جریان لازم در محل تقاطع ارائه نماید.



شکل ۸-۵۸کنترل تداخل با استفاده از آند فداشونده

اثرات دانسیته جریان بالا

اعمال دانسیته جریان‌های بالا منجر به تردی هیدروژن یا کندگی پوشش می‌شود. در اکثر موارد انتخاب نامناسب محل بستر آند در سیستم حفاظت کاتدی اعمال جریان و یا تداخل با سازه‌های غریب منجر به توزیع غیریکنواخت جریان بر روی سازه تحت حفاظت می‌شود. ایجاد پتانسیل‌های بهینه حفاظتی در بعضی از نقاط سازه، منجر به ایجاد پتانسیل‌های اضافی (بیش از حد نیاز) در بعضی دیگر از نقاط سازه می‌شود. این شرایط را می‌توان با نصب آندهای اضافی با تغییر مکان بستر آند اصلاح نمود تا آنکه توزیع جریان در سازه یکنواخت‌تر گردد. در بعضی موارد می‌توان سازه را به قسمت‌های مجزا تقسیم نمود و توزیع جریان را با نصب اتصالات مقاوم بین سازه و یک‌سوکننده بهبود بخشید. پتانسیل‌های اضافی به‌ندرت در مورد سیستم آندهای فداشونده به وقوع می‌پیوندد. اگر این حالت به وقوع پیوست می‌توان آن را با نصب مقاومت در سیم رابط بین آند و سازه اصلاح نمود.

اثرات pH الکترولیت

آلومینیم و سرب نباید در محیط‌هایی که pH آنها بیش از ۸ است حفاظت کاتدی شوند. در خاک‌های فشرده مانند خاک رس، محیط قلیایی تشکیل شده در اطراف کاتد در اثر حفاظت کاتدی، باعث افزایش pH به مقادیر بسیار بالا می‌شود و در نتیجه آلومینیم و سرب تحت حملات شیمیایی شدید قرار می‌گیرند. درصورتی‌که محیط اطراف سازه آب جاری و روان باشد، در

این صورت شرایط قلیایی از اطراف سازه شسته می‌شود و در نتیجه حملات تخریبی شیمیایی بر آلومینیم و سرب رخ نمی‌دهد. بعضی از انواع پوشش‌ها همچون آلکیدها نیز توسط محیط قلیایی شدیداً آسیب می‌بینند. شرایط با pH پایین (اسیدی) هم خوردگی را تشدید می‌کنند و هم بر سیستم‌های حفاظت کاتدی دارای آثار مخرب و زیانبار هستند. در خاک‌های با pH پایین‌تر از ۳، میزان جریان لازم برای حفاظت کاتدی فولاد تقریباً ۱۰ برابر بیش از آن چیزی است که برای حفاظت کاتدی فولاد در خاک‌های خنثی لازم است. بالا بودن میزان جریان لازم برای حفاظت کاتدی فولاد در چنین شرایطی، انجام حفاظت کاتدی فولاد در این محیط‌ها را بسیار سخت و پرهزینه می‌سازد. استفاده از پوشش‌های با کیفیت بسیار بالا به همراه حفاظت کاتدی فولاد در چنین محیط‌هایی بسیار ضروری است.

خطرات حاصل از وجود سیستم‌های حفاظت کاتدی

سیستم‌های حفاظت کاتدی مانند همه سیستم‌های الکتریکی می‌توانند تحت شرایط خطرناک باشند. عملکرد چنین سیستم‌هایی می‌تواند کاملاً ایمن باشد، اگر در هنگام طراحی، نصب، بهره‌برداری و نگهداری این سیستم‌ها ملاحظات و احتیاط‌ها لازم و ضروری، مدنظر قرار گرفته باشد.

خطرات انفجار

در نواحی که مایعات آتش‌گیر یا گازهای انفجار وجود دارند، باید توجه خاصی به طراحی صحیح و اصولی سیستم‌های حفاظت کاتدی چه سیستم اعمال جریان و چه سیستم آندهای فداشونده مبذول گردد. نمونه‌هایی از این نواحی عبارت از محل‌های استقرار مخازن سوخت، ترمینال‌های سوخت، پالایشگاه‌ها و دپوهای مواد منفجره می‌باشند. ازآنجاکه، جریان‌های حفاظتی مربوط به سیستم‌های حفاظت کاتدی وقتی از داخل زمین عبور می‌کنند، تولید جرقه یا حرارت می‌کنند بنابراین استفاده از سیستم‌های حفاظت کاتدی در این‌گونه محل‌ها ایمن می‌باشد. اما یک‌سوکننده‌های مورد استفاده در این‌گونه محل‌ها باید از نوع مقاوم در مقابل انفجار و در داخل روغن نیز غوطه‌ور باشند. درصورتی‌که از این نوع یک‌سوکننده استفاده نمی‌شود باید حتماً یک‌سوکننده در این‌گونه محل‌ها در نقاط دور از نقاط پر مخاطره قرار داده باشد. در ضمن کلیه عمل اتصالات باید در یک محل ضدانفجار انجام پذیرد. علاوه بر مایعات و گازهای انفجاری، در بعضی موارد دیگر نیز باید تمهیدات ایمنی اندیشیده شود. از آن جمله می‌توان به این مورد اشاره نمود که جریان‌های سیستم اعمال جریان نیز توسط سیم‌های رابط به مواد منفجره که برای انهدام در محل‌های در نظر گرفته شده‌اند، جذب می‌شوند و باعث انفجار می‌شوند. بنابراین در محل‌هایی که عمل انفجار انهدام صورت می‌پذیرد، باید سیستم‌های حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان در زمان‌هایی خاموش شوند که عمل انفجار صورت می‌پذیرد.

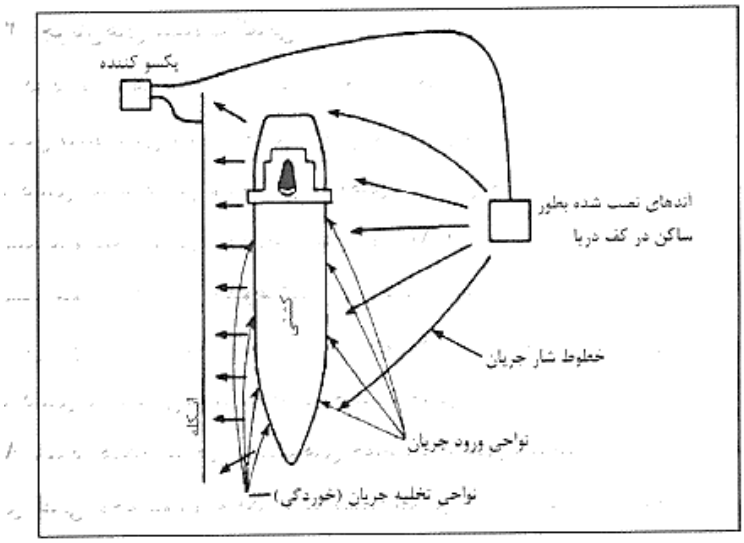
باندینگ برای ایمنی الکتریکی

استفاده از باندینگ الکتریکی برای ایمنی در محل‌هایی که کشتی‌ها، خودروها یا هواپیماها در حال سوخت‌گیری هستند، لازم می‌باشد. هر گرادیان ولتاژ در خاک می‌تواند منجر به ایجاد اختلاف پتانسیل بین سازه‌های موجود در نقاط مختلف خاک گردد. اختلاف پتانسیل می‌تواند منجر به جرقه‌زنی خطرناک گردد. سیستم‌های حفاظت کاتدی می‌تواند باعث افزایش سطح چنین

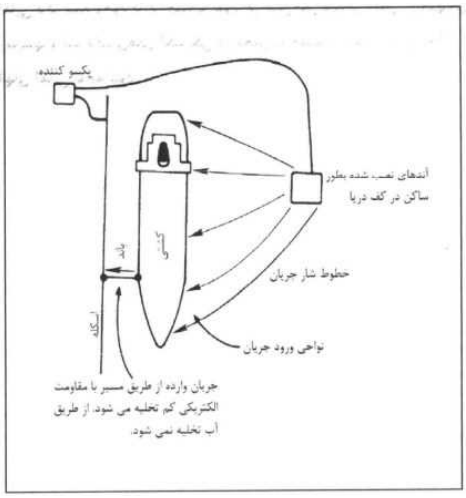
گرادیان ولتاژی شوند. باندینگ الکتریکی عادی که در این چنین شرایط استفاده می‌شوند برای کنترل این نوع خطر کافی است.

گرادیان‌های ولتاژ حاصله از سیستم‌های حفاظت کاتدی همچنین در موارد دیگری می‌توانند تولید جرقه کنند و آن در حالتی رخ می‌دهد که در هنگام تعمیرات، خط لوله بریده شود. برای پیشگیری از این حالت باید قبل از بریدن خط لوله باندهای موقتی در طول خط لوله نصب شوند.

تداخل حاصل از قرار گرفتن یک کشتی در مجاورت یک اسکله تحت حفاظت کاتدی می‌تواند منجر به حملات خوردگی شدید بر روی کشتی گردد (شکل۸-۵۹). این مشکل را می‌توان به طور عادی از طریق اتصال یک باند مستقیم بین سازه تحت حفاظت کاتدی و کشتی بر طرف نمود (شکل ۸-۶۰).



شکل ۸-۵۹ تداخل ناشی از حفاظت کاتدی اسکله



شکل ۸-۶۰ کنترل تداخل از طریق باندینگ

جریان‌های متناوب القایی

همان‌طور که در مورد هر سازه بزرگ صادق است که در مجاورت و خطوط انتقال برق متناوب قرار دارد، جریان متناوب می‌تواند بر اجزای مدفون یا اجزای موجود روی سطح زمین سیستم‌های حفاظت کاتدی القا شود. این به‌ویژه برای سازه‌های با پوشش خوب و یا سازه‌هایی صادق است که به‌خوبی از زمین ایزوله نشده‌اند و به طور موازی با خطوط انتقال برق AC قرار دارند. خطوط لوله‌ای که دارای مسیر عبوری یکسان با خطوط انتقال برق هستند به طور ویژه تحت تأثیر ولتاژهای AC القایی هستند. این نوع ولتاژها علاوه بر ایجاد صدمات خوردگی بر سازه‌ها، برای افرادی که به سیستم‌های حفاظت کاتدی نزدیک می‌شوند نیز دارای خطرات جدی است. موقعیت قرار گرفتن خطوط انتقال برق AC باید در هنگام طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی مدنظر قرار گیرد. باید به اثرات جریان‌های القایی توجه شود و به فکر تغییر مسیر عبوری خطوط انتقال برق AC و یا تغییر مسیر خط لوله بود. ضمناً باید از قرار دادن ایستگاه‌های اندازه‌گیری در محل‌هایی که احتمال وجود جریان‌های القایی ذکر شده وجود دارد اجتناب نمود. درعین‌حال، باید در زمان ارزیابی‌های میدانی و همچنین آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های الکتریکی در مجاورت خطوط انتقال برق AC، به این احتمال وجود جریان‌های القایی توجه شود.

طراحی سیستم اعمال جریان حفاظت کاتدی

فوائد سیستم‌های حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان

از فوائد مهم این سیستم نسبت به سیستم آندهای فداشونده می‌توان این مورد را اشاره نمود که پتانسیل محرکه سیستم‌های اعمال جریان صرفاً به پتانسیل خوردگی فلزات فعال، محدود نمی‌شود. ازآنجاکه، در این سیستم امکان انتخاب پتانسیل محرکه مناسب و همچنین تنظیم پتانسیل محرکه پس از نصب سیستم موجود می‌باشد، بنابراین برای طراح و اپراتور این سیستم فرصت تنظیم نمودن سیستم، همگام با تغییرات شرایط محیطی فراهم می‌گردد. از فوائد مهم وجود این پتانسیل محرکه متغیر در طراحی سیستم حفاظت کاتدی اعمال جریان، توانایی انتخاب موقعیت بستر آند برای توزیع مناسب جریان حفاظتی با حداقل میزان تداخل می‌باشد. از فوائد دیگر پتانسیل محرکه متغیر در این سیستم، امکان‌پذیر بودن حفاظت سازه‌ها در محیط‌های با مقاومت مخصوص الکتریکی بالا می‌باشد. در این نوع محیط‌ها استفاده از آندهای فداشونده به دلیل خروجی پایین آنها عملی نمی‌باشد. از مزایای اولیه پتانسیل محرکه متغیر توانایی تغییر سیستم مطابق با تغییرات در مقاومت مخصوص خاک، شرایط آند، شرایط پوشش سازه و افزایش سطح سازه تحت حفاظت است.

تعیین مقاومت مدار

اولین قدم در طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان تعیین مقدار جریان کل مورد نیاز برای حفاظت می‌باشد. تعیین این جریان، ظرفیت خروجی جریان دستگاه یک‌سوکننده را مشخص خواهد نمود. دومین قدم، تعیین پتانسیل محرکه لازم می‌باشد. به محض آنکه خروجی جریان دستگاه یک‌سوکننده مشخص گردید می‌توان پتانسیل محرکه لازم را با استفاده از مقاومت کل مدار و ولتاژ برگشتی تعیین نمود. ولتاژی برگشتی ولتاژی است که بین آندها و سازه و برخلاف جهت ولتاژ اعمالی وجود دارد. مقدار آن برای آندهای بستر آندی با پشت‌بند کربنی، معمولاً ۲ ولت است. در مناطقی که خاک دارای ترکیب غیرمعقول است، این امکان وجود دارد که ولتاژ برگشتی بیشتری را نشان دهند اما به منظور طراحی معمولاً از همان ۲

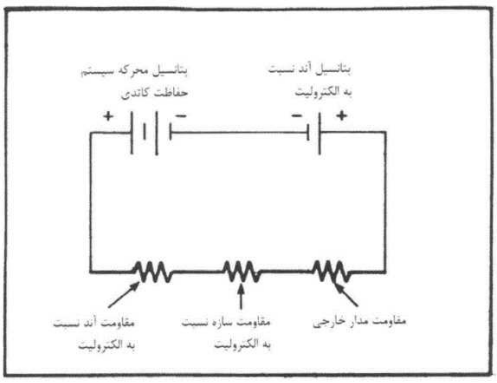
ولت استفاده می‌شود مگر آنکه آزمایش‌ها در یک ناحیه خاص شرایط دیگری را حکم کنند. در عمل، ولتاژ برگشتی در یک بستر آندی در حال فعالیت، به‌وسیله اندازه‌گیری ولتاژ مابین بستر و سازی (در بین پایانه‌های مثبت و منفی یک‌سوکننده) بلافاصله پس از خاموش کردن یک‌سوکننده، اندازه‌گیری می‌شود. اگر ولتاژ برگشتی ۲ ولت باشد، این به آن معنی است که پیش از آنکه جریان بتواند در بستر آندی جریان یابد، ۲ ولت ولتاژ از یک‌سوکننده برای غلبه بر ولتاژ برگشتی مورد نیاز خواهد بود. مدار معادل در شکل ۸-۶۱ نشان داده شده است. در اکثر سیستم‌های اعمال جریان مهم‌ترین عامل در تعیین مقاومت کل مدار، عامل مقاومت آند نسبت به الکترولیت است.

مقاومت آند نسبت به الکترولیت

این مقاومت که به مقاومت بستر آند نیز معروف است در واقع بزرگ‌ترین مقاومت در مدار سیستم حفاظت کاتدی اعمال جریان می‌باشد.

اثر مقاومت آند نسبت به الکترولیت در طراحی سیستم حفاظت کاتدی و عملکرد آن

همان‌طور که در شکل ۸-۶۱ نشان داده شده است. مقاومت آند نسبت به الکترولیت اگر پایین باشد می‌تواند به‌عنوان مهم‌ترین عامل برای تعیین پتانسیل محرکه مورد نیاز و به دنبال آن برای تعیین جریان لازم برای حفاظت در یک سیستم حفاظت کاتدی فعال به حساب آید. مقاومت آند نسبت به الکترولیت بر اساس اندازه و تعداد آندها در محدوده وسیعی تغییر می‌کند. از دیدگاه اقتصادی بسیار مطلوب است که مقاومت آند نسبت به الکترولیت در پایین‌ترین مقدار قرار داشته باشد. زیرا در این صورت با کاهش یافتن ولتاژ دستگاه یک‌سوکننده، هزینه‌های انرژی سیستم حفاظت کاتدی کاهش می‌یابد. این کاهش ولتاژ خروجی یک‌سوکننده همچنین باعث بالا رفتن دوام و پایداری اجزاء دیگر سیستم همچون عایق کابل‌ها و اتصالات می‌شود. به طور کلی اگر مقاومت بستر آند کمتر از ۲ اهم باشد بسیار مطلوب است.



شکل ۸-۶۱ مدار معادل حفاظت کاتدی

محاسبه مقاومت آند نسبت به الکترولیت

مقاومت آند نسبت به الکترولیت بر اساس نوع، اندازه، شکل، چگونگی قرار گرفتن مجموعه آندها و همچنین مقدار مقاومت مخصوص خاک قابل محاسبه می‌باشد. البته نوع، اندازه و شکل آندها انتخاب می‌شود. سپس مقاومت یک آند تک محاسبه می‌شود. سپس اثر آندهای چندتایی مشخص می‌شود. ازآنجاکه، مقاومت مخصوص واقعی محیط یکنواخت نیست یا ممکن

است تحت تأثیر تغییرات فصلی تغییر یابد، بنابراین مقاومت آند به الکترولیت به‌صورت تقریبی محاسبه می‌شود. در نتیجه پتانسیل محرکه واقعی مورد نیاز با آنچه که بر اساس مقدار تقریبی مقاومت آند به الکترولیت به دست می‌آید متفاوت خواهد بود، بنابراین باید پتانسیل محرکه سیستم بعد از نصب تنظیم شود تا مقدار جریان مورد نیاز حاصل شود. ازآنجاکه، پتانسیل‌های سازه نسبت به الکترولیت، مقاومت مخصوص محیط و مقاومت بستر آند در مدار حفاظت کاتدی متغیر می‌کنند بنابراین سیستم حفاظت کاتدی نیازمند تنظیم‌های ادواری است.

فرمول‌های اساسی

برای تعیین مقاومت آند به الکترولیت از فرمول‌های دی وایت که برای یک تک آند استوانه‌ای به دست آمده است، استفاده می‌شود. این فرمول برای آندها با وضعیت قرار گرفتن عمودی به شرح زیر است.

$$R_v = \frac{0/0052\rho}{L}\left(\mathrm{In}\frac{8L}{d} - 1\right)$$

فرمول برای آندها با وضعیت گرفتن افقی به شرح زیر است.

$$R_h = \frac{0/0052\rho}{L}\left(\mathrm{In}\frac{4\mathrm{L}+4L\left(S^2+L^2\right)^{0/5}}{\mathrm{dS}} + \frac{S}{L} - \frac{\left(S^2+L^2\right)^{0/5}}{L} - 1\right)$$

که در آن:

R_v: مقاومت آند نسبت به الکترولیت برای یک تک آند عمودی نسبت به الکترود مرجع دور برحسب اهم

S: دو برابر عمق دفن آند برحسب فوت

R_h: مقاومت آند نسبت به الکترولیت برای یک آند تک افقی نسبت به الکترود مرجع دور برحسب اهم

ρ: مقاومت مخصوص الکترولیت برحسب اهم – سانتی‌متر در عمق دفن آند

L: طول آند یا طول ستون پشت‌بند اگر از پشت‌بند استفاده شده باشد برحسب فوت

d: قطر مؤثر آند یا ستون پشت‌بند برحسب فوت

فرمول‌های ساده شده برای وضعیت‌های خاص

برای اکثر موارد، فرمول دی وایت با حذف عواملی که دارای مقادیر جزئی هستند قابل ساده شدن می‌باشد. بعضی از این فرمول‌های ساده شده. علاوه بر آن فرمول‌ها از فرمول‌های ساده شده زیر نیز می‌توان استفاده نمود:

۱) مقاومت تک آند عمودی

$$R_v = \left(\frac{\rho}{L}\right)k$$

که در آن:

R_v: مقاومت آند به الکترولیت برای یک آند عمودی تک نسبت به الکترود مرجع دور برحسب اهم

ρ: مقاومت مخصوص الکترولیت برحسب اهم – سانتی‌متر در عمق دفن آند

L: طول آند برحسب فوت یا طول ستون پشت‌بند اگر پشت‌بند به کار رفته باشد

k: عامل شکل آند از جدول ۸-۲۴ اقتباس می‌شود.

$\frac{L}{d}$: نسبت طول به قطر آند

جدول ۸-۲۴ تعیین مقدار K (عامل شکل آند)

$\frac{L}{d}$	□□	$\frac{L}{d}$	□□
۱	۰/۰۰۸	۱۶	۰/۰۲۰۱
۲	۰/۰۱۰	۱۸	۰/۰۲۰۷
۳	۰/۰۱۲	۲۰	۰/۰۲۱۳
۴	۰/۰۱۳	۲۵	۰/۰۲۲۴
۵	۰/۰۱۴۰	۳۰	۰/۰۲۳۴
۶	۰/۰۱۵	۳۵	۰/۰۲۴۲
۷	۰/۰۱۵۸	۴۰	۰/۰۲۴۹
۸	۰/۰۱۶۵	۴۵	۰/۰۲۵۵
۹	۰/۰۱۷۱	۵۰	۰/۰۲۶۱
۱۰	۰/۰۱۷۷	۵۵	۰/۰۲۶۶
۱۲	۰/۰۱۸۶	۶۰	۰/۰۲۷۰
۱۴	۰/۰۱۹۴		

۲) آندهای موازی

برای کاهش مقاومت بستر آند، از گروهی از آندهای موازی که به یکدیگر متصل هستند استفاده می‌شود. مقاومت آندهای گروهی کمتر از مقاومت یک تک آند می‌باشد اما مقاومت آنها از مقدار مقاومتی که از طریق فرمول آندهای موازی محاسبه می‌شود بیشتر است. این به خاطر وجود تعامل بین آند و محیط هر آند می‌باشد. اگر آندهای عمودی در یک ردیف به طور موازی و با فاصله یکسان قرار گیرند و به یکدیگر متصل باشند، مقاومت آنها از فرمول زیر به دست می‌آید.

$$R_n = \left(\frac{1}{n}\right) R_v + \rho_s \frac{F}{S}$$

که در آن:

R_n: مقاومت آند نسبت به الکترولیت برای آندهای عمودی که به طور موازی و با فاصله یکسان در یک ردیف قرار دارند.

n: تعداد آندها

R_v: مقاومت آند نسبت به الکترولیت برای یک تک آند عمودی نسبت به الکترود مرجع این دور برحسب اهم

ρ_s: مقاومت مخصوص الکترولیت برحسب اهم - سانتیمتر، اندیس S بیانگر آنست که فاصله آندها از یکدیگر S فوت می‌باشد.

S: فاصله آندها برحسب فوت

F: عامل موازی بودن آندها که از جدول ۸-۲۵ استخراج می‌شود.

جدول ۸-۲۵ تعیین مقدار F (عامل موازی بودن آندها)

□□	□□	□□	□
۲	۰/۰۰۲۶۱	۱۲	۰/۰۰۱۸۲
۳	۰/۰۰۲۸۹	۱۴	۰/۰۰۱۶۸
۴	۰/۰۰۲۸۳	۱۶	۰/۰۰۱۵۵
۵	۰/۰۰۲۶۸	۱۸	۰/۰۰۱۴۵
۶	۰/۰۰۲۵۲	۲۰	۰/۰۰۱۳۵
۷	۰/۰۰۲۳۷	۲۲	۰/۰۰۱۲۸
۸	۰/۰۰۲۲۴	۲۴	۰/۰۰۱۲۱
۹	۰/۰۰۲۱۲	۲۶	۰/۰۰۱۱۴
۱۰	۰/۰۰۲۰۱	۲۸	۰/۰۰۱۰۹
		۳۰	۰/۰۰۱۰۴

اگر آندها در چند ردیف قرار داشته باشند به طوری که فاصله بین هر ردیف بیش از ۴ برابر فاصله بین آندها از یکدیگر در هر ردیف باشد در این صورت از فرمول زیر استفاده می‌شود.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \cdots$$

۳) فرمول مخصوص برای مخازن آب

برای حفاظت مخازن آب که آندها در آن معمولاً در مسیری مدور قرار گرفته‌اند از فرمول مخصوص برای محاسبه مقاومت آند به الکترولیت استفاده می‌شود. درصورتی‌که فقط از یک تک آند استوانه‌ای استفاده شده باشد فرمول به‌صورت زیر است:

$$R = \frac{0/012\rho \log\left(\frac{D}{d}\right)}{L}$$

که در آن:

R: مقاومت آند به الکترولیت برحسب اهم

ρ: مقاومت مخزن آب برحسب اهم – سانتی‌متر

L: طول تک آند برحسب فوت (از پشت‌بند استفاده نمی‌شود)

$\frac{D}{d}$: نسبت قطر مخزن به قطر آند (هر دو باید برحسب یک واحد باشند)

آندها معمولاً بر روی یک مسیر مدور در داخل مخزن قرار گرفته‌اند شعاع بهینه این دایره از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$r=\frac{DN}{2(\pi+N)}$$

که در آن:

r: شعاع دایره‌ای که آندها بر روی آن قرار دارند (برحسب فوت)

D: قطر مخزن برحسب فوت

N: تعداد آندها

اگر از ۴ آند یا بیشتر بر روی مسیر دایره‌ای در داخل مخزن استفاده شود برای محاسبه مقاومت آندها از فرمول زیر استفاده می‌شود.

$$R=\frac{0/012\rho \log\left(\frac{D}{a}\right)}{L}$$

که در آن:

a: حاصلضرب فاکتور قطر معادل (که از جدول ۸-۲۶ زیر به دست می‌آید) در شعاع بهینه دایره آندها (که در قسمت بالا محاسبه گردید).

جدول ۸-۲۶ تعیین فاکتور قطر معادل

تعداد آندهای قرار گرفته در مسیر نور	فاکتور قطر معادل
۴	۰/۰۸
۶	۰/۱۱
۸	۰/۱۸
۱۰	۰/۲۸
۱۲	۰/۴۳
۱۴	۰/۷۰

ρ: مقاومت مخصوص آب برحسب اهم – سانتی‌متر

L: طول تک آند برحسب فوت

D: قطر مخزن برحسب فوت

اندازه‌گیری میدانی

محاسبات بالا مقدار تقریبی مقاومت آن نسبت به الکترولیت را در شرایط واقعی ارائه می‌نمایند. گرچه از این محاسبات برای طراحی سیستم استفاده می‌شود اما اگر محیط به طور کامل شناخته شده باشد، مقدار واقعی مقاومت آند نسبت به الکترولیت با مقدار محاسبه شده توسط محاسبات بالا متفاوت خواهد بود که این امر سبب می‌شود تا سیستم نیازمند به تنظیم‌های بعدی باشد. مقدار واقعی مقاومت آند نسبت به الکترولیت توسط اندازه‌گیری‌های میدانی به شرح ذیل قابل حصول است.

۱) روش اندازه‌گیری بر اساس وضعیت آند

در این روش، آندها بر اساس آنچه طراحی شده‌اند نصب می‌شوند. سپس مقاومت واقعی بین آند یا بستر آند و سازه تحت حفاظت اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری شامل مقاومت آند نسبت به الکترولیت و مقاومت سازه نسبت به الکترولیت است و از آن می‌توان برای تعیین پتانسیل محرکه لازم استفاده نمود. بر اساس آن نیز می‌توان منبع تغذیه مناسب و سفارش داد. این در واقع از دقیق‌ترین روش جهت تعیین ظرفیت مورد نیاز برای منبع تغذیه به حساب می‌آید.

۲) روش اندازه‌گیری بر اساس وضعیت منبع تغذیه

در این روش، منبع تغذیه براساس محاسبات مقاومت مدار سفارش داده شده و پس از نصب به سازه متصل می‌شود. آندها مطابق طرح نصب می‌شوند، اما در هر بار یک آند نصب می‌شود. مقاومت کل مدار براساس جریان خروجی و ولتاژ خروجی منبع تغذیه محاسبه می‌شود. اگر به منظور رسیدن به مقاومت مناسب آند به الکترولیت به آندهای اضافی نیاز باشد در همان زمان آن آندها باید نصب شوند زیرا وسایل و امکانات کندن زمین و نصب در محل فراهم است و در نتیجه هزینه‌های مربوط به اضافه کردن آندها پایین خواهد بود.

اثر پشت‌بند

استفاده از پشت‌بند خیلی مهم است. معمولاً آندهای سیستم اعمال جریان در داخل پشت‌بند قرار داده می‌شوند. فواید استفاده از پشت‌بند عبارتند از:

۱) کاهش مقاومت آند نسبت به الکترولیت

۲) افزایش میزان خلل و فرج در اطراف آند در نتیجه گازهای حاصل از واکنش‌ها به‌راحتی از اطراف آند خارج می‌شوند.

۳) کاهش اثرات پلاریزاسیون و کاهش انحلال موضعی آند. تحت شرایط مناسب، مقاومت آند نسبت به الکترولیت را می‌توان با استفاده از پشت‌بند به نصف کاهش داد. در محیط‌های با مقاومت مخصوص بسیار کم همچون آب دریا، می‌توان آندهایی چون گرافیت و چدن پر سیلیسیم را بدون استفاده از پشت‌بند استفاده نمود. به غیر از این چنین حالت‌ها، در بقیه موارد معمولاً باید برای آندهای سیستم اعمال جریان از پشت‌بند استفاده کرد. در محیط‌های با مقاومت مخصوص بالا که استفاده از پشت‌بند غیر عملی است، آندهای گرافیتی نباید استفاده شود. آندهای چدنی پر سیلیسیم کروم دار را می‌توان با و بدون پشت‌بند در اکثر موارد استفاده نمود. هزینه استفاده از پشت‌بند براساس مطالعات اقتصادی باید چندین آنالیز گردد که استفاده از آن کاهش انرژی و کاهش تعداد آندهای مورد نیاز را به دنبال دارد. اگر مقاومت مخصوص پشت‌بند کمتر از یک دهم مقاومت مخصوص خاک باشد افت ولتاژ از داخل پشت‌بند قابل صرف‌نظر کردن می‌شود.

بنابراین، قطر مؤثر آند عبارت از قطر پشت‌بند است و نباید برای آن قطر، خود آند در نظر گرفته شود. بنابراین براساس فرمول‌های مربوط به محاسبه مقاومت آند به الکترولیت این امر منجر به کاهش قابل ملاحظه در مقاومت آند به الکترولیت می‌شود و به دنبال آن، تعداد آندهای مورد نیاز همچنین پتانسیل محرکه مورد نیاز نیز کاهش می‌یابد. پشت‌بند برای آندهای سیستم اعمال جریان مواد کربنی بوده که از چندین منبع تولید می‌شود. این مواد می‌توانند از ذرات کک، تکه‌های گرافیتی یا خرده‌های کروی کک مواد نفتی باشند. تجربیات نشان داده است که ذرات کروی کک مواد نفتی دارای مزایای بسیاری در مقایسه با ذرات کک حاصل از ذغال سنگ می‌باشد. از مشخصات مطابق با استاندارد لرسکو DW - 2 یا معادل آن برای آندهای سطحی و از مشخصات مطابق با استاندارد لرسکو DW - 3 یا معادل آن برای آندهای چاه عمیق باید استفاده شود. ازآنجاکه، پشت‌بندها باید دارای خلل و فرجی مناسب باشند، بنابراین استفاده از ذرات کروی کک مواد نفتی به دلیل توانایی آن در ایجاد خلل و فرجی مناسب از بهترین ماده برای استفاده در پشت‌بندها محسوب می‌شوند. بنابراین به دلیل وجود این خاصیت مهم، قیمت بالای آن به‌ویژه در مورد آندهای چاه عمیق قابل توجیه است.

در مناطقی که خاک در آن مناطق بسیار مرطوب یا شل می‌باشد مانند باطلاق‌ها، در آنجا امکان استفاده از مواد پشت‌بند ممکن نیست. در این مناطق باید از پشت‌بندهایی که داخل استوانه‌های فلزی در اطراف آند ریخته شده است استفاده شود. البته باید توجه نمود که قیمت این نوع پشت‌بندهای آماده شده گران‌تر می‌باشد. آندهایی که در داخل استوانه‌های فلزی به همراه پشت‌بند آماده شده‌اند در مقایسه با آندهایی که در محل نصب می‌شوند و سپس در اطراف آنها پشت‌بند ریخته می‌شوند از سهولت نصب بیشتری برخوردارند. قابل ذکر است که استوانه‌های فلزی که در آنها آند و پشت‌بند قرار داده شده‌اند، پس از نصب شدن در زمین به سرعت خورده می‌شوند. آندهای از قبل بسته‌بندی شده علاوه بر دارا بودن قیمت بالا دارای معایب زیر نیز می‌باشند:

۱- به دلیل سنگین بودن دارای سهولت لازم برای حمل و نقل و انجام عملیات نمی‌باشند.

۲- احتمال ایجاد حفرات در داخل پشت‌بندها در حین حمل و نقل و نصب بسیار بالا است.

۳- محل اتصال بین آند و کابل در داخل بسته‌بندی پنهان و مخفی است، بنابراین انجام بازرسی‌ها بر روی آن بسیار مشکل است.

انتخاب بین آندهای بسته‌بندی و آندهای باز براساس شرایط محیطی و مسائل اقتصادی انجام می‌شود. معمولاً صرفاً در مواقعی که شرایط خاک ناپایدار است از آندهای بسته‌بندی شده استفاده می‌شود. در این نوع خاک‌ها گودال‌هایی که برای نصب آندها کند شده‌اند فروکش می‌کنند و در آن استفاده از آندهای باز امکان‌پذیر نیست.

مقاومت سازه نسبت به الکترولیت

مقاومت سازه نسبت به الکترولیت معمولاً در طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان لحاظ نمی‌گردد زیرا مقدار آن معمولاً در مقایسه با مقاومت آند به الکترولیت بسیار کوچک می‌باشد. هنگامی که مقاومت کل مدار اندازه‌گیری می‌شود، این مقاومت کل معمولاً شامل مقاومت سازه به الکترولیت نیز می‌باشد.

مقاومت کابل رابط

مقاومت کابل رابط براساس ابعاد کابل تعیین می‌شود. چگونگی انتخاب کابل رابط با ابعاد مناسب

مقاومت اتصالات

محل‌های اتصالات در سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان به‌عنوان محل‌های ایجاد کننده مقاومت در سیستم محسوب می‌شود و همچنین در این محل‌ها امکان وقوع آسیب و صدمات در سیستم بسیار بالا است. اولاً باید سعی شود تا تعداد این محل‌ها به حداقل مقدار ممکن کاهش یابد ثالثاً باید در این محل‌ها مراحل انجام اتصالات، عایق کاری، بازرسی و نصب با دقت کافی صورت پذیرد. کابل مثبت کابلی است که از قطب مثبت منبع جریان به آندها وصل شده است. حال اگر محل‌های اتصالات این کابل آسیب ببیند و فلز کابل در تماس مستقیم با الکترولیت قرار گیرد به‌شدت دچار خوردگی و انهدام خواهد شد. بنابراین تعداد اتصالات و محل‌های اتصالات باید در مرحله طراحی به طور اصولی تعیین شود و هرگز نباید این محل‌ها و تعداد آنها را به طور کاملاً اتفاقی و پیش‌بینی نشده در هنگام نصب و اجراء تعیین نمود.

تعیین نوع و ظرفیت منبع تغذیه

میزان ولتاژ و جریان منبع تغذیه براساس قانون اهم و برحسب میزان جریان مورد نیاز برای حفاظت سازه و محاسبه مقاومت کل مدار تعیین می‌شود. البته با توجه به فرسوده شدن یک‌سوکننده و برای تضمین تأمین جریان و ولتاژ مورد نیاز برای آینده از ضریب ۱/۵نیز استفاده می‌شود.

انتخاب نوع منبع تغذیه

هر منبع تغذیه که دارای محدوده مناسب ولتاژ و جریان باشد می‌تواند به‌عنوان منبع تغذیه برای سیستم حفاظت کاتدی اعمال جریان مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب منبع تغذیه بستگی به شرایط محلی در موقعیت نصب سیستم حفاظت کاتدی دارد. از پارامترهای مهم دیگر این انتخاب می‌توان به هزینه‌های مربوط به خریداری دستگاه، نگهداری دستگاه، در دسترس بودن جریان متناوب AC اشاره نمود.

یک‌سوکننده‌ها

یک‌سوکننده رایج‌ترین دستگاه منبع تغذیه است که در سیستم‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان از آنها استفاده می‌شود. یک‌سوکننده‌ها در محدوده وسیعی از نوع و ظرفیت که به‌صورت خاص برای استفاده در سیستم‌های حفاظت کاتدی طراحی و ساخته شده‌اند موجود می‌باشند. رایج‌ترین و عادی‌ترین نوع یک‌سوکننده یک مبدل کاهنده قابل تنظیم شامل یونیت‌های یک‌سوکننده‌گی، اندازه‌گیرها، عامل قطع مدار، جرقه‌گیر، شنت‌های اندازه‌گیری جریان، گیج‌های تنظیم مبدل است که همگی در داخل یک محفظه قرار دارند.

ژنراتورهای ترموالکتریک

این منابع جریان به طور مستقیم حرارت را به جریان الکتریسیته مستقیم تبدیل می‌کنند. این عمل توسط یک سری از ترموکوپل‌ها انجام می‌شود. این ترموکوپل‌ها از یک سر توسط حرارت حاصل از اشتعال سوخت‌های فسیلی گرم می‌شود و از سر دیگر معمولاً توسط یک سری از پره‌های خنک‌کننده، می‌شوند. ژنراتورهای ترموالکتریک ازآنجاکه، معمولاً دارای قطعات متحرک نمی‌باشند کاملاً قابل اعتماد و مطمئن هستند بنابراین تنها برای انجام حفاظت کاتدی در نقاط دور استفاده افتاده که در آنجا جریان برق قابل دسترس نبوده ولی در آنجا سوخت کافی در دسترس است قابل استفاده می‌باشند. در مجموع، کاربرد عمده این ژنراتورها برای حفاظت کاتدی خطوط لوله فولادی حامل سوخت در نقاط دور دست می‌باشد.

پیل‌های خورشیدی

پیل‌های خورشیدی نور خورشید را مستقیماً به جریان برق مستقیم تبدیل می‌کنند. هزینه تولید این برق بالا است اما با استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته می‌توان این هزینه را نیز کاهش داد. این پیل‌ها برای حفاظت کاتدی خطوط لوله در نقاط بسیار دور دست که در آنجا نه جریان برق و نه سوخت در دسترس است استفاده می‌شود. به منظور آنکه در این پیل‌های خورشیدی به طور پیوسته جریان برق فراهم باشد باید این پیل‌ها در سیستم‌هایی استفاده شوند که در آن سیستم‌ها به محض وجود نور خورشید جریان برق تولید و در باتری‌های قابل شارژ ذخیره شوند. بنابراین به محض آنکه نور خورشید دریافت نشود، آن باتری‌ها جریان مورد نیاز را تأمین می‌نمایند.

باتری‌ها

هنگامی که میزان جریان لازم برای حفاظت کم باشد، از باتری‌های زخمی کننده برای حفاظت کاتدی سازه با روش اعمال جریان در نقاط دور دست استفاده می‌شود. این باتری‌ها باید به طور متناوب شارژ شده و به‌خوبی نگهداری شوند.

ژنراتورها

از ژنراتورهای موتوری یا بادی نیز برای تولید جریان برق مستقیم برای حفاظت کاتدی با روش اعمال جریان سازه‌های موجود در نقاط دور افتاده که در آنجا جریان متناوب وجود ندارد، می‌توان استفاده نمود.

انتخاب نوع یک‌سوکننده

انتخاب نوع یک‌سوکننده برای حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان باید بر اساس جریان مورد نیاز برای حفاظت سازه و شرایط محیطی محل انجام پذیرد. بر این اساس، یک‌سوکننده‌های مختلف موجود می‌باشند.

مواد یک‌سوکننده

شکل ۸-۶۲ جزئیات مدار یک یکسو استاندارد از نوع تک فاز را نشان می‌دهد. در این شکل همچنین سوئیچ بیرونی و وسیله حفاظت مدار نیز نشان داده شده است. قابل ذکر است که وجود این دو مورد اخیر برای این نوع یک‌سوکننده اجباری است.

اجزای مبدل

مبدل وسیله‌ایست که ولتاژ جریان متناوب ورودی را به ولتاژ جریان متناوب مورد نیاز برای انجام عملیات اجزای یک‌سوکننده تبدیل می‌کند. در اکثر یک‌سوکننده‌های حفاظت کاتدی در سیستم اعمال جریان، ولتاژ خروجی از سیم پیچ‌های ثانویه را می‌توان از طریق تغییر دادن تعداد سیم پیچ‌های مؤثر در سیستم تغییر داد. این کار معمولاً به کمک نصب و تعبیه دکمه‌های تنظیم میسر می‌گردد. معمولاً دو نوع دکمه تنظیم در این سیستم‌ها وجود دارد. یکی از این دکمه‌ها برای تنظیم عادی و دیگری برای تنظیم بسیار دقیق است. از طریق بازی کردن با این دکمه‌های تنظیم، ولتاژ باید طوری تنظیم شود تا ولتاژ یک‌سوکننده از صفر تا بالاترین حد ولتاژ تعیین شده تغییر کند.

اجزاء تشکیل دهنده یک‌سوکننده

جریان متناوب حاصل از سیم پیچ‌های ثانویه مبدل توسط اجزاء یک‌سوکننده به جریان مستقیم تبدیل می‌شود این اجزاء که عمدتاً به‌صورت صفحه یا دیود هستند در چندین شکل موجود می‌باشند. معمولی‌ترین نوع آنها عبارت از صفحات سلنیمی یا دیود سیلیسیمی می‌باشد. هریک از این دو دارای مزایا و معایبی می‌باشد. معمولی‌ترین شکل اجزاء یک‌سوکننده عبارت از پل

تک فاز، شیر یا والو مرکزی تک فاز، پل سه فاز و شیر یا والو مرکزی سه فاز می‌باشند. اجزاء یک‌سوکننده، جریان را فقط از یک‌سو عبور داده و یک جریان مستقیم به وجود می‌آورند. اجزاء یک‌سوکننده همچنین مقدار خیلی کمی از جریان متناوب را نیز عبور می‌دهند. البته این مورد اخیر غیر مطلوب بوده و باید مقدار عبور آن به میزان بسیار کم کاهش داده شود قابل ذکر است که یک‌سوکننده‌ها هیچ‌گاه با راندمان ۱۰۰ درصد جریان متناوب را جریان مستقیم، تبدیل نمی‌کنند. این عمدتاً به خاطر خواص ذاتی اجزاء یک‌سوکننده و جریان متناوب می‌باشد که منجر به گرم شدن اجزاء یک‌سوکننده و در نتیجه کاهش راندمان یک‌سوکنندگی آنها می‌گردد. البته اجزاء سیلیسیمی نسبت به اجزاء سلنیمی دارای راندمان تبدیل بالاتری می‌باشند ولی از طرف دیگر آمادگی بیشتری نیز به آسیب‌پذیری در اثر اعمال بارهای اضافی ولتاژ دارا می‌باشند. راندمان یک‌سوکنندگی اجزاء یک‌سوکننده از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{راندمان یک‌سوکنندگی } \frac{\text{DC}}{\text{AC}} \frac{\text{خروجی توان}}{\text{ورودی توان}} \times 100\%$$

حفاظت در مقابل بار اضافی ولتاژ

برای حفاظت در مقابل بار اضافی ولتاژ باید از عامل قطع‌کننده مدار، فیوزها و یا هر دوی آنها در یک‌سوکننده‌های سیستم اعمال جریان استفاده شود. قطع‌کننده مدار علاوه بر حفاظت مدار در مقابل بارهای اضافی ولتاژ، به‌عنوان یک سوئیچ قدرت مناسب برای سیستم یک‌سوکننده نیز به حساب می‌آید. عامل قطع‌کننده مدار معمولاً در محل ورود جریان متناوب به یک‌سوکننده نصب می‌شود. درصورتی‌که، فیوزها معمولاً در خروجی جریان مستقیم از یک‌سوکننده نصب می‌شوند. یک‌سوکننده‌ها باید علاوه بر دارا بودن تجهیزاتی چون عامل قطع مدار و فیوز، به وسایل رعدوبرق‌گیر نیز مجهز باشند. وسایل رعدوبرق‌گیر باید هم در محل ورودی جریان متناوب و هم در محل خروجی جریان مستقیم نصب شوند. این وسایل دستگاه یک‌سوکننده را در مقابل خسارات و صدمات مهلک حاصل از رعدوبرق محافظت می‌نمایند. وسایل رعدوبرق‌گیر باید در ولتاژهای بسیار بالاتر از ولتاژ ورودی جریان متناوب و ولتاژ خروجی جریان مستقیم بسوزند. به خاطر آنکه دیودهای سیلیسیمی نیز در اثر ولتاژهای بالا و جریان‌های بالا تحت خسارات و صدمات جدی قرار دارند، باید آنها را با استفاده از پیل‌های سیلیسیمی یا فیوزهای محدودکننده جریان تحت حفاظت و مراقبت قرار داد. اخیراً از فیوزهایی که خیلی سریع هم عمل می‌نمایند نیز برای این منظور استفاده می‌شود. یکی از این فیوزها در قسمت ورودی جریان متناوب و دیگری در قسمت خروجی جریان مستقیم نصب می‌شود.

وسایل اندازه‌گیری

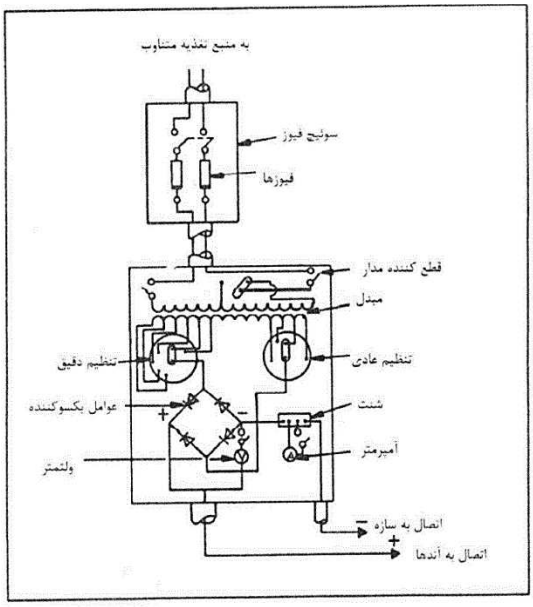
به منظور آنکه بتوان به‌راحتی جریان و پتانسیل خروجی را اندازه‌گیری نمود، یک‌سوکننده باید دارای وسایل اندازه‌گیری مناسب باشد. البته این وسایل اندازه‌گیری به طور پیوسته کار نمی‌کنند ولی لازم است تا در صورت نیاز در داخل مدار قرار گرفته و کار اندازه‌گیری را انجام دهند. بدین ترتیب اولاً وسایل اندازه‌گیری در مقابل صدمات حاصل از ولتاژها و جریان‌های بالا مصون می‌مانند و ثانیاً وقتی برای اندازه‌گیری روشن می‌شوند، عقربه آنها از صفر شروع و به‌سمت مقدار مورد نظر حرکت می‌کند و بدین ترتیب درصورتی‌که دستگاه اندازه‌گیری به هر دلیل خراب شده باشد و عقربه آن حرکت نکند، به‌راحتی

می‌توان وجود عیب در آن را تشخیص داد. دستگاه‌های اندازه‌گیری دارای دو ردیف مندرج جداگانه برای اندازه‌گیری پتانسیل و جریان هستند. جریان معمولاً توسط یک شنت جریان بیرونی اندازه‌گیری می‌شود. جریان و ولتاژ خروجی به‌راحتی توسط یک وسیله اندازه‌گیری قابل حمل اندازه‌گیری می‌شود.

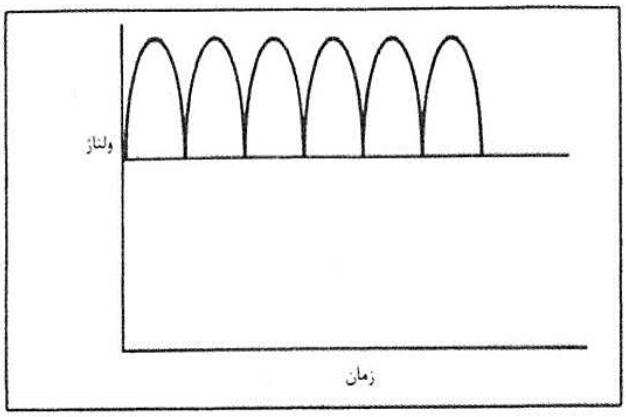
انواع یک‌سوکننده‌های استاندارد

پل تک فاز

مدار این نوع یک‌سوکننده در شکل ۸-۶۲ نشان داده شده است. این نوع یک‌سوکننده در واقع رایج‌ترین مورد یک‌سوکننده بوده که تا توان خروجی ۱۰۰۰ وات قابل استفاده می‌باشد. برای توان بالاتر از ۱۰۰۰ وات باید از نوع سه فاز که دارای راندمان الکتریکی بالاتری است استفاده شود. عامل یک‌سوکنندگی در این یک‌سوکننده‌ها از ۴ جزء تشکیل شده است. اگر هریک از اجزاء یک‌سوکننده خراب شود و یا تغییر مقاومت دهد بقیه اجزاء نیز خراب خواهند شد. جریان از طریق جفت اجزاءهای یک‌سوکننده عبور کرده و وارد مدار بیرونی می‌گردد که شامل سازه تحت حفاظت و آندها می‌باشد. جفت اجزاء فعال یک‌سوکننده با تغییر پلاریته جریان متناوب به طور متناوب تغییر می‌کند. به‌طوری‌که وقتی یک جفت از اجزاء فعال هستند، جفت دیگر اجزاء مسدود بوده، از عبور جریان در آن جلوگیری می‌کند. نتیجه انجام این مراحل در شکل ۸-۶۳ نشان داده شده است و به جریان یک‌سوشده موج کامل معروف است.



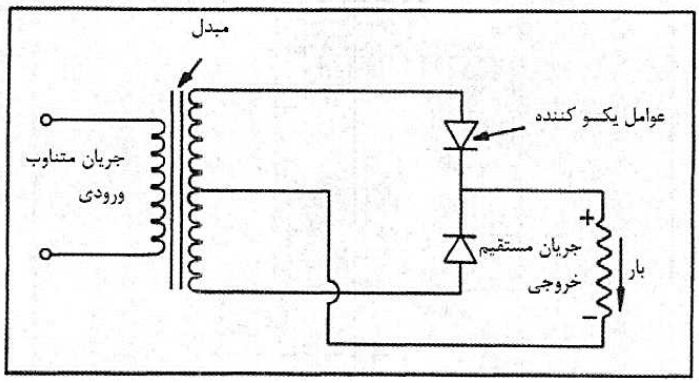
شکل ۸-۶۲ یک‌سوکننده از نوع پل تک فاز (موج کامل)



شکل ۸-۶۳ جریان یکسو شده موج کامل

تک فاز با کلید مرکزی

مدار این نوع یک‌سوکننده در شکل ۸-۶۴ نشان داده شده است. این نوع یک‌سوکننده اگرچه فقط دارای دو جزء یک‌سوکنندگی است اما قادر است تا خروجی یک‌سوشده تمام موج تولید نماید. ازآنجاکه، فقط نصف خروجی مبدل تحت اعمال بار قرار می‌گیرد، بنابراین نوع مبدل مورد نیاز به طور قابل ملاحظه‌ای سنگین‌تر و گران‌تر از نوع پل تک فاز می‌باشد. این نوع یک‌سوکننده نسبت به نوع پل تک فاز کمتر به تنظیم دقیق و حساس می‌باشد و همچنین دارای راندمان الکتریکی بالاتری نیز می‌باشد.

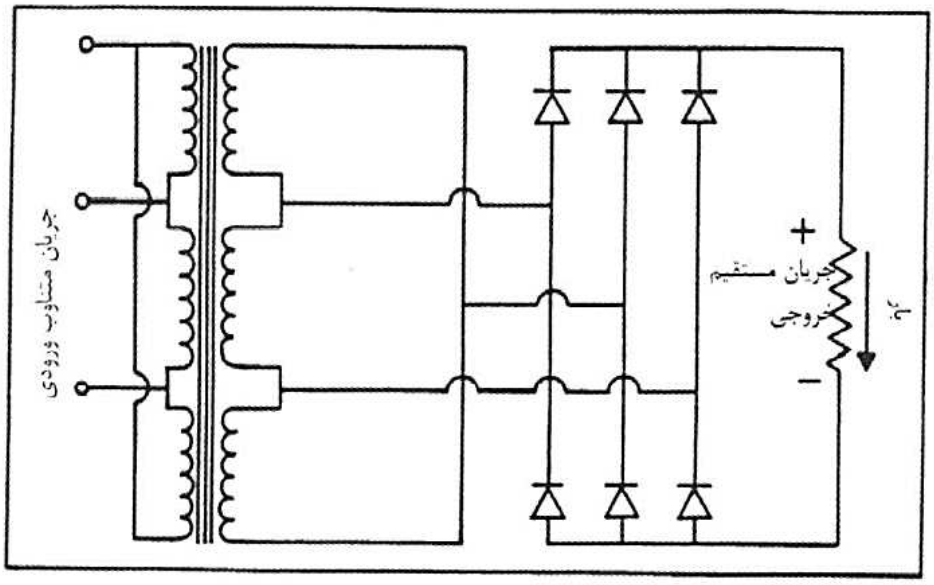


شکل ۸-٦٤ مدار یک‌سوکننده نوع تک‌فاز با کلید مرکزی

پل سه فاز

مدار این نوع یک‌سوکننده در شکل ۸-۶۵ نشان داده شده است. این مدار نوع یک‌سوکننده مانند آن است که سه یک‌سوکننده از نوع تک فاز با یکدیگر ترکیب شده باشند به‌صورتی‌که در آنها یک جفت از دیودها و یکی از سه پل مشترک باشد. در آن سه سیم پیچ ثانویه در مبدل وجود دارد که تولید جریان متناوب کرده که به هر یک از جفت اجزاء یک‌سوکننده اعمال می‌شود. این نوع جریان متناوب تولید یک جریان مستقیم خروجی می‌کند که میزان جریان متناوب همراه آن بسیار کمتر از حالتی است که جریان مستقیم توسط یک‌سوکننده تک فاز حاصل می‌شود (فقط حدود ۴/۵٪). از این دیدگاه یک‌سوکننده پل سه فاز

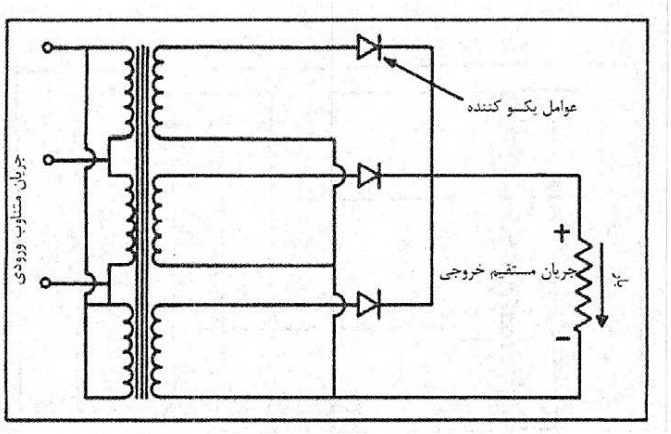
دارای راندمان الکتریکی بالاتری در مقایسه با یک‌سوکننده پل تک فاز می‌باشد. بنابراین استفاده از این یک‌سوکننده‌ها علی‌رغم قیمت بالای آنها، با توجه به بالاتر بودن راندمان آنها دارای توجیه اقتصادی است. (به‌ویژه برای یک‌سوکننده‌های با ظرفیت بیش از ۱۰۰۰ وات).



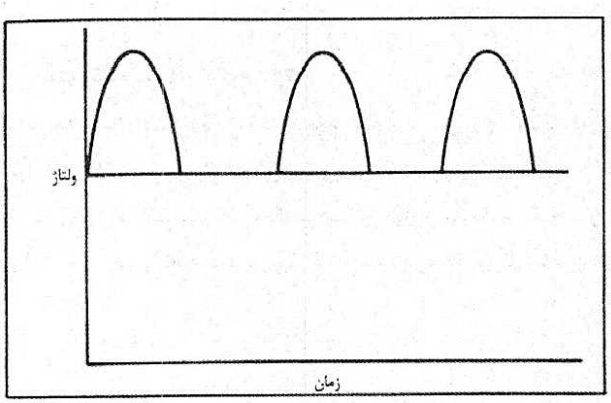
شکل ۸-۶۵ مدار پل سه فاز

یک‌سوکننده سه فاز از نوع wye

مدار یک‌سوکننده سه فاز wye در شکل ۸-۶۶ نشان داده شده است. این نوع یک‌سوکننده تولید جریان نیمه موج مانند شکل ۸-۶۷ می‌کند. توان اعمالی به این یک‌سوکننده توسط سه سیم پیچ جداگانه در یک مبدل تولید می‌شود اما فقط سه جزء یک‌سوکننده در این سیستم وجود دارد. این نوع یک‌سوکننده برای سیستم‌هایی که به خروجی ولتاژ کم احتیاج دارند دارای کاربرد می‌باشد.



شکل ۸-۶۶ مدار سه فاز wye

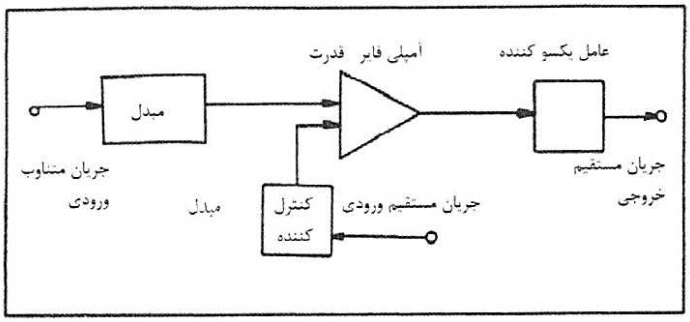


شکل ۸-۶۷ مدار یک‌سوشده نیم‌موج

انواع دیگر یک‌سوکننده‌های خاص

چندین نوع یک‌سوکننده که به طور اختصاصی برای استفاده در سیستم‌های حفاظت کاتدی طراحی شده‌اند، برای کاربردهای خاص توسعه یافته‌اند. بعضی از یک‌سوکننده‌های خاص به طور اتوماتیک جریان را کنترل می‌کنند تا همواره پتانسیل سازه به الکترولیت دارای مقدار ثابتی باشد. بعضی از انواع دیگر برای تمام مقاومت‌های مدار خارجی سیستم، جریان ثابتی را تولید می‌کنند. بعضی از انواع دیگر صرفاً برای شرایط خاص و ویژه مناسب می‌باشند.

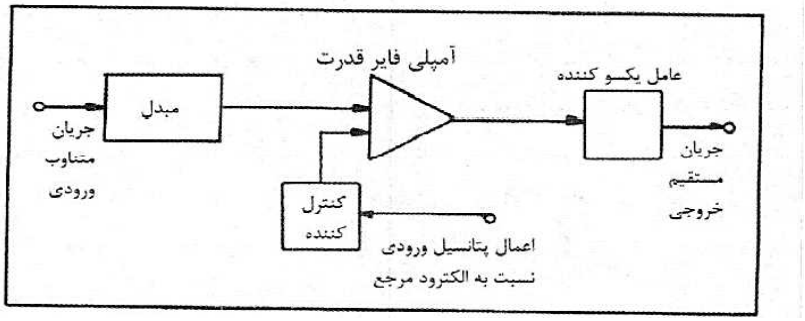
۱) یک یک‌سوکننده با جریان ثابت توسط یک دیاگرام در شکل ۸-۶۸ نشان داده شده است. یک سیگنال ورودی جریان مستقیم به آمپلی‌فایر قدرت توسط یک مقاومت متغیر در مدار خارجی تأمین می‌شود. آمپلی‌فایر قدرت از این سیگنال تغذیه‌ای استفاده می‌کند تا ولتاژ اعمالی به یک‌سوکننده را تنظیم نماید تا نهایتاً تولید یک سیگنال ورودی ثابت یا به‌عبارتی یک جریان خروجی ثابت را تولید نماید. آمپلی‌فایر قدرت ممکن است از نوع الکترونی (یک‌سوکننده با یک‌سوکنندگی سیلیسیمی) یا از نوع راکتور قابل اشباع باشد.



شکل ۸-۶۸ یک‌سوکننده جریان ثابت

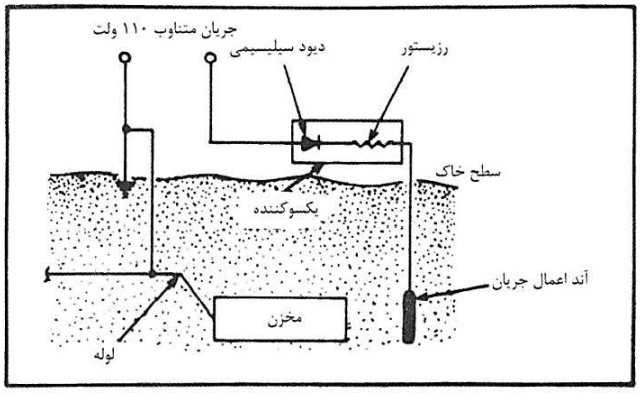
۲) یک‌سوکننده از نوع کنترل پتانسیل اتوماتیک توسط دیاگرام در شکل ۸-۶۹ نشان داده شده است. در این نوع یک‌سوکننده با اعمال یک پتانسیل ثابت بین سازه و یک الکترود مرجع، جریان خروجی سیستم کنترل می‌شود. در این نوع یک‌سوکننده نیز مانند حالت قبل، آمپلی‌فایر قدرت از نوع الکترونی یا راکتور قابل اشباع می‌باشد. این نوع یک‌سوکننده معمولاً در مواردی استفاده می‌شود که جریان مورد نیاز برای حفاظت یا مقاومت مدار با گذشت زمان به‌شدت تغییر می‌کند. به‌عنوان مثال‌هایی

برای این‌گونه موارد می‌توان از سازه‌های غوطه‌ور در دریا که در آن سطح تماس سازه با الکترولیت در حالت‌های جزرومد به‌شدت تغییر می‌کند یا در مخازن نگهداری آب که در آن ارتفاع آب در مخازن به مقدار قابل ملاحظه تعقیب می‌کند نام برد.



شکل ۸-۶۹ یک‌سوکننده پتانسیل ثابت

۳) یک‌سوکننده جریان ثابت چند مداره در شکل ۸-۷۰ نشان داده شده است. این نوع یک‌سوکننده طوری طراحی شده است تا بتواند جریان کوچک ثابت در حدود ۱۰۰ آمپر را برای تک آند تولید نماید. ازآنجاکه، مقاومت رزیستور داخلی در مقایسه با مقاومت مدار خارجی بالا است، بنابراین مقدار جریان خارجی توسط مقدار مقاومت این رزیستور کنترل می‌شود. پتانسیل خروجی تا مقدار ولتاژ خط تغییر خواهد کرد تا بتواند جریان خروجی مورد نیاز را تأمین نماید. در این نوع مدار، سازه تحت حفاظت مستقیماً به کابل خنثی منبع تولید جریان متناوب وصل می‌شود. به خاطر وجود مسائل مربوط به جریان‌های سرگردان و امکان حضور منابع ولتاژ بالای خارجی در اطراف این یک‌سوکننده، استفاده از این نوع یک‌سوکننده توصیه نمی‌شود.



شکل ۸-۷۰ یک‌سوکننده جریان ثابت چند مداره

چندین یک‌سوکننده استاندارد برای کاربردهای تجاری همچون حفاظت از سیستم‌های گاز طبیعی و حفاظت سیستم‌ها در مراکز تولید برق طراحی و ساخته شده است. این نوع یک‌سوکننده‌ها عمدتاً از دیدگاه اقتصادی طراحی شده‌اند به‌طوری‌که استفاده از آنها باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های کاربرد، نصب و نگهداری می‌شود. بنابراین در مراکز بزرگ صنعتی، استفاده از این یک‌سوکننده‌های استاندارد مناسب می‌باشد.

مشخصات یک‌سوکننده‌ها جهت انتخاب آنها

یک‌سوکننده‌ها را یا می‌توان مستقیماً از مراکز فروش خریداری کرد و یا می‌توان ساخت آنها را برای استفاده‌های خاص و مطابق با نیازهای خاص سفارش داد. در حال حاضر انواع یک‌سوکننده‌ها با مشخصات متفاوت موجود می‌باشد.

انواع یک‌سوکننده

۱- با خروجی پتانسیل ثابت یا خروجی جریان ثابت

۲- یک‌سوکننده چند مداره که در داخل یک دستگاه تهیه شده است

۳- هوا خنک یا غوطه‌ور در روغن

۴- نوع تجاری با ولتاژ ورودی متفاوت

۵- سه فاز یا تک فاز

۶- دارای پل یا کلید مرکزی

۷- با محدوده وسیع ولتاژ و جریان خروجی

۸- فیلتردار برای کاهش نویزهای جریان متناوب

۹- با فیلتر کاهش نوسانات تداخلی

۱۰- نوع دارای محفظه ضدانفجار

۱۱- نوع دارای محفظه ضدگلوله

۱۲- نوع دارای وسیله رعدوبرق‌گیر در ورودی جریان متناسب و در خروجی جریان مستقیم

۱۳- جرقه‌گیر هم در ورودی جریان متناوب و هم در خروجی جریان مستقیم

۱۴- دارای دیودسیلیکونی یا صفحات سلنیمی

۱۵- با محفظه رنگ زده شده یا با محفظه از نوع فولاد گالوانیزه یا از نوع آلومینیم آندایز شده

۱۶- انواع با پایه‌های مختلف

۱۷- نوع مناسب برای دفن در زمین

۱۸- نوع دارای چراغ‌های روشن - خاموش

۱۹- با قیمت‌ها، کیفیت و ضخامت کار متفاوت

عوامل مؤثر بر انتخاب انواع یک‌سوکننده‌ها در بخش ذیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

نوع هوا خنک یا غوطه‌ور در روغن

یک‌سوکننده‌ها معمولاً یا کاملاً هوا خنک و یا کاملاً غوطه‌ور در روغن می‌باشند. نوع هوا خنک ارزان‌تر بوده و از لحاظ نصب و تغییرات نیز آسان می‌باشند. یک‌سوکننده غوطه‌ور در روغن معمولاً در مکان‌های دارای آن آتمسفر خورنده و آلوده و در مکان‌های حاوی گازهای قابل انفجار به کار می‌رود. در این نوع یک‌سوکننده‌ها قسمت‌های کنترل دستگاه نباید در روغن غوطه‌ور باشند.

یک‌سوکننده از نوع هوا خنک بیشتر نیاز به نگهداری دارد. باید در آن فیلترهای هوا و دیگر قسمت‌های به طور ادواری تمیز و پاک شوند قطعات این نوع یک‌سوکننده بیشتر تحت تأثیر صدمات و آسیب‌ها می‌باشند. در بعضی از مدل‌های قدیمی یک‌سوکننده‌های نوع غوطه‌ور در روغن، از روغن‌های حاوی پلی کلرینیتد بی‌فنیلز (PCBS) استفاده می‌شده است. اخیراً ثابت شده است که این نوع روغن‌ها سمی هستند بنابراین اگر از دستگاه یک‌سوکننده که غوطه‌ور در این نوع روغن می‌باشد استفاده شود باید به موارد و دستورالعمل‌های ایمنی مربوط به کار با این نوع روغن‌ها توجه شود.

انتخاب ولتاژ متناوب

معمولاً می‌توان از کلیه منابع تغذیه تجاری جریان متناوب استفاده نمود. منابع تغذیه با ولتاژ ۱۱۵ ولت، ۲۳۰ ولت و ۴۴۰ ولت تک فاز یا ۲۰۸ ولت، ۲۳۰ ولت، ۴۴۰ ولت سه فاز بیشتر برای استفاده رایج می‌باشند. بعضی از دستگاه‌ها دارای ولتاژ ورودی دوگانه می‌باشند که برحسب نیاز می‌توان مورد مربوطه را انتخاب نمود. معمولاً انتخاب بین حالت تک فاز و حالت سه فاز برحسب هزینه‌ها و همچنین راندمان انجام می‌شود. برای انتخاب بهینه می‌توان از جدول ذیل که برحسب توان یک‌سوکننده و ولتاژهای ورودی تهیه شده است استفاده نمود.

توان یک‌سوکننده (ولت)	ولتاژ تک فاز	ولتاژ سه فاز
تا ۲۷۰۰	۱۱۵	۲۰۸
۵۴۰۰ تا ۲۷۰۰	۲۳۰	۲۳۰
۷۵۰۰ تا ۵۴۰۰	۴۴۰	۲۳۰
بالای ۷۵۰۰	۴۴۰	۴۴۰

ولتاژ و جریان مستقیم خروجی

معمولاً ولتاژ مستقیم خروجی ۱۲۰ - ۸ ولت و جریان مستقیم خروجی ۱۰۰ - ۴ آمپر عادی است. تقریباً هر میزان جریانی را می‌توان تولید کرد ولی در عمل بهتر است تا یک‌سوکننده با ظرفیت استاندارد کوچک‌تر مثلاً یک‌سوکننده با ظرفیت تولید ۲۰ آمپر انتخاب شود حال اگر به میزان جریان بیشتری نیاز است بهتر است تا از چند دستگاه کوچک استفاده شود. باید به این نکته توجه نمود که چندین دستگاه کوچک، خیلی کمتر از یک دستگاه بزرگ تولید تداخل می‌کنند از طرف دیگر باعث توزیع جریان یکنواخت‌تری بر روی سازه تحت حفاظت می‌گردند.

فیلترها

استفاده از فیلترهای الکترونیک در دستگاه‌های یک‌سوکننده به منظور افزایش راندمان، کاهش نویز و نوسانات در جریان متناوب و همچنین کاهش تداخل با وسایل ارتباط‌دهنده انجام می‌شود. فیلترها می‌توانند راندمان یک‌سوکننده تک فاز از نوع پل را به میزان ۱۰ تا ۱۴ درصد افزایش دهند. استفاده از این فیلترها باید بر اساس بررسی نسبت هزینه‌های اولیه به هزینه‌های کاری آنها ارزیابی شود. از این فیلترها در یک‌سوکننده‌های سه فاز ازآنجاکه، میزان نویز و نوسانات در جریان متناوب در این

دستگاه بسیار کم است، استفاده نمی‌شود. برای دستگاه‌های بزرگ به‌ویژه در مواقعی که در مجاورت خطوط ارتباطات نصب شده‌اند، باید از فیلترهای کنترل نویز برای رفع مشکلات حاصل از نویز استفاده شود.

یک‌سوکننده‌های ضدانفجار

در این یک‌سوکننده‌های اجزایی همچون سوئیچ‌ها و وسایل قطع مدار در داخل یک محفظه ضدانفجار قرار داده شده است. این نوع یک‌سوکننده بر اساس استانداردهای ایمنی الکتریکی بین‌المللی و برای استفاده در شرایط خطرناک در سیستم‌های توزیع یا نگهداری گاز طبیعی حاصل می‌شود به کار می‌روند. در هر مکانی که احتمال خطر وقوع انفجار وجود دارد باید از این محفظه‌ها استفاده شود.

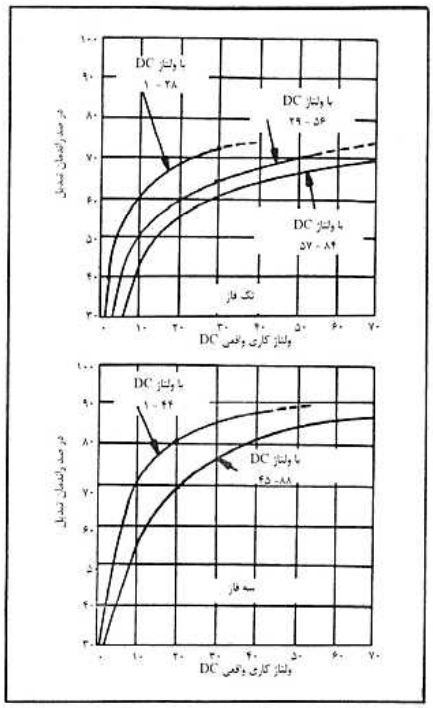
وسایل رعدوبرق‌گیر

همواره باید از وسایل رعدوبرق‌گیر در قسمت ورودی AC و قسمت خروجی DC یک‌سوکننده‌هایی که دارای اجزاء یک‌سوکنندگی از نوع سیلیسیم هستند، استفاده شود. استفاده از این وسایل بر روی یک‌سوکننده‌هایی که دارای اجزاء یک‌سوکنندگی از نوع سلنیمی هستند فقط در محل‌هایی لازم می‌باشد که متناوباً تحت شرایط رعدوبرق قرار دارند. ولتاژ سوختن وسایل رعدوبرق‌گیر نصب شده در خروجی یک‌سوکننده باید از ولتاژ خروجی یک‌سوکننده بالاتر باشد.

اجزاء یک‌سوکنندگی سیلیسیمی و سلنیمی

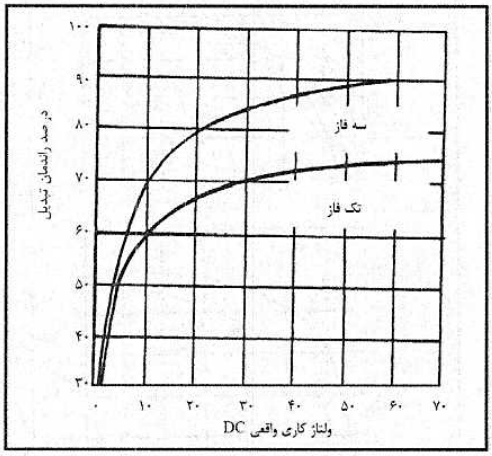
در یک‌سوکننده‌های قدیمی از اجزاء یک‌سوکنندگی از جنس اکسید مس استفاده می‌شد. در یک‌سوکننده‌های امروزی از اجزاء یک‌سوکنندگی از جنس سیلیسیم یا سلنیم استفاده می‌شود. معمولاً نوع سیلیسیمی در یک‌سوکننده‌های بزرگ‌تر که در آنها راندمان بالاتر در مقایسه با دوام و مرغوبیت اهمیت بیشتری دارد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اجزاء یک‌سوکنندگی سلنیمی معمولی با گذشت زمان فرسوده می‌شود. پدیده پیرشدگی در آنها را می‌توان با تغییر دادن ترکیب اجزاء و صفحات یک‌سوکنندگی کاهش داد. اجزاء یک‌سوکنندگی با خاصیت مقاومت بالا در مقابل پیرشدگی نیز موجود می‌باشند. سرعت پیر شدن در این اجزاء به درجه حرارت کاری بستگی دارد. درجه حرارت کاری نیز خود به میزان عبور جریان بستگی دارد. انتخاب اجزاء یک‌سوکنندگی از نوع سلنیمی که دارای ظرفیت بیشتری هستند باعث افزایش عمر دستگاه یک‌سوکننده می‌گردد. راندمان اجزاء یک‌سوکنندگی از نوع سلنیمی تابعی از ولتاژ کاری می‌باشد (طبق شکل۸-۷۱).



شکل ۸-۷۱ راندمان یک‌سوکننده‌های سلنیمی برحسب ولتاژ

دیودهای سیلیسیم در داخل محفظه‌های فلزی که بر روی صفحات مسی و یا آلومینیمی مانت شده‌اند قرار داده می‌شوند تا حرارت حاصل از انجام کار به آسانی خارج شود. دیودهای سیلیسیم برخلاف اجزاء سلنیمی دچار فرسودگی و پیری نمی‌شوند و همان‌طور که در شکل ۸-۷۲ نشان داده شده است آنها نسبت به اجزاء یک‌سوکنندگی سلنیمی دارای راندمان کاری بالاتری هستند. این راندمان به‌ویژه در ولتاژهای کاری بالاتر، بیشتر نیز می‌باشد. اجزاء یک‌سوکنندگی سیلیسیم در ولتاژهای ناگهانی و شدید به طور کامل آسیب و صدمه می‌بینند درصورتی‌که این ولتاژها صرفاً باعث پیری و فرسودگی در اجزاء یک‌سوکنندگی سلنیمی می‌گردند. بنابراین هنگامی که اجزاء یک‌سوکنندگی سیلیسیم استفاده می‌شود باید از وسایل حفاظت در مقابل ولتاژهای ناگهانی و شدید هم در ورودی‌های AC و هم در خروجی DC استفاده شود.



شکل ۸-۷۲ راندمان یک‌سوکننده‌های سیلیسیمی برحسب ولتاژ

پیش‌بینی‌های دیگر

از مشخصات دیگر در صورت نیاز می‌توان انتخاب نمود در نقاط دور افتاده ممکن است به محفظه‌های کوچک ضدگلوله نیاز باشد. مثلاً استفاده از محفظه‌های از جنس آلومینیم آندایز شده همراه با یک روکش از جنس پلی‌یورتین از لحاظ اقتصادی مناسب می‌باشد.

محدوده جریان متناوب یک‌سوکننده‌ها

میزان جریان متناوب مورد نیاز برای یک‌سوکننده برحسب میزان خروجی یک‌سوکننده و راندمان آن براساس فرمول زیر بیان می‌شود.

۱) یک‌سوکننده‌های تک فاز

$$I_{AC} = \frac{(E_{DC} \times I_{DC})}{F \times E_{AC}}$$

که در آن:

I_{AC}: جریان متناوب مورد نیاز برحسب آمپر

E_{DC}: ولتاژ خروجی جریان مستقیم

I_{DC}: آمپراژ خروجی جریان مستقیم

F: راندمان یک‌سوکننده (٪)

E_{AC}: ولتاژ جریان متناوب

۲) یک‌سوکننده‌های سه فاز

$$I_{AC} = \frac{E_{DC} \times I_{DC}}{\sqrt{3} F E_{AC}}$$

که در آن:

I_{AC}: جریان متناوب مورد نیاز (آمپر)

E_{DC}: ولتاژ خروجی جریان مستقیم

I_{DC}: آمپراژ خروجی مستقیم

F: راندمان یک‌سوکننده (٪)

E_{AC}: ولتاژ جریان متناوب

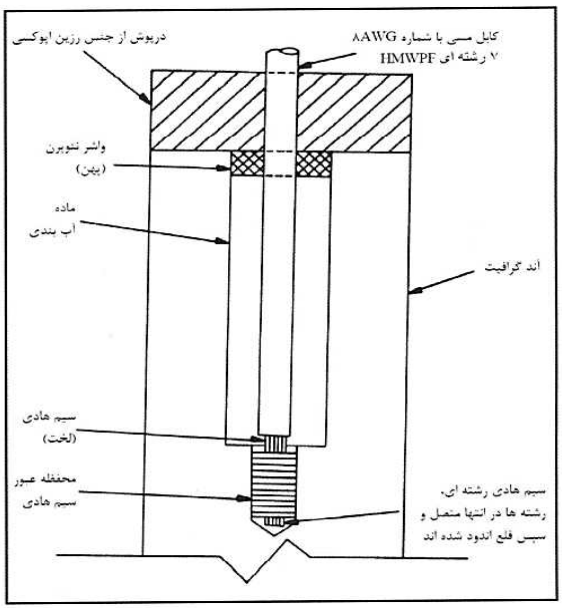
آندهای سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان

اگرچه از هر ماده هادی می‌توان به‌عنوان آندهای سیستم حفاظت کاتدی اعمال جریان استفاده نمود ولی موادی که به هنگام عبور جریان از آنها به محیط اطراف، دارای نرخ خوردگی پایین می‌باشند با دوام‌تر بوده و بنابراین استفاده از آنها برای این منظور مناسب‌تر می‌باشند. این آندها با شکل‌ها و ابعاد مختلف و بر اساس اصول مهندسی و همچنین اقتصادی برای استفاده در سیستم‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان تهیه می‌شوند. از قطعات قراضه آهن و فولاد همچون لوله‌ها و قطعات ریل فرسوده نیز می‌توان برای این منظور استفاده کرد ولی باید توجه نمود که نرخ خوردگی این‌گونه مواد در حدود ۲۰ پوند بر آمپر در

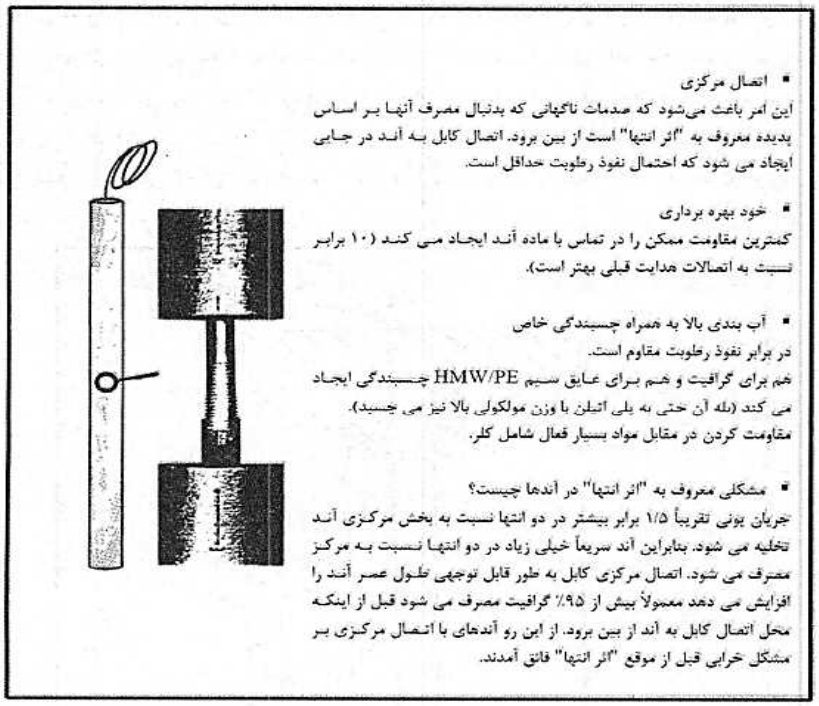
سال است. موادی که استفاده از آنها برای این منظور رایج‌تر است عبارتند از: گرافیت، چدن پرسیلیسیم، چدن پرسیلیسیم کروم‌دار، آلومینیم، تیتانیوم، تیتانیم با پوشش پلاتین، تانتالیم با پوشش پلاتین، نیوبیوم با پوشش پلاتین و آلیاژ سرب - نقره و آندهایی که اخیراً ساخته شده‌اند آندهای تیتانیوم با پوشش اکسیدهای ایریدیم و به‌عنوان آندهای سیستم اعمال جریان استفاده می‌شوند. ارزیابی‌های اولیه نشان می‌دهد که این نوع آندها نیز پتانسیل لازم برای جایگزین شدن با آندهای سنتی را دارا می‌باشند.

آندهای گرافیتی

آندهای گرافیتی رایج‌ترین آندهای مورد مصرف برای حفاظت کاتدی سازه‌های مدفون در زمین به روش سیستم اعمال جریان می‌باشد. این آندها از گداخته شدن کک یا کربن در دماهای بالا ساخته می‌شوند. ازآنجاکه، آندهای گرافیتی دارای مقدار زیادی حفره می‌باشند و این حفره‌ها می‌توانند عاملی برای نفوذ رطوبت به داخل آندها گردد، لذا آنها را توسط موادی همچون موم یا رزین آب‌بندی می‌کنند بدین ترتیب میزان حفره‌ها در داخل آندها به میزان زیادی کاهش یافته و همچنین مقاومت در مقابل اکسیداسیون آنها نیز افزایش می‌یابد. این آندها دارای یک کابل مسی روکش‌دار بوده که از طریق آن به طور الکتریک به یک‌سوکننده متصل می‌شوند محل اتصال کابل مسی به آند باید به طور دقیق از محل محیط ایزوله شده باشد تا رطوبت از طریق محیط به محل اتصال راه نیابد، در ضمن محل اتصال باید از لحاظ مکانیکی نیز محکم باشد تا در اثر حمل و نقل دچار کندگی و آسیب دیدگی نگردد. یکی از مهم‌ترین ابداعاتی که اخیراً در مورد این آندها و همچنین آندهای چدنی پرسیلیسیم انجام یافته آن است که محل اتصال کابل مسی رابط را به جای آنکه در انتهای آند متصل کنند در مرکز آند وصل می‌کنند. این امر باعث می‌شود مشکلی که معروف به «اثر انتها» در آندها می‌باشد از بین برود. این مشکل معمولاً از آنجا نشأت می‌گیرد که انتهای آندها ۱/۵ برابر بیشتر از وسط آندها مصرف می‌شود. اگرچه در صورت انجام اتصال سیم رابط به وسط آند قیمت آن بیشتر می‌شود، ولی عمر آندها تقریباً دو برابر می‌شود. باید توجه نمود که در آندهای لوله‌ای که محل اتصال در وسط آند انجام می‌گیرد ۹۵ درصد آندها، ولی در مورد آندهایی که اتصال در انتهای آنها می‌باشد فقط ۵۰ درصد آندها قبل از آنکه محل اتصال کابل به آند از بین برود مصرف می‌شود. در مورد آندهای لوله‌ای محل اتصال کابل به آند نیز بهتر حفظ می‌شود آندهای لوله‌ای که در آنها محل اتصال کابل به آند در مرکز انجام می‌شود به هر اندازه قابل ساخت هستند. این نوع آندها و چگونگی اتصال کابل به آند در آنها در اشکال ۸-۷۳ و ۸-۷۴ نشان داده شده است.



شکل ۸-۷۳ آند گرافیت و چگونگی اتصال کابل به آند



شکل ۸-۷۴ آند گرافیت با اتصال مرکزی

مشخصات

مشخصات آندهای گرافیتی به شرح ذیل است.

ترکیبات شیمیایی

میزان موم و رزین	حداکثر ۶/۵ درصد
خاکستر	حداکثر ۱/۵ درصد
رطوبت و مواد فرار	حداکثر ۰/۵ درصد
مواد محلول در آب	حداکثر ۱ درصد
گرافیت	باقیمانده

خواص فیزیکی

وزن مخصوص	حداکثر ۹۹/۸۴ پوند بر فوت‌مربع
مقاومت مخصوص	حداکثر ۰/۰۰۱۱ اهم – سانتی‌متر

خواص مکانیکی

استحکام اتصال کابل به آند	حداقل ۵۲۵ پوند

اندازه موجود

آندهای تجاری گرافیتی در دو اندازه به شرح ذیل موجود است:

وزن (پوند)	قطر (اینچ)	طول (اینچ)	مساحت (فوت‌مربع)
۲۷	۳	۶۰	۴/۰
۶۸	۴	۸۰	۷/۱

اوزان ارائه شده در جدول فوق صرفاً مربوط به خود گرافیت می‌باشد و شامل وزن کابل رابط و محل اتصال کابل به آند نمی‌باشد.

تولیدات حاصل از واکنش‌های آندی

تولیدات حاصل از واکنش‌های آندی بر آندهای گرافیتی گازها می‌باشند. در آب‌های شیرین یا خاک‌های بدون نمک، گازهای حاصل از واکنش‌های آندی عبارت از دی‌اکسید کربن و اکسیژن می‌باشند. در خاک‌های نمکی یا آب دریا گاز کلر اصلی‌ترین

گاز حاصل از واکنش‌های آندی می‌باشد. درصورتی‌که گازهای حاصل از واکنش‌های آندی در اطراف آند تجمع یابند باعث افزایش موضعی در مقاومت مخصوص خاک می‌گردد و همچنین مقاومت مدار نیز افزایش می‌یابد.

عملکرد آندهای گرافیتی

آندهای گرافیتی باید به طور مناسب نصب شده و به طور اصولی کار کنند تا عمر مناسب و عملکرد مناسب آنها تضمین شود.

۱) دانسیته جریان – باید خاطر نشان گردد که دانسیته جریان‌های به آندها نباید از آنچه که در جدول زیر ارائه شده است، بیشتر شود. بدین ترتیب می‌توان عمر مناسب از این آندها انتظار داشت.

جدول حداکثر دانسیته جریان توصیه شده برای آندهای گرافیتی

	آب دریا	آب شیرین	خاک
حداکثر دانسیته جریان (آمپر بر فوت‌مربع)	۳/۷۵	۰/۲۵	۱/۰
جریان معادل (آمپر) برای آند ۶۰ اینچ × ۳ اینچ	۱۵	۱	۴
جریان معادل (آمپر) برای آند ۸۰ اینچ × ۴ اینچ	۳۶/۶	۱/۷	۷/۱

۲) پتانسیل‌های کاری- ازآنجاکه، اختلاف پتانسیلی بین فولاد و گرافیت درحالی‌که، گرافیت کاتد باشد تقریباً برابر با ۱ ولت است، بنابراین قبل از آنکه جریان حفاظتی در مدار سیستم حفاظت کاتدی اعمال جریان شروع به حرکت نماید باید به این اختلاف پتانسیل غلبه شود. به هنگام انتخاب منبع جریان با نیروی محرکه مناسب باید به مقدار افت ولتاژ (IRdrop) موجود در مدار مقدار ۱ ولت نیز اضافه شود.

۳) نرخ مصرف آندها – با فرض آنکه مصرف آندهای گرافیتی به‌صورت یکنواخت باشد. نرخ زوال آندهای گرافیتی در خاک و آب شیرین درصورتی‌که دانسیته جریان اعمالی به آنها از حد مجاز اعلام شده در جدول فوق بیشتر نباشد تقریباً معادل ۲/۵ پوند بر آمپر در سال خواهند بود. نرخ زوال آندهای گرافیتی در آب دریا، با دانسیته جریان‌های کمتر از ۱ آمپر بر فوت‌مربع، معادل ۱/۶ پوند بر آمپر در سال و با دانسیته جریان ۳/۷۵ آمپر بر فوت‌مربع معادل ۲/۵ پوند بر آمپر در سال می‌باشد.

۴) نیاز به پشت‌بند – زوال آندهای گرافیتی از هر نقطه موجود بر آند متناسب با دانسیته جریان اعمالی در آن نقطه می‌باشد. اگر مقاومت مخصوص محیط در یک نقطه کمتر از مقاومت مخصوص در نقاط دیگر محیط باشد دانسیته جریان و زوال آند از آن نقطه بیشتر از نقاط دیگر محیط می‌باشد. این مطلب منجر به مصرف غیریکنواخت و آسیب‌های ناگهانی در آندهای گرافیتی می‌شود. به‌ویژه اگر ناحیه با مقاومت مخصوص پایین در قسمت بالایی آند قرار داشته باشد. در این حالت، شکل گلویی شدن (necking)در قسمت بالایی آند به وقوع پیوسته و در نتیجه از ارتباط بین قسمت‌های بالایی آند و قسمت‌های پایینی آن دچار مشکل می‌شود. بدین ترتیب استفاده از پشت‌بند با مقاومت مخصوص یکنواخت برای آندهای گرافیتی در خاک ضروری به نظر می‌رسد. پشت‌بند مصرف و خوردگی یکنواخت آند گرافیتی در خاک را تضمین می‌نماید.

آند چدنی پرسیلیسیم

چدن با ۱۴ تا ۱۵ درصد سیلیسیم و ۰/۷۵ تا ۱ درصد از عناصر آلیاژی دیگر مانند منگنز و کربن به‌عنوان یک آند مناسب در سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان محسوب می‌شود. در اثر عبور جریان از این نوع آند به محیط اطراف آند یک لایه محافظ از جنس SiO_2 بر سطح آند تشکیل می‌شود. این لایه در اکثر محیط‌ها به استثناء محیط‌های حاوی یون کلر پایدار می‌باشد. با تشکیل این لایه بر سطح آند نرخ مصرف آند از ۲۰ پوند بر آمپر در سال که در واقع نرخ مصرف فولاد معمولی است به ۱ پوند بر آمپر در سال کاهش می‌یابد. ازآنجاکه، این آلیاژ در مقابل محیط‌های حاوی یون کلر دارای مقاومت مناسب نیست لذا از آلیاژهای چدنی پر سیلیسیم کروم‌دار استفاده می‌شود. البته قابل ذکر است که اخیراً نه تنها در محیط‌های حاوی یون کلر بلکه در تمام محیط‌های به طور انحصاری از آلیاژ کروم‌دار استفاده می‌شود.

آند چدنی پرسیلیسیم کروم‌دار

این آند به طور وسیع در سیستم‌های حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان استفاده می‌شود. استحکام مکانیکی این آلیاژ به مراتب بهتر از آندهای مگنتایت یا گرافیتی می‌باشد. اما به خاطر آنکه دارای تغییر طول نسبی کم در مقابل اعمال بار می‌باشد لذا ترد بوده و باید در مقابل بارهای مکانیکی و همچنین شوک‌های حرارتی محافظت شود.

خواص

ترکیب شیمیایی این آلیاژ به شرح زیر است:

عنصر	درصد
سیلیسیم	۱۴/۵
کروم	۴/۵
کربن	۰/۹۵
منگنز	۰/۷۵
آهن	مابقی

خواص مکانیکی و فیزیکی این آلیاژ به شرح زیر است:

استحکام مکانیکی	۱۵۰۰۰
استحکام فشاری	۱۰۰۰۰۰
سختی	۵۲۰ برینل
وزن مخصوص	۷
نقطه ذوب	۲۳۰۰ درجه فارنهایت

مقاومت مخصوص	۷۲ میکرواهم بر سانتی‌متر
ضریب انبساط حرارتی	۷/۳۳ میکروواینچ بر اینچ بر درجه فارنهایت

حداقل مقاومت قابل قبول بین کابل و آند باید ۰/۰۱ اهم باشد.

ابعاد و اشکال آندها

آندهای چدنی پرسیلیسیم کروم‌دار در ابعاد و اشکال مختلف استاندارد موجود می‌باشند این ابعاد و اشکال در جداول ۸-۲۷ و ۸-۲۸ ارائه شده‌اند. این آندها هم‌چنین در ابعاد و اشکال ویژه نیز قابل تهیه می‌باشند که البته گران‌تر خواهند بود. بدیهی است آندها با ابعاد و اشکال ویژه برای شرایط خاص که در آنها امکان استفاده از آندهای استاندارد مقدور نیست یا در مواردی نیاز به استفاده از تعداد زیادی آندهای با شکل خاص می‌باشد تهیه می‌شوند. نمونه‌هایی از اشکال و ابعاد آندها در اشکال ۸-۷۵ تا ۸-۷۹ ارائه شده است. در این مورد نیز مانند تمام موارد مربوط به آندهای سیستم اعمال جریان، محل و چگونگی اتصال آند به کابل بسیار حساس است. نمونه‌هایی از چگونگی اتصال آند به کابل در اشکال ۸-۸۰ و ۸-۸۱ و ۸-۸۲ ارائه شده است. نمونه‌ای از آند لوله‌ای از نوع اتصال در مرکز که در شکل ۸-۸۳ نشان داده شده است، به‌عنوان بهترین نوع اتصال آند به کابل شناخته شده است. زیرا در این نوع آند عمل گلویی شدن آند در محل اتصال انجام نمی‌شود و در نتیجه عمر آند تا ۹۰ درصد افزایش می‌یابد (در این نوع آند ۹۵ درصد ماده آند قبل از آسیب دیدن اتصال کابل آند مصرف می‌شود درصورتی‌که در مورد آندهای دیگر فقط ۵۰ درصد وزن آند قبل از آسیب دیدن اتصال کابل آند مصرف می‌شود).

جدول ۸-۲۷ آندهای چدنی پر سیلیسیم کروم‌دار استاندارد

نوع آند	اندازه اسمی اینچ (سانتی‌متر)	وزن پوند (کیلوگرم)	مساحت سطح فوت‌مربع (مترمربع)	خروجی جریان اسمی آمپر	ویژگی‌های خاص
□□	$1 \times 60(25 \times 1524)$	۱۲ (۵/۴)	۱/۴ (۰/۱۳)	۰/۵	هر انتها به قطر $1\frac{1}{2}$ اینچ (۳۸ میلی‌متر) گشاد شده است به همراه هسته مرکزی باز جهت اتصال
□□□	$2\frac{3}{16} \times 24(56 \times 609)$	۱۳ (۵/۹)	۱/۱ (۰/۱۰)	۱/۰ – ۰/۵	مجموعه‌ای با وزن کم و انعطاف‌پذیر به همراه کابل پیوسته
□□□□	$2\frac{21}{23} \times 24(67 \times 609)$	۱۸ (۸/۲)	۱/۴ (۰/۱۳)	۱/۰ – ۰/۵	مجموعه‌ای با وزن کم و انعطاف‌پذیر به همراه کابل پیوسته
□□	$1\frac{1}{2} \times 60(38 \times 1524)$	۲۵ (۱۱/۴)	۲/۰ (۰/۱۹)	۱/۰	تنها یک انتها به قطر ۲ اینچ (۵۱ میلی‌متر) گشاد شده است به همراه هسته مرکزی باز جهت اتصال کابل
□□□□	$2\frac{3}{16} \times 60(56 \times 1524)$	۳۲ (۱۴/۵)	۲/۸ (۰/۲۶)	۳/۰ – ۲/۵	اتصال مرکز، به‌صورت سری بر روی کابل پیوسته یا تنها یک سیم رابط
□□□□	$2\frac{3}{16} \times 42(56 \times 1067)$	۲۳ (۱۰/۴)	۲/۰ (۰/۱۹)	۲/۰ – ۱/۵	اتصال مرکز، به‌صورت سری بر روی کابل پیوسته یا تنها یک سیم رابط

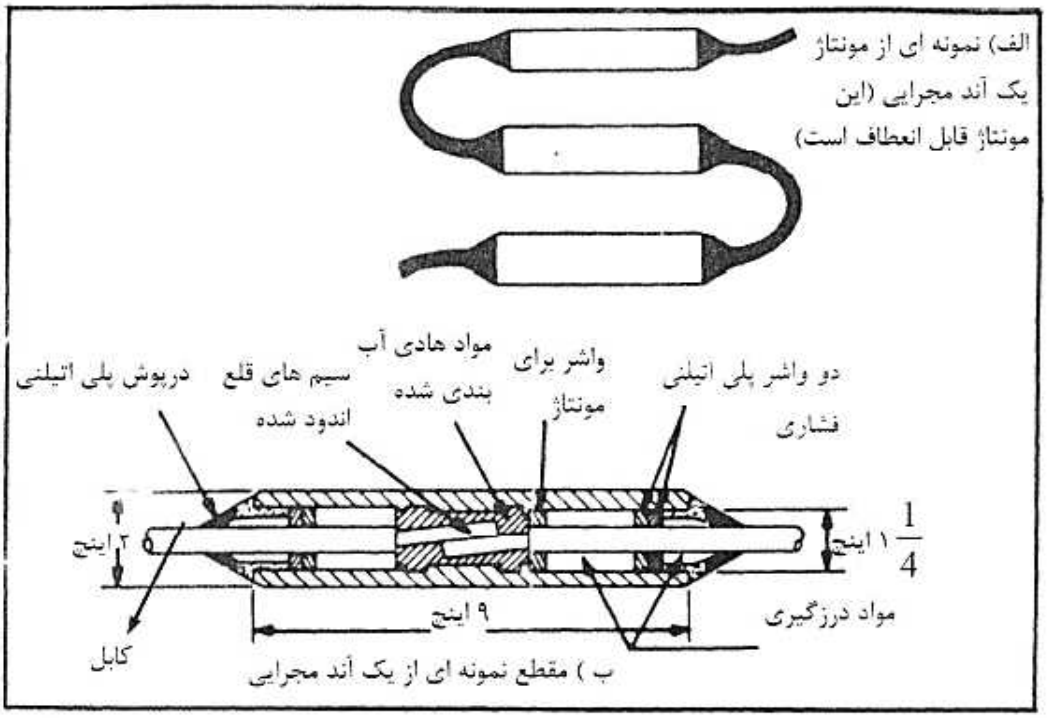
□□□	$2\frac{21}{32} \times 42(67 \times 1067)$	۳۱ (۱۴/۱)	۲/۴ (۰/۲۲)	۲/۰ – ۱/۵	اتصال مرکز، به‌صورت سری بر روی کابل پیوسته یا تنها یک سیم رابط
□□□	$4\frac{3}{4} \times 24(121 \times 609)$	۳۱ (۱۴/۱)	۲/۵ (۰/۲۳)	۲/۰ – ۱/۵	اتصال مرکز، به‌صورت سری بر روی کابل پیوسته یا تنها یک سیم رابط
□	$2 \times 24(51 \times 1525)$	۴۴ (۲۰/۰)	۲/۵ (۰/۲۴)	۱/۵	قطر یکنواخت ۲ اینچ (۵۱ میلی‌متر) به همراه اتصالات کابل تنها در یک انتها.
□□□	$2\frac{21}{32} \times 60(67 \times 1524)$	۴۵ (۲۰/۴)	۳/۵ (۰/۳۲)	۳/۵ – ۲/۳	اتصال مرکز، به‌صورت سری بر روی کابل پیوسته یا تنها یک سیم رابط
□□□	$2\frac{3}{16} \times 84(56 \times 2133)$	۴۶ (۲۰/۹)	۴/۰ (۰/۳۷)	۴/۰ – ۳/۰	اتصال مرکز، به‌صورت سری بر روی کابل پیوسته یا تنها یک سیم رابط
□	$2 \times 60(51 \times 1524)$	۶۰ (۲۷/۲)	۲/۸ (۰/۲۶)	۲/۵ – ۲/۰	هر انتها به قطر ۳ اینچ (۷۶ میلی‌متر) گشاد شده است به همراه هسته مرکزی باز جهت اتصال
□□□	$2\frac{3}{4} \times 60(95 \times 1524)$	۶۰ (۲۷/۲)	۴/۹ (۰/۴۶)	۵/۰ – ۲/۵	اتصال مرکز، به‌صورت سری بر روی کابل پیوسته یا تنها یک سیم رابط

نوع آند	اندازه اسمی اینچ (سانتی‌متر)	وزن پوند (کیلوگرم)	مساحت سطح فوت‌مربع	خروجی جریان اسمی آمپر	ویژگی‌های خاص
□□□□	$2\frac{21}{32} \times 84(67 \times 2133)$	۶۳ (۲۸/۶)	۴/۹ (۰/۴۶)	۵/۰ – ۳/۵	اتصال مرکز، به‌صورت سری بر روی کابل پیوسته یا تنها یک سیم رابط
□□	$2 \times 36(76 \times 914)$	۸۰ (۶۳/۳)	۳/۵ (۰/۲۳)	۳/۰ – ۲/۵	هر انتها به قطر ۵ اینچ (۱۲۷ میلی‌متر) گشاد شده است به همراه هسته مرکزی باز جهت اتصال
□□□□	$4\frac{3}{4} \times 60(121 \times 1524)$	۷۸ (۳۵/۴)	۶/۲ (۰/۵۸)	۶/۰ – ۵/۰	اتصال مرکز و طراحی لوله‌ای شکل مساحت سطح بزرگ‌تری به دست می‌دهد.
□□□□	$3\frac{3}{4} \times 84(95 \times 2133)$	۸۵ (۳۸/۶)	۶/۹ (۰/۶۴)	۷/۰ – ۶/۰	اتصال مرکز و طراحی لوله‌ای شکل مساحت سطح بزرگ‌تری به دست می‌دهد.
□□	$3 \times 60(76 \times 1524)$	۱۱۰ (۴۹/۹)	۴ (۰/۳۷)	۶ – ۴	تنها یک انتها به قطر ۴ اینچ (۱۰۲ میلی‌متر) گشاد شده است به همراه هسته مرکزی باز جهت اتصال کابل
□□□□	$4\frac{3}{4} \times 60(121 \times 1524)$	۱۲۵ (۵۶/۷)	۶/۲ (۰/۵۸)	۸ – ۶	اتصال مرکز اتلاف ناشی از اثر انتهایی را حذف می‌کند.
□□□□	$4\frac{3}{4} \times 84(121 \times 2133)$	۱۱۰ (۴۹/۹)	۸/۷ (۰/۸۱)	۸/۵ – ۶	اتصال مرکز اتلاف ناشی از اثر انتهایی را حذف می‌کند.
□□□	$4\frac{1}{2} \times 60(114 \times 1524)$	۲۲۰ (۹۹/۹)	۵/۵ (۰/۵۱)	۸ – ۵	قطر یکنواخت $\frac{1}{2}$ -4 اینچ (۱۱۴ میلی‌متر) به همراه هسته مرکزی باز در هر انتها، در صورت نیاز، اتصال دو کابل را امکان‌پذیر می‌سازد.
□□□□	$4\frac{3}{4} \times 84(121 \times 2133)$	۱۷/۵ (۷۹/۴)	۸/۷ (۰/۸۱)	۱۰ – ۹	اتصال مرکز و طراحی لوله‌ای شکل عمر طولانی‌تر به دست می‌دهد.
□□□	$1\frac{1}{8} \times 9(29 \times 229)$	۱ (۰/۵)	۰/۲۲ (۰/۰۲)	۰/۰۲۵	مجموعه‌ای با وزن کم و انعطاف‌پذیر به همراه کابل پیوسته
□□□□	$2\frac{3}{16} \times 8(56 \times 203)$	۴/۳ (۱/۹)	۰/۳۸ (۰/۰۴)	۰/۴۰	مجموعه‌ای با وزن کم و انعطاف‌پذیر به همراه کابل پیوسته

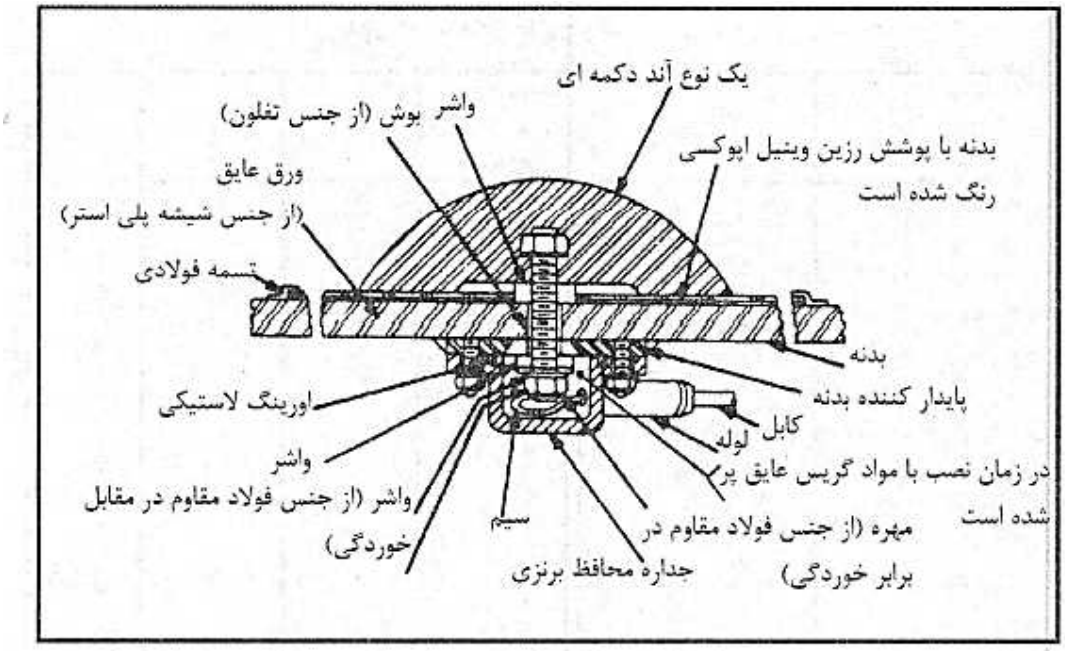
□ □□□	$2 \times 9(51 \times 229)$	۵ (۲/۳)	۰/۴۰ (۰/۰۴)	۰/۱۰	در داخل پیکربندی اجازه یک اتصال مرکزی کابل به آند با کابل پیوسته.
□ □□□□	$2\frac{21}{32} \times 8(67 \times 203)$	۶ (۲/۷)	۰/۴۷ (۰/۰۵)	۰/۵۵	اتصال مرکز، به‌صورت سری بر روی کابل پیوسته یا تنها یک سیم رابط.
□□□□□ □□	$2\frac{3}{16} \times 12(56 \times 304)$	۶/۵ (۲/۹)	۰/۵۷ (۰/۰۶)	۰/۶۰	اتصال مرکز، به‌صورت سری بر روی کابل پیوسته یا تنها یک سیم رابط

جدول ۸–۲۸ آندهای چدنی پر سیلیسیم خاص

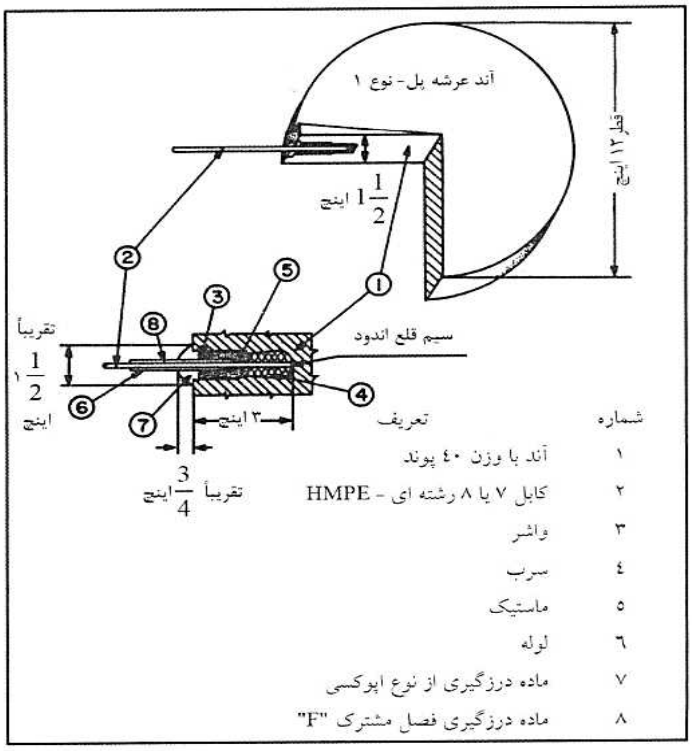
نوع آند	اندازه اسمی (اینچ)	وزن پوند (کیلوگرم)	مساحت سطح فوت‌مربع (مترمربع)	کاربرد	ویژگی‌های خاص
□□□	3×3	۶	۰/۲۵	مبدل‌های حرارتی کوچک و مانند سازه‌های با نواحی نصب محدود	"دکمه" آند با پیچ ریخته‌گری کامل برای اتصال به سازه با استفاده از واشر مناسب
□□	$6 \times 2\frac{1}{2}$	۱۶	۰/۵	بدنه کشتی. دریچه قفل. مبدل‌های حرارتی، یا هر سازه دیگر با سطح بزرگ مسطح	«دکمه» آند با پیچ ریخته‌گری کامل برای اتصال به سازه با استفاده از واشر مناسب
□□	$12 \times 3\frac{7}{16}$	۵۳	۱/۰	بدنه کشتی. دریچه قفل. مبدل‌های حرارتی، یا هر سازه دیگر با سطح بزرگ مسطح	«دکمه» آند با پیچ ریخته‌گری کامل برای اتصال به سازه با استفاده از واشر مناسب
عرشه پل ۱	$1\frac{1}{2} \times$ قطر۱۲	۴۰	۱/۹۶	عرشه‌های پل	فقط اتصال از یک سر
عرشه پل □۲	$\frac{9}{16} \times$ بیضی۹	۶	۰/۷۴	عرشه‌های پل	مونتاژ پشت سر هم روی کابل پیوسته با شماره □ □□ ۸ با ۷



شکل ۸-۷۵ آند مجرایی

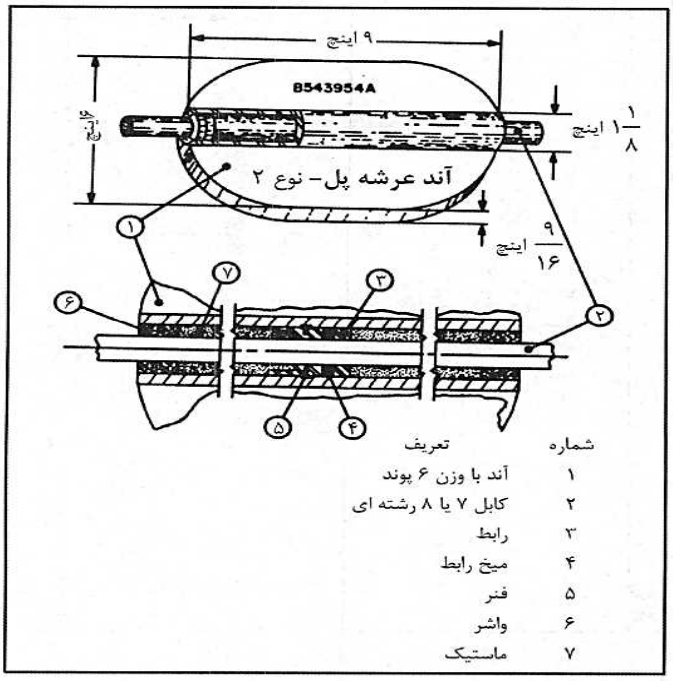


شکل ۸-۷۶ آند دکمه‌ای



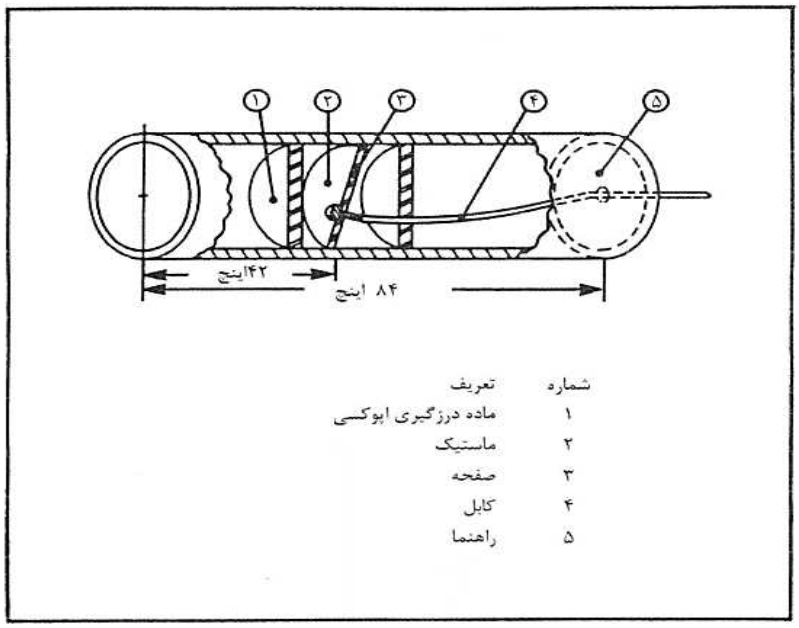
شماره	تعریف
۱	آند با وزن ۴۰ پوند
۲	کابل ۷ یا ۸ رشته ای - HMPE
۳	واشر
٤	سرب
٥	ماستیک
٦	لوله
۷	ماده درزگیری از نوع اپوکسی
۸	ماده درزگیری فصل مشترک "F"

شکل ۸-۷۷ آند عرشه پل - نوع۱



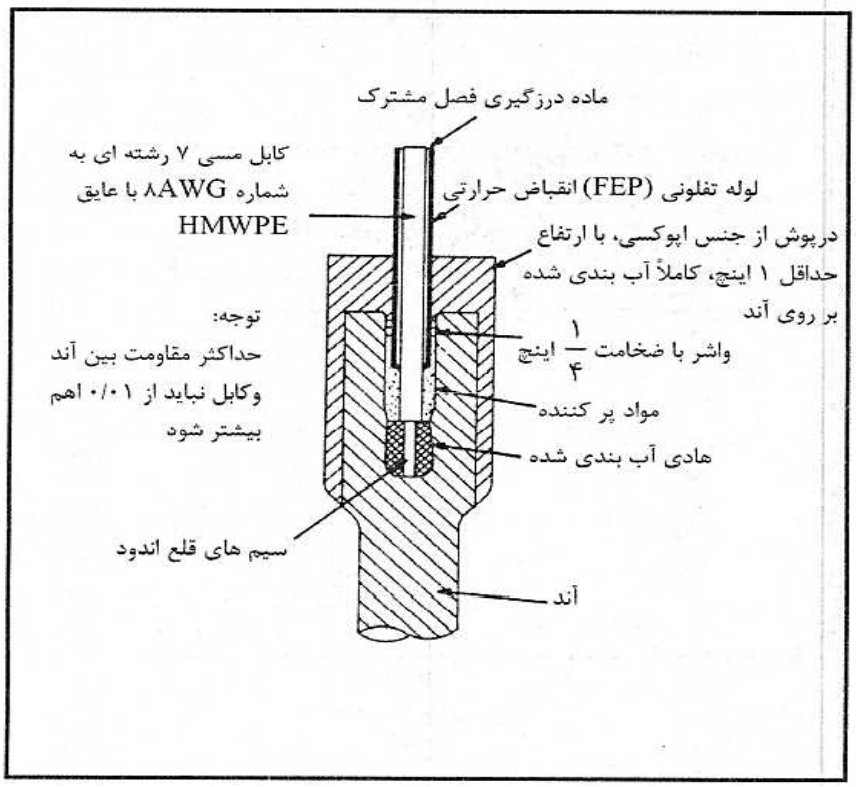
شماره	تعریف
۱	آند با وزن ۶ پوند
۲	کابل ۷ یا ۸ رشته ای
۳	رابط
۴	میخ رابط
۵	فنر
۶	واشر
۷	ماستیک

شکل ۸-۷۸ آند عرشه پل نوع ۲

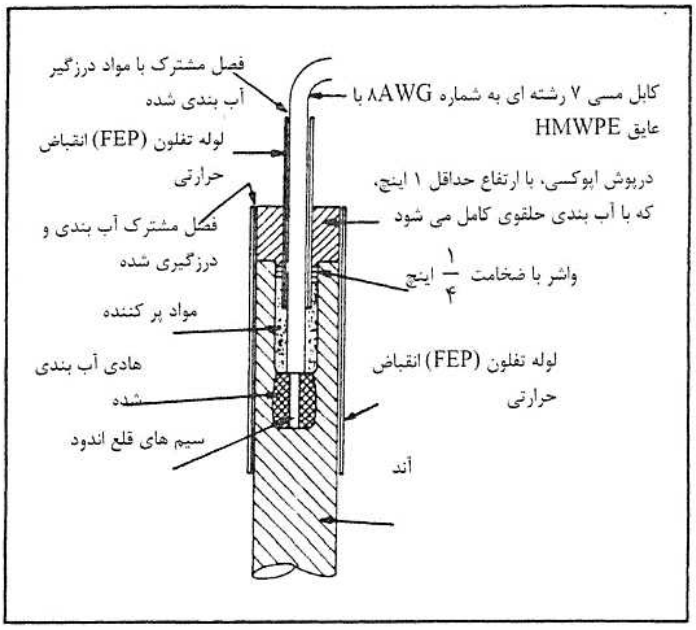


شماره	تعریف
۱	ماده درزگیری اپوکسی
۲	ماستیک
۳	صفحه
۴	کابل
۵	راهنما

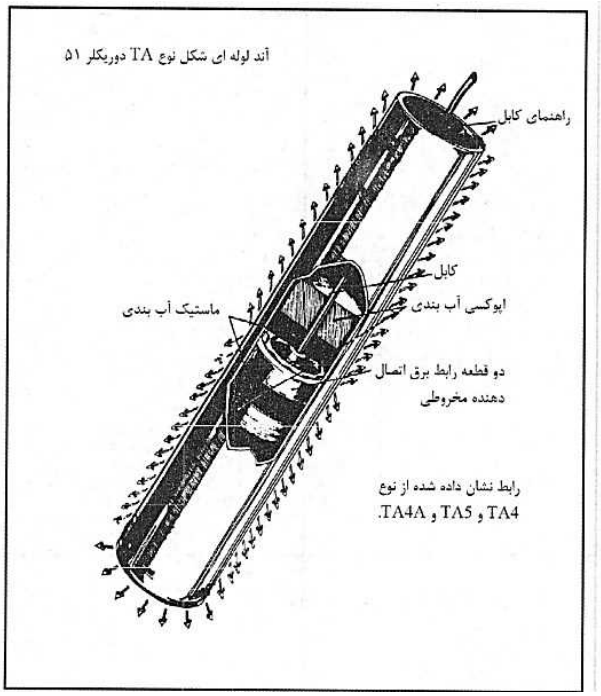
شکل ۸-۷۹ آند لوله‌ای



شکل ۸-۸۰ اتصال آند به کابل - آب‌بندی شده با اپوکسی



شکل ۸-۸۱ اتصال آند به کابل - آب‌بندی شده با تفلون



شکل ۸-۸۲ آند چدنی پرسیلیسیم کروم‌دار با اتصال مرکزی

عملکرد آندها

آندهای چدنی پر سیلیسیم کرم‌دار درصورتی‌که با دانسیته جریان مجاز کار کنند با نرخ ۱ پوند بر آمپر در سال مصرف می‌شوند. معمولاً به هنگام انتخاب یک‌سوکننده سیستم اعمال جریان از اختلاف پتانسیل بین فولاد و آندهای چدنی پرسیلیسیم صرف‌نظر می‌شود. این نوع آندها را می‌توان بدون پشت‌بند استفاده نمود ولی درصورتی‌که از پشت‌بند استفاده شود با توجه به کم شدن مقاومت آند به الکترولیت عمر آند به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. به خاطر آنکه اتصال خوبی بین آند و ذرات کک موجود در پشت‌بند برقرار می‌شود، بنابراین قسمت خارجی ذرات کک آند مصرف می‌شود. از طرف دیگر در این صورت با توجه به نیاز به ولتاژ خروجی کمتر ضمن صرفه‌جویی در مصرف انرژی هزینه مربوط به تهیه یک‌سوکننده نیز به مقدار جریان زیاد کاهش می‌یابد. بنابراین بر اساس آنچه گفته شد استفاده از پشت‌بند از نوع کک مواد نفتی در مواردی که استفاده از آن امکان‌پذیر است قویاً توصیه می‌شود.

آلومینیم

از آندهای آلومینیمی بعضی اوقات برای حفاظت داخلی مخازن نگهداری آب استفاده می‌شود. این نوع آندها معمولاً با نرخ نسبتاً بالایی در حدود ۹ پوند بر آمپر در سال مصرف می‌شوند. مهم‌ترین فواید استفاده از آندها آلومینیمی در مخازن نگهداری آب، قیمت پایین آنها، وزن کم، آلوده نشدن آب‌ها در اثر تولیدات حاصل از خوردگی آندها می‌باشد. از آندهای آلومینیمی معمولاً در مواردی استفاده می‌شود که در آنها خطر آسیب دیدگی آندها در اثر یخ زدن مخازن در زمستان وجود دارد. در این‌گونه موارد ابعاد آندهای آلومینیمی را طوری انتخاب می‌کنند که فقط برای یک سال دوام بیاورند. بنابراین هر سال یک‌بار در بهار این آندها تعویض می‌شوند. البته از آندهای گرافیتی و آندهای چدنی پر سیلیسیم کروم دار نیز برای حفاظت داخلی مخازن نگهداری آب استفاده می‌شود هنگامی که این آندها بر روی یک وسیله شناور نصب شده باشند در این صورت در مقابل شرایط یخ‌زدگی مقاوم می‌شوند.

پلاتین

در مواردی که فضای لازم برای نصب آندهای سیستم اعمال جریان وجود نداشته باشد از سیم پلاتین خالص استفاده می‌شود. پلاتین در مقابل زوال و خوردگی در اکثر محیط‌ها مقاوم می‌باشد. مصرف این آند در آب دریا تحت دانسیته جریان ۵۰۰ آمپر بر فوت‌مربع معادل ۰/۰۰۰۰۱ پوند بر آمپر در سال می‌باشد. به خاطر قیمت بالای پلاتین معمولاً از این فلز به‌صورت یک لایه نازک پوشش بر سطح فلزات دیگر استفاده می‌شود که در این مورد در بخش زیر توضیح داده می‌شود.

آندهای پلاتین شده

پلاتین را می‌توان بر سطح فلزات دیگر رسوب داده و یا متصل نموده و از آن به‌عنوان آندهای سیستم اعمال جریان استفاده نمود. فلزات پایه در این گونه موارد عبارت از تیتانیوم، تانتالیم و نیوبیم می‌باشند. این فلزات دارای این خصوصیت هستند که بر سطح‌شان لایه اکسید طبیعی پایدار تشکیل می‌شود. این لایه‌های اکسید سطحی از عبور جریان از سطح این فلزات در مواردی که آنها تحت پتانسیل‌های آندی بالا قرار می‌گیرند جلوگیری می‌کنند. در این موارد همه جریان صرفاً از پوشش پلاتین موجود

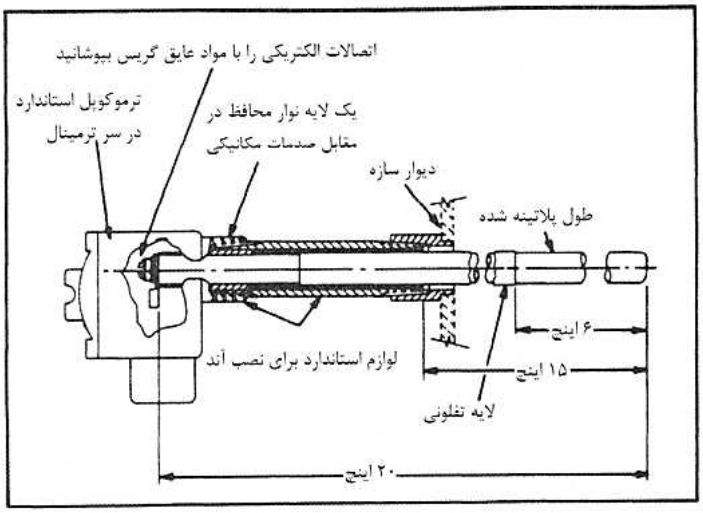
بر سطح آندها عبور خواهد کرد. این آندهای پلاتین شده گرچه بسیار گران قیمت هستند ولی برای موارد با دانسیته جریان‌های بالا برای حفاظت داخل مخازن و همچنین سیستم‌های موجود در آب دریا کاربرد وسیع دارند. کاربرد آنها در خاک‌ها صرفاً محدود به چاه‌های عمیق می‌شود.

انواع

آندهای پلاتینه شده در اشکال و ابعاد مختلف موجود می‌باشند. ابعاد انواع استاندارد آنها در جدول زیر ارائه شده است.

قطر (اینچ)	طول (اینچ)	طول قسمت پلاتینه شده آند (اینچ)
$\frac{3}{4}$	۲۰	۶
$\frac{3}{4}$	۱۲	۳
$\frac{3}{4}$	۲۳	۹
$\frac{3}{4}$	۲۰	۹
$\frac{1}{2}$	۲۰	۶
$\frac{1}{2}$	۱۷	۵
$\frac{1}{2}$	۲۳	۹

نمونه‌ای از شکل آند در شکل ۸-۸۳ ارائه شده است.



شکل ۸-۸۳۸ یک نمونه از آند پلاتینه شده

عملکرد

آندهای پلاتین شده قادر هستند تا با دانسیته جریان‌های خیلی بالا (برای مثال با ۱۰۰ آمپر بر فوت‌مربع) کار کنند. محدودیت کاری آندهای پلاتینه شده در ارتباط با اعمال ولتاژ آن است که فیلم‌های اکسیدی بر روی سطح فلز زیرین در اثر اعمال ولتاژهای بالا می‌شکنند. محدوده عملی برای آندهای تیتانیوم پلاتینه شده ۱۲ ولت است. آندهای نیوبیم پلاتینه شده قادر هستند که پتانسیل‌های ۱۰۰ ولت را بدون آنکه آسیب ببینند، تحمل کنند. ازآنجاکه، این آندها از لحاظ اندازه کوچک هستند بنابراین مقاومت آنها نسبت به الکترولیت بالا است بنابراین به منظور آنکه جریان‌های بالا از آنها به دست آید باید ولتاژهای بالا اعمال گردد.

آلیاژ سرب

از آلیاژ سرب با نقره، آنتیموان یا قلع به‌عنوان آند در سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان در آب دریا استفاده می‌شود. مزیت اولیه آندهای سربی قیمت پایین آنهاست. سرعت مصرف آندها سرب - نقره در ابتدا عبارت از ۳ - ۲ پوند بر آمپر در سال است ولی پس از ۲ سال این مقدار به ۰/۲ پوند بر آمپر در سال کاهش می‌یابد. دانسیته جریان حاصل از این آندها تقریباً ۱۰ آمپر بر فوت‌مربع است. آندهای آلیاژی سرب برای خیلی از موارد کارایی لازم را ندارد و این یا به خاطر آنست که آنها به‌راحتی پسیو نمی‌شوند و سرعت مصرف آنها در محدوده ۲ تا ۳ پوند بر آمپر در سال باقی می‌ماند و در نتیجه کاملاً مصرف می‌شوند و یا آنکه آنها به قدری شدید پسیو می‌شوند که مقاومت آند نسبت به الکترولیت در آنها به‌شدت افزایش می‌یابد.

دیگر اجزاء سیستم

علاوه بر منبع تغذیه برای حفاظت کاتدی و انواع آندهای مصرفی، حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان دارای اجزاء دیگری نیز می‌باشد. کل سیستم باید مورد اطمینان باشد. تا بتواند به طور مؤثر حفاظت کاتدی را تأمین نماید.

کابل‌های رابط

کابل‌های رابط مورد استفاده در بین اجزاء مختلف سیستم‌های حفاظت کاتدی در عملکرد اصولی و صحیح این سیستم‌ها بسیار ضروری و حیاتی می‌باشند. هرگونه آسیبی در مدار اولیه موجب از کار افتادن سیستم شده و در نتیجه سیستم برای انتقال جریان حفاظتی نیازمند تعمیر می‌باشد. هرگونه آسیب در اتصالات کمکی مانند آنچه که برای تست سیستم به کار می‌رود منجر به ایجاد اشکال در تنظیم و بازرسی صحیح و اصولی سیستم می‌گردد. انتخاب صحیح اندازه کابل، نوع عایق و مسیر عبور کابل برای عملکرد صحیح و اصولی سیستم ضروری می‌باشد. فقط باید از کابل‌های مسی با پوشش عایق در سیستم‌های حفاظت کاتدی استفاده شود. استفاده از کابل‌های آلومینیمی به دلیل دارا بودن مقاومت اتصال بالا و همچنین مشکل بودن جوشکاری آن در سیستم‌های حفاظت کاتدی مجاز نمی‌باشد.

نکات و فاکتورهای مهم

کابل‌های رابط باید بر اساس توجه به فاکتورهای ذیل انتخاب شوند:

۱) ظرفیت انتقال جریان

۲) میرایی ولتاژ (افت IR)

۳) استحکام مکانیکی

۴) قیمت (هزینه اولیه در مقابل هزینه‌های انرژی)

۵) استحکام دی‌الکتریک عایق

۶) دوام عایق (مقاومت در مقابل سایش و برش)

استاندارد مربوط به ابعاد، وزن و استحکام پارگی کابل‌ها در جدول ۸-۲۹ ارائه شده است.

جدول ۸-۲۹ مشخصات سیم استاندارد

اندازه □□ □	قطر بدون عایق (اینچ)	وزن تقریبی بدون عایق (پوند بر متر یا فوت)	حداکثر استحکام پارگی (پوند)	حداکثر مقاومت جریان مستقیم در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (اهم بر متر یا فوت)	حداکثر مجاز ظرفیت جریان مستقیم (آمپر)
۱۲	۰/۰۷۲۶	۱۲/۶۸	۱۳۰	۲/۵۸۰۰	۱۵
۱۴	۰/۰۹۱۵	۲۰/۱۶	۲۰۷	۱/۶۲۰۰	۲۰
۱۰	۰/۱۱۶۰	۳۲/۰۶	۳۲۹	۱/۰۲۰۰	۳۰
۸	۰/۱۴۶۰	۵۰/۹۷	۵۲۵	۰/۶۴۰۰	۴۵
۶	۰/۱۸۴۰	۸۱/۰۵	۸۳۲	۰/۴۰۳۰	۶۵
۴	۰/۰۲۳۲	۱۲۸/۹۰	۱۳۲۰	۰/۲۵۴۰	۸۵
۳	۰/۲۶۰۰	۱۶۲/۵۰	۱۶۷۰	۰/۲۰۱۰	۱۰۰
۲	۰/۲۹۲۰	۲۰۴/۹۰	۲۱۱۰	۰/۱۵۹۰	۱۱۵
۱	۰/۳۳۲۰	۲۵۸/۴۰	۲۶۶۰	۰/۱۲۶۰	۱۳۰
۱/۰	۰/۳۷۳۰	۳۲۵/۸۰	۳۳۵۰	۰/۱۰۰۰	۱۵۰
۲/۰	۰/۴۱۹۰	۴۱۰/۹۰	۴۲۳۰	۰/۰۷۹۵	۱۷۵
۳/۰	۰/۴۷۰۰	۵۱۸/۱۰	۵۳۲۰	۰/۰۶۳۱	۲۰۰
۴/۰	۰/۵۲۸۰	۶۵۳/۳۰	۶۴۵۳	۰/۰۵۰۰	۲۳۰

□ □□ ۲۵۰	۰/۵۷۵۰	۷۷۱/۹۰	۷۹۳۰	۰/۰۴۲۳	۲۵۵

مواد عایق کابل‌ها

معمولاً حداقل بخشی از کابل‌های رابط بین منبع تغذیه سیستم حفاظت کاتدی و آندها در داخل آب غوطه‌ور بوده و یا در داخل زمین مدفون هستند. این کابل‌ها ازآنجاکه، تحت پتانسیل‌های مثبت بسیار بالایی قرار دارند بنابراین در مقابل آسیب‌های مکانیکی بسیار حساس می‌باشند. هرگونه تماس بین هادی فلزی کابل و محیط اطراف منجر به زوال و خوردگی سریع هادی فلزی کابل شده و در نتیجه پوسیدگی در ارتفاع انتقال جریان حفاظتی سیستم از بین می‌رود. هرگز از سیم‌های رابط آندها نباید برای آویزان کردن آندها، حمل و نقل آندها یا نصب آندها به‌جز در مخازن نگهداری آب استفاده شود.

در مواقعی که آندها در داخل زمین دفن شده‌اند برای عایق کابل‌ها باید از ماده پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا (HMWPE) استفاده شود. عملکرد این ماده عایق بسیار رضایت‌بخش می‌باشد. در مواقعی که این کابل‌ها در تماس با گاز کلر قرار داشته باشند مانند حالتی که آندها در آب دریا غوطه‌ور باشند یا در اعماق زیاد در زمین دفع شده باشند باید از موادی چون پروپیلن اتیلن فلورینیتد (FEP)، تترافلوراتیلن (TFE) و یا فلوری پلی وینیلدین (PVF_2) استفاده شود. از این مواد هم می‌توان به تنهایی برای عایق کاری استفاده نمود و هم می‌توان از مخلوطی از آنها استفاده نمود. در هر حال حداکثر ضخامت عایق کاری مورد استفاده ۰/۱۵ اینچ می‌باشد. بر روی جداره بیرونی این مواد عایق کاری باید از یک لایه سطحی از جنس پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا (HMWPE) نیز برای حفاظت در مقابل شرایط مکانیکی محیط استفاده شود.

برای موارد و کاربردهای بسیار حساس بهتر است از ماده عایق پلیمراتیلن – مونوکلروتری فلوئور اتیلن (E - CTFE) با ضخامت ۰/۴ اینچ به‌عنوان عایق کابل استفاده شود. این ماده عایق باید با یک جداره بیرونی از جنس پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا (HMWPE)با ضخامت ۰/۰۶۵ اینچ به منظور مقاومت در مقابل سایش پوشیده شود. برای موارد و کاربردهای کمتر حساس مانند کابل منفی یک‌سوکننده، سیم‌های آزمایش و سیم‌های بالای زمین از ماده عایق ترموپلاستیک (TW)، لاستیک مصنوعی (RHW)یا پلی‌اتیلن به‌عنوان ماده عایق کابل استفاده می‌شود.

کابل‌های توصیه شده برای کاربردهای خاص

خصوصیات عمومی کابل‌های مورد استفاده در انواع سیستم‌های حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان به شرح ذیل است:

۱) سیم‌های آزمایش: ازآنجاکه، این سیم‌ها جریان بسیار کمی را حمل می‌کنند و از طرفی چون آنها خود تحت حفاظت کاتدی نیز قرار دارند بنابراین نیازهای عایق کاری آنها چندان حساس نمی‌باشد. این نوع سیم‌ها از جنس مس با شماره AWG ۱۲ هستند و ماده عایق آنها نیز ترموپلاستیک، لاستیک مصنوعی و یا پلی‌اتیلن می‌باشد.

۲) سیم‌های باند : این نوع سیم‌ها نسبت به سیم‌های آزمایش جریان بیشتری را حمل می‌کنند. این کابل‌ها از جنس مس با شماره AWG ۴ هستند و ماده عایق آنها نیز ترموپلاستیک، لاستیک مصنوعی و یا پلی‌اتیلن می‌باشد.

۳) کابل‌های رابط بین منبع جریان و سازه : این نوع سیم‌ها از جنس مس با شماره AWG ۲ یا ۴AWG و با عایق پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا می‌باشد. شماره این سیم‌ها بر اساس آنالیز اقتصادی تعیین می‌شود ولی به هیچ‌عنوان نباید شماره آنها از شماره AWG ۴ کوچک‌تر انتخاب شود و این به دلیل نیاز به وجود استحکام مکانیکی مناسب می‌باشد.

۴) کابل‌های رابط بین آندها و منبع جریان : عایق کاری مناسب در این کابل‌ها بسیار حساس است. عایق از نوع پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا با ضخامت حداقل ۰/۱۱ اینچ بر روی این کابل‌ها ضروری است. سیم رابط آندها معمولاً شماره AWG ۸ با عایق از نوع پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا می‌باشد. سیم‌های رابط بین آندها و سیم‌های مورد استفاده برای اتصال بستر آند به منبع جریان باید از شماره AWG ۲یا بالاتر انتخاب شود. شماره این سیم‌ها بر اساس آنالیز اقتصادی ارائه شده تعیین می‌شود و به هیچ‌عنوان نباید شماره آنها کوچک‌تر از AWG ۴ انتخاب شود و این به دلیل نیاز به وجود استحکام مکانیکی مناسب می‌باشد.

انتخاب نوع سیم از دیدگاه اقتصادی

نوع سیم رابط بین سازه، بستر آند و منبع جریان در سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان باید به‌صورتی انتخاب شود تا هزینه‌های کلی در سیستم کاهش یابد. این از طریق محاسبه هزینه‌های ثابت سالیانه نوع سیم انتخابی و مقایسه آن با هزینه مربوط به اتلاف انرژی به دست می‌آید. وقتی که هزینه‌های ثابت سالیانه و هزینه اتلاف انرژی مساوی شوند. در این صورت اقتصادی‌ترین نوع سیم انتخاب شده است. اگر هزینه اتلاف انرژی از هزینه‌های سالیانه بیشتر شود در این صورت باید سیمی با اندازه بزرگ‌تر انتخاب شود حال اگر هزینه اتلاف انرژی از هزینه‌های سالیانه کمتر شود در این صورت باید سیمی با اندازه کوچک‌تر انتخاب شود.

هزینه اتلاف انرژی از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$V=MK_m$$

در این فرمول:

$$M = 0.0874I^2R$$

$$K_m = \frac{LP}{E}$$

که در آن:

V: هزینه سالیانه اتلاف انرژی برحسب دلار

I: جریان برحسب آمپر

R: مقاومت ۱۰۰ فوت کابل برحسب اهم

P: هزینه انرژی برحسب سنت بر کیلووات ساعت

E: راندمان منبع تغذیه (یک‌سوکننده) ٪

L: طول کابل (فوت)

M: مقادیر آن برای اندازه‌های سیم‌های مورد استفاده و جریان‌های گوناگون از ۱۰ تا ۱۰۰ آمپر در جدول ۳۰-۸ ارائه شده است.

جدول ۸-۳۰ مقادیر M برای محاسبه اقتصادی اندازه سیم

(هزینه اتلاف در ۱۰۰ فوت کابل مسی یک سنت به ازای هر کیلووات ساعت)

	جریان (آمپر)									
اندازه کابل	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
۱۰	۰/۸۹۳	۳/۵۷	۸/۰۴							
۸	۰/۵۶۱	۲/۲۵	۵/۰۵	۹/۰۰	۱۴/۰۰					
۶	۰/۳۶۰	۱/۴۴	۳/۲۴	۵/۷۶	۹/۰۰	۱۳/۰۰	۱۷/۶۴			
۴	۰/۲۲۶	۰/۹۰۵	۲/۰۳	۳/۶۲	۵/۶۵	۸/۱۴	۱۱/۰۸	۱۴/۴۶	۱۸/۳۰	۲۲/۶۰
۲	۰/۱۴۲۴	۰/۵۷۰	۱/۰۸	۲/۲۸	۳/۵۶	۵/۱۳	۶/۹۸	۹/۱۱	۱۱/۵۴	۱۴/۲۴
۱	۰/۱۱۳	۰/۴۵۱	۱/۰۲	۱/۸۱	۲/۸۲	۴/۰۶	۵/۵۴	۷/۲۴	۹/۱۵	۱۱/۳۰
۱/۰	۰/۰۸۹۳	۰/۳۵۷	۰/۸۰۴	۱/۴۲۵	۲/۲۳	۳/۲۱	۴/۴۷	۵/۷۱	۷/۲۳	۸/۹۳
۲/۰	۰/۰۷۱۰	۰/۲۸۴	۰/۶۳۹	۱/۱۳۵	۱/۷۷	۲/۵۶	۳/۴۸	۴/۵۵	۵/۷۵	۷/۱۰
۳/۰	۰/۰۵۶۲	۰/۲۵۷	۰/۵۰۶	۰/۹۰۰	۱/۴۰	۲/۰۳	۲/۷۶	۳/۶۰	۴/۵۵	۵/۶۲
۴/۰	۰/۰۴۴۶	۰/۱۷۸	۰/۴۰۱	۰/۷۱۵	۱/۱۱۵	۱/۶۱	۲/۱۹	۲/۸۶	۳/۶۲	۴/۴۶
□□□ ۲۵۰	۰/۰۳۷۸	۰/۱۵۱	۰/۳۴۰	۰/۶۰۵	۰/۹۴۵	۱/۳۶	۱/۸۵	۲/۴۲	۳/۰۶	۳/۷۸
۳۰۰	۰/۰۳۱۶	۰/۱۲۶۵	۰/۲۸۴	۰/۵۰۶	۰/۷۹۰	۱/۱۴	۱/۵۵	۲/۰۲	۲/۵۶	۳/۱۶
۳۵۰	۰/۰۲۷۰	۰/۱۰۸	۰/۲۴۳	۰/۴۳۲	۰/۶۷۵	۰/۹۷۲	۱/۳۲	۱/۷۳	۲/۱۸	۲/۷۰
۴۰۰	۰/۰۲۷۳	۰/۰۹۴۸	۰/۲۱۳	۰/۳۷۹	۰/۵۹۳	۰/۸۵۴	۱/۱۶	۱/۵۲	۱/۹۱	۲/۳۷
۴۵۰	۰/۰۲۱۰	۰/۰۸۴۰	۰/۱۸۹	۰/۳۳۶	۰/۵۲۵	۰/۷۵۵	۱/۰۳	۱/۳۴۲	۱/۷۰	۲/۱۰
۵۰۰	۰/۰۱۸۹	۰/۰۷۵۵	۰/۱۷۰	۰/۳۰۲	۰/۴۷۲	۰/۶۸۰	۰/۹۲۵	۱/۲۱	۱/۵۳	۱/۸۹
۵۵۰	۰/۰۱۷۲	۰/۰۶۸۹	۰/۱۵۵	۰/۲۷۵	۰/۴۳۰	۰/۶۱۹	۰/۸۴۲	۱/۱۰	۱/۳۹	۱/۷۲
۶۰۰	۰/۰۱۵۸	۰/۰۶۳۲	۰/۱۴۲	۰/۲۵۳	۰/۳۹۵	۰/۵۶۹	۰/۷۷۵	۱/۰۱	۱/۲۸	۱/۵۸
۶۵۰	۰/۰۱۴۵	۰/۰۵۸۰	۰/۱۳۰۵	۰/۲۳۲	۰/۳۶۲	۰/۵۲۲	۰/۷۱۰	۰/۹۲۸	۱/۱۷	۱/۴۵
۷۰۰	۰/۰۱۳۵	۰/۰۵۴۰	۰/۱۲۱۵	۰/۲۱۶	۰/۳۳۸	۰/۴۸۶	۰/۶۶۱	۰/۸۶۵	۱/۰۹	۱/۳۵
۷۵۰۰	۰/۰۱۲۶	۰/۰۵۰۴	۰/۱۱۳۲	۰/۲۰۲	۰/۳۱۵	۰/۴۵۴	۰/۶۱۶	۰/۸۰۵	۱/۰۲	۱/۲۶
۱۰۰۰	۰/۰۰۹۴۵	۰/۰۳۷۸	۰/۰۹۷۰	۰/۱۵۱	۰/۲۳۶	۰/۳۴۰	۰/۴۶۳	۰/۶۰۵	۰/۷۶۵	۰/۹۴۵

فرمول برای تعیین هزینه‌های سالیانه ثابت عبارتست از:

$$F=ESL$$

که در آن:

F: هزینه‌های سالیانه ثابت برحسب دلار بر سال

E: هزینه‌های سالیانه تخمین زده شده (بند الف ملاحظه شود)

S: هزینه اولیه کابل برحسب دلار بر فوت

L: طول کابل برحسب فوت

الف) هزینه‌های ثابت سالیانه تخمینی متغیر است. این هزینه‌ها شامل استهلاک، سود، مالیات، بیمه، عملیات و نگهداری می‌باشد. بر اساس آنچه که در ذیل ارائه شده است مقدار ۰/۱۱ به‌عنوان یک نمونه از این هزینه‌ها به دست آمده است. البته در این حالت مالیات و بیمه در نظر گرفته نشده است.

استهلاک = ۰/۰۲

سود = ۰/۰۶

مالیات = صفر

بیمه = صفر

عملیات و نگهداری = ۰/۰۳

جمع کل (E) = ۰/۱۱

محل‌های اتصال سیم

از دیدگاه اثرات مقاومت مدار، در این محل‌ها به‌عنوان محل‌های حساس به حساب می‌آیند. این محل‌ها در مقابل خوردگی و عوامل مکانیکی آسیب‌پذیر هستند. تعداد محل‌های اتصالات باید در حداقل تعداد ممکن باشند. نوع اتصالات نیز باید طوری انتخاب شود تا محل اتصالات دارای مقاومت الکتریکی پایین، اطمینان‌پذیری بالا و مقاومت به خوردگی بالا باشد. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شده است اتصالات مکانیکی و اتصالات جوشکاری شده در سیستم‌های حفاظت کاتدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اتصالات مکانیکی ارزان‌تر از اتصالات جوشکاری شده است اما معمولاً دارای مقاومت الکتریکی بالاتر و همچنین آسیب‌پذیرتر نسبت به صدمات مکانیکی و خوردگی می‌باشند. تمام اتصالات باید به دقت عایق کاری شوند به‌ویژه محل اتصال آند به منبع تغذیه از این دیدگاه از حساسیت بیشتری برخوردار است و هرگونه آسیب در عایق کاری محل اتصال باعث از کار افتادن سیستم حفاظت کاتدی می‌گردد.

محل اتصالات منبع تغذیه و بستر آند و تمام اتصالات کابل به کابل باید توسط اپوکسی به طور کامل عایق‌کاری شوند. محل اتصال کابل به سازه کمتر حساس می‌باشد ولی این اتصالات را نیز می‌توان توسط اپوکسی و یا قیرقطران زغال‌سنگ داغ کاملاً عایق‌کاری نمود. در ضمن پس از انجام عایق‌کاری باید سطوح محل اتصال را توسط مواد لاستیکی نیز پوشاند. اتصالات زیر برای سیستم‌های حفاظت کاتدی ضروری است:

۱) اتصال بین منبع جریان و سازه

۲) اتصال بین بستر آند و منبع جریان

۳) اتصالات بین کابل اصلی بالاسری و هر یک از آندها

۴) اتصال بین کابل و آند (معمولاً توسط سازنده در کارخانه انجام شده است)

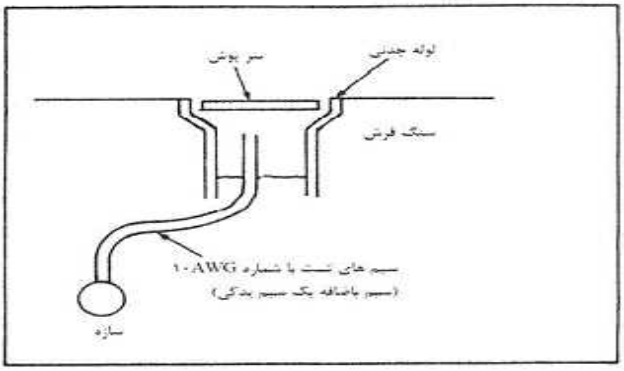
۵) سیم‌های آزمایش و باندهای ضروری

هرگونه نیاز به وجود اتصالات اضافی باید با دقت مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. محل تمام اتصالات ضروری باید به طور خاص بر روی نقشه‌های طراحی مشخص گردند. هر گونه نیاز به وجود اتصالات اضافی باید توسط مهندس طراح سیستم تعیین گردد. نباید تعیین نیاز به این نوع اتصالات به مهندس نصب و راه‌اندازی سپرده شود.

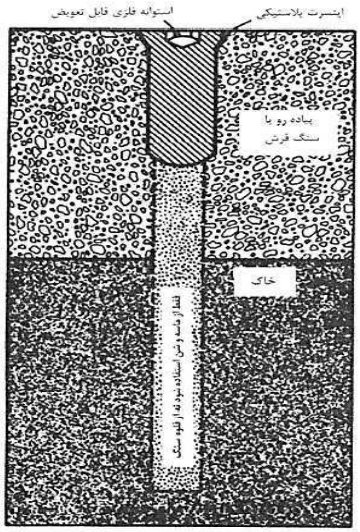
ایستگاه‌های آزمایش

شش نوع اصلی ایستگاه آزمایش در سیستم‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان وجود دارد: ایستگاه آزمایش پتانسیل، ایستگاه آزمایش اتصال خاک، ایستگاه آزمایش جریان خط (افت پتانسیل)، ایستگاه آزمایشی اتصال عایق، ایستگاه آزمایش عایق غلاف و ایستگاه آزمایش باند. سیم‌کشی برای هریک از این ایستگاه‌های آزمایش در شکل‌های ۸-۸۴ تا ۸-۸۹ ارائه شده است. سیم‌های آزمایش باید از جنس مس با شماره AWG ۱۰ بوده که دارای پوشش عایق از نوع TW یا RHW - USE باشد. اگر در آینده در بین فلنج‌ها یا سازه‌ها نیاز به استفاده از باند باشد باید از کابل مسی ۷ رشته‌ای با شماره AWG ۴ یا بزرگ‌تر استفاده شود. این باندها باید به داخل ایستگاه آزمایش آورده شوند.

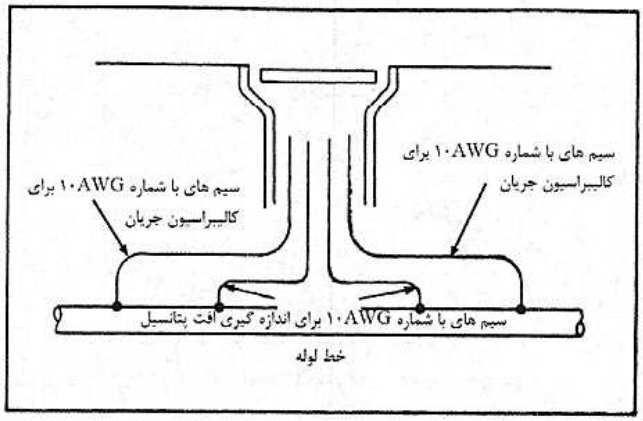
ایستگاه‌های آزمایش ممکن است یا در داخل زمین قرار گرفته باشند (مانند شکل ۸-۸۴) یا ممکن است در بالای زمین قرار گرفته و بر میله‌ای نصب شده باشند (مانند شکل ۸-۸۷). ایستگاه‌هایی که در داخل زمین قرار دارند صرفاً در مواردی استفاده می‌شوند که احتمال آسیب به آنها توسط عبور وسائل نقلیه و عابرین وجود نداشته باشد.



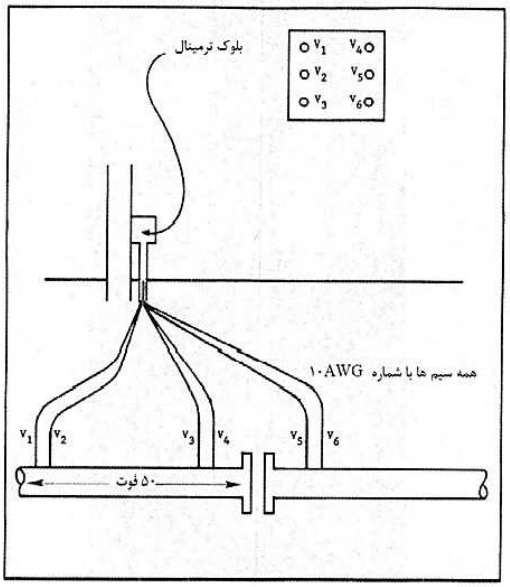
شکل ۸-۸۴ ایستگاه تست پتانسیل قرار گرفته در داخل زمین



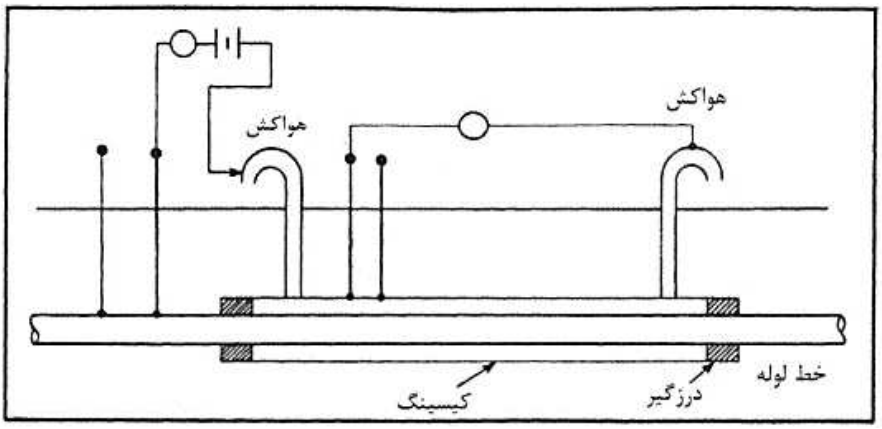
شکل ۸-۸۵ایستگاه آزمایش اتصال خاک



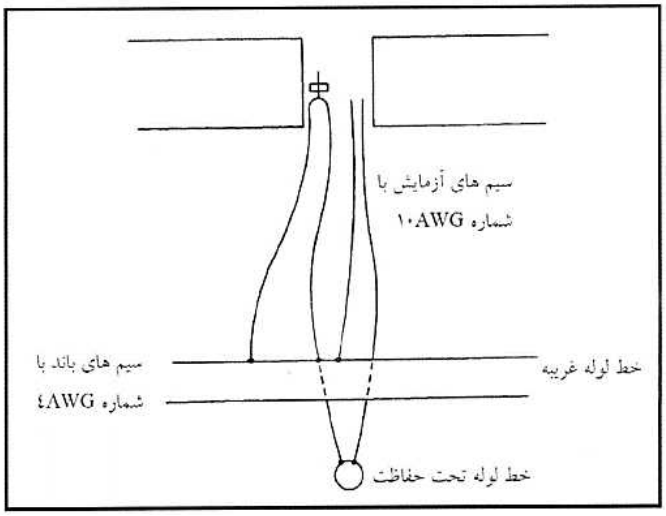
شکل ۸-۸۶ایستگاه آزمایش افت ولتاژ



شکل ۸-۸۷ ایستگاه آزمایش فلنج عایق (۶ سیم)

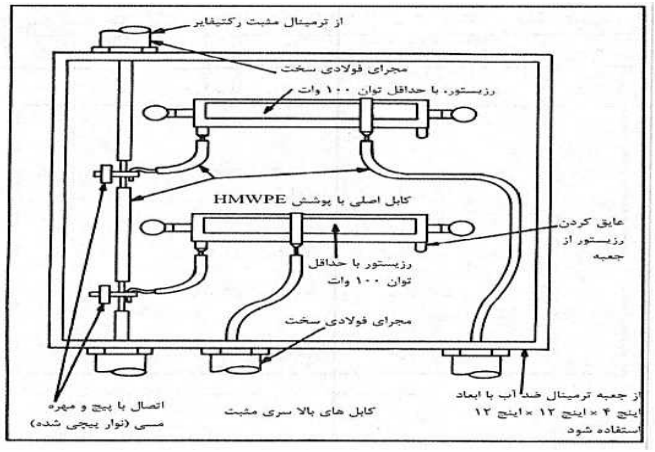


شکل ۸-۸۸ ایستگاه آزمایش عایق کیسینگ



شکل ۸-۸۹ ایستگاه آزمایش اثر تداخل با استفاده از سیم‌های باند

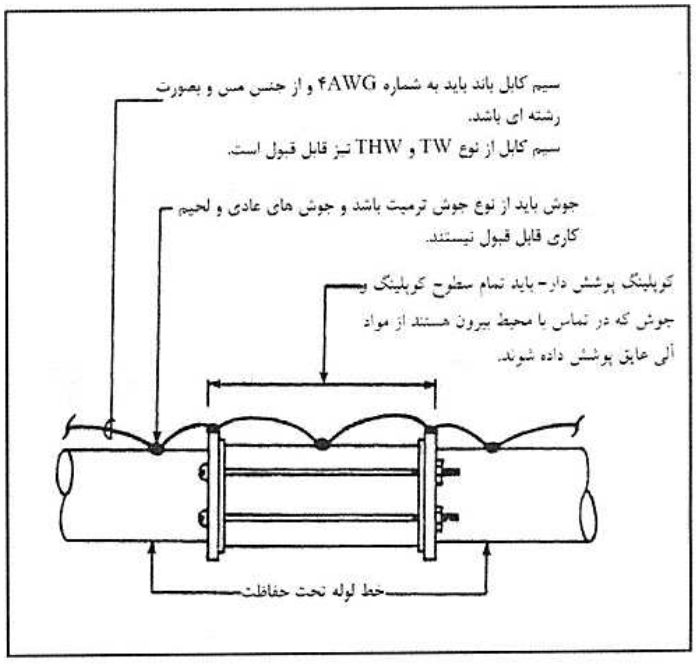
درصورتی‌که احتمال آسیب به آنها توسط وسائل نقلیه یا عابرین وجود داشته باشد، باید این ایستگاه‌ها در بالای زمین در محلی امن و بر روی میله‌ای عمودی نصب شوند. علاوه بر ایستگاه‌های آزمایش استفاده از مقاومت‌های متغیر متعادل‌ساز نیز ضروری است. این در هنگامی ضروری است که فقط از یک یک‌سوکننده برای چند بستر آندی استفاده می‌شود. این مقاومت‌های متغیر در داخل ترمینال ایستگاه‌های آزمایش بالای زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد (مانند شکل ۸-۹۰). محل و چگونگی سیم‌کشی همه ایستگاه‌های آزمایش باید در نقشه‌های طراحی سیستم مشخص شده باشند. تمام سیم‌های آزمایش باید دارای رنگ‌های استاندارد باشند و همچنین باید دارای برچسب‌هایی از جنس فلزات مقاوم در مقابل خوردگی و یا پلاستیک باشند که بر روی این برچسب‌ها مشخص گردیده باشد که این سیم‌ها به کجا متصل شده‌اند.



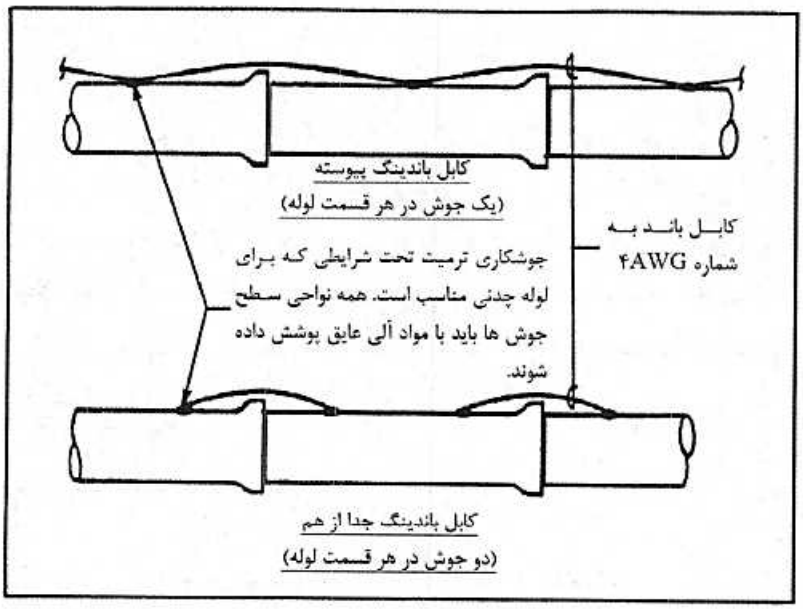
شکل ۸-۹۰ رزیستورهای متعادل‌سازی آند

باندها

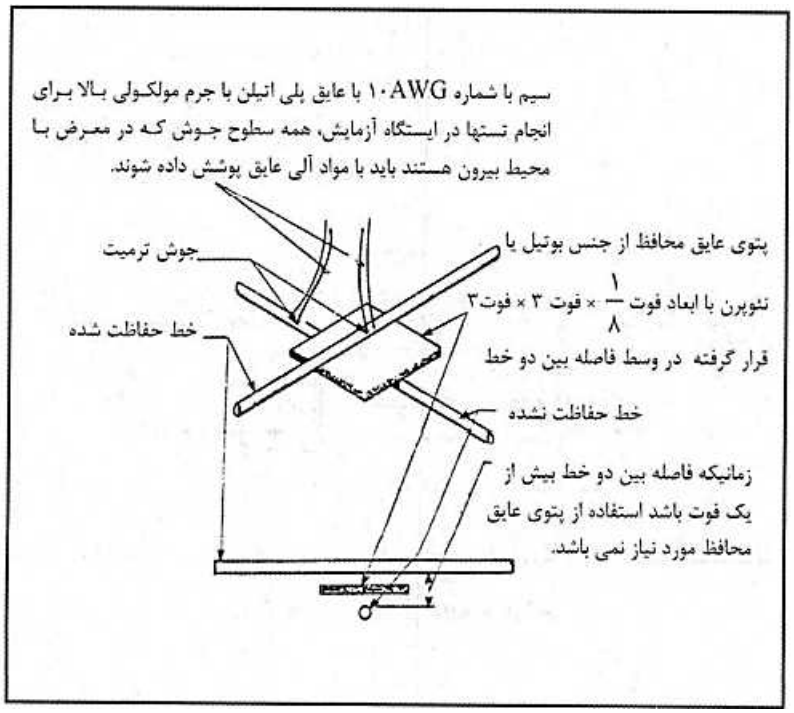
باندهای بین قسمت‌های یک سازه تحت حفاظت یا بین یک سازه تحت حفاظت و یک سازه غریبه باید از نوع مس ۷ رشته‌ای با شماره AWG ۴ یا بزرگ‌تر که دارای پوشش عایق است انتخاب شود. تمام باندهای دارای مقاومت الکتریکی باید برای تنظیم شدن به داخل ایستگاه آزمایش آورده شوند. باندهای رابط نیز باید جهت ارتباط دادن و یا انجام تنظیم به داخل ایستگاه‌های آزمایش آورده شوند. تمام اتصالات بین سازه و باند باید با استفاده از جوش ترمیت انجام شده و توسط مواد اپوکسی پوشانده شوند. روش‌های استاندارد برای انجام عملیات استفاده از باندها و اتصالات مربوط در اشکال ۸-۹۱ تا ۸-۹۸ ارائه شده‌اند.



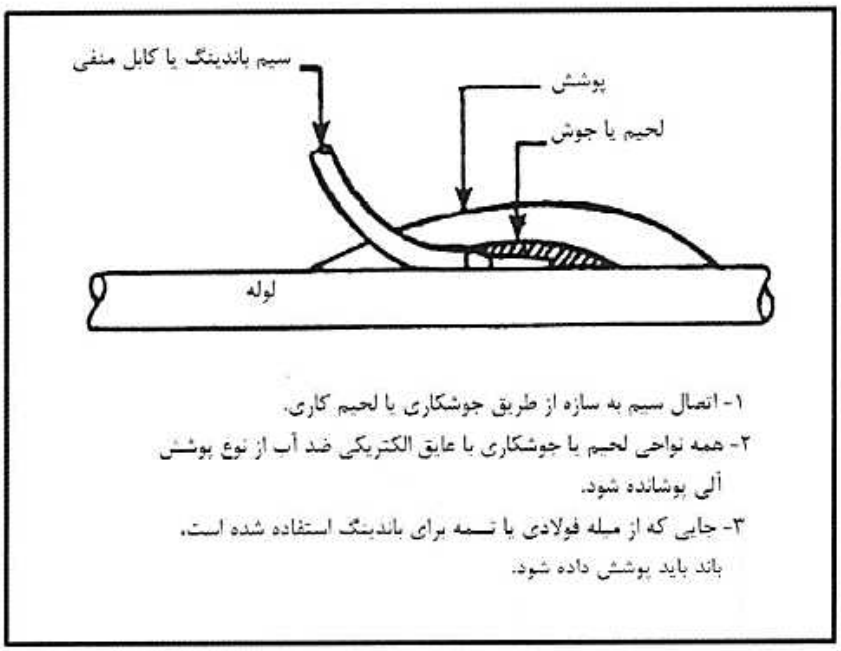
شکل ۸-۹۱ باندینگ از نوع کوپلینگ پوشش‌دار



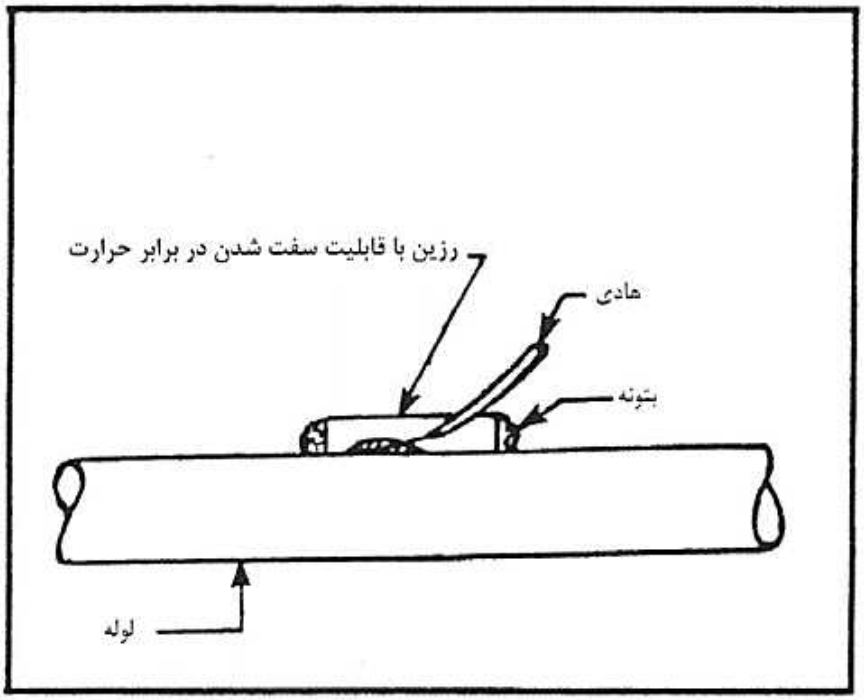
شکل ۸-۹۲ روش‌های باندینگ برای لوله‌های چدنی



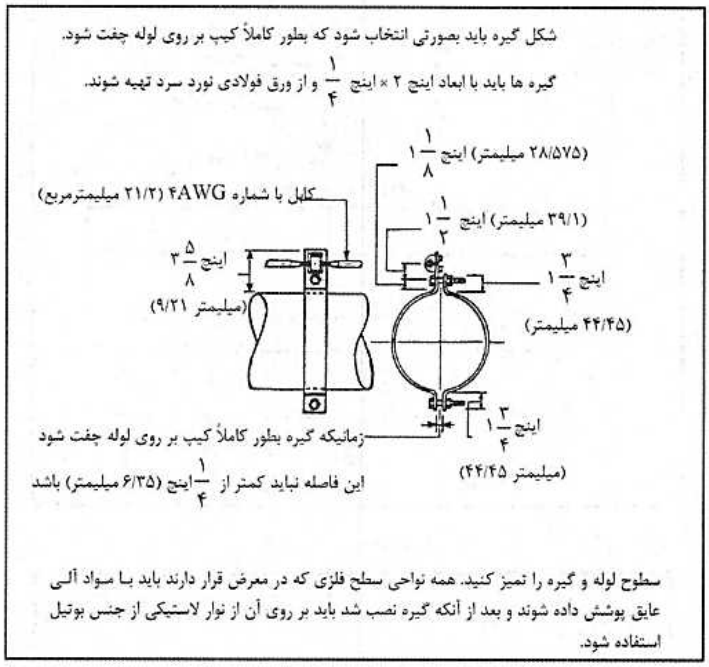
شکل ۸-۹۳ جداسازی یک خط حفاظت شده از یک خط حفاظت نشده



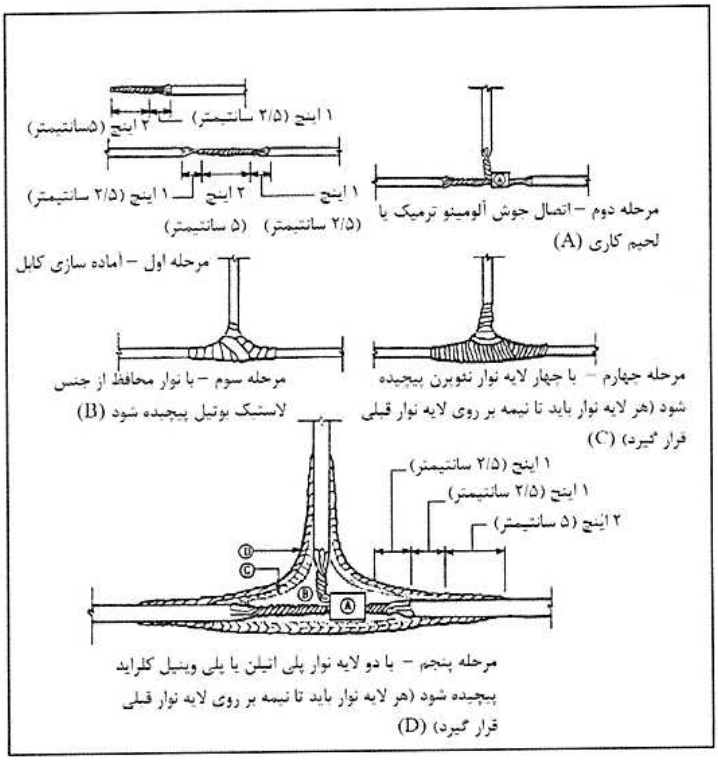
شکل ۸-۹۴ باند الکتریکی



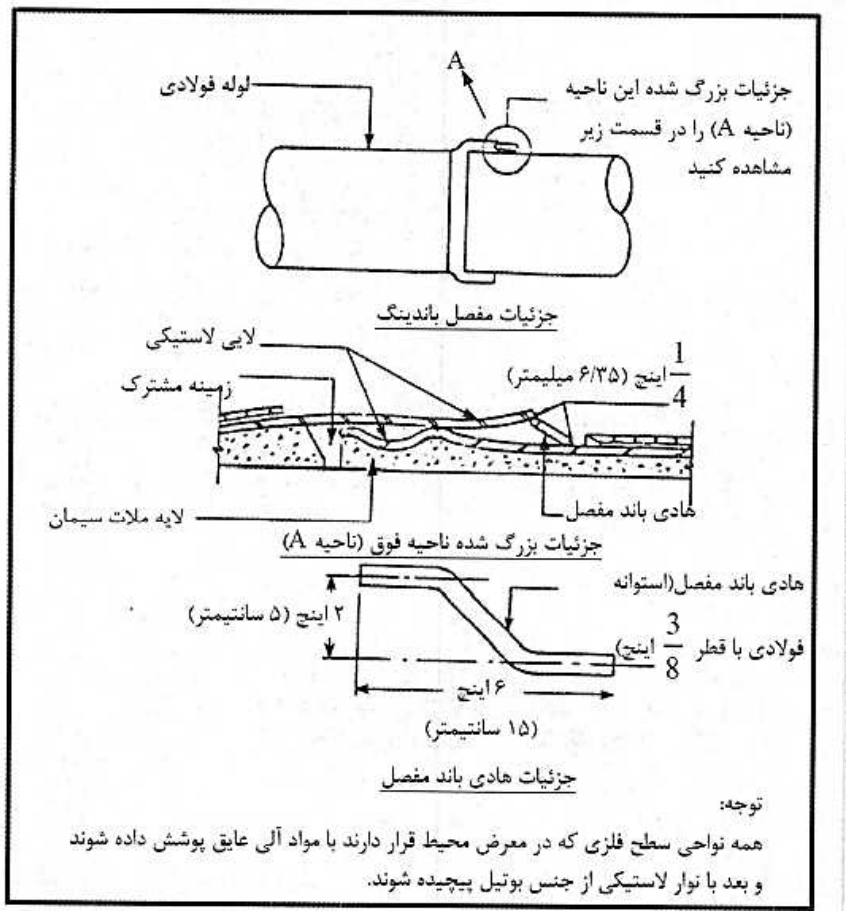
شکل ۸-۹۵ چگونگی پوشاندن محل اتصال کابل به لوله با استفاده از رزین دارای قابلیت سفت شدن با حرارت



شکل ۸-۹۶ مفصل و چفت باندینگ با استفاده از گیره



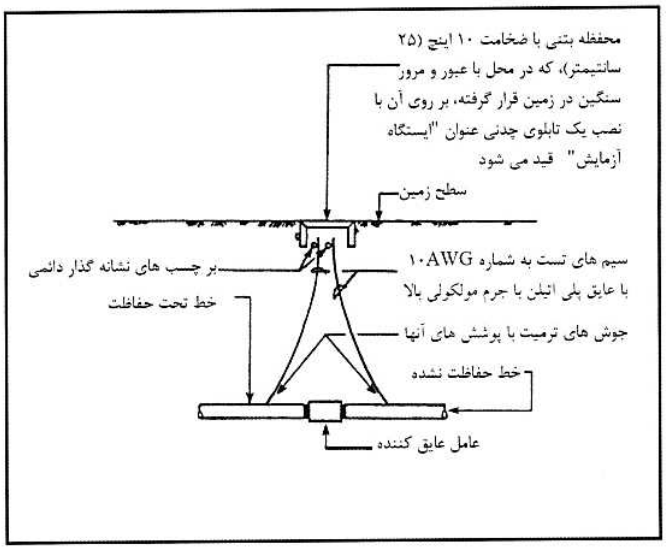
شکل ۸-۹۷ مراحل اتصال کابل‌ها در زیر زمین



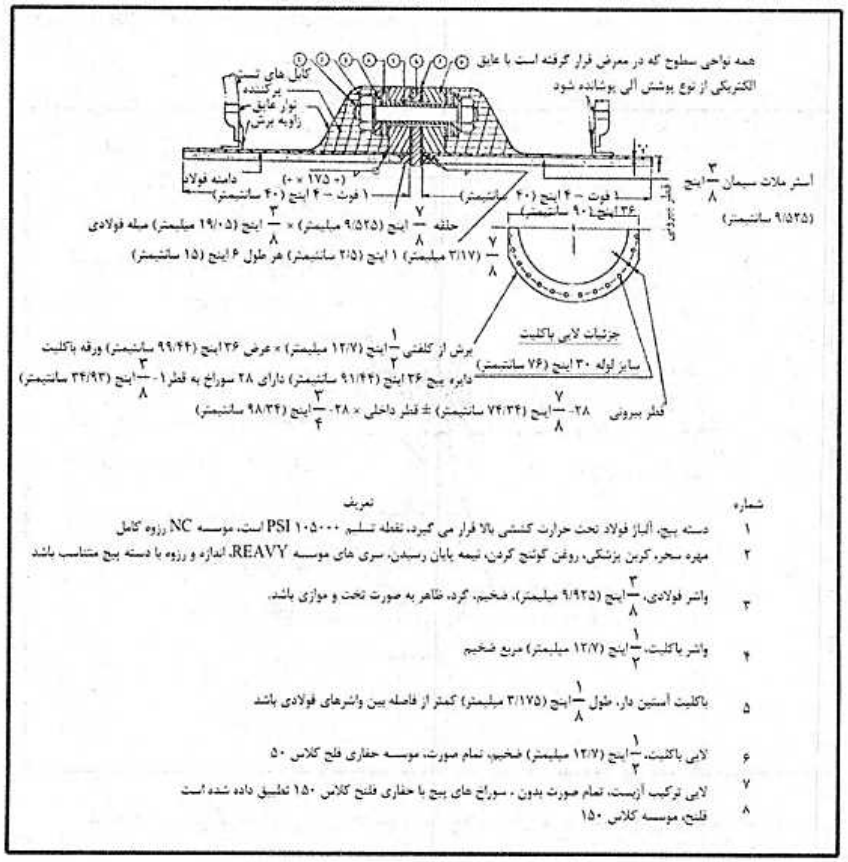
شکل ۸-۹۸ مفصل باند جوشکاری شده برای قرار گرفتن بر روی لوله فولادی غیرمدفون (روی زمینی)

اتصالات عایق

اتصالات عایق بین قسمت‌های سازه معمولاً به دو منظور استفاده می‌شوند. در حالت اول زمانی که لازم باشد تا یک سازه را به چند قسمت مجزا تقسیم نمود و سپس هر یک از قسمت‌ها را به طور مجزا تحت حفاظت کاتدی قرار داد. در حالت دوم زمانی که لازم باشد تا قسمتی از سازه را جدا نمود که تحت حفاظت کاتدی است از قسمت دیگر آنکه نیاز به حفاظت کاتدی ندارد. اتصالات عایق را هم می‌توان مستقیماً در داخل زمین دفن نمود هم می‌توان آن را در داخل یک گودال مخصوص قرار داد و هم می‌توان آن را در بالای سطح زمین تعبیه نمود. اگر آن مستقیماً در داخل زمین دفن شود باید برای آن یک ایستگاه آزمایش در نظر گرفت.

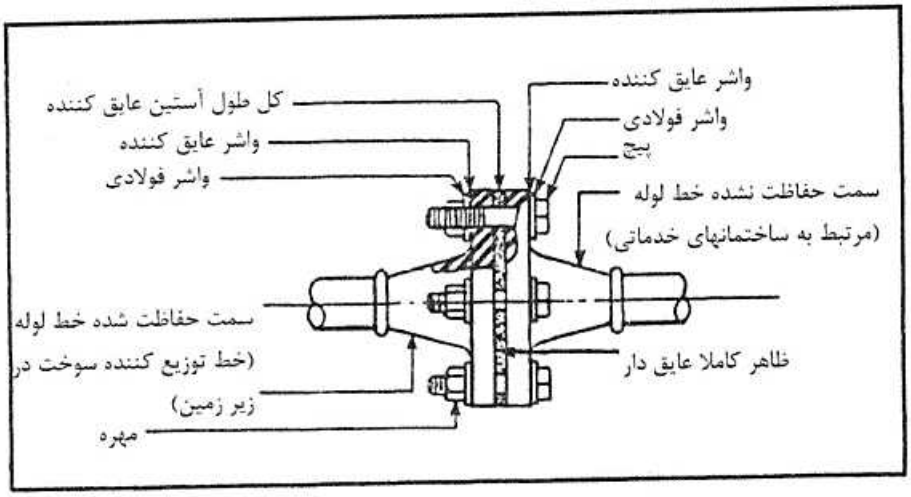


شکل ۸-۹۹ چگونگی قرار گرفتن محفظه تست برای عامل عایق کننده بین دو خط لوله

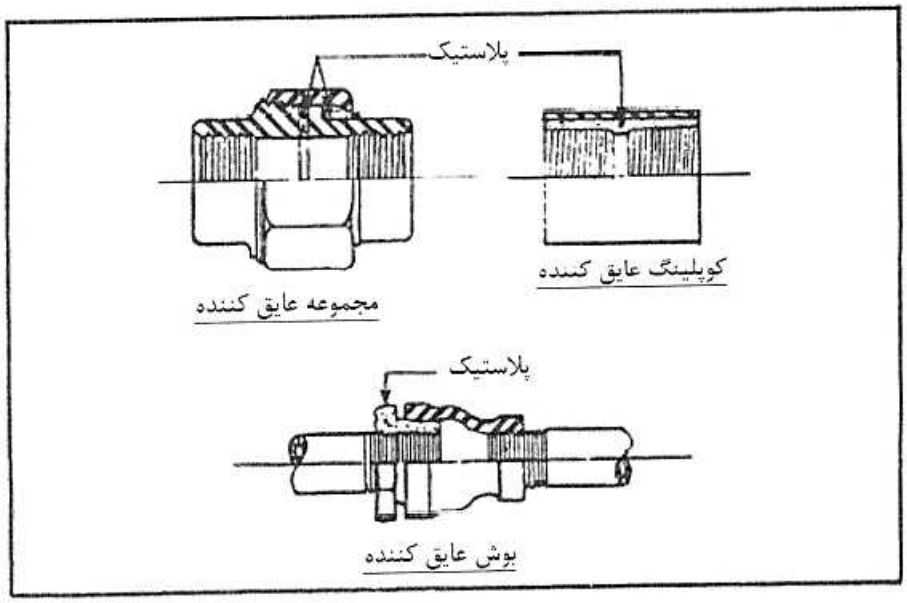


شماره	تعریف
۱	دسته پیچ، آلیاژ فولاد تحت حرارت کشش بالا قرار می گیرد، نقطه تسلیم ۱۰۵۰۰۰ PSI است، موسسه NC رزوه کامل
۲	مهره سخر، کربن بزنشکی، روغن گوشتج کردن، تیمه پایان رسیدن، سری های موسسه REAVY، اندازه و رزوه با دسته پیچ متناسب باشد
۳	واشر فولادی، ۳/۸ اینچ (۹/۹۲۵ میلیمتر)، ضخیم، گرد، ظاهر به صورت تخت و موازی باشد.
۴	واشر باکلیت، ۱/۲ اینچ (۱۲/۷ میلیمتر) مربع ضخیم
۵	باکلیت آستین دار، طول ۱/۸ اینچ (۳/۱۷۵ میلیمتر) کمتر از فاصله بین واشرهای فولادی باشد
۶	لایی باکلیت، ۱/۲ اینچ (۱۲/۷ میلیمتر) ضخیم، تمام صورت، موسسه حفاری فلج کلاس ۵۰
۷	لایی ترکیب آزبست، تمام صورت بدون ، سوراخ های پیچ با حفاری فلنج کلاس ۱۵۰ تطبیق داده شده است
۸	فلنج، موسسه کلاس ۱۵۰

شکل ۸-۱۰۰ جزئیات مفصل عایق فولادی برای لوله فلنج‌دار که در زیر پای نصب شده است



شکل ۸-۱۰۱ جزئیات و عوامل عایق کننده لوله فلنج‌دار در بالای سطح زمین



شکل ۸-۱۰۲ جزئیات و عوامل عایق‌کننده برای قسمت‌های لوله‌هایی که با پیچ‌ومهره به یکدیگر متصل شده‌اند

طراحی سیستم فداشونده حفاظت کاتدی

تئوری

پایه و اصول حفاظت کاتدی از نوع آندهای فداشونده نیز بر تشکیل پیل الکتروشیمیایی استوار است مانند آنچه در مبحث سیستم اعمال جریان توضیح داده شد الکترون‌های دارای انرژی بالا از آند به سازه تحت حفاظت جریان می‌یابد. پتانسیل سازه به الکترولیت مورد نیاز برای حفاظت در این سیستم دقیقاً برابر با این پتانسیل در سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان می‌باشد.

الکترون‌های دارای انرژی بالا، توسط خوردگی فلزات فعالی چون منیزیم و روی حاصل می‌شود. در این سیستم فلز آند در حین فرایند، مصرف یا به‌عبارت‌دیگر، فدا می‌شود. به همین خاطر آند باید به طور ادواری تعویض گردد تا عمل حفاظت سازه بتواند به طور پیوسته ادامه داشته باشد. به منظور آنکه دوره‌های تعویض ادواری آندها به حداقل رسانده شود باید مقدار ماده آند را به اندازه کافی به کار برد در این صورت فاصله تعویض آندها به مقدار قابل قبول و مطلوب و رسانده می‌شود. معمولاً برای سازه‌های مدفون در خاک، این سیستم به‌صورتی طراحی می‌شود تا عمر آندها بین ۱۰ تا ۱۵ سال باشد برای سازه‌های غوطه‌ور در آب و یا برای سازه‌های مدفون که در آنها عمل تعویض آندها با دشواری صورت می‌پذیرد باید سیستم طوری طراحی شود تا عمر آندها به ۲۰ تا ۳۰ سال برسد.

مزایای سیستم حفاظت کاتدی از نوع آندهای فداشونده

مزیت اولیه سیستم فداشونده در مقایسه با سیستم اعمال جریان، ساده و مطمئن بودن آن است. در این سیستم از وسایل حساسی هم‌چون دستگاه یک‌سوکننده استفاده نمی‌شود. در این سیستم کابل رابط بین یک‌سوکننده و آندها که در آنها احتمال خوردگی و آسیب‌پذیری بسیار زیاد است وجود ندارد. در سیستم آندهای فداشونده کابل رابط بین آندها و سازه نیز تحت پتانسیل منفی قرار داشته، بنابراین تمام کابل نیز تحت حفاظت می‌باشد. سیستم حفاظت کاتدی از نوع فداشونده در مقایسه با سیستم اعمال جریان از لحاظ نصب و نگهداری کم هزینه‌تر است. این مورد به‌ویژه برای سیستم‌هایی که در آنها جریان لازم برای حفاظت کم است (۰/۵ آمپر یا کمتر بازاء ۱۰۰ فوت از طول سازه) بیشتر صادق است. در سیستم آندها فداشونده هزینه مصرف برق یا هزینه مربوط به انتقال جریان برق به اتفاق نقاط دور دست سازه جهت حفاظت وجود ندارد. مزیت مهم دیگر سیستم آندهای فداشونده آنست که در آن احتمال ایجاد تداخل با سازه‌های دیگر وجود ندارد. در این سیستم معمولاً آندها برای انجام حفاظت کاتدی سازه، در طول سازه و در کل سطح سازه توزیع می‌شوند و این به خاطر پتانسیل‌های محرکه پایین بین مواد آندهای فداشونده و سازه‌های تحت حفاظت می‌باشد.

معایب سیستم آندهای فداشونده

مهم‌ترین عیب این سیستم پایین بودن میزان ولتاژ محرکه بین ماده آند فداشونده و سازه تحت حفاظت است. این باعث محدود شدن جریان خروجی آندها شده و در نتیجه آن، میزان سطح سازه تحت حفاظت که توسط یک آند حفاظت می‌شود محدود می‌گردد. مصرف شدن و خورده شدن آندها در سیستم آندهای فداشونده جزء خواص ذاتی آندها بوده و در نتیجه، آندها باید پس از گذشت یک دوره زمانی تعویض گردند.

روش‌های طراحی سیستم آندهای فداشونده

اصول و پایه طراحی سیستم حفاظت کاتدی از نوع آندهای فداشونده در قسمت مربوطه توضیح داده شده است. ابتدا جریان کل لازم برای حفاظت تعیین می‌شود. سپس خروجی جریان هر آند تعیین می‌گردد. پس از آن تعداد آندهای لازم برای حفاظت و عمر آنها تعیین می‌شود. می‌توان نوع آندها و اندازه آنها را طوری تعیین و تنظیم نمود تا سیستم حفاظت کاتدی حاصله دارای عملکرد مطلوب و دلخواه بوده و همچنین عمر آندها نیز بهبود یابد.

تعیین میزان جریان لازم برای حفاظت

اولین مرحله در طراحی سیستم آندهای فداشونده تعیین جریان کل لازم برای حفاظت می‌باشد. در این صورت می‌توان تعداد آندهای مورد نیاز برای تأمین این مقدار جریان را تعیین نمود و یا به‌عبارتی می‌توان تعیین نمود که هر آند باید چه مقدار از جریان مورد نیاز برای حفاظت را تأمین نماید.

تعیین خروجی جریان هر آند

میزان خروجی جریان هر آند در محیط تعیین می‌شود. این توسط یک روش ساده که در آن از فاکتورهای استاندارد مطابق با نوع و اندازه آندها و پتانسیل سازه به الکترولیت مطلوب استفاده می‌شود تعیین می‌گردد. خروجی جریان هر آند تک با استفاده از پتانسیل محرکه بین آند و سازه و مقاومت کل مدار نیز قابل تعیین می‌باشد. مقاومت آند به الکترولیت یک عامل مهم در اکثر موارد است. این روش اصولاً از هر لحاظ شبیه روش طراحی برای سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان است.

روشی ساده برای شرایط معمولی

فرمول ذیل برای تعیین خروجی جریان آندها با تقریب خوب در اکثر موارد قابل استفاده است. در ضمن از این فرمول می‌توان برای کنترل کردن نتایج حاصل از بررسی روش «تعیین خروجی جریان آند با استفاده از مقاومت آند به الکترولیت» نیز استفاده نمود.

$$I = \frac{CFy}{\rho}$$

که در آن:

I = خروجی جریان برحسب میلی‌آمپر

C = ثابت مواد

F = فاکتور مربوط به آند

y= فاکتور مربوط به پتانسیل سازه به الکترولیت

ρ = مقاومت مخصوص محیط برحسب اهم – سانتی‌متر

تعیین خروجی جریان آند با استفاده از مقاومت آند به الکترولیت

همانند روش سیستم اعمال جریان، در این روش نیز مقاومت مدار حفاظت کاتدی شامل مقاومت آند به الکترولیت، مقاومت سازه به الکترولیت و مقاومت تمام اتصالات الکتریکی تعیین می‌شود. سپس با استفاده از میزان اختلاف بین پتانسیل آند و پتانسیل سازه تحت حفاظت، خروج جریان با استفاده از قانون اهم به دست می‌آید.

محاسبه مقاومت آند به الکترولیت

همانند روش سیستم اعمال جریان، در اینجا نیز مقاومت بین آند و محیط، بالاترین مقاومت در مدار حفاظت کاتدی می‌باشد این مطلب به‌ویژه در هنگامی که آندها در فاصله کمی (۱۰ فوت یا کمتر) از سازه تحت حفاظت قرار دارند به‌خوبی صادق می‌باشد. مقاومت آند به الکترولیت با استفاده از معادلات ساده شده که هم برای شرایط عادی و هم برای شرایط پیچیده کاربرد دارد، محاسبه می‌شود. این فرمول هم برای سیستم اعمال جریان و هم برای سیستم آندهای فداشوند قابل استفاده است. در

بعضی موارد، استفاده از گروهی متشکل از ۲ یا ۳ آند فداشونده به منظور فراهم آوردن و تأمین جریان لازم برای حفاظت و همچنین تأمین دوام و عمر مناسب از آندها با استفاده از آندهای موجود در انبار ضروری می‌باشد. در این صورت لازم است تا از فاکتوری موسوم به فاکتور موازی برای محاسبه مقاومت معادل آندهای موازی استفاده شود. در بعضی از مواقع وقتی که این آندها استفاده می‌شود باید یک رزیستور قابل تنظیم یا رزیستور سیم از جنس نایکرم بین کابل آند به سازه قرار داده شود تا جریان به میزان مورد نیاز تنظیم و محدود شود. در این حالت با تعیین مقاومت آند به الکترولیت مقدار رزیستور مورد نیاز محاسبه می‌شود.

تعیین مقاومت سازه به الکترولیت

مقاومت سازه به الکترولیت معمولاً در طراحی سیستم حفاظت کاتدی از نوع آندهای فداشونده در نظر گرفته نمی‌شود و این به خاطر آنست که این مقاومت در مقایسه با مقاومت آند به الکترولیت کوچک است.

مقاومت کابل رابط

مقاومت کابل رابط توسط طول و قطر کابل تعیین می‌شود. انتخاب اندازه سیم کابل در قسمت اندازه سیم توضیح داده شده است. سیم‌های مسی با شماره AWG ۱۲ بر روی آندهای فداشونده نصب می‌شوند از سیم‌های مسی با شماره AWG ۱۰ نیز به‌عنوان سیم رابط آندهای فداشونده استفاده می‌شود. این سیم‌ها به ترتیب دارای مقاومت‌های ۱/۰۲ و ۱/۶۲ اهم بر ۱۰۰۰ فوت می‌باشند. ازآنجاکه، در سیستم‌های آند فداشونده معمولاً طول کابل‌های رابط، کوتاه و مقدار جریان نیز کم می‌باشد، بنابراین از مقاومت کابل رابط می‌توان صرف نظر کرد.

مقاومت الکتریکی در محل‌های اتصالات

ضرورت پایین نگهداشتن مقاومت الکتریکی در تمام طول عمر آندها فداشونده مهم‌تر از ضرورت انتخاب سیم‌های رابط با مقاومت الکتریکی اولیه کم می‌باشد. اگرچه محل اتصالات در سیستم آندهای فداشونده تحت حفاظت از خوردگی است. با وجود این، همچنان خوردگی در این اتصالات وجود دارد که این امر موجب افزایش مقاومت الکتریکی در محل اتصالات می‌شود. همانند سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان در مورد سیستم آندهای فداشونده نیز باید تعداد محل‌های اتصال را به حداقل ممکن کاهش داد. اتصالات را باید به خوبی انجام داده، عایق‌بندی نمونه، بازرسی کرده و بهره‌برداری نمود. تعداد و محل‌های اتصالات را باید در هنگام طراحی سیستم تعیین نموده و باید از محول نمودن زمان تعیین آنها به زمان نصب و راه‌اندازه سیستم پرهیز نمود.

مقاومت کل مدار

مقاومت کل مدار (معمولاً فقط مقاومت آند به الکترولیت به‌عنوان عامل اصلی در نظر گرفته می‌شود) از طریق جمع نمودن مقاومت کلیه اجزاء موجود در مدار به دست می‌آید.

در اینجا نیاز است تا اختلاف پتانسیلی بین آند و سازه تحت حفاظت تعیین شود در اکثر موارد میزان اختلاف پتانسیل مدار باید آند و پتانسیل سازه تحت حفاظت (برای فولاد برابر با ۸۵۰- میلی‌ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس در نظر گرفته می‌شود) استفاده می‌شود. در صورت نیاز می‌توان از دیگر معیارهای حفاظت نیز استفاده نمود. در شرایطی که خروجی جریان

آندها به راحتی انجام می‌شود (مثلاً هنگامی که آندها در محیطی با مقاومت مخصوص پایین قرار داشته باشند) می‌توان برای حفاظت، از آندهای با پتانسیل مدار باز کمتر نیز استفاده نمود.

خروجی جریان آندها

خروجی جریان آندها را می‌توان با استفاده از مقاومت مدار و پتانسیل سازه به آند و با استفاده از قانون اهم به دست آورد.

اندازه‌گیری میدانی خروجی جریان آند

محاسبات بر اساس آنچه که در سیستم‌های حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان گفته شد فقط مقدار تقریبی مقاومت آند نسبت به الکترولیت را تحت شرایط واقعی ارائه می‌دهد. اگرچه از این محاسبات برای طراحی اولیه سیستم‌های حفاظت کاتدی استفاده می‌شود اما خروجی جریان واقعی به اندازه کافی از مقدار محاسبه شده متفاوت است بنابراین نیاز به تنظیم و تغییر نیز وجود خواهد داشت. این برای سیستم آندهای فداشونده بیشتر یک مشکل محسوب می‌شود زیرا پتانسیل خروجی در سیستم‌های آندهای فداشونده بر اختلاف سیستم اعمال جریان قابل تنظیم نمی‌باشد. در مناطقی که مقاومت مخصوص خاک برحسب محل تغییر می‌کند اندازه‌گیری‌های میدانی باید برای موقعیت هر آند انجام شود. اغلب تنها روش برای رفع مشکل آندها با خروجی جریان پایین، افزودن آندهای اضافی به سیستم است. یک روش برای رفع مشکل آندها با خروجی جریان بالا قرار دادن رزیستور محدود کننده جریان در سیستم هادی آندهای می‌باشد، اگرچه حد حتی الامکان باید از این روش خودداری نمود. مقدار واقعی خروجی جریان آند را باید از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی تعیین نمود.

بهترین روش برای تعیین خروجی جریان آند آنست که یک آند را در محل واقعی پیش‌بینی شده در تأسیسات حفاظت کاتدی قرار داده و آن را به سازه تحت حفاظت متصل نمود. مقدار خروجی جریان آند با استفاده از یک شنت جریان (با مقاومت ۰/۰۱ یا ۰/۱ اهم) که در سیم هادی آند نصب می‌شود اندازه‌گیری می‌شود. ازآنجاکه، این غیر محتمل است تا یک آند تک بتواند سازه را به یک پتانسیل مطلوب پلاریزه کند بنابراین اصلاح خروجی آند برای رسیدن به یک پتانسیل مطلوب ضروری است. این امر یا با استفاده از فاکتور پتانسیل سازه یا با تعیین مقاومت آند به الکترولیت امکان‌پذیر است. برای تعیین مقاومت آند به الکترولیت، از اختلاف پتانسیل واقعی و خروجی جریان آند استفاده می‌شود.

تعیین تعداد آندهای مورد نیاز

پس از آنکه خروجی جریان هر آند تعیین شد، تعداد آندهای لازم برای حفاظت سازه محاسبه می‌شود. برای این کار باید جریان کل لازم برای حفاظت به میزان جریان خروجی هر آند تقسیم شود. در عمل تقریباً ۱۰ درصد به تعداد آندهای حاصل از این محاسبات اضافه می‌شود. این برای جبران بی‌دقتی‌ها در طراحی سیستم، اثر تغییرات فصلی در خروجی جریان آندها کاهش خروجی آنها به دنبال مصرف فیزیکی آندها می‌باشد. البته باید توجه داشت که افزودن این درصد آند به آندهای محاسبه شده هیچ اثر ضرری ندارد زیرا حتی اگر تعداد آندهای محاسبه شده کافی نیز بوده باشند، افزودن تعدادی آند می‌تواند صرفاً منجر به افزایش عمر آندها گردد.

تعیین عمر آند

عمر آند بر اساس میزان جریان خروجی، وزن آند و راندمان آند محاسبه می‌شود این محاسبات شامل تعداد آمپر ساعت‌های حاصل از یک آند برحسب هر پوند آند مصرفی می‌باشد. مصرف آندها با استفاده از فرمول ذیل محاسبه می‌شود:

W=YSI

که در آن:

W= میزان مصرف آند برحسب پوند

Y= تعداد سال‌ها

S= نرخ روز تئوری آند برحسب پوند بر آمپر در سال

I= خروجی جریان آند برحسب آمپر

برای برخی از آندها، راندمان آند دانسیته جریان آند بستگی دارد. برای این مواد، راندمان آند از فرمول ذیل محاسبه می‌شود:

$$W = \frac{YSI}{E}$$

که در آن:

W= میزان مصرف آند برحسب پوند

Y= تعداد سال‌ها

S= نرخ مصرف تئوری آند برحسب پوند بر آمپر در سال

I= خروجی جریان آند برحسب آمپر

E= راندمان آند

برای آندهای با آلیاژ منیزیم استاندارد، راندمان آند درصورتی‌که دانسیته جریان آند بالای ۲۵۰ میلی‌آمپر بر فوت‌مربع باشد تقریباً ثابت است. حال اگر راندمان آند در دانسیته جریانی از آند کار می‌کند پایین باشد. ماده آند در اثر خود خوردگی به هدر می‌رود. درصورتی‌که راندمان آند ۵۰ درصد باشد نیمی از ماده آند در اثر خوردگی از بین رفته و فقط نیمی از ماده آند برای تولید جریان حفاظتی سازه مصرف می‌شود. اگر عمر مطلوب آند، با انتخاب جنس، نوع و اندازه آن حاصل نشود در این صورت باید جنس آند و یا اندازه آند تغییر یابد و این فرایند آن‌قدر ادامه یابد تا سرانجام آندی با جنس، ابعاد و مشخصات مناسب حاصل شود تا قادر باشد عمر مناسب را تأمین نماید.

تأثیر تغییرات فصلی در جریان خروجی آند

با تغییر در مقاومت مخصوص محیط، میزان جریان خروجی آند نیز تغییر خواهد کرد. تغییرات فصلی از طریق ایجاد تغییرات در رطوبت خاک برای سیستم‌های مدفون در خاک یا رقیق نمودن آب دریا برای سیستم‌های غوطه‌ور در آب دریا باعث ایجاد تغییرات در خروجی جریان آند می‌شود. خوشبختانه در بیشتر موارد، مقدار جریان مورد نیاز برای حفاظت نیز با افزایش مقاومت مخصوص محیط، کاهش می‌یابد، به هر حال در بعضی موارد جریان خروجی آند از حد حفاظت تغییر کرده و سیستم نیازمند تنظیمات فصلی برای دستیابی به حفاظت کافی می‌باشد.

مواد آند فداشونده

منیزیم

منیزیم رایج‌ترین ماده آند فداشونده مورد استفاده برای حفاظت سازه‌های مدفون می‌باشد. همچنین آندهای منیزیم برای حفاظت داخل گرمکن‌ها و مخازن آبی، مبدل‌های حرارتی، کندانسورها و دیگر سازه‌هایی که در تماس با آب دریا هستند به کار می‌روند. آندهای منیزیم هم به‌صورت ریخته‌گری و هم اکسترود شده با وزن‌های از ۱ تا ۲۰۰ پوندی و در اشکال مختلف موجود می‌باشد. دو ترکیب معمول آند، آلیاژ استاندارد و آلیاژ پتانسیل بالا می‌باشد. ترکیب هر آلیاژ در قسمت زیر آورده شده است.

ترکیب

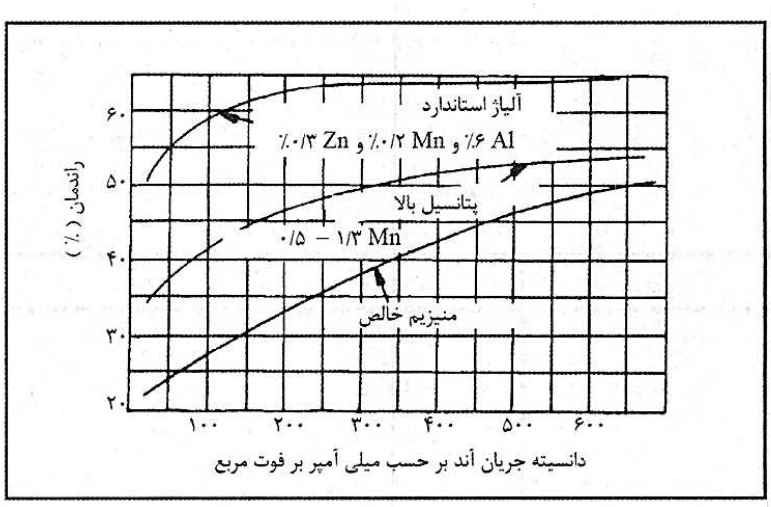
ترکیب آلیاژ استاندارد و آلیاژ منیزیم پتانسیل بالا به‌صورت زیر می‌باشد:

ترکیب آلیاژ	نوع استاندارد	نوع پتانسیل بالا
آلومینیم	٪۶/۷ – ۵/۳	حداکثر ٪۰/۰۱
منگنز	حداقل ٪۰/۱۵	٪۱/۳ – ۰/۵
روی	٪۳/۵ – ۲/۵	–
مس	حداکثر ٪۰/۰۲	حداکثر ٪۰/۰۲
سیلیسیم	حداکثر ٪۰/۱	حداکثر ٪۰/۰۵
آهن	حداکثر ٪۰/۰۰۳	حداکثر ٪۰/۰۳
نیکل	حداکثر ٪۰/۰۰۲	حداکثر ٪۰/۰۰۱
سایر فلزات	حداکثر کل ٪۰/۳	حداکثر کل ٪۰/۳
		حداکثر هرکدام ٪۰/۰۵
منیزیم	باقیمانده	باقیمانده

راندمان آند

ظرفیت جریان‌دهی تئوری آند منیزیم ۱۰۰۰ آمپر در ساعت بر پوند بوده و نرخ مصرف تئوری آن نیز ۸/۸ پوند بر آمپر در سال می‌باشد. راندمان آلیاژهای منیزیم مورد استفاده برای حفاظت کاتدی به علت خود خوردگی به ندرت از ۶۵ درصد تجاوز می‌کند. راندمان هر دو نوع آلیاژ منیزیم استاندارد و آلیاژهای منیزیم پتانسیل بالا مطابق شکل ۸-۱۰۳ به دانسیته جریان‌های موجود بر روی سطوح خودشان بستگی دارد. راندمان آلیاژ منیزیم استاندارد بیشتر از آلیاژ منیزیم پتانسیل بالا می‌باشد. پس، آلیاژ پتانسیل بالا باید تنها هنگامی که پتانسیل محرک بالاتری مورد نیاز است، به کار رود (معمولاً برای خاک‌های با مقاومت

مخصوص‌های بالای ۱۲۰۰۰ اهم – سانتی‌متر). برای مقاصد طراحی، معمولاً راندمان هر دو نوع آند ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۸-۱۰۳ نمودار راندمان برحسب دانسیته جریان برای آندهای منیزیم

پتانسیل‌ها

پتانسیل مدار با آلیاژ منیزیم استاندارد تقریباً ۱/۵۵- ولت برحسب الکترود مرجع مس/سولفات مس و پتانسیل مدار باز آلیاژ منیزیم پتانسیل بالا تقریباً ۱/۷۵- ولت برحسب الکترود مرجع مس/سولفات مس می‌باشد.

اندازه‌ها

آندهای منیزیم در اندازه‌ها و شکل‌های مختلفی موجود می‌باشند که در جداول ۸-۳۱ تا ۸-۳۶ نشان داده شده‌اند. علاوه بر اندازه‌های نشان داده شده، آند آلیاژی منیزیم به‌صورت یک آند نواری نیز موجود می‌باشد که شامل یک میله فولادی مرکزی است که اطراف آن را آلیاژ منیزیم پتانسیل بالا با ضخامت $\frac{3}{8}$ اینچ $\frac{3}{4}$ اینچ می‌پوشاند. آندهای نواری منیزیم در موقعیت‌هایی مثل درون غلاف‌ها که فضای در دسترس آنها محدود است و یا برای حفاظت کابل‌های با قطر کوچک، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۸-۳۱ اندازه‌های استاندارد آندهای آلیاژ منیزیم از نوع استاندارد برای کاربرد در خاک

وزن آند بدون پشت‌بند (پوند)	ابعاد آند بدون پشت بند (اینچ)	وزن آند با پشت‌بند (پوند)	ابعاد آند با پشت‌بند (اینچ)
۳	۵ × ۳ × ۳	۸	۸ × ۵/۲۵
۵	۸ × ۳ × ۳	۱۳	۱۱/۲۵ × ۵/۲۵
۹	۱۴ × ۳ × ۳	۲۷	۲۰ × ۵/۲۵
۱۰	۷۰ × ۱/۵ × ۱/۵	–	–
۱۲	۱۲ × ۴ × ۴	۳۲	۱۸ × ۷/۵
۱۶	۶۰ × ۳ × ۳	–	–
۱۷*	۱۷ × ۴ × ۴	۴۵	۲۴ × ۷/۵
۱۷	۲۸ × ۳ × ۳	–	–
۳۲	$۲۰\frac{۱}{۳} \times ۵ \times ۵$	۶۸	۲۸ × ۸/۵
۴۰	۶۰ × ۳ × ۳	–	–
۵۰	۳۱ × ۵ × ۵	–	–
۵۰	۱۶ × ۷ × ۷	۱۰۰	۲۴ × ۱۰
۵۰	۱۶ × ۸	۱۰۰	۲۴ × ۱۰
۶۰	۶۰ × ۴ × ۴	–	–

* این آند بیشترین کاربرد را دارد.

توجه:

هسته مرکزی آندهای مورد استفاده در خاک از تسمه مارپیچی از جنس فولاد گالوانیزه با قطر داخلی «متفاوت» اینچ و قطر خارجی «متفاوت» اینچ ساخته شده است. سیم رابط این آندها مسی و تک رشته‌ای به شماره AWG ۱۲ و با طول ۱۰ فوت است. این سیم با مواد ترموپلاستیک ضدآب عایق و با نقره به هسته مرکزی لحیم شده است. محل اتصالات در برابر رطوبت آب‌بندی می‌شود. سیم‌های با اتصالات ویژه و طول‌های دیگر غیر از ۱۰ فوت نیز موجود می‌باشد.

جدول ۸-۳۲ اندازه‌های آندهای آلیاژ منیزیم از نوع استاندارد برای کاربرد در آب

وزن (پوند)	اندازه (اینچ)	نوع هسته مرکزی
۲۰	۲۶ × ۳/۵ × ۳/۵	لوله گالوانیزه به قطر $\frac{۳}{۴}$ اینچ ساخته شده است (با انتهای خمیده شده).
۵۰	۱۶ × ۷ × ۷	لوله گالوانیزه به قطر $\frac{۳}{۴}$ اینچ ساخته شده است (با انتهای رزوه شده بطول ۱ اینچ).
۵۰	۱۶ × ۷ × ۷	میله گالوانیزه به قطر $\frac{۱}{۲}$ اینچ ساخته شده است (با انتهای سوراخ شده).
۵۰	۱۶ × ۸	لوله گالوانیزه به قطر $\frac{۳}{۴}$ اینچ ساخته شده است (با انتهای خمیده شده).
۵۰	۱۶ × ۸	میله گالوانیزه به قطر $\frac{۱}{۲}$ اینچ ساخته شده است (با انتهای سوراخ شده).
۱۰۰	۳۲ × ۷ × ۷	لوله گالوانیزه به قطر $\frac{۳}{۴}$ اینچ ساخته شده است (با انتهای خمیده شده).
۱۰۰	۳۲ × ۷ × ۷	میله گالوانیزه به قطر $\frac{۱}{۲}$ اینچ ساخته شده است (با انتهای سوراخ شده).
۱۰۰	۳۲ × ۸	لوله گالوانیزه به قطر $\frac{۳}{۴}$ اینچ ساخته شده است (با انتهای خمیده شده).
۱۰۰	۳۲ × ۸	میله گالوانیزه به قطر $\frac{۱}{۲}$ اینچ ساخته شده است (با انتهای سوراخ شده).

جدول ۸-۳۳ اندازه‌های آندهای آلیاژ منیزیم از نوع استاندارد برای کندانسورها و مبدل‌های حرارتی

وزن (پوند)	اندازه (اینچ)	نوع هسته
۱۵	۴ × ۸ × ۸	پیچ $\frac{3}{4}$ اینچی
۲۴	۲ × ۹ × ۱۸	تسمه های با ابعاد اینچ ۲ × اینچ $\frac{1}{4}$
۴۴	۴ × ۹ × ۱۸	تسمه های با ابعاد اینچ ۲ × اینچ $\frac{1}{2}$
۶۰	۷ × ۹ × ۱۸	پیچ $\frac{3}{4}$ اینچی

جدول ۸-۳۴ آندهای منیزیم آلیاژی استاندارد (از نوع کشیده و طولانی)

وزن آند بدون پشت‌بند (پوند)	ابعاد آند بدون پشت بند (اینچ)	وزن آند با پشت‌بند (پوند)	ابعاد آند با پشت‌بند (اینچ)
۱	۱/۳۲ × ۱۲	۶	۳ × ۱۵/۵
۳	۲/۳۵ × ۱۰/۵	۱۰	۴ × ۱۴
۵	۲/۶۳ × ۱۴	۱۴	۴/۵ × ۱۸
۹	۲/۴۹ × ۲۸	۳۷	۵ × ۳۳
۱۷	۲/۸۶ × ۴۰	۶۰	۵/۵ × ۴۶
۳۲	۳/۷۵ × ۴۴	۹۶	۶/۵ × ۵۰
۵۰	۴/۵۸ × ۴۶	۱۲۰	۷ × ۵۲

جدول ۸-۳۵ اندازه‌های آندهای آلیاژ منیزیم از نوع پتانسیل بالا برای خاک و آب

وزن آند بدون پشت‌بند (پوند)	ابعاد آند بدون پشت بند (اینچ)	وزن آند با پشت‌بند (پوند)	ابعاد آند با پشت‌بند (اینچ)
۳	۵ × ۳/۷۵ × ۳/۷۵	۱۲	۶ × ۱۰
۵	۷/۵ × ۳/۷۵ × ۳/۷۵	۱۷	۶ × ۱۲
۹	۲۶ × ۲/۷۵ × ۲/۷۵	۳۵	۶ × ۳۱
۹	۱۳/۲۵ × ۳/۷۵ × ۳/۷۵	۲۷	۶ × ۱۷
۱۲	۱۸ × ۳/۷۵ × ۳/۷۵	۳۶	۶ × ۲۳
۱۴	۴۱ × ۲/۷۵ × ۲/۷۵	۵۰	۶ × ۴۶
۱۴	۲۱ × ۳/۷۵ × ۳/۷۵	۴۲	۶/۵ × ۲۶
۱۷	۵۰ × ۲/۷۵ × ۲/۷۵	۶۰	۶ × ۵۵
۱۷	۲۶ × ۳/۷۵ × ۳/۷۵	۴۵	۶/۵ × ۲۹
۲۰	۵۹/۲۵ × ۲/۷۵ × ۲/۷۵	۷۰	۵ × ۶۶
۲۴	۲۳ × ۴/۵ × ۴/۵	۶۰	۷ × ۳۰
۳۲	۲۱ × ۵/۵ × ۵/۵	۷۴	۸ × ۲۸
۴۰	۵۹/۲۵ × ۳/۷۵ × ۳/۷۵	۱۰۵	۶/۵ × ۶۶
۴۸	۳۰ × ۵/۵ × ۵/۵	۱۰۰	۸ × ۳۸
۴۸	۱۶ × ۸	۱۰۰	۱۲ × ۲۵
۶۰	۶۰ × ۴/۵ × ۴/۵	-	-

توجه:

هسته مرکزی از نوار سوراخ‌دار فولاد گالوانیزه (با گیج ۲۰) ساخته شده است. هسته مرکزی آندهای با طول بلندتر از ۲۴ اینچ از نوار سوراخ‌دار فولاد گالوانیزه (با گیج ۲۰) ساخته می‌شوند. سیم رابط این آندها مسی و به شماره AWG ۱۲ و با طول ۱۰ فوت است این سیم با مواد ترموپلاستیک ضدآب عایق شده و با نقره به هسته مرکزی لحیم شده است. محل اتصالات در برابر رطوبت آب‌بندی می‌شود. سیم‌های با اتصالات ویژه و طول‌های دیگر نیز موجود می‌باشد.

جدول ۸-۳۶ اندازه‌های استاندارد میله اکسترود شده آندهای آلیاژ منیزیم از نوع استاندارد برای مخازن آب و گرم کن‌های آبی

وزن هر فوت (پوند)	اندازه	نوع هسته مرکزی
۰/۳۶	فوت ۲۰ تا فوت ۱ × قطر اینچ ۰/۷۵	میله فولادی به قطر $\frac{۱}{۸}$ اینچ
۰/۴۵	فوت ۲۰ تا فوت ۱ × قطر اینچ ۰/۸۴	میله فولادی به قطر $\frac{۱}{۸}$ اینچ
۰/۶۸	فوت ۲۰ تا فوت ۱ × قطر اینچ ۱/۰۵	میله فولادی به قطر $\frac{۱}{۸}$ اینچ
۱/۰۶	فوت ۲۰ تا فوت ۱ × قطر اینچ ۱/۳۱۵	میله فولادی به قطر $\frac{۱}{۸}$ اینچ
۱/۵۰	فوت ۲۰ تا فوت ۱ × قطر اینچ ۱/۵۶۱	میله فولادی به قطر $\frac{۱}{۸}$ اینچ
۲/۵۰	فوت ۲۰ تا فوت ۱ × قطر اینچ ۲/۰۲۴	میله فولادی به قطر $\frac{۱}{۸}$ اینچ

بازده جریان

بازده جریان آندهای منیزیم توسط اندازه‌گیری میدانی تعیین می‌گردد که در قسمت «اندازه‌گیری میدانی خروجی جریان آند» شرح داده شده است.

پشت‌بند

برای حفاظت کاتدی سازه‌های مدفون در خاک استفاده از پشت‌بند بسیار مطلوب بوده و در تمامی موارد مورد نیاز است. ترکیب شیمیایی پشت‌بند برای استفاده با آندهای منیزیم در زیر آورده شده است:

ترکیب شیمیایی پشت‌بند برای آندهای منیزیم:

گچ آبدار	۷۵ درصد
بنتونیت	۲۰ درصد
سولفات سدیم	۵ درصد

آندها در کیسه‌های کتانی رطوبت‌پذیر با پشت‌بند پر شده به‌صورت بسته‌بندی شده، موجود می‌باشند. آندهای بسته‌بندی شده معمولاً با یک پوشش خارجی رطوبت ناپذیر مثل پلاستیک تهیه می گردند. این آندها باید قبل از نصب از پوشش ضدرطوبت خارجی‌شان بیرون آورده شوند.

روی

آندهای روی معمولاً در وزن‌های ۵ تا ۲۵۰ پوندی به‌صورت وزن، شمش و میله موجود می‌باشند که در جداول ۸-۳۷ تا ۸-۴۰ شرح داده شده است. همچنین روی به‌صورت آندهای نواری در اندازه‌های اینچی $\frac{7}{8} * \frac{5}{8}$ و $\frac{9}{16} * \frac{1}{2}$ و $\frac{15}{32} * \frac{11}{32}$ موجود می‌باشند. این آندها برای حفاظت سازه‌ها یا غوطه‌ور در آب شیرین یا شور به کار می‌روند. البته آنها برای حفاظت سازه‌های مدفون هم استفاده می‌شوند. به طور معمول دو ترکیب آند روی موجود می‌باشد. آندهای با فرمول آلیاژ استاندارد برای استفاده در آب شیرین و خاک می‌باشند و آندهای با فرمول آلیاژی خاص در آب دریا استفاده می گردند. ترکیب این آلیاژها در قسمت قبلی آورده شده است.

جدول ۸-۳۸ اندازه‌های استاندارد آندهای روی برای استفاده در خاک یا آب شیرین

وزن (پوند)	اندازه اسمی (اینچ)
۵	۱/۴ × ۱/۴ × ۹
۱۸	۱/۴ × ۱/۴ × ۳۶
۲۷	۱/۴ × ۱/۴ × ۴۸
۳۰	۱/۴ × ۱/۴ × ۶۰
۳۰	۲ × ۲ × ۳۰
۵۰	۲ × ۲ × ۴۸
۶۰	۲ × ۲ × ۶۰

توجه:

از میله مرکزی فولادی الکتروگالوانیزه شده به قطر $\frac{1}{4}$ اینچ برای آندهای استاندارد روی استفاده شده است.

جدول ۸-۳۸ اندازه‌های ویژه آندهای روی برای استفاده در خاک یا آب شیرین

وزن (پوند بر اینچ)	ابعاد (اینچ)	طول (اینچ)
۲/۳	۳ × ۳	۶۰ تا ۶
۴/۲	۴ × ۴	۶۰ تا ۶
۶/۵	۵ × ۵	۴۸ تا ۶
۱۲/۸	۷ × ۷	۳۶ تا ۶
۲۱/۰	۹ × ۹	۲۴ تا ۱۲
۲۶/۰	۱۰ × ۱۰	۲۴ تا ۹

توجه:

هسته مذکری آند ها به شکل استوانه ای به قطر یک چهارم اینچ از جنس فولاد الکتروگالوانیزه شده هستند. همچنین استوانه های قطر های سه هشتم و یک دوم و پنج هشتم نیز موجود میباشد

جدول ۸-۳۹ اندازه‌های استاندارد آندهای روی برای کاربرد در آب دریا

وزن (پوند)	ابعاد (اینچ)
۵	۹ × ۳ × ۱/۲۵
۱۲	۱۲ × ۳ × ۱/۲۵
۲۴	۱۲ × ۶ × ۱/۲۵
۵۰	۴۸ × ۲ × ۲
۱۵۰	۳۶ × ۴ × ۴
۲۵۰	۱۲ × ۹ × ۹
۲۵۰	۶۰ × ۴ × ۴

توجه:

آندهای با وزن ۲۴ پوند و کمتر از آن دارای هسته مرکزی به شکل تسمه از جنس فولاد گالوانیزه هستند. آندهای با وزن ۵۰ پوند دارای هسته مرکزی به شکل استوانه به قطر $\frac{3}{8}$ اینچ از جنس فولاد گالوانیزه هستند. آندها سنگین‌تر دارای هسته مرکزی به شکل استوانه به قطر $\frac{3}{4}$ اینچ یا ۱ اینچ از جنس فولاد گالوانیزه هستند.

جدول ۸-۴۰ اندازه‌های ویژه آندهای روی برای استفاده در آب دریا

وزن (پوند بر اینچ)	ابعاد (اینچ)	طول (اینچ)
۰/۵	۱/۴ × ۱/۴	۶۰ تا ۶
۱	۲ × ۲	۶۰ تا ۶
۲/۳	۳ × ۳	۶۰ تا ۶
۴/۲	۴ × ۴	۶۰ تا ۶
۶/۵	۵ × ۵	۴۸ تا ۶
۱۲/۸	۷ × ۷	۳۶ تا ۶
۲۱/۰	۹ × ۹	۲۴ تا ۹
۲۳/۴	۱۰ × ۹	۲۴ تا ۹
۲۶/۰	۱۰ × ۱۰	۲۴ تا ۹

توجه: برای آندهای فوق هسته‌های مرکزی متنوع با اندازه‌های مختلف موجود می‌باشند.

ترکیب شیمیایی

ترکیب شیمیایی آلیاژ آند فداشونده روی از نوع استاندارد و از نوع مورد استفاده در آب دریا در ذیل ارائه شده است.

عناصر آلیاژی	آلیاژ استاندارد (۱)	آلیاژ آب دریا (۲)
آلومینیم	حداکثر ٪ ۰/۰۰۵	٪ ۰/۵ – ۰/۱
کادمیم	حداکثر ٪ ۰/۰۰۳	٪۰/۰۷ – ۰/۰۲۵
آهن	حداکثر ٪ ۰/۰۰۱۴	حداکثر ٪ ۰/۰۰۵
سرب	حداکثر ٪ ۰/۰۰۳	حداکثر ٪ ۰/۰۰۶
مس	٪ ۰/۰۰۲	حداکثر ٪ ۰/۰۰۵
سایر فلزات	–	حداکثر ٪ ۰/۱۲۵
روی	باقیمانده	باقیمانده

(۱) مشخصات مطابق با استاندارد ASTM - B 418 type II

(۲) مشخصات مطابق با استاندارد ASTM - B 418 type I یا MIL - A - 18001

راندمان آند

میزان مصرف آند روی بر اساس محاسبات تئوری برابر با ۲۳/۵ پوند بر آمپر سال است. ظرفیت جریان‌دهی تئوری این آند نیز برابر با ۳۷۲ آمپر در ساعت بر پوند می‌باشد. راندمان آند روی بیشتر از آند منیزیم است. راندمان آند روی با صرف نظر از میزان جریان خروجی آن ما بین ۹۵ – ۹۰ درصد است. برای مراحل طراحی میزان راندمان آند روی معادل ۹۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.

پتانسیل‌ها

پتانسیل مدار باز هر دو نوع آند روی در اکثر خاک‌ها یا آب‌های طبیعی برابر با ۱/۱- ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس است. پتانسیل نسبی بین روی و آهن به درجه حرارت بستگی دارد. در درجه حرارت‌های بالاتر از درجه حرارت محیط، اختلاف پتانسیل بین آهن و روی کاهش می‌یابد. در بعضی از آب‌های شیرین در درجه حرارت‌های بالاتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد پلاریته بین آهن و روی عکس می‌شود. یعنی آنکه روی نسبت به آهن از لحاظ پتانسیل کاتدی‌تر می‌شود. بنابراین روی دیگر قادر نیست تا آهن را به‌صورت فداشوندگی حفاظت کند. بنابراین در محیط‌های آبی با درجه حرارت بالاتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد نباید از روی برای حفاظت آهن استفاده نمود.

خروجی جریان آند

خروجی جریان آندهای روی ممکن است توسط محاسبات ارائه شده در قسمت «تعیین خروجی جریان آند با استفاده از مقاومت آند به الکترولیت» و یا از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی تعیین گردد که در قسمت «اندازه‌گیری میدانی خروجی جریان آند» توضیح داده شده است. هنگامی که آندهای روی بدون پشت‌بند مورد استفاده قرار گیرند، سطح آندها از محصولات خوردگی نارسانای الکتریکی پوشیده می‌شود که این امر باعث کاهش خروجی جریان آندها می‌شود. آندهای آلیاژهای روی که در آب دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌صورتی طراحی شده‌اند که تمایل به تشکیل محصولات خوردگی نارسانا بر سطح آندها

کاهش یابد. هنگامی که آندهای روی در خاک‌های حاوی مقادیر زیادی اکسیژن، کربنات‌ها یا فسفات‌ها استفاده شوند باید برای جلوگیری از تشکیل محصولات خوردگی بر سطح آنها از پشت‌بند استفاده شود.

پشت‌بند

دو نمونه از پشت‌بندهای مورد استفاده با آندهای روی در خاک در ذیل ارائه شده است.

مواد پشت‌بند	نوع	نوع
گچ آبدار	۷۵ درصد	۵۰ درصد
بنتونیت	۲۰ درصد	۵۰ درصد
سولفات سدیم	۵ درصد	

آندهای آلومینیم

آندهای فداشونده آلومینیمی پس از به کارگیری آندهای فداشونده منیزیم و روی تهیه شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کاربرد اصلی این آندها در حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی در آب دریا است. اگرچه این آندها در آب شیرین و یا خاک نیز می‌توانند قابل استفاده باشند. هنگامی که از آندهایی از جنس آلیاژ آلومینیم برای حفاظت استفاده شود و عملکرد آنها نیز رضایت بخش باشد باید آندها پس از مصرف شدن، مجدداً با آندهای مشابه خود تعویض شوند. در ترکیب شیمیایی آلیاژهای فداشوند و آلومینیمی که قبلاً تولید می‌شد، جیوه وجود داشت اگر چه میزان جیوه موجود در آلیاژ کم بود با این حال با مصرف بدنه اصلی آند این مقدار جیوه در مواد به جا مانده از آند تغلیظ می‌شد. بنابراین در صورت استفاده از این نوع آندها باید در هنگام خارج کردن باقیمانده آند قبلی و تعویض آن دقت و احتیاط لازم اعمال گردد. تا از مسمومیت افراد به جیوه جلوگیری شود.

ترکیب شیمیایی

ترکیب شیمیایی بیشتر آندهای آلیاژ آلومینیم به‌صورت اختصاصی می‌باشد. ترکیب شیمیایی اختصاصی سه نوع آلیاژ به‌صورت نمونه در زیر آورده شده است:

عناصر آلیاژی	نوع اول	نوع دوم	نوع سوم
روی	٪۰/۵ – ٪۰/۳۵	٪۵/۰ – ٪۳/۵	٪۳/۰
سیلیسیم	حداکثر ٪۰/۱۰		٪۰/۱
جیوه	٪۰/۰۴۸ – ٪ ۰/۰۳۵	٪۰/۰۴۸ – ٪۰/۰۱۵	
ایندیم			٪۰/۰۱۵
آلومینیم	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده

آند نوع اول در موارد غوطه‌وری در آب دریاهای خیلی شور به کار می‌رود. آلیاژ نوع دوم در مواردی که آند در زیر رسوبات کف دریا فرو برده می‌شود، به کار می‌رود. آلیاژ نوع سوم برای استفاده در زیر رسوبات کف دریا، آب دریاهای شور و یا خیلی شور، ساخته شده است.

راندمان آند

ظرفیت جریان‌دهی آندهای آلومینیم نوع اول تقریباً ۱۲۵۰ آمپر در ساعت بر پوند و نرخ مصرف آن نیز ۶/۸ پوند بر آمپر در سال می‌باشد. آندهای آلومینیم نوع دوم مورد استفاده در زیر رسوبات کف دریا، راندمان کمتری داشته و ظرفیت جریان‌دهی آنها تقریباً ۷۷۰ آمپر در ساعت بر پوند و نرخ مصرف آنها نیز ۱۱/۴ پوند بر آمپر در سال می‌باشد. آندهای آلومینیم نوع سوم، ظرفیت جریان‌دهی تقریباً ۱۱۵۰ آمپر در ساعت بر پوند و نرخ مصرف ۷/۶ پوند بر آمپر در سال دارند.

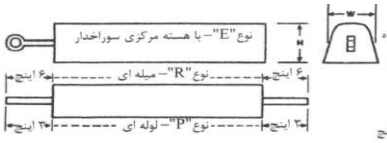
پتانسیل‌ها

پتانسیل آندهای آلومینیم نوع اول و دوم، ۱/۱۰- ولت برحسب الکترود مرجع مس/سولفات مس می‌باشد. آندهای نوع سوم، پتانسیل محرک کمی بالاتر، به مقدار ۱/۱۵- ولت برحسب الکترود مرجع مس/سولفات مس دارند.

اندازه‌ها

آندهای آلیاژ آلومینیم اصولاً برای حفاظت سازه‌های دریایی تهیه شده‌اند. آنها در اندازه‌ها و شکل‌های مختلفی موجود می‌باشند که در جداول ۸-۴۱ تا ۸-۴۵ نشان داده شده است. آندهای دستبندی (bracelet) که در جدول ۸-۴۳ شرح داده شده است، در شکل ۸-۱۰۴ مشاهده می‌شود. این آندها برای حفاظت خطوط لوله غوطه‌ور در آب، همچنین پایه‌های سکوهای دریایی به کار می‌روند.

جدول ۸-۴۱ اندازه‌های استاندارد آندهای آلومینیمی مورد استفاده در پایه‌های اسکله‌ها و سکوهای دریایی مگر اینکه طور دیگر مشخص شده باشد، اندازه هسته فولادی که به دنبال می‌آید در سه نوع تأمین می‌شود.



مگر اینکه طور دیگر مشخص شده باشد، اندازه هسته فولادی که به دنبال می آید در سه نوع تامین می شود:

نوع "E"- هسته سر سوراخ $\frac{1}{2}$ اینچ

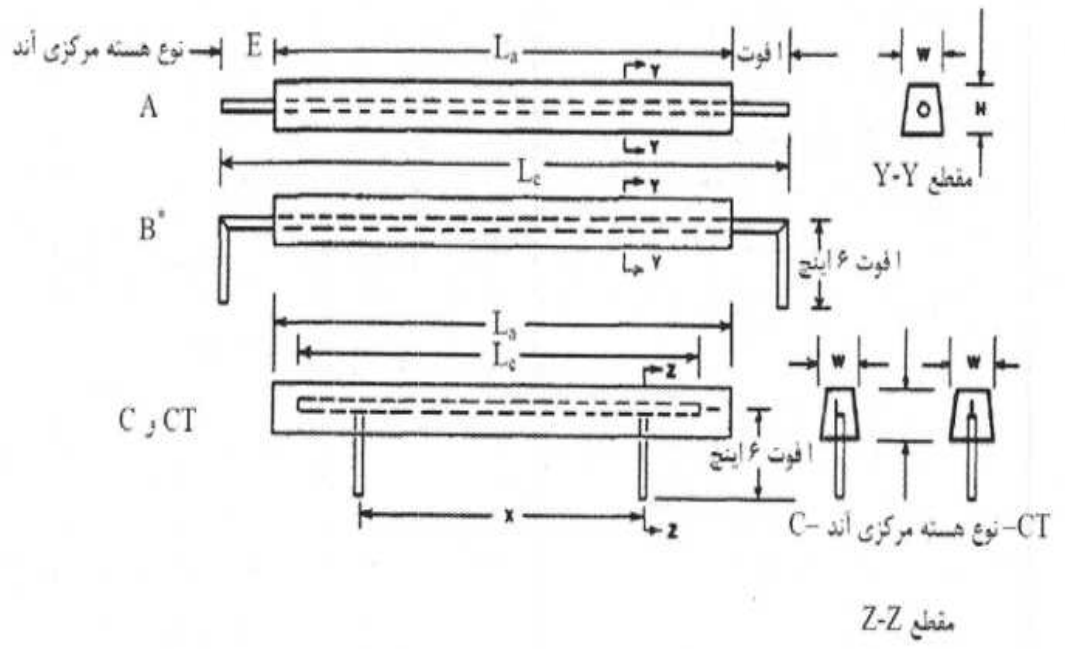
نوع "P"- لوله $\frac{1}{4}$ اینچ STD

نوع "R"- میله به قطر $\frac{1}{2}$ اینچ

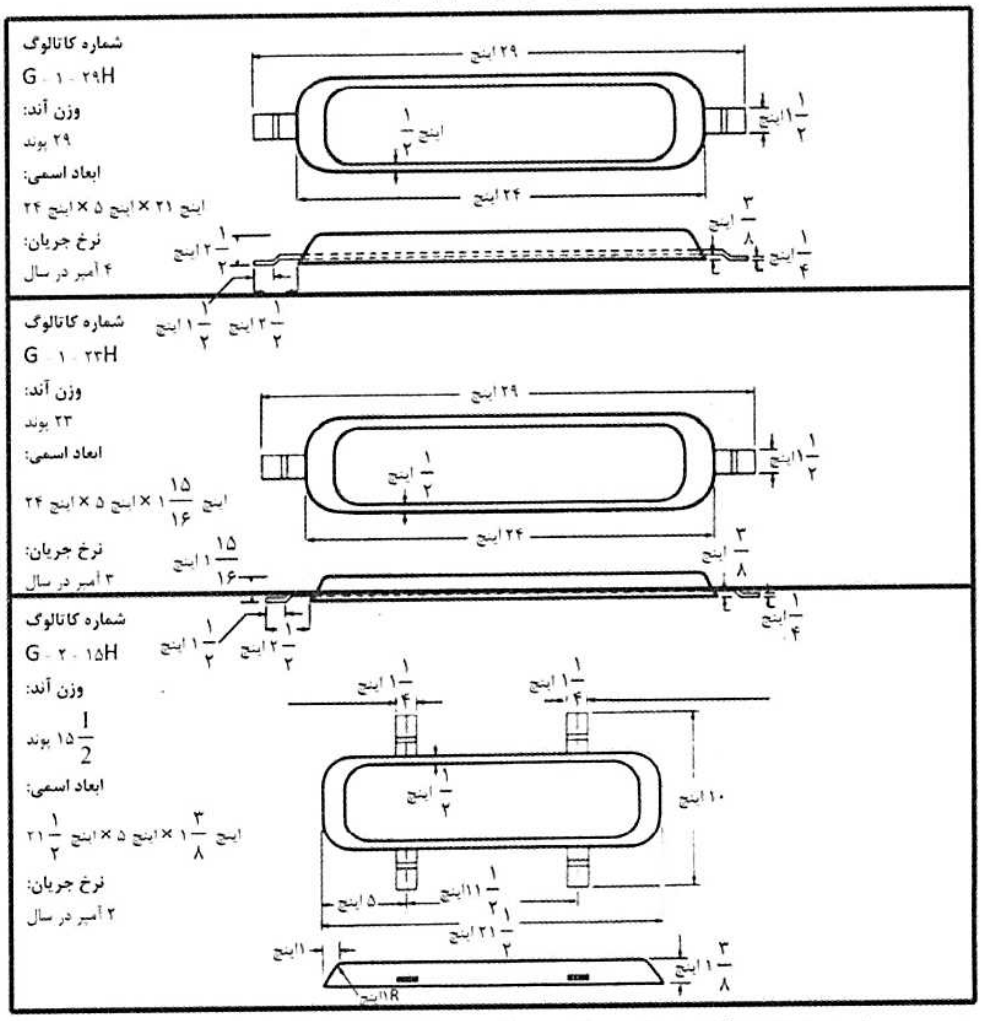
شماره آند	وزن اسمی (پوند)	طول (اینچ)	عرض (اینچ)	ارتفاع (اینچ)	نوع هسته مرکزی
A-۲۴۰	۲۴۰	۲۴	۱۰	۱۰	E ،P یا R
A-۱۷۵	۱۷۵	۳۶	۷	۷	E ،P یا R
A-۱۲۰	۱۲۰	۱۲	۱۰	۱۰	E ،P یا R
A-۱۲۰-۱	۱۲۰	۲۴	۷	۷	E ،P یا R
A-۱۲۰-۲	۱۲۰	۴۸	۵	۵	E ،P یا R
A-۱۰۰	۱۰۰	۶۰	۴	۴	E ،P یا R
A-۹۰	۹۰	۱۸	۷	۷	E ،P یا R
A-۹۰-۱	۹۰	۳۶	۵	۵	E ،P یا R
A-۶۰	۶۰	۱۲	۷	۷	E ،P یا R
A-۶۰-۱	۶۰	۲۴	۵	۵	E ،P یا R
A-۶۰-۲	۶۰	۳۸	۴	۴	E ،P یا R
A-۳۰	۳۰	۳۴	۳	۳	E ،P یا R

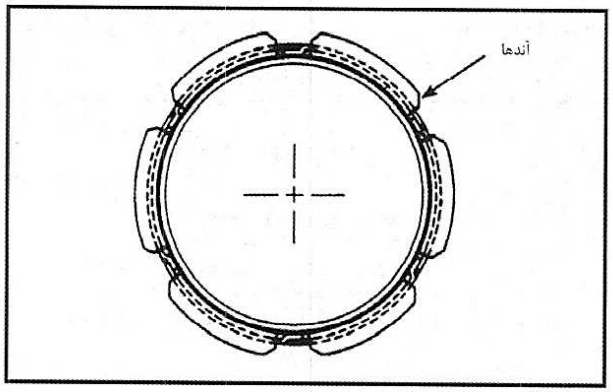
توجه: همه ابعاد و وزن‌ها به‌صورت اسمی نشان داده شده است.

جدول ۸-۴۲ اندازه‌های استاندارد آندهای آلیاژ آلومینیم نوع اول برای کاربرد فرا ساحلی



شماره آند	وزن آلومینیم خالص	W×H	L_a	L_c	X	هسته مرکزی فولادی آند		
						نوع	شکل هسته مرکزی با ابعاد	
A ۳۷۵	۳۲۵	اینچ $6\frac{1}{2}$ × اینچ $6\frac{1}{2}$	۸ فوت	۱۰ فوت	-	A	لوله ۸۰ دو اینچی	
A ۸۷۵	۷۲۵	اینچ $9\frac{1}{2}$ × اینچ $9\frac{1}{2}$	۸ فوت	۱۰ فوت	-	A	لوله ۸۰ چهار اینچی	
B ۳۸۵	۳۲۵	اینچ $6\frac{1}{2}$ × اینچ $6\frac{1}{2}$	۸ فوت	۱۰ فوت	-	B	لوله ۸۰ دو اینچی	
B ۹۱۰	۷۲۵	اینچ $9\frac{1}{2}$ × اینچ $9\frac{1}{2}$	۸ فوت	۱۰ فوت	-	B	لوله ۸۰ چهار اینچی	
							ابعاد قسمت داخلی	لوله های قرار گرفته در پایه ها
C ۳۶۰	۳۲۵	اینچ ۶ × اینچ $6\frac{1}{2}$	۸ فوت	۷ فوت	۵ فوت	C	اینچ $\frac{1}{4}$ × اینچ ۳ × اینچ ۲	لوله نوع ۸۰ دو اینچی
C ۴۰۵	۳۷۰	اینچ $6\frac{1}{2}$ × اینچ $6\frac{1}{2}$	۸ فوت	۷ فوت	۵ فوت	C	اینچ $\frac{1}{4}$ × اینچ ۳ × اینچ ۲	لوله نوع ۸۰ دو اینچی
CT ۸۴۰	۷۲۵	اینچ $8\frac{1}{2}$ × اینچ $9\frac{1}{2}$	۸ فوت	۷ فوت	۵ فوت	CT	عرض اینچ $5\frac{1}{4}$ × قطر اینچ ۴ (ST4WF)	لوله نوع ۸۰ چهار اینچی





شکل ۸-۱۰۴ آندهای آلیاژ آلومینیم از نوع دستبندی

جدول ۸-۴۵ اندازه‌های استاندارد آند آلیاژ آلومینیم از نوع دستبندی

تعداد قطعات	قطر اسمی لوله (اینچ)
۴	۲۰ – ۳۶
۶ یا ۴	۲۰ – ۳۶
۶	۳۰ – ۵۴
۸ یا ۶	۴۰ – ۵۴
۸	۴۰ – ۷۲

حداقل طول کمان هر قطعه آندی تقریباً در محدوده ۱۴ اینچ تا ۲۷ اینچ است.
در هر قطعه آندی حداقل یک هسته مرکزی فولادی که به شکل کمانی مطابق با محیط لوله تهیه شده جاسازی شده است.

خروجی جریان

خروجی جریان بعضی از اندازه‌های آندهای آلومینیم، توسط سازندگان آند، تعیین می‌گردد در محاسبات آنها، پتانسیل سازه ۸۵۰- میلی‌ولت برحسب الکترود مرجع مس/سولفات مس و مقاومت مخصوص محیط نیز ۲۰ اهم – سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. باید توجه کرد که مقادیر ارائه شده برای خروجی جریان آندها عمدتاً تخمینی است و باید از طریق انجام محاسبات و آزمایشات مورد ارزیابی قرار گیرد.

سایر اجزای سیستم

کابل‌ها

انتخاب صحیح اندازه کابل، نوع عایق و مسیر عبوری کابل، لازمه صحت و اطمینان عملکرد سیستم می‌باشد. تنها کابل‌های مسی باید در نصب حفاظت کاتدی، مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از سیم‌های آلومینیمی در حفاظت کاتدی به دلیل ایجاد اتصال‌های با مقاومت بالا و ایجاد اشکال اتصالات جوشکاری شده، مجاز نمی‌باشد.

تعیین نوع و اندازه سیم‌های کابل‌ها

ازآنجاکه جریان‌ها معمولاً در سیستم‌های حفاظت کاتدی با آند فداشونده، خیلی پایین است. بنابراین انتخاب شماره سیم‌های هادی کابل‌ها بیشتر تابع استحکام مکانیکی آنهاست تا مقاومت الکتریکی. در سیستم‌هایی که آندهای فداشونده در طول سازه حفاظت شده، توزیع شده باشند و به یک کابل اصلی جریان متصل شده باشند. شماره سیم کابل اصلی جریان باید شماره AWG ۱۰ باشد. حداقل شماره سیم برای آندهای تکی شماره AWG ۱۲ می‌باشد.
ازآنجاکه سیم‌های کابل‌ها در سیستم‌های حفاظت کاتدی با آند فداشونده به‌صورت کاتدی حفاظت می‌گردند، بنابراین عایق کردن آنها در مقایسه با عایق کردن سیم‌ها در سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان آن چنان حیاتی نمی‌باشد. برای این سیم‌ها از عایق نوع TW، نوع RHW - USE یا عایق پلی‌اتیلنی استفاده می‌گردد.

از کابل‌های آندها هرگز نباید برای معلق کردن، حمل یا نصب آندها استفاده گردد. معمولاً شماره کابل‌های آندها، شماره AWG ۱۲ و نوع عایق آنها نیز نوع TW می‌باشند. به‌جز در موارد ضرورت، در بقیه موارد سیم‌های کابل آندهای تکی باید مس خالص با شماره AWG ۱۲ باشد.

هنگامی که جریان در هر قسمت مدار آند فداشونده بزرگ‌تر از ۱ آمپر باشد، اقتصادی‌ترین اندازه و نوع سیم باید، تعیین کرد. به جای استفاده از هزینه توان مصرفی که در تعیین اقتصادی اندازه و نوع سیم برای سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان استفاده می‌شود در اینجا باید هزینه آندهای اضافی که برای غلبه بر افت‌های مقاومتی استفاده می‌شود ملاک قرار گیرد. البته لازم است که این هزینه‌ها برابر با هزینه‌های ثابت سالیانه برای اندازه کابل مورد آنالیز باشد.

پیوندها و اتصالات

پیوندها و اتصالات سیم‌ها باید در حداقل تعداد ممکن نگه داشته شود و نوع اتصالات به کار رفته باید دارای مقاومت پایین، قابلیت اطمینان بالا و مقاومت به خوردگی خوبی باشند. اتصالات باید به طریق اگزوترمیک یا مکانیکی ایجاد گردد. عایق‌کاری اتصالات زیرزمینی یا با استفاده از اپوکسی و یا عایق‌کاری با قیر قطران زغال‌سنگ انجام می‌شود. پس از انجام عایق‌کاری باید از پوشش بیرونی از جنس نمد نیز استفاده شود. برای اتصالات بالای زمین مثلاً در ایستگاه‌های آزمایش، معمولاً از نوع اتصالات مکانیکی استفاده می‌شود و باید برای جلوگیری از خوردگی حاصل از ورود رطوبت، به‌دقت نوارپیچی شوند.

اتصالات زیر برای سیستم‌های آند فداشونده مورد نیاز می‌باشند:

۱) اتصال بین آند (یا آندها) و سازه

۲) اتصال بین کابل و آند (معمولاً توسط سازه و در کارخانه انجام شده است)

۳) باندهای ضروری و سیم‌های آزمایش

نیاز به وجود پیوندها و اتصالات اضافی باید به‌دقت مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین در مورد سیستم‌های اعمال جریان موقعیت تمامی اتصالات مورد نیاز باید دقیقاً بر روی نقشه‌های طراحی، نشان داده شود. نیاز به انجام اتصالات اضافی باید توسط طراح سیستم، تعیین گردد و نباید آن را برعهده نصاب سیستم حفاظت کاتدی گذارد.

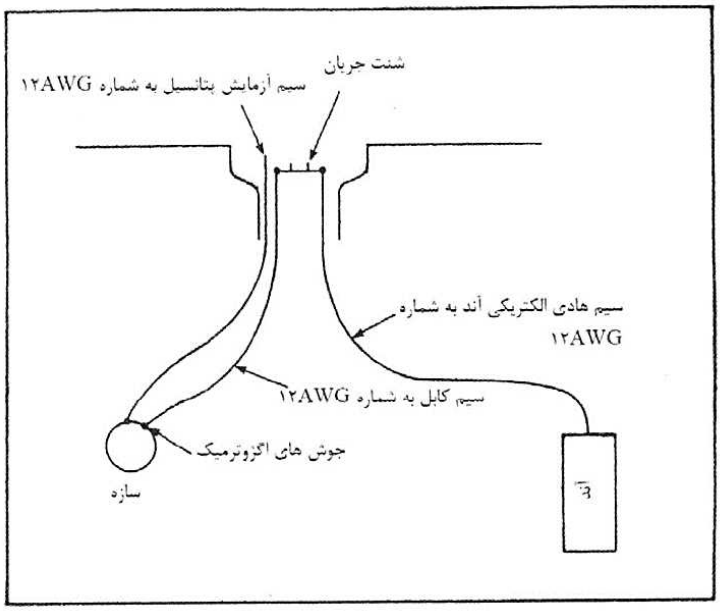
باندها و اتصالات عایق

باندها و اتصالات عایق در بعضی سیستم‌های حفاظت کاتدی با آند فداشونده، مورد نیاز می‌باشد. راهنمایی‌هایی در این زمینه در قسمت‌های گذشته آورده شده است که باید برای تمامی باندها و اتصالات عایق، مورد استفاده قرار گیرد.

موقعیت و عملکرد ایستگاه آزمایش

متداول‌ترین نوع ایستگاه آزمایش مورد استفاده در سیستم‌های حفاظت کاتدی آند فداشونده، ایستگاه آزمایش جریان – پتانسیل است که در شکل ۸-۱۰۵ نشان داده شده است. در این ایستگاه آزمایش سیستم آند توسط یک مقاومت ۰/۰۱ اهمی (شنت) به سیم سازه متصل می‌شود و بدین ترتیب می‌توان خروجی جریان آند را از طریق اندازه‌گیری افت ولتاژ و شنت اندازه‌گیری

نمود. برای اندازه‌گیری پتانسیل سازه از سیم رابط ثانویه سازه استفاده می‌شود قابل ذکر است که از این سیم رابط ثانویه جریانی عبور نمی‌کند بنابراین هرگونه افت پتانسیل در طول آن حذف می‌گردد.



شکل ۸-۱۰۵ ایستگاه آزمایش جریان - پتانسیل

همچنین در صورت تخریب یا آسیب در سیم رابط اولیه سازه، از سیم رابط ثانوی سازه به‌عنوان یدکی استفاده می‌شود. ایستگاه‌های آزمایش برای سیستم‌های حفاظت کاتدی با آند فداشونده یا از نوع نصب شده هم سطح با زمین و یا از نوع قرار گرفته در بالای زمین می‌باشد. اگر این ایستگاه‌های آزمایش هم سطح با زمین استفاده می‌گردد، از خاک قرار گرفته در کف ایستگاه آزمایش می‌توان برای اندازه‌گیری پتانسیل «سازه به الکترولیت» استفاده نمود زیرا این نوع ایستگاه‌های آزمایش درست در بالای سازه قرار گرفته‌اند بنابراین اندازه‌گیری پتانسیل در چنین وضعیتی یک مزیت است چون افت ولتاژ (IR - drop) در اثر عبور جریان از میان خاک حداقل می‌گردد.

ایستگاه‌های آزمایش دیگری که در سیستم‌های حفاظت کاتدی آند فداشونده استفاده می‌شود عبارت از ایستگاه آزمایش پتانسیل، ایستگاه آزمایش تماس خاک، ایستگاه آزمایش جریان عبوری از خط لوله (افت ولتاژ)، ایستگاه آزمایش اتصال عایق، ایستگاه آزمایش غلاف و ایستگاه آزمایش باند می‌باشند.

پشت‌بند

استفاده از پشت‌بند در کاربردهای خاکی برای انواع آندهای مورد استفاده در سیستم‌های حفاظت کاتدی با آند فداشونده در بخش مربوط به مواد آند شرح داده شد. هنگامی که آندهای بسته‌بندی شده مورد استفاده قرار می‌گیرند باید قبل از نصب، پوشش خارجی نفوذناپذیری که برای حفاظت آندها در خلال انبارداری و حمل و نقل مورد استفاده قرار گرفته است، از روی آنها برداشته شود.

فصل نهم

طراحی عملی سیستم حفاظت کاتدی با ذکر مثال

طراحی سیستم حفاظت کاتدی در بتن

در میان اقدامات حفاظتی مورد استفاده برای بتن‌های مسلح، حفاظت کاتدی مؤثرترین روش می‌باشد. اما، مشکلاتی در ارتباط با کاربرد حفاظت کاتدی وجود دارند. مهم‌ترین مسئله به قرار دادن آندها در بتن مربوط است. همچنین، تداوم یک جریان حفاظت کاتدی یکنواخت بسیار دشوار است، چون بتن الکترولیتی با رسانایی بسیار کم است، به‌ویژه وقتی که بتن خشک است. به‌علاوه، میله‌های فولادی بتن مسلح، معمولاً به طور دستی و نه با جوشکاری متصل می‌شوند و این‌گونه اتصالات ضعیف، جریان یافتن حفاظت کاتدی با پتانسیل کم را دشوار می‌سازند و در نتیجه، برخی مناطق ممکن است بیش از اندازه حفاظت شوند، درحالی‌که، برخی مناطق ممکن است جریان کافی مورد نیاز برای حفاظت کاتدی را دریافت نکنند.

علی‌رغم همه این دشواری‌ها، حفاظت کاتدی هنوز مؤثرترین روش برای جلوگیری از خوردگی در سازه‌هایی مانند پل‌ها، پل‌های راه‌آهن، اسکله‌ها، پارکینگ‌های غیرمسقف، استخرها، لوله‌های فولادی پیش‌تنیده و غیره است. صرف‌نظر از میزان کلرید موجود در بتن، می‌توان از طریق حفاظت کاتدی از خوردگی فولادهای بتن مسلح که در زیرزمین، درون آب یا در معرض اتمسفر هستند، جلوگیری کرد. تفاوت‌های موجود بین حفاظت کاتدی که برای خطوط لوله به کار برده می‌شود و حفاظت کاتدی برای فولادهای بتن مسلح به شرح زیر است:

۱. اگر محل اتصال میله‌های فولادی در زمان قرار گرفتن در قالب بتن، جوش داده نشوند، ممکن است مقاومت‌هایی به وجود آیند که باعث ایجاد مشکلاتی در انتقال جریان‌های کم ولتاژ مورد نیاز برای حفاظت کاتدی شوند. بنابراین، اتصالات الکتریکی باید پیشاپیش به‌صورت آزمایشی مورد بررسی قرار بگیرند تا مشخص شود که آیا برای حفاظت کاتدی مناسب هستند یا خیر. این کار را می‌توان با اندازه‌گیری مستقیم مقاومت یا با اندازه‌گیری پتانسیل سطح بتن انجام داد. اگر اختلاف بین مقادیر پتانسیل دو فولاد بتنی متفاوت اندازه‌گیری شده در یک مکان بیشتر از ۵ mV نباشد؛ این‌گونه فرض می‌شود که اتصالات الکتریکی کافی می‌باشند.

۲. مقاومت بتن خشک بسیار زیاد است. به‌ویژه، بخش‌هایی از بتن که در معرض اتمسفر هستند می‌توانند خشک شوند، درحالی‌که، بخش‌های دیگر می‌توانند به اندازه کافی مرطوب باشند. این تفاوت‌ها، تعیین جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی را دشوار می‌سازد. تعیین نادرست جریان کاتدی نیز می‌تواند منجر به حفاظت بیش از حد شود.

۳. مقدار حفاظت بیش از حد فولادهای بتن مسلح معمولی در مقایسه با الکترود مرجع مس/سولفات مس، ۱۵۰ mV- است، درحالی‌که، در مورد فولادهای بتن پیش تنیده ۹۵۰ mV- است و این موضوع دلیل حفاظت فقط یک محدوده باریک با یک آند می‌باشد. در نتیجه باید آندهای بسیاری را به کار گرفت که ممکن است منجر به حفاظت بیش از حد شود که باعث ایجاد تصاعد هیدروژن در کاتد می‌گردد که به نوبه خود می‌تواند باعث ایجاد تردی هیدروژنی شود.

۴. وقتی که جریان از میان پیل حفاظت کاتدی عبور می‌کند، مقدار یون‌های هیدروکسید در مناطق کاتدی افزایش می‌یابد، که باعث افزایش pH و در نتیجه به غیرفعال (روبین) شدن فولاد کمک می‌کند، اما افزایش یون‌های هیدروکسید همچنین می‌تواند منجر به واکنش‌هایی بین مصالح و قلیاها شود که به از دست رفتن چسبندگی بین بتن و فولاد منتهی می‌گردد.
۵. آندهایی که برای حفاظت کاتدی بتن‌های استفاده می‌شوند که در معرض جو قرار دارند باید درون سازه بتنی قرار بگیرند که در عمل باعث ایجاد مشکلاتی می‌شود، درحالی‌که، آندهای مورد استفاده برای حفاظت کاتدی سازه بتنی زیرزمینی یا وقتی که سازه در آب قرار دارد را می‌توان در بیرون سازه بتنی قرار داد.

جریان الکتریکی مورد نیاز برای حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی

هم سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده و هم اعمال جریان را می‌توان برای سازه‌های بتنی به کار گرفت، اما ازآنجاکه، بتن مقاومت بسیار زیادی دارد (بین ۳۰۰۰ ohm.cm و ۲۰۰۰۰ ohm.cm)؛ سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان باید به طور خاص برای بتن‌هایی استفاده شوند که در معرض شرایط جوی قرار دارند. جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی به سرعت احیاء اکسیژن در کاتد بستگی دارد و مقدار جریان مورد نیاز را می‌توان، برای مثال، با رنگ‌آمیزی سطح بتن کاهش داد، که از نفوذ اکسیژن جلوگیری به عمل می‌آورد. وجود کلریدها نمی‌تواند باعث ایجاد هیچ مشکلی برای اجرای حفاظت کاتدی شود، اما کلریدها، جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی را افزایش می‌دهند، چون مانع غیرفعال (رویین) شدن مجدد سطوح فولادی می‌شوند. با گذشتن زمان، یون‌های کلرید به‌سمت آند مهاجرت کرده و جذب آن می‌شوند. چون نفوذ اکسیژن برای بتن‌هایی که زیرزمین یا در آب هستند بسیار آهسته است؛ جریان ۱ تا $2mA/m^2$ برای حفاظت کاتدی کافی است.

معیارهای حفاظت کاتدی

معیار پتانسیل ۷۷۰ mV-

متداول‌ترین معیار پتانسیل حفاظت کاتدی پذیرفته شده، ۸۵۰ mV-، بر مبنای الکترود مرجع مس/سولفات مس (CSE) است، که برای حفاظت فولادهای بتن مسلح، مقدار ۷۷۰ mV- در نظر گرفته می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، اگر پتانسیل فولادهای بتن در مقایسه با الکترود مرجع مس/سولفات مس به ۷۷۰ mV- یا منفی‌تر برسد، می‌توان از خوردگی آن جلوگیری کرد. در مقابل، اگر پتانسیل منفی‌تر از ۱۱۵۰ mV- باشد؛ حفاظت بیش از حد اتفاق می‌افتد و تشکیل هیدروژن در کاتد آغاز می‌شود.

به دلیل این واقعیت که اندازه‌گیری‌های پتانسیل حین اعمال جریان انجام می‌شود و چون مقاومت بتن بسیار زیاد است، افت پتانسیل اُهمی IR باید لحاظ گردد. پتانسیل IR در بتن به ازای هر میلی‌متر عمق در حدود ۲ mV کاهش می‌یابد. در نتیجه، برای فولادهای بتن که در عمق ۵ cm هستند، پتانسیل IR تقریباً ۱۰۰ V است. به‌عبارت‌دیگر، پتانسیل اندازه‌گیری شده حدوداً ۱۰۰ mV منفی‌تر از پتانسیل واقعی است.

معیار جابه‌جایی پتانسیل ۳۰۰ mV

این معیار تفاوت بین پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده در موقعیت‌های «روشن» و «خاموش» است. افت پتانسیل اُهمی IR باید برای پتانسیل اندازه‌گیری شده در موقعیت «روشن» در نظر گرفته شود.

معیار جابه‌جایی قطبش ۱۰۰ mV

بر مبنای این معیار، فولادهای بتن باید از نظر کاتدی به اندازه حداقل ۱۰۰ mV در جهت منفی قطبیده شوند. به‌عبارت‌دیگر، تفاوت بین پتانسیل تعادلی و پتانسیل اندازه‌گیری شده درست پس از قطع جریان، باید حداقل ۱۰۰ mV باشد. چون هر دو اندازه‌گیری پتانسیل وقتی انجام می‌شوند که هیچ جریانی به اعمال نمی‌شود، افت پتانسیل اُهمی IR تأثیری بر نتایج ندارد. اندازه‌گیری‌ها را می‌توان برای سامانه‌های حفاظت کاتدی که برای مدت زمانی طولانی فعال بوده‌اند به‌سرعت انجام داد و در نتیجه مقدار پتانسیل «خاموش» درست پس از خاموش شدن جریان قرائت می‌شود، درحالی‌که، برای سامانه‌های که به تازگی فعال شده‌اند، جریان باید حداقل چهار ساعت قبل از آن اعمال شود که بتوان اندازه‌گیری را انجام داد. چون قطبش کاتدی فقط می‌تواند پس از گذشت حداقل چهار ساعت از اعمال جریان، رخ دهد. اگر رطوبت نسبی زیاد و مقادیر کلرید زیادی در بتن وجود داشته باشد، تغییر قطبش ۱۰۰ mV کافی نیست و حداقل باید تغییر پلاریزاسیون ۱۵۰ mV به دست آید. در مقابل، اگر مقدار کلریدها کمتر از $1/2\text{kg Cl}^-/\text{m}^3$ باشد، آن وقت تغییر قطبش ۶۰ mV کافی است.

تعیین پتانسیل حفاظت

در نمودار پتانسیل در مقابل لگاریتم جریان، ناحیه‌ای که در آن منحنی قطبش کاتدی خطی می‌شود، پتانسیلی به دست می‌دهد که جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی را نیز به وجود می‌آورد. اما برای اینکه ناحیه خطی به درستی تعیین شود، جریان‌های بیرونی که حداقل صد بار شدت بیشتری نسبت به جریان خوردگی دارند، باید اعمال شوند، به‌گونه‌ای که حداقل سه اندازه‌گیری را بتوان در منطقه تافل انجام داد.کاربرد چنین جریان‌های دارای شدت زیاد، در عمل باعث ایجاد مشکلاتی می‌شود.

روش‌های حفاظت کاتدی فولادهای بتن مسلح

حفاظت کاتدی فولادهای بتن مشابه حفاظت کاتدی خطوط لوله است، البته تفاوت‌هایی وجود دارد. در زیر، برخی از تکنیک‌های متداول انجام شده ارائه شده‌اند.

به‌وسیله آندهای آهن – سیلیکون

آندهای آهن – سیلیکون، ۱۰ تا ۲۰ سال عمر دارند و معمولاً برای حفاظت کاتدی پل‌ها استفاده می‌شوند. این آندها در درون مخلوط آسفالت/زغال کک رسانا به ضخامت ۵۰ mm که سطح بتن را می‌پوشاند، نصف می‌شوند و فاصله بین هر دو آند ۷/۵ متر است. همچنین، برای افزایش استحکام مکانیکی، مقداری ماسه به این مخلوط افزوده می‌شود، چون در غیر این صورت، پوشش به آسانی آسیب می‌بیند. آندهای آهن – سیلیکون را می‌توان فقط برای حفاظت کاتدی بتن‌هایی استفاده کرد که به‌صورت افقی قرار گرفته‌اند.

به‌وسیله آندهای قفسی پلیمری رسانا

آندهای قفسی پلیمری رسانا را می‌توان برای حفاظت کاتدی بتن‌های استفاده کرد که هم به‌صورت افقی و هم به‌صورت عمودی قرار می‌گیرند. در ابتدا، قفس‌های ساخته شده از نیوبیوم که با پلاتین پوشش داده شده‌اند مورد استفاده قرار می‌گرفتند و مناطق بالایی قفس با ساروج[۳۳۲] (شن آهک) پوشش داده می‌شد. بزرگ‌ترین مشکل که در این تکنیک با آن مواجه می‌شدند آن است که در اطراف آند اسیدهایی تشکیل می‌شوند که به ساروج آسیب وارد می‌کنند.

آندهای پلیمری رسانا که شکل یک قفس سیمی $500mm \times 250mm$ را دارند می‌توانند $80mA/m^2$ جریان حفاظت کاتدی را به مدت ۲۵ تا ۳۵ سال تولید کنند.

به‌وسیله آندهای مشبک تیتانیم با پوششی از اکسیدها

آندهای تیتانیم با پوشش اکسیدها و به شکل شبکه‌ای، از سیم‌هایی به ضخامت $1\ mm$ ساخته می‌شوند و چشمه‌هایی به اندازه $100mm \times 50mm$ دارند. دریافت $20\ mA$ جریان از $1m^2$ آند شبکه‌ای شکل امکان‌پذیر است.

به‌وسیله رنگ‌های رسانا

رنگ‌های رسانا عمدتاً به‌عنوان آند استفاده می‌شوند، به‌ویژه برای سازه‌های بتنی که در آب قرار دارند و به طور خاص برای دکل‌های اسکله بتنی که در منطقه پاشش[۳۳۳] می‌باشند. رنگ‌های رسانا با افزودن ذرات زغال کک به پلیمرهای آکرلیک تولید می‌شود. این رنگ در آب محلول است، اما پس از سخت شدن، پوشش محکم به وجود می‌آورد. ضخامت این پوشش رنگ در حدود $400\mu m$است و آندها با فاصله ۳ تا ۵ متر بین آندها روی آن قرار داده می‌شوند.

حفاظت کاتدی لوله‌های بتنی پیش تنیده (فشرده) با فولاد

لوله‌های بتنی پیش تنیده (فشرده) با فولاد را با پوشش دادن سطوح بیرونی یک ورقه فولادی استوانه‌ای، با ضخامت معینی از بتن تولید می‌کنند. پس از عمل‌آوری بتن با بخار، سطوح بیرونی ابتدا با سیم‌های فولادی پیش تنیده و سپس بار دیگر با بتن پوشش داده می‌شوند. تفاوت بین بتن‌های پیش‌تنیده و بتن‌های مسطح معمولی این است که در مورد بتن‌های پیش تنیده، سیم‌های فولادی تحت تنش کششی ثابتی هستند که منجر به خوردگی تنشی می‌شود و این موضوع دلیل حساس‌تر بودن بتن‌های پیش‌تنیده به کلریدها است.

فولاد ناحیه داخلی بتن معمولاً غیرفعال (رویین) شده است و در نتیجه تحت تأثیر خوردگی قرار نمی‌گیرد. غالباً، سیم‌های پیش‌تنیده نزدیک به ناحیه بیرونی بتن تحت تأثیر خورندگی می‌باشند و در نتیجه، یک پوشش دهی خوب، تا حد معینی مانع خورندگی می‌شود، اما در زمین‌هایی با مقاومت پایین و محتوی نمک زیادی، این کار کافی نیست.

ازآنجاکه، مقدار پتانسیل حفاظت بیش از حد برای فولادهای بتنی پیش‌تنیده، بر مبنای الکترود مس/سولفات مس، $-1150\ mV$ ، است در هنگام اجرای سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، باید نهایت دقت به عمل آید، در غیر این صورت، به دلیل تصاعد گاز هیدروژن در کاتد، ممکن است هم خوردگی تنشی و هم تردی هیدروژن رخ دهد.

---

2 3 □□□ □□□□□□ 3

3 3 □□□□□□□□□□□□□□□ 3

به‌علاوه، ثابت‌های میرایی سیم‌های فولادی لخت که در درون بتن قرار دارند بسیار زیاد می‌باشد و در نتیجه، فقط طول کوتاهی از خط لوله را می‌توان از یک نقطه مورد حفاظت قرار داد، و این موجود دلیل این است که چرا حتی استفاده از آندهایی با پتانسیل زیاد مانند منیزیم یا به طور خاص آندهای منیزیمی HP ممکن است باعث ایجاد حفاظت بیش از حد در مناطق نزدیک به آند شود، در نتیجه، در مورد حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده، آندهای روی مناسب‌تر هستند چون حداکثر پتانسیل ۱۱۰۰ mV- دارند.

مثال عملی طراحی دوره □□□□ برای آرماتورهای فولادی در سازه‌های بتنی

مقدمه

ایجاد تقویت در سازه‌های بتنی، میله‌های مسلح استاندارد پا پی‌های فولاد استحکام بالا (بتن از پیش تحت تنش قرار گرفته یا بعداً تحت کشش قرار گرفته) نامیده می‌شود. حفاظت کاتدی برای تقویت کننده‌های فولادی در بتن می‌تواند از نوع اتصال اعمال جریان و با آند فداشونده باشد. وظیفه آند در یک سامانه حفاظت کاتدی برای بتن مسلح، توزیع یکنواخت جریان به تمام سطوح فولاد درگیر است. در حفاظت کاتدی با اعمال جریان، از یک یک‌سوکننده و یک آند برای تبدیل تمام اجزاء تقویت‌کننده فولادی به کاتد استفاده می‌شود که در نتیجه خوردگی در سطح فولاد ایجاد نخواهد شد. از طرف دیگر، یک سامانه حفاظت کاتدی با آند فداشونده، نیاز به یک‌سوکننده ندارد، زیرا منبع جریان خود آند است. وقتی دو فلز متفاوت (فولاد و آند فداشونده) به یکدیگر متصل می‌شوند، یک پیل گالوانیک ایجاد می‌شود. در نتیجه جریان الکتریکی به‌صورت طبیعی از آند فداشونده به فولاد از طریق بتن برقرار می‌شود. ازآنجاکه مسلح‌سازی در بتن، در نزدیکی سطح و بسیار فشره انجام می‌شود، آند معمولاً کل سطح بتن را تحت پوشش قرار داده یا اینکه از آندهایی با فاصله کم استفاده می‌شود.

سازه‌های موجود

سامانه‌های اعمال جریان

سامانه حفاظت کاتدی شبکه تیتانیمی[۳۳۴]

سامانه آندی شبکه تیتانیمی کاتالیز شده، شامل یک شبکه تیتانیمی توسعه یافته با یک کاتالیست اکسید فلزی مخلوط (MMO) است که بر سطح بتن اعمال می‌شود (شکل ۹-۱).

3 -Titanium mesh 3 4

شکل ۹-۱ سامانه آندی شبکه تیتانیمی

آندهای شبکه پس از تعمیر بتن‌های آسیب دیده، با استفاده از بست‌های پلاستیکی به سطح آماده شده بتن متصل می‌شوند. شبکه تیتانیمی با استفاده از جوش نقطه‌ای، به یک میله توزیع‌کننده جریان (از جنس تیتانیم بدون روکش) متصل می‌شود. سپس شبکه آندی با ماده سیمانی مانند مخلوط بتن سیمان پرتلند یا شاتکریت[۳۳۵] پوشانده می‌شود. سامانه آند شبکه‌ای از جنس تیتانیم کاتالیز شده، اولین بار در سال ۱۹۸۵ معرفی شد و در حال حاضر متداول‌ترین سامانه حفاظت کاتدی برای سطح بدنه پل‌هایی است که برای یخ‌زدایی در معرض محیط نمکی قرار می‌گیرند. سامانه شبکه تیتانیمی به‌عنوان بادوام‌ترین سامانه برای حفاظت از سازه‌های بدنه پل‌ها شناخته می‌شود. این سامانه برای حفاظت از شمع‌ها[۳۳۶] یا ستون‌های بتنی نیز به کار می‌رود. پس از اینکه بتن آسیب دیده تعمیر شد، آندهای شبکه تیتانیمی بر روی سطوح بتن با استفاده از نوارپیچی در دور شمع‌ها یا ستون‌ها نصب می‌شوند. سپس آندها با استفاده از شاتکریت یا شکل‌های غیرفلزی بتن در ماده‌ای سیمانی قرار داده می‌شود.

سامانه حفاظت کاتدی با استفاده از شبکه نوار[۳۳۷] تیتانیمی

این سامانه شامل استفاده از یک نوار تیتانیمی با پوشش MMO و یک ملات سیمانی غیرانقباضی به‌عنوان پوشاننده شیادار است. عرض شبکه‌های نواری معمولاً ۱۳ و یا ۱۹ میلی‌متر است. فاصله شیارها وابسته به چگالی فولاد بوده اما معمولاً بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر از مرکز است. یک شیار بتن برای آند ۱۳ میلی‌متر، ۱۶ میلی‌متر عرض و ۲۵ میلی‌متر عمق دارد و برای آند ۱۹ میلی‌متر، ۱۹ میلی‌متر عرض و ۳۲ میلی‌متر عمق دارد. در نواحی که در آنها بتن دچار تخریب و یا پوسیدگی شده است می‌توان نوارهای آندی را توسط گیره‌های پلاستیکی به شبکه میلگردهای فولادی متصل کرد و با شاتکریت پوشاند. میله‌های تیتانیمی توزیع‌کننده جریان باعث ایجاد پیوستگی بین نوارهای آندی شده و به شبکه آندی در جهت عرضی، جوش نقطه‌ای می‌شوند.

3	□□□□□□□□□□□□	3	5
3	□□□□□□□	3	6
3	□□□□□□□□	3	7

این سامانه به خصوص برای سازه‌های بتنی که قادر به تحمل بار مرده اضافی یک لایه رویی بتن نیستند یا درجایی دارای کاربرد است که اتصال لایه رویی برای پوشاندن شبکه آندی اهمیت دارد. بر روی شبکه میلگردهای فولادی باید پوشش کافی وجود داشته باشد.

شبکه ۹-۲ شبکه نوار تیتانیمی

سامانه آندی گسسته

سامانه آندی گسسته، یکی از مقرون‌به‌صرفه‌ترین سامانه‌ها برای تیرها، شمع‌ها و ستون‌هاست. نصب این آندها نسبتاً آسان بوده و نیاز به برش وسیع و یا استفاده از روکش‌های بتنی ندارند. آندهای گسسته معمولاً وارد حفرات دریل و عمق ۲۰ الی ۲۵ میلی‌متر شده و توسط یک ملات سیمانی غیرانقباضی پوشانده می‌شوند. طول و فاصله آندها، وابسته به چگالی فولاد و ملزومات حفاظتی برای حفاظت کاتدی است. چندین سامانه مختلف در دسترس هستند. این سامانه‌ها شامل سامانه شبکه نوار تیتانیمی، آندهای سرامیکی و سیم تیتانیمی پلاتینیزه شده با پشت‌بند غنی از کربن هستند. چگالی جریان در فصل مشترک آند- بتن باید محدود به ۲۲۰ میلی‌آمپر بر مترمربع باشد، در غیر این صورت ممکن است که تخریب چسب سیمان در فصل مشترک آند- بتن رخ دهد.

سامانه پوشش دهی روی به روش اسپری حرارتی

روش پوشش دهی روی در حفاظت کاتدی بتن مسلح، اولین بار توسط اداره حمل و نقل کالیفرنیا در سال ۱۹۸۳ انجام شد. فرایند پوشش دهی فلزی[۳۳۸] شامل ذوب یک فلز یا آلیاژ به شکل سیم (معمولاً با قوس آمپراژ بالا) و اسپری کردن فلز مذاب بر روی بتن با هوای فشرده شده است. پوشش روی معمولاً با ضخامت فیلم ۳۰۰ تا ۴۰۰ میکرون اعمال می‌شود. از یک پد فلزی قرار گرفته در بتن برای اتصال آند به یک‌سوکننده استفاده می‌شود که با گذشت زمان به دلیل تبلور مجدد محصولات واکنش

3 □□□ □□□□□□□□□□ 3 8

روی، استحکام پیوند افزایش پیدا می‌کند. سامانه‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان با آند روی اسپری شده، در معرض اتصال کوتاه ناشی از خرک‌های آماتور[۳۳۹] قرار دارند.

سامانه پوشش دهی تیتانیم به روش اسپری حرارتی

از آندهای تیتانیم اسپری شده برای حفاظت کاتدی بتن مسلح، برای سازه‌های مختلفی به‌صورت آزمایشی استفاده شده است. یک کاتالیست شیمیایی مایع بر سطح آند اعمال می‌شود تا امکان تخلیه جریان از آند را فراهم کند. اولین استفاده از این آندها در سال ۱۹۹۴ در پل خلیج دیو[۳۴۰] در ارگون[۳۴۱] صورت گرفت. نتایج کارهای میدانی انجام شده تا کنون نشان می‌دهد که این سامانه‌ها در جریان‌های نسبتاً پایینی کار می‌کنند و در حال دستیابی به معیار حفاظت کاتدی فولاد در بتن هستند. اعمال تیتانیم به‌صورت اسپری حرارتی، به دلیل سختی سیم تیتانیم و سایش نوک‌های اسپری تا حدودی سخت‌تر از اعمال روی است؛ اما تیتانیم در محیط نسبتاً خنثی بوده و اثرات محیطی مضری ندارد. در تئوری، از این آندها انتظار طول عمر بسیار بالا (یعنی بیش از ۱۰۰ سال) می‌رود و در آینده در صورت نیاز می‌توان کاتالیست مایع را بر روی سطح تیتانیم مجدداً اعمال کرد.

سامانه پوشش رسانا

پوشش‌های رسانا با استفاده از اعمال کربن بالا، یکی از اولین سامانه‌های آند به کار رفته در سازه‌های بتنی بودند. یکی از مزایای پوشش‌های رسانا، امکان اعمال آسان آنها بر روی سطوح نامنظم مانند پایه‌های پل و کف عرشه است. رنگ با استفاده از اسپری یا غلتک و برس بر روی سطح با ضخامتی در حدود ۳۰۰ میکرون اعمال می‌شود. سیم‌های توزیع کننده جریان از جنس نیوبیم پلاتینیزه شده معمولاً در فواصل ۳ تا ۶ متری قرار داده می‌شوند. پوشش رسانا مستقیماً بر روی این سیم‌ها اعمال می‌شود یا اینکه سیم‌ها در چسب رسانا قرار داده می‌شوند. پوشش رسانا، سیاه رنگ بوده و بنابراین برای زیباسازی نیاز به یک رنگ رویی است. سامانه‌های رنگ رسانا در معرض اتصال کوتاه ناشی از خرک‌های آرماتور موجود در سطح زیرین اجزاء سازه قرار دارند. عیب دیگر این سامانه‌ها، عدم اطمینان از عمر طولانی در محیط‌های دریایی به‌ویژه در مناطقی است که سطح در تماس با آب قرار دارد.

سامانه جکت یکپارچه برای شمع[۳۴۲] (آند تیتانیمی)

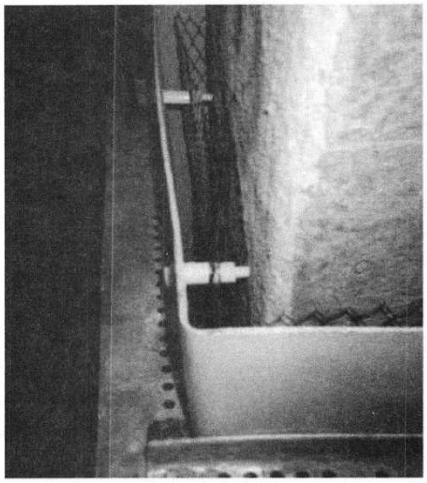
سامانه دیگری که به‌عنوان سامانه جکت یکپارچه برای شمع شناخته می‌شود، در بسیاری از شمع‌کوبی‌های پل‌های بتنی در فلوریدا به کار رفته است. در این سامانه از یک جکت فایبرگلاس از پیش ساخته شده که شبکه آندی با استفاده از خمیدگی‌های خاصی به داخل جکت متصل شده است، استفاده می‌شود. سامانه جکت با استفاده از بندهای فشاری در شمع نصب می‌شود و فضای خالی بین جکت وسط بتن با ملات سیمانی پر می‌گردد. سامانه‌های نصب شده با جکت‌های شمع، در کنترل خوردگی در شمع‌های پل در نواحی جزر و مدی و پاششی موفق بوده‌اند. مزیت دیگر این جکت‌ها، عملکرد آنها به‌عنوان عایق الکتریکی و بنابراین جلوگیری از شار جریان از طریق آب دریا به فولاد غوطه‌ور است. از آنجایی که آندهای تیتانیم کاتالیز شده نرخ

3	[illegible]	3	9
3	[illegible]	4	0
3	[illegible]	4	1
3	[illegible]	4	2

مصرف بی‌نهایت پایین و طول عمر بالایی (بیش از ۷۵ سال) دارند، هزینه‌های آنها بسیار مطلوب است. شکل ۹-۳ مثالی از یک سامانه جکت یکپارچه برای شمع با شبکه تیتانیمی در پلی در فلوریدا را نشان می‌دهد.

آندهای گالوانیک

تمام سامانه‌های حفاظت کاتدی با استفاده از آند فداشونده، نیاز به برقراری اتصال فلزی به فولاد آرماتور دارند. نوع اتصال بستگی به ساخت سازه دارد. در مواردی که از فولادهای استحکام بالا استفاده شده است مانند سازه‌های از پیش تحت تنش قرار گرفته یا بعداً کشیده شده[۴۳]این اتصال معمولاً به‌صورت مکانیکی انجام می‌شود. در موارد دیگر، از لحیم‌کاری یا سایر روش‌های حرارتی می‌توان استفاده کرد.



شکل ۹-۳ آند تیتانیمی در یک جکت شمع

سامانه پوشش دهی روی به روش اسپری حرارتی

از روی اسپری حرارتی شده نیز به‌عنوان یک آند فداشونده برای سازه‌های بتن مسلح قرار گرفته در معرض اتمسفر استفاده شده است. روی خالص، با استفاده از تجهیزات استاندارد پوشش دهی فلزی (برای مثال اسپری شعله‌ای، قوس الکتریکی) بر سطح بتن اعمال می‌شود. همانند تمام آندهای فداشونده، وجود فلز در نزدیکی سطح که در عملکرد سامانه حفاظت کاتدی با اعمال جریان تداخل ایجاد خواهد کرد، تأثیر مخربی بر روی سامانه آند فداشونده ندارد. روی اسپری شده در ضخامتی در حدود ۳۰۰ میکرون اعمال می‌شود. جریان حاصل از روی اسپری حرارتی شده در نواحی خشک، با زمان کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. روی برای سطوحی مؤثر است که دارای اندکی رطوبت بوده و فلز را فعال نگه می‌دارند. برای سطوحی که در معرض غوطه‌وری پیوسته قرار دارند نباید از پوشش آند فداشونده استفاده کرد، زیرا آند به‌واسطه تخلیه جریان به فلزات قرار گرفته در خارج از بتن مورد حفاظت، به‌سرعت خورده خواهد شد. برای این سامانه باید اتصال مناسبی با آرماتور فولای ایجاد کرد.

3 4 3

پوشش دهی آلیاژ آلومینیم به روش اسپری حرارتی

این آلیاژ که حاوی آلومینیم، روی و ایندیوم است به شکل سیم هسته‌دار تولید می‌شود که شامل یک غلاف بیرونی آلومینیمی و یک هسته تو خالی پر شده با پودر آلیاژ است. این آلیاژ با استفاده از تجهیزاتی اسپری قوس بر روی سطح بتن اعمال می‌شود (شکل ۹-۴). سامانه اسپری قوس الکتریکی از طریق تفنگ اسپری، هم‌زمان دو سیم را با سرعتی یکنواخت تغذیه می‌کند. پس از اعمال ولتاژ به سیم‌ها، قوس تشکیل می‌شود که در ادامه باعث ذوب شدن سیم‌ها می‌گردد. سپس آلیاژ ذوب شده با استفاده از فشار هوای پنیوماتیک، بر روی سطح بتن حرکت داده می‌شود. ضخامت پوشش آندی توصیه شده، تقریباً ۳۰۰ میکرون (۱۲ میل) است.

شکل ۹-۴ اعمال اسپری قوس آند گالوانیک

طول عمر مورد انتظار از آند آلیاژ آلومینیم، بسته به محیط اطراف بوده و بین ۱۰ تا ۱۵ سال است جریان خروجی از آند فداشونده، با تغییرات رطوبتی نسبی، دما و میزان خیسی بتن متغیر است. بنابراین انتظار می‌رود که آند نصب شده بر روی سطح بتنی قرار گرفته در معرض محیط بسیار خورنده (ما و رطوبت نسبی بالا)، طول عمر کوتاه‌تری داشته باشد.

سامانه روی/هیدروژل

این ماده شامل ورق روی به ضخامت ۰/۲۵ میلی‌متر ادرای یک پشت‌بند چسبنده رسانای یونی (هیدروژل) است. تجهیزات یا مهارت مهندسی خاصی برای نصب این آند مورد نیاز نیست. کاغذ محافظ به‌آسانی از پشت خط جدا شده و سپس آند، با فشار بر روی سطح بتن چسبانده می‌شود. برای اعمال این آند، سطح بتن باید نسبتاً هموار و تمیز باشد. برای جلوگیری از ورود رطوبت، لبه‌های آند باید با عایق سیلیسیمی درزبندی شوند. این سامانه در چندین پروژه پل و بالکن‌های مشترک در امتداد ساحل فلوریا نصب شده است.

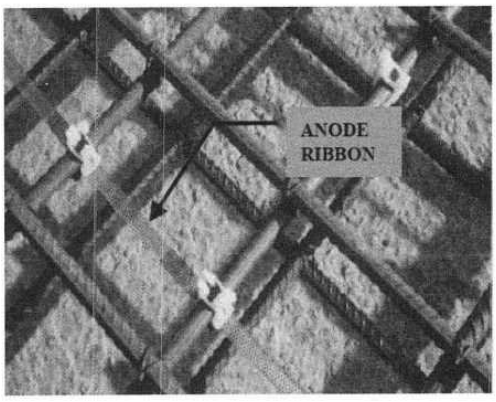
جکت یکپارچه برای شمع با شبکه روی

سامانه جکت یکپارچه برای شمع با شبکه روی، برای حفاظت از نواحی پاششی و جزر و مدی شمع‌های پل طراحی شده است. این سامانه شامل جکت‌های فایبرگلاس متصل به هم با شبکه روی بسته شده به وجه داخلی مجموعه جکت است. فضای خالی بین جکت و شمع با یک ملات سیمانی پر می‌شود. از آنجایی که این سامانه از پیش‌ساخته شده، نصب آن بسیار آسان است.

سازه‌های جدید

سامانه حفاظت کاتدی با شبکه نوار تیتانیم

آندهای شبکه‌ای نوار تیتانیم کاتالیز شده نیز برای حفاظت کاتدی سازه‌های بتنی جدی مناسب هستند. آنها در طول ساخت، با استفاده از گیره‌های غیرفلزی خاصی به قفس آرماتور بسته می‌شوند (شکل ۹–۵). هرکدام از آندهای نواری شبکه برای دریافت جریان حفاظتی از یک‌سوکننده، به میله‌های توزیع‌کننده جریان (از جنس تیتانیم بدون روکش) متصل می‌شوند. آندهای شبکه به میله‌های توزیع‌کننده جریان (از جنس تیتانیم بدون روکش) متصل می‌شوند. آندهای شبکه به میله‌های توزیع‌کننده جریان، جوش نقطه‌ای می‌شوند. فاصله آندها براساس چگالی جریان مورد نیاز در آرماتور و الگوی توزیع جریان پیش‌بینی شده محاسبه می‌شود. باید اطمینان حاصل کرد که فاصله آندها بیشتر از میزان محاسبه شده نباشد. استفاده از جریان خروجی بالاتر در فاصله بیشتر آندها، منجر به توزیع غیریکسان و غیرقابل قبول جریان در طول قفس آرماتور خواهد شد. فاصله معمول آندها بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر از مرکز آنهاست.



شکل ۹–۵ آند تیتانیمی نصب شده در یک سازه جدید

سامانه شبکه آندی تیتانیمی

از شبکه تیتانیمی نیز می‌توان برای شمع‌ها، ستون‌ها و تیرهای بتنی جدید استفاده کرد. پس از نصب قفس آرماتور، شبکه تیتانیمی با استفاده از تسمه‌های پلاستیکی به لایه خارجی فولاد آرماتور متصل می‌شود. برای جلوگیری از برقراری اتصال کوتاه الکتریکی بین آندها و آرماتور، قبل از نصب آندهای تیتانیمی، شبکه‌ای از جداکننده‌های پلاستیکی مستقیماً بر روی قفس آرماتور نصب می‌گردد. شبکه تیتانیمی توسط جوش نقطه‌ای به یک میله توزیع‌کننده جریان از جنس تیتانیم بدون روکش متصل می‌شود. پس از نصب سامانه حفاظت کاتدی، شبکه بتنی تکمیل خواهد شد. برای جلوگیری از جدایش بتن توسط شبکه

تیتانیمی، چندین سوراخ در شبکه بریده می‌شود. معمولاً حفراتی به قطر ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) در فواصل تقریباً ۳۰۰ میلی‌متری (۱۲ اینچ) ایجاد می‌شوند تا جریان بتن در طول بتن‌ریزی بهبود پیدا کند.

مثال‌های طراحی برای حفاظت از بدنه بتنی پل‌ها

طراحی یک سامانه حفاظت کاتدی برای بدنه یک پل، شامل ترکیبی از عوامل تجربی و ویژه است. عوامل ویژه اصلی مورد نیاز عبارت‌اند از:

۱. ابعاد بدنه و واحدهای مربوط به آن
۲. الگوی آرماتور قرار گرفته در بدنه
۳. نتایج ارزیابی شرایط پل که معمولاً شامل: - پتانسیل‌های میله‌های فولادی تقویت کننده (آرماتور)، غلظت یون کلر- عمق پوشش دهی آرماتور- پیوستگی الکتریکی آرماتور و سازه‌های فلزی دیگر- نواحی پیوسته شده بتن و- مقاومت بتن است
۴. در دسترس بودن، موقعیت و نوع منبع تغذیه AC
۵. طول عمر طراحی مورد نیاز برای سامانه حفاظت کاتدی.

اصلی‌ترین ورودی تجربی، تخمین جریان مورد نیاز برای ایجاد حفاظت کاتدی مناسب است. میزان جریان مورد نیاز تعیین‌کننده نوع سامانه آندی، مقدار آند مورد نیاز، اندازه واحد یک‌سوکننده و اندازه کابل‌ها و چیدمان‌ها است. ازآنجاکه طراحی حفاظت کاتدی برای سازه‌های بتن مسلح، کاملاً متفاوت از سازه‌های دیگر ارائه شده در این کتاب هستند، مثال انتخاب شده در این بخش، کلی‌تر از سایر مثال‌های طراحی خواهد بود.

جریان مورد نیاز

جریان مورد نیاز، براساس چگالی جریان در هر مترمربع از سطح فولاد یا هر مترمربع از بدنه پل است. در چگالی جریان‌های محاسبه شده براساس مساحت فولاد، معمولاً برای تعیین مساحت فولاد از کل مساحت فولاد آرماتور در بنه پل استفاده می‌شود. اگر جریان به طور مساوی در کل فولاد آرماتور در بدنه توزیع نشود، در بعضی از آرماتورهای فولادی محافظت کافی در برابر خوردگی ایجاد نخواهد شد. نسبت شار جریان به هرکدام از آرماتورها، تابعی از هدایت بتن، عمق پوشش بالای هرکدام از آرماتورها و الگوی آرماتور است. برای در نظر گرفتن چنین تابع پیچیده‌ای، طراح باید سازه مور نظر را با سازه‌هایی از همان نوع که جریان مور نیاز آنها به‌صورت تجربی به دست آمده است. مقایسه کند. اگر تفاوت قابل توجه باشند، ممکن است که نیاز به داده‌های تجربی دیگری باشد. برای تعیین مقادیر جریان مورد نیاز براساس مساحت بدنه نیاز به انجام این فرض است که الگوی فولاد آرماتور، در طول سطح، یکنواخت بوده و نسبت به مساحت بدنه به مساحت فولاد، ثابت است. طراح باید برای تعیین فهرست و الگوی آرماتور، نقشه‌های هرکدام از بدنه‌های پل را بررسی کند. برای یک بدنه پل را با آرماتور دو لایه[۳۴۴] مساحت آرماتور فولادی در حدود ۸۵٪ مساحت پل خواهد بود.

محدوده متداول چگالی جریان‌های به کار رفته در تخمین جریان مورد نیاز، از ۵ تا ۲۰ میلی‌آمپر بر مترمربع (۰/۵ تا ۲/۰ میلی‌آمپر بر فوت مربع) است. براساس مساحت آرماتور به بدنه ذکر شده در بالا، جریان ۴/۳ تا ۱۶ میلی‌آمپر بر مترمربع (۰/۴۳ تا ۱/۷

3 4 4

میلی‌آمپر بر فوت‌مربع) از سطح بدنه خواهد بود. جریان مورد نیاز در شرایط واقعی، بیشتر و محدوده آنها از ۷/۵ تا ۱۵ میلی‌آمپر بر مترمربع (۰/۷۵ تا ۱/۵ میلی‌آمپر بر فوت‌مربع) است. در مرحله طراحی یک سامانه حفات کاتدی، با در نظر گرفتن ضریب اطمینان و تخلیه جریان غیر قابل پیش‌بینی احتمالی در نواحی موضعی از سامانه و همچنین نیاز به جریان بالاتر در مراحل اولیه عملکرد حفاظت کاتدی، از جریان بالاتری باید استفاده کرد.

مثال

بدنه پلی با مساحت ۱۰۰۰ مترمربع را در نظر بگیرید. بررسی الگوی میلگردهای فولادی نشان می‌دهد که نسبت به ساخت فولاد به مساحت بدنه پل، یک به یک است. کل جریان مورد نیاز، به‌صورت محافظه‌کارانه ۲۰ آمپر تخمین زده شده (۱۰۰۰ مترنربع × ۰/۲ آمپر بر مترمربع). پس از مشخص شدن جریان مورد نیاز، میزان آند تعیین خواهد شد. برای آند شبکه‌ای از جنس تیتانیم با پوشش اکسیدی فلزی مخلوط (MMO)، حداکثر چگالی جریان در هر مترمربع از آند، معمولاً به ۱۱۰ میلی‌آمپر بر مترمربع است. واکنش الکتروشیمیایی در سطح آند، اکسیداسیون یون‌های کلر یا هیدروکسیل است. نتایج این واکنش‌ها، تولید آب و اکسیژن یا گاز کلر است.

$$4\mathrm{OH}^- \rightarrow O_2 + 4e^- + 2H_2O$$

یا

$$2\mathrm{Cl}^- \rightarrow \mathrm{Cl}_2 + 2e^-$$

واکنش و نرخ اکسیداسیون، تابع مستقیمی از چگالی جریان آند است. آزمایش نشان داده است که محصولات اکسیداسیون (اکسیژن و آب) وقتی که در چگالی جریان‌های بیشتر از ۱۱۰ میلی‌آمپر بر مترمربع تولید شوند می‌توانند در بتن نفوذ کنند. برای جلوگیری از تخریب بتن به‌واسطه تولید کلر در فصل مشترک آند- بتن، چگالی جریان آند باید کمتر از ۱۱۰ میلی‌آمپر بر مترمربع باشد. با در نظر گرفتن عمر باقیمانده بدنه بتنی پل، حداقل عمر طراحی ۴۰ سال در چگالی جریان ۱۱۰ میلی‌آمپر بر مترمربع مورد نیاز است. مثال‌های زیر نشان‌دهنده روند محاسبه میزان آندها هستند. سه نوع آند شبکه‌ای تیتانیمی بوده و میزان خروجی جریان هرکدام با نوع مش متغیر است. خروجی آندها برحسب مساحت شبکه بدین صورت است.

- نوع ۱۵۰ (جریان خروجی: ۱۸/۸ میلی‌آمپر بر مترمربع در ۱۱۰ میلی‌آمپر بر مترمربع از سطح آند)
- نوع ۲۱۰ (جریان خروجی: ۲۴/۴ میلی‌آمپر بر مترمربع در ۱۱۰ میلی‌آمپر بر مترمربع از سطح آند)
- نوع ۳۰۰ (جریان خروجی: ۳۷/۸ میلی‌آمپر بر مترمربع در ۱۱۰ میلی‌آمپر بر مترمربع از سطح آند)

اگر جریان طراحی مورد نیاز، ۲۰ میلی‌آمپر بر مترمربع از سطح بدنه پل و جریان آند شبکه‌ای، محدود به ۱۱۰ میلی‌آمپر بر مترمربع از سطح آند باشد، از شبکه نوع ۲۱۰ استفاده می‌شود.

نواحی آندی

آندهای حفاظت کاتدی معمولاً به نواحی تأثیر گرفته در طول بدنه تقسیم‌بندی می‌شوند. تقسیم‌بندی برای مهندسین پل این امکان را فراهم می‌سازد که بتوانند حفاظت کاتدی را نسبت به حالتی که یک سامانه آندی برای کل بدنه در نظر گرفته شده است، با دقت زیادتری کنترل کنند. در داخل یک ناحیه نسبت به کل سامانه می‌توان عیوب، تخریب‌ها یا اتصال‌های کوتاه را بسیار سریع‌تر تعیین کرد. اندازه یک ناحیه، یکی از عواملی است که طراح باید مشخص کند..

در نگاه اول، طراحی می‌تواند تعداد زیادی ناحیه کوچک برای کنترل بهتر سامانه را مشخص کند؛ اما عوامل اقتصادی نیز باید در نظر گرفته شوند. افزایش بیش از حد تعداد ناحیه‌ها، هزینه‌های سامانه را افزایش خواهد داد. هر ناحیه نیاز به یک مدار کنترل یک‌سوکننده و کابل تغذیه از یک‌سوکننده به آند بدنه و سامانه اتصال به زمین جداگانه دارد. هزینه‌های کابل و کانال‌های آنها نیز باید مورد ارزیابی قرار بگیرد. معمولاً یک ناحیه نیاز به حداقل یک الکترود مرجع و ترجیحاً دو الکترود برای اطمینان بیشتر دارد.

اندازه نواحی آندی، به مساحت بدنه و تغییر مساحت آرماتور در هر مترمربع از سطح بدنه بستگی دارد. نمونه‌ای از راهنماهای به کار رفته در این مورد، در جدول ۹-۱ ارائه شده است.

جدول ۹-۱ اندازه نواحی آندی پیشنهادی

مساحت بدنه (مترمربع)	متوسط مساحت ناحیه (مترمربع)	حداکثر مساحت ناحیه (مترمربع)
۰ تا ۵۰۰۰	۴۰۰	۷۵۰
۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰
۱۰۰۰۰ به بالا	۱۰۰۰	۱۲۰۰

توزیع جریان

مرحله بعدی پس از تعیین میزان آند مورد نیاز، توزیع مؤثر جریان در سامانه آندی است. هرکدام از سامانه‌های آندی، مقاومت طولی محدودی در برابر شار جریان دارند. مقاومت داخلی آند باعث تخلیه غیریکنواخت جریان در طول آند می‌شود. اگر جریان به‌صورت یکسان توزیع نشود، چگالی جریان آند بیشتر از ۱۱۰ میلی‌آمپر بر مترمربع خواهد شد و یا به بخش‌هایی از بدنه پل، جریان کافی نخواهد رسید. میله‌های تیتانیمی (بدون روکش) توزیع‌کننده جریان که به سامانه شبکه آندی متصل شده‌اند، توزیع یکنواخت جریان را ایجاد می‌کنند. مقاومت میله‌های تیتانیمی توزیع‌کننده جریان و آندهای شبکه‌ای تیتانیمی، باعث افت ولتاژ در سامانه آندی می‌شود. ازآنجاکه ولتاژ باعث جابه‌جایی جریان از آند به فولاد آرماتور می‌شود، افت قابل توجه در ولتاژ منجر به افت جریان نیز خواهد شد. توزیع یکنواخت جریان از سطح آند می‌تواند منجر به یک یا چند مورد زیر نیز شود:

۱. چگالی جریان ناکافی در فولاد برای نواحی دور از نقاط تزریق جریان آند
۲. تخلیه بیش از حد جریان از آندها در نزدیکی نقاط تزریق جریان آند
۳. تخریب بتن
۴. کاهش عمر آند

افت ولتاژ، بخش ذاتی یک شبکه الکتریکی است. به‌عنوان راهنما، افت ولتاژ باید به حدود ۱۰٪ ولتاژ اولیه کاهش داده شود. محاسبه افت ولتاژ در طول تمام سامانه‌های شبکه آندی، کاری پیچیده در آنالیز شبکه الکتریکی است. جزئیات مورد نیاز برای انجام این آنالیز، فراتر از محدوده این بخش است، اما می‌توان از چند روش تخمینی برای به دست آوردن راهنماهایی در تعیین فاصله بین توزیع‌کننده‌های جریان در سامانه آندی استفاده کرد. جریان در طول آند به‌صورت پیوسته تخلیه می‌شود. به دلیل افت ولتاژ ذاتی در آند، جریان یکنواخت نخواهد بود، اما جریان متوسط در امتداد تمام طول، برابر با نصف کل خواهد بود. افت ولتاژ در بخش آند را می‌توان به‌صورت زیر تخمین زد:

$$V = \frac{1}{2}\mathrm{I}\times\mathrm{R}$$

که V افت ولتاژ در طول آند، I جریان خروجی از آند و R مقاومت خطی هادی آند می‌باشند. به طور کلی افت ولتاژ قابل قبول برای آند شبکه‌های تیتانیمی، کمتر از ۳۰۰ میلی ولت است.

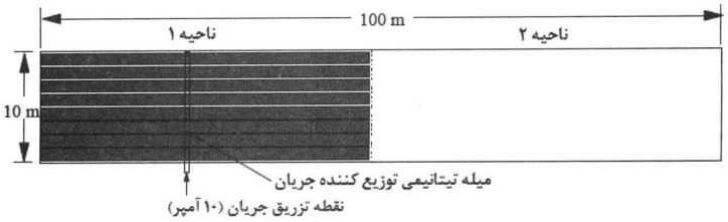
مثال- سامانه آندی برای آند شبکه‌ای اکسید فلزی مخلوط (MMO) نوع ۲۱۰

اطلاعات موجود:

۱. اندازه بدنه پل (۱۰ متر در ۱۰۰ متر: ۱۰۰۰ مترمربع)
۲. دو ناحیه (هرکدام از ناحیه‌ها ۵۰۰ مترمربع)
۳. مقاومت آند شبکه‌ای نوع ۲۱۰: عرض ۱/۲ متر (۰/۰۴۶ اهم بر متر)
۴. میله تیتانیمی توزیع‌کننده جریان (۰/۰۴۹ اهم بر متر)

ازآنجاکه عرض شبکه تیتانیمی، ۱/۲ متر است می‌توان ۸ ردیف شبکه آندی را با فاصله‌های ۵ سانتی‌متری در جهت طولی بدنه پل قرار دارد.

الف) فرض می‌شود یک میله توزیع‌کننده جریان، در مرکز هر ناحیه در جهت عرضی بدنه قرار داده می‌شود و کابل مسی از یک‌سوکننده، در ابتدا میله توزیع‌کننده متصل می‌شود (شکل ۹-۶). طول میله توزیع‌کننده، ۱۰ متر و حداکثر فاصله از میله توزیع‌کننده و انتهای شبکه، ۲۵ متر است.



شکل ۹-۶

جریان طراحی کل (I_{anode}) برای یک ناحیه (۵۰۰ مترمربع) برابر است با:

$$I_{\mathrm{anode}} = 20\mathrm{mA/m^2} \times 500m^2 = 1000\mathrm{mA} = 10A$$

افت ولتاژ (V_{bar}) در میله توزیع‌کننده جریان برابر است با:

$$V_{\text{bar}} = \frac{1}{2} \times 10000\text{mA} \times (0/049\text{ohm/m} \times 10m) = 2450\text{mV}$$

جریان در نصف یک شبکه تیتانیمی برابر است با:

$$\frac{1}{2} \times \left(\frac{10000\text{mA}}{\text{A rows}}\right) = 625\ \text{mA}$$

افت ولتاژ (I_{anode}) در شبکه آندی از میله توزیع‌کننده تا انتهای شبکه (۲۵ متر طول) برابر است با:

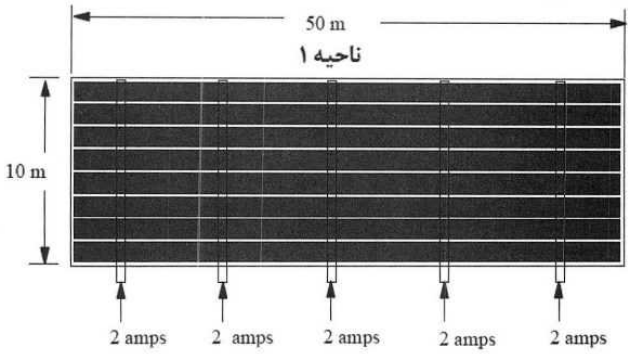
$$V_{\text{anode}} = \frac{1}{2} \times 625\ \text{mA} \times (0/049\text{ohm/m} \times 25m) = 359\text{mV}$$

بنابراین کل افت ولتاژ (V_{total}) در سامانه شبکه آندی برابر است با:

$$V_{\text{total}} = \text{V}_{\text{bar}} + \text{V}_{\text{anode}} = 2809\text{mV} > 300\text{mV}$$

این مقدار بیشتر از معیار ۳۰۰ میلی‌ولت است.

ب) اکنون فرض می‌شود که از ۵ میله توزیع‌کننده جریان برای اعمال جریان به شبکه آندی استفاده می‌شود (شکل ۹-۷).



شکل ۹-۷

در این حالت، میزان جریان اعمالی به هر میله توزیع‌کننده جریان برابر خواهد بود با:

$$\frac{10000\ \text{mA}}{5\ \text{bars}} = 2000\text{mA} = 2\text{A}$$

افت ولتاژ در میله توزیع‌کننده جریان برابر است با:

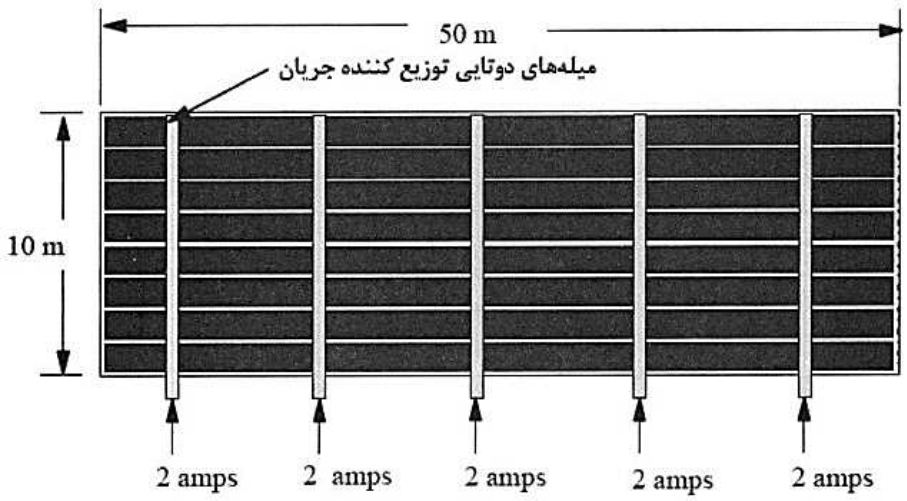
$$\text{V}_{\text{bar}} = \frac{1}{2} \times 2000\text{mA} \times (\ 0.049\ \text{ohm/m} \times 10\text{m}) = 490\text{mV} > 300\text{mV}$$

ج) برای کاهش بیشتر افت ولتاژ در میله توزیع‌کننده، دو گزینه وجود دارد:

گزینه ۱: از میله‌های توزیع‌کننده دوتایی استفاده شود. این کار مقاومت را نصف خواهد کرد.

گزینه ۲: در صورت امکان، مکان اتصال کابل الکتریکی به مرکز میله توزیع‌کننده جابه‌جا شود. این کار طول میله توزیع‌کننده و بنابراین جریان عبور از آن را نصف خواهد کرد.

در صورت گزینه ۱ (شکل ۹-۸):



شکل ۹-۸

$$V_{\text{bar}} = \frac{1}{2\text{bars}} \times \frac{1}{2} \times 2000\text{mA} \times (0/049\text{ohm/m} \times 10m) = 245\text{mV}$$

مقدار جریان از میله توزیع‌کننده تا انتهای یک شبکه آندی برابر است با:

$$\frac{1}{2} \times \left(\frac{2000\text{mA}}{8\text{rows}}\right) = 125\text{mA}$$

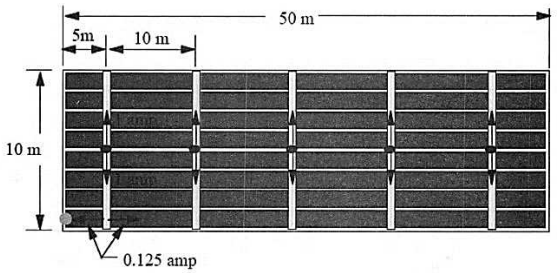
افت ولتاژ در شبکه آندی از میله توزیع‌کننده تا انتهای شبکه (۵ متر طول) برابر است با:

$$V_{\text{bar}} = \frac{1}{2} \times 125\text{mA} \times (0/046\text{ohm/m} \times 5m) = 14\text{mV}$$

بنابراین کل افت ولتاژ در سامانه شبکه آندی برابر است با:

$$V_{\text{total}} = V_{\text{bar}} + V_{\text{anode}} = 259\text{mV} < 300\text{mV}$$

در مورد گزینه ۲ (شکل ۹- ۹):



شکل ۹- ۹

$$V_{\text{bar}} = \frac{1}{2} \times 1000\text{mA} \times (0/049\text{ohm/m} \times 5m) = 123\text{mV}$$

مقدار جریان از میله توزیع‌کننده تا انتهای یک شبکه آندی برابر است با:

$$\frac{1}{2} \times \left(\frac{1000\text{mA}}{4\text{rows}}\right) = 125\text{mA}$$

افت ولتاژ در شبکه آندی از میله توزیع‌کننده تا انتهای شبکه (۵ متر طول) برابر است با:

$$V_{\text{anode}} = \frac{1}{2} \times 125\text{mA} \times (0/046\text{ohm/m} \times 5m) = 14\text{mV}$$

بنابراین کل افت ولتاژ در سامانه شبکه آندی برابر است با:

$$V_{\text{total}} = V_{\text{bar}} + V_{\text{anode}} = 137\text{mV} < 300\text{mV}$$

در این حالت کل افت ولتاژ، کمتر از ۳۰۰ میلی‌ولت است. بنابراین می‌توان تعداد میله‌های توزیع‌کننده را از ۵ به ۳ کاهش داد که در نتیجه افت ولتاژ برابر با ۲۴۴ میلی‌ولت خواهد شد.

مشخصات یک‌سوکننده

مورد بعدی در طراحی، مشخصات یک‌سوکننده و کابل‌های تغذیه آندها است. طراحی پایه‌ای یک یک‌سوکننده، در مورد نوع کنترل خروجی، ورودی برق AC، خروجی برق DC و تجهیزات جانبی است. عوامل کابل‌کشی AC و DC شامل ظرفیت حامل جریان، مقاومت طولی و نوع عایق است.

ورودی AC یک‌سوکننده معمولاً توسط منبع برق در دسترس در نزدیکی پل تعیین می‌شود. خروجی DC یک‌سوکننده توسط جریان طراحی کل در هر ناحیه (شامل تمام ضرایب اطمینان) و ولتاژ مورد نیاز این جریان تعیین می‌شود. ولتاژ تابعی از مقاومت آند نسبت به آرماتور و همچنین مقاومت مدار کابل‌های DC است. مقاومت‌های آند نسبت به آرماتور، متغیر بوده و بستگی به چیدمان آند، مساحت آرماتور و دما و مقاومت بتن دارند، اما برای یک مترمربع از بدنه پل، معمولاً مقاومت پیش‌بینی شده در هر ناحیه، از تقسیم مقاومت یک مترمربع بر کل مساحت ناحیه به دست می‌آید. برای یک بدنه پل مشخص می‌توان این مقادیر را در طول تغییرات فصلی مشاهده کرد. برای بدنه پلی به مساحت ۱۰۰۰ مترمربع که به دو ناحیه مساوی (هرکدام ۵۰۰ مترمربع) تقسیم شده است، مقاومت بین آند و فولاد آرماتور برای یک ناحیه، ۰/۱ تا ۰/۴ اهم است. در مقاومت ۰/۴ اهم، ولتاژ مورد نیاز برای ایجاد جریان ۱۰ آمپر در یک ناحیه، برابر با ۴ ولت است.

طراح حفاظت کاتدی باید در نظر داشته باشد که ولتاژ یک‌سوکننده به کار رفته در طراحی آند در بالا، براساس معیار افت ولتاژ ۳۰۰ میلی ولت در آند، ولتاژ در نقطه اتصال بین نقطه تزریق جریان و دورترین نقطه آند است. هر گونه افت ولتاژ در کابل‌های مثبت و منفی مدارها بین یک‌سوکننده و اتصال به آند باید به حداکثر ولتاژ DC برای طراحی یک‌سوکننده افزوده شود. افت ولتاژ کابل‌ها باید به حداقل رسانده شود تا از مصرف غیرضروری نیروی برق جلوگیری به عمل آید. برای اهداف

طراحی، افت ولتاژها در مدار کابل‌کشی باید محدود به ۱۰٪ ولتاژ مورد نیاز در محل تزریق حریان به آند شود. مثال‌های محاسبه و در نظر گرفتن این افت ولتاژ کابل‌ها، در بخش کابل‌کشی DC در این فصل آمده است. ولتاژ خروجی طراحی شده برای مدار یک‌سوکننده، کل ولتاژ مورد نیاز برای اعمال جریان حفاظت کاتدی از آند به فولاد آرماتور به اضافه افت ولتاژ در کابل‌های مثبت و منفی از یک‌سوکننده و همچنین یک ضریب اطمینان است.

طراحی ولتاژ یک‌سوکننده برای مثال ارائه شده، شامل مؤلفه‌های زیر است:

الف) ولتاژ مورد نیاز در آند = ۴/۰ ولت

ب) افت ولتاژ در سامانه آندی = ۰/۲۴۴ ولت

ج) افت ولتاژ در کابل‌های DC شود = ۰/۴ ولت (۱۰٪ الف)- فرض شده- در زیر محاسبه می‌شود.

د) ولتاژ مورد نیاز در یک‌سوکننده = ۴/۶۴۴ ولت (مجموع الف، ب و ج)

ه) افزودن ۵۰٪ ضریب اطمینان = ۲/۳۲۲ (٪۵۰ د)

و) ولتاژ طراحی یک‌سوکننده = ۶/۹۶۶ ولت

یک‌سوکننده شامل ۲ مدار (یکی در هر ناحیه) خواهد بود. هر مدار، حداقل ۱۰ ولت و ۱۰ آمپر فراهم خواهد کرد. ضریب اطمینان ۵۰٪ به ظرفیت ولتاژ یک‌سوکننده اضافه شده است. حال طراح باید از کاتالوگ سازنده یک‌سوکننده کمک بگیرد. اکثر سازنده‌ها، یکی سری یک‌سوکننده‌ها با مشخصات استاندارد تولید می‌کند. مشخصات غیراستاندارد برای یک‌سوکننده می‌تواند هزینه‌های یک یک‌سوکننده را افزایش دهد.

تصمیم مهم بعدی، انتخاب نوع کنترل یک‌سوکننده است. این مورد شامل گزینه‌های زیر است:

- حالت ولتاژ ثابت: در حالت ولتاژ ثابت، ولتاژ خروجی DC یک‌سوکننده، در مقداری ثابت نگه داشته می‌شود. تغییرات در بتن (برای مثال رطوبت، مقدار کلر، دما) بر مقاومت الکتریکی بتن مؤثر بوده و در نتیجه باعث ایجاد تغییراتی در خروجی جریان DC خواهد شد
- حالت جریان ثابت: اگر نوسانات خروجی جریان DC، اهمیت داشته باشد می‌توان از یک یک‌سوکننده جریان ثابت برای اعمال جریان ثابت استفاده کرد

یک‌سوکننده ممکن است شامل اندازه گیرنده‌های داخلی، جای پریز برای آزمایش ابزارها، مدارهای هشدار، ساعت و غیره باشد. هدف از این موارد، به دست آوردن اطلاعات سامانه در حال کار برای کاربر یا برای آسان شدن پایش در آینده است؛ اما از این تجهیزات برای نگهداری سامانه نیز استفاده می‌شود. برای یک‌سوکننده‌ای با کاربرد معمولی، تجهیزات جانبی کمتر و هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمتری مورد نیاز است. در تعیین مشخصات یک یک‌سوکننده، فقط گزینه‌های مورد نیاز برای اعمال جریان حفاظت کاتدی و نگهداری مقرون‌به‌صرفه سامانه ذکر می‌شود.

طراح باید در هنگام انتخاب روش بررسی یک‌سوکننده، موقعیت آن را در نظر داشته باشد. در مورد اندازه گیرنده‌های مجزا می‌توان از تجهیزات دستی استفاده کرد. گزینه دیگر پایش از راه دور با استفاده از اتصالات تلفن به یک مودم در داخل

یک‌سوکننده است. یک‌سوکننده، دستگاه ساده‌ای است که می‌تواند برای چندین سال کار کند. بعضی از تجهیزات و گزینه-های موجود در یک‌سوکننده ممکن است هزینه‌های نگهداری آن را افزایش دهند. هرکدام از این گزینه‌ها باید از لحاظ صرفه اقتصادی به دقت مورد ارزیابی قرار بگیرند.

کابل‌کشی DC

کابل‌های DC، خروجی مثبت یک‌سوکننده را به آند و خروجی منفی آن را به فولاد آرماتور متصل می‌کنند. شار جریان در این کابل‌ها باعث ایجاد افت پتانسیل می‌گردد. اگر افت پتانسیل‌ها بیش از حد باشد، ممکن است ولتاژ در دسترس بین سامانه آندی و فولاد آرماتور برای ایجاد جریان حفاظتی مورد نیاز از آندها به آرماتور ناکافی باشد. افت ولتاژها را می‌توان با استفاده از قانون اهم برای کابل‌های مختلف محاسبه کرد.

مثال‌ها

محاسبه افت ولتاژها برای مدارهایی با کابل‌های مختلف در زیر آمده است:

حداکثر جریان طراحی برای هر مدار = ۱۰ آمپر

D1 = فاصله از یک‌سوکننده تا نقطه تزریق جریان به آند = ۵۰ متر

D2 = فاصله از یک‌سوکننده تا نقطه منفی = ۵۰ متر

D = کل فاصله D1 + D2 = ۱۰۰ متر

انتخاب اندازه کابل

به طور کلی، مقاومت اندازه‌ها مختلف ۱۰۰ متر کابل در ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر است با:

کابل AWG No. 2/0: ۰/۰۲۶ اهم

کابل AWG No. 1/0: ۰/۰۳۲ اهم

کابل AWG No. 2: ۰/۰۵۱ اهم

کابل AWG No. 4: ۰/۰۸۲ اهم

کابل AWG No. 6: ۰/۱۳ اهم

کابل AWG No. 8: ۰/۲۱ اهم

کابل AWG No. 10: ۰/۳۳ اهم

کابل AWG No. 12: ۰/۵۲ اهم

کابل AWG No. 14: ۰/۸۳ اهم

اگر از کابل مسی AWG No. 10 استفاه شود:

$$R = \frac{0/34\text{ohm}}{100m}$$

$$D = 50m + 50\,m = 100m$$

$$E = 10A \times \left(\frac{0/34\text{ohm}}{100m}\right) \times 100m = 3/4V$$

(بزرگ‌تر از ۰/۴ ولت یا ۱۰٪ ولتاژ مورد نیاز در آند)

اگر از کابل مسی AWG No. 1/0 استفاده شود:

$$R = \frac{0/32\text{ohm}}{100m}$$

$$E = 10A \times \left(\frac{0/32\text{ohm}}{100m}\right) \times 100m = 0/32V$$

(کمتر از ۰/۴ ولت یا ۱۰٪ ولتاژ مورد نیاز در آند)

بنابراین در این مثال، کابل AWG No. 1/0 انتخاب می‌شود. وقتی که مقاومت آند- آرماتور (۰/۴ اهم) و مقاومت کابل (۰/۰۳۲ اهم) باهم جمع می‌شوند، مقاومت کل برابر با ۰/۴۳ اهم می‌شود. در نتیجه این ناحیه نیاز به حداقل ۴/۳ ولت DC و ۱۰ آمپر DC دارد. در عمل برای در نظر گرفتن ضریب اطمینان، ولتاژ و جریان بیشتری انتخاب می‌شود. مقدار ضریب اطمینان به کار رفته توسط طراح، به دقت داده‌های طراحی استفاده شده در محاسبات بستگی دارد. به طور کلی، ضریب اطمینان ۵۰٪ استفاده می‌شود که بنابراین نتیجه‌نهایی در این مورد، ۸ ولت و ۱۵ آمپر است.

تا اینجا روش‌های محاسباتی پایه‌ای، ارائه شدند. مهندس طراح می‌تواند بین هزینه نیروی برق، هزینه سینی کابل‌ها، هزینه کابل‌ها و هزینه یک‌سوکننده با مقایسه جایگزین‌های موجود تعادل ایجاد کند. به دلیل تفاوت در طول عمر طراحی‌ها، هزینه‌های جاری و در نظر گرفتن تمام کاربران استفاده کننده از این کتاب، تجزیه‌وتحلیل اقتصادی خاصی در این فصل نیامده است. فرض بر این است که مهندس طراح با تجزیه‌وتحلیل اقتصادی آشنا بوده و یا مهندس طراحی، مراجعی برای این امر در دسترس دارد.

الکترودهای مرجع

الکترودهای مرجع؛ نشانه‌ای از کارایی سامانه حفاظت کاتدی بوده و برای تنظیم و ارزیابی آن به کار می‌روند. جریان حفاظت کاتدی برای نگه داشتن سطح انرژی فولاد آرماتور به کار می‌رود. الکترودهای مرجع دائمی قرار گرفته در داخل بدنه پل، ابزاری برای اندازه‌گیری سطح انرژی به‌صورت اختلاف پتانسیل بین فولاد و الکترود مرجع هستند.

از الکترودهای مرجع زیر می‌توان استفاده کرد:

مس- سولفات مس $(Cu\text{-}CuSO_4)$

نقره- کلرید نقره $(Ag\text{-}AgCl)$

دی‌اکسید منگنز (MnO_2)

برای نصب دائمی الکترود مرجع در بدنه پل‌ها، از الکترودهای مس- سولفات مس به دلیل عدم پایداری طولانی مدت آنها در بتن، به‌ندرت استفاده می‌شود. الکترود مرجع پیشنهادی در این قسمت، نقره- کلرید نقره یا دی‌اکسید منگنز است.

پس از مشخص شدن نوع الکترود، تعداد و مکان نصب آنها باید مشخص شود. باید در نظر داشتن این نکته که وظیفه یک الکترود مرجع، نشان دادن سطح حفاظت کاتدی است، الکترودها باید در نواحی قرار داده شوند که بیشترین احتمال خوردگی را دارند یا نیازمند بیشترین مقدار از جریان حفاظت کاتدی هستند. الکترودهای مرجع باید در مناطق زیر نصب شوند:

الف) مکان‌های دارای میزان بالای یون کلر.

ب) مکان‌های دارای الگوهای فشرده از آرماتور.

ج) مکان‌های دور از محل تزریق جریان آند یا در وسط بین محل‌های تزریق جریان آند.

تعداد الکترودهای مرجع تا حدودی اختیاری است. هر ناحیه آندی باید حداقل یک الکترود مرجع داشته باشد. اگر نواحی کوچک هستند (۵۰۰ مترمربع یا کمتر)، یک الکترود مرجع می‌تواند کافی باشد؛ اما در نواحی بزرگ‌تر (۵۰۰ متر مربع به بالا) ممکن است تغییراتی در الگوی آرماتور یا میزان کلر به وجود آب که در این موارد نیاز به قرار دادن یک جفت الکترود مرجع است. مهندس پل نیز باید تعداد بیش از حد الکترودهای مرجع را در نظر بگیرید. به‌عنوان یک راهنما، در هر ۵۰۰ مترمربع از بدنه پل، یک الکترود مرجع برای پایش مقادیر پتانسیل حفاظت کاتدی مناسب خواهد بود.

خلاصه

پس از اینکه طراحی سامانه حفاظت کاتدی کامل شد، موارد زیر تعیین می‌شوند:

الف) تعداد و اندازه نواحی آندی.

ب) نوع آند مورد نیاز.

ج) تعداد آندهای مورد نیاز.

د) اندازه و فاصله هرکدام از بخش‌های آندی بر روی بدنه.

ه) مکان تزریق جریان به سامانه آندی.

و) گزینه‌ها و مشخصات یک‌سوکننده.

ز) اندازه کابل‌های DC.

ح) تعداد و مکان الکترودهای مرجع.

طراحی سیستم حفاظت کاتدی خطوط لوله

حفاظت کاتدی خطوط لوله برای سیستم خط لوله نفت خام، برای اولین بار در سال ۱۹۲۸ و به‌وسیله آر. جی. کوهن[۳۴۵]در ایالات متحده تحقق یافت. قبل از به کارگیری حفاظت کاتدی برای سیستم خط لوله نفت خام، کارهای شناسایی مقدماتی از جمله تعیین راه حل‌های تقاطع با آب، سیستم‌های راه‌آهن مجاور که با جریان مستقیم کار می‌کردند، خطوط انتقال ولتاژ بالا و سیستم‌های خط لوله دیگر در محیط اطراف، باید انجام می‌شدند. اگر چنین سازه‌هایی وجود داشتند، آن وقت معیارهای خاصی باید برای پیشگیری از خوردگی تداخلی مدنظر قرار می‌گرفت. به‌علاوه، نوع و مقاومت زمینی که خط لوله از آن عبور می‌کرد، سطح آب‌های زیرزمینی، مقدار pH و پتانسیل‌های اکسایش - کاهش که خورندگی زمین را نشان می‌دادند، از معیارهای دیگری بودند که باید از قبل تعیین می‌شدند.

اندازه‌گیری مقاومت ویژه زمین

3 [illegible] 4 5

مقاومت ویژه زمینی که خط لوله از آن عبور می‌کند، در هر ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر اندازه‌گیری می‌شود. اگر زمین در کل آن فاصله یکسان ارزیابی شود. این محدوده را می‌توان به ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر نیز افزایش داد. اگر تفاوت در دو اندازه‌گیری متوالی بسیار بزرگ باشد، مثلاً دو برابر بیشتر یا کمتر، آنگاه تعداد اندازه‌گیری‌های بیشتری را باید در آن فاصله انجام داد. مقاومت ویژه زمین به طور مستقیم با کمک روش چهار میله‌ای ورنر و به‌صورت میدانی اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، چهار میله، در یک راستا و با فاصله مساوی هر میله از میله بعدی، در زمین نصب می‌شوند. سپس جریان متناوبی از طریق دو میله که بیشترین فاصله را از هم دارند، به زمین اعمال می‌شود. اختلاف پتانسیلی که با این جریان اعمال می‌شود، توسط دو میله دیگر، اندازه‌گیری می‌شود، درحالی‌که مقاومت ویژه توسط قانون اُهم اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین، مقاومت ویژه توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho = \pi\ aR$$

که در آن ρ مقاومت ویژه (ohm.cm) و a فاصله بین دو الکترود داخلی (cm) و r مقاومت قرائت شده از دستگاه (ohm) است. اندازه‌گیری مقاومت معمولاً در یک محل خاصی از زمین و درست بالای خط لوله و نزدیک به سطح زمین انجام می‌شود. این فاصله معمولاً ۱۰۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر است. بنابراین، برای مثال، اگر در فرمول a برابر ۱۶۰ سانتی‌متر باشد، $2\pi a$ تقریباً ۱۰۰۰ است و مقاومت زمین ۱۰۰۰ برابر مقاومت قرائت شده می‌باشد. به‌طوری‌که مقاومت زمین به‌وسیله افرادی با پیش‌زمینه کار میدانی، معمولاً به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho \sim 1000R$$

همچنین، مقاومت زمین با استفاده از روش جعبه مستطیلی و انجام آزمون روی نمونه‌های برداشت شده از زمین مورد نظر، در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود؛ بااین‌حال، باید انتظار خطا هم داشت، زیرا معمولاً عوامل دیگری در محیط طبیعی وجود دارد که در آزمایشگاه لحاظ نمی‌گردد. زمانی که از جعبه مستطیلی برای تعیین مقاومت استفاده می‌شود، از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$\rho = R\frac{W.L}{D}$$

که در آن P مقاومت ویژه زمین به R.ohm.cm مقاومت اندازه‌گیری شده نمونه زمین به اُهم، D فاصله به سانتی‌متر بین نقاطی است که در آن نمونه‌ها گرفته شده است و W و D به ترتیب عرض و طول مستطیل هستند.

هنگامی که رطوبت زیر ۵٪ است، مقاومت زمین به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند و هنگامی که رطوبت سطح به ۲۰٪ می‌رسد، مقاومت زمین به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

به‌علاوه، به طور کلی مقاومت زمین با کاهش دما، افزایش و زیر صفر درجه سانتی‌گراد اساساً افزایش می‌یابد، زیرا آب یخ می‌بندد. بنابراین، دما باید در طول مدت اندازه‌گیری مقاومت زمین ثبت شود. از فرمول زیر برای محاسبه تغییرات زمین نسبت به تغییرات دما استفاده می‌شود:

$$P_{T_1} = P_{T_2} \frac{40}{25 + T_1}$$

که در آن P_{T_1} مقاومت زمین (ohm.com) در دمای T_1 و P_{T_2} مقاومت زمین (ohm.cm) در دمای T_2 است.

اندازه‌گیری پتانسیل

پتانسیل اکسایش - کاهش زمین

پتانسیل اکسایش - کاهش[۳۴۶] نشان می‌دهد که آیا زمین خورنده است و آیا خطر خوردگی میکروبی وجود دارد. پتانسیل کمتر از ۱۰۰ mv نشان می‌دهد امکان خوردگی شدید است، پتانسیل بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ mv نشان می‌دهد. امکان خوردگی بالا است، پتانسیل بین ۲۰۰ تا ۴۰۰mV نشان‌دهنده امکان خوردگی متوسط است و پتانسیل‌های بالاتر از ۴۰۰ mv نشان می‌دهد که امکان خوردگی خفیف است. پتانسیل اکسایش - کاهش زمین با افزایش مقدار عوامل اکسیده مانند اکسیژن محلول در زمین افزایش می‌یابد. پتانسیل اکسایش - کاهش از طریق فرمول زیر اندازه‌گیری می‌شود:

$$E_{redox}=E_p+E_{ref} + 60(pH - 7)$$

در اینجا، E_{redox} پتانسیل اکسایش - کاهش زمین به mV، E_p پتانسیل الکترود پلاتین نصب شده در زمین به mV و E_{ref} پتانسیل الکترود مرجع در مقایسه با الکترود هیدروژن استاندارد هیدروژن (SHE)[۳۴۷] به mV است. برای مثال، برای الکترود اشباع $Cu/CuSO_4$، این اختلاف پتانسیل برابر ۳۱۶ mV است.

پتانسیل ایستا و پتانسیل خاموش و روشن

پتانسیل ایستا[۳۴۸] (E_S)، پتانسیل سیستم خط لوله‌ای است که قبل از اجرای سامانه حفاظت کاتدی اندازه‌گیری می‌شود، درحالی‌که، پتانسیل روشن (E_{on})، پتانسیل اندازه‌گیری شده خط لوله تحت جریان حفاظت کاتدی می‌باشد و پتانسیل (E_{off}) پتانسیلی است که حدود ۵ ثانیه پس از قطع جریان حفاظت کاتدی اندازه‌گیری می‌شود. برای مشاهده اینکه آیا معیارهای ذکر شده در قسمت «معیارهای حفاظت کاتدی» حاصل شده است که تأییدی بر قطبش کافی سازه می‌باشد، اندازه‌گیری این پتانسیل‌ها بسیار ضروری و حیاتی است. پتانسیل سازه فولادی باید به اندازه کافی قطبیده شده باشد، به‌طوری‌که بتواند به‌صورت کاتدی حفاظت شود. از فرمول زیر برای محاسبه E_S، E_{on}، و پتانسیل E_{off} استفاده می‌شود:

$$E_{on}=E_s+E_p+E_{IR}$$

و

$$E_{off}=E_s+E_p+E_{IR}$$

به علت قطع جریان حفاظت کاتدی اعمال شده در طول زمان اندازه‌گیری E_{off} مقدار پتانسیل E_{IR} (افت IR) صفر می‌شود، درحالی‌که، مقدار پتانسیل دیگری که از جریان حفاظت کاتدی نشأت می‌گیرد، یعنی پتانسیل قطبش (E_p)، صفر نشده و

3 4 6
3 4 7

[۳۴۸]. منظور از پتانسیل ایستا، پتانسیل طبیعی خط لوله در زمینی می‌باشد که در آن نصب شده است.

به‌تدریج و پس از قطع جریان کاهش می‌یابد و به این ترتیب آن را می‌توان اندازه‌گیری کرد. بر اساس مقادیر پتانسیل ایستا (E_s)، پتانسیل روشن (E_{on}) و پتانسیل خاموش (E_{off})، جابه‌جایی پتانسیل و جابه‌جایی قطبش نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

جابجایی پتانسیل $= E_{on} - E_s$

و

جابجایی قطبش $= E_{on} - E_s$

اندازه‌گیری پتانسیل خط لوله/زمین

پتانسیل سیستم خط لوله/زمین با استفاده از یک ولت‌متر و یا یک پتانسیومتر با مقاومت بالا اندازه‌گیری می‌شود. قطب مثبت ولت‌متر به خط لوله و قطب منفی به الکترود مرجع متصل می‌شود. اندازه‌گیری بهینه را می‌توان با جوش یا لحیم‌کاری کابل به خط لوله انجام شود، که معمولاً این کار به‌صورت میدانی عملی نیست.[۳۴۹] به جای آن، ابتدا، لایه زنگ زده سطح لوله، جایی که اندازه‌گیری انجام خواهد شد، زدوده می‌شود، و در مرحله دوم، با فشار دادن نوک تیز فلز متصل به کابل روی سطح لوله آزمایش انجام می‌شود. برای جلوگیری از افت پتانسیل اُهمی IR، الکترود مرجع همچنین باید بسیار نزدیک به سطح خط لوله باشد، که دستیابی به این موضوع هم عملی نیست، زیرا خط لوله زیرزمینی است و بنابراین معمولاً الکترود مرجع درست بالای خط لوله در یک چاله حفر شده در سطح قرار داده می‌شود. به‌علاوه، اگر زمین خشک باشد، به منظور کاهش مقاومت خیس می‌شود.

تعیین نواقص پوشش بر اساس اندازه‌گیری پتانسیل

تعیین نواقص پوشش بر اساس اندازه‌گیری پتانسیل خط لوله/زمین

هنگامی که سیستم خط لوله/زمین مورد بررسی قرار می‌گیرد، فلز خط لوله باردار منفی و زمین باردار مثبت می‌شود. چنان‌که خط لوله از زمین‌های مختلفی عبور می‌کند، تغییرات پتانسیل خط لوله/زمین به نوع زمین و ساختار آن بستگی خواهد داشت. جایی که در آن پتانسیل خط لوله/زمین منفی‌تر است، لوله به آند تبدیل می‌شود و جایی که در آن پتانسیل خط لوله/زمین مثبت‌تر است، لوله به کاتد تبدیل می‌شود و در نتیجه جریان از آند به کاتد شار می‌یابد.[۳۵۰] جاهایی که در آن پوشش نقص دارد، پتانسیل منفی‌تر است و در نتیجه، با اندازه‌گیری پتانسیل خط لوله/زمین در امتداد خط لوله، مناطق خوردگی تعیین می‌شود. بعد از اعمال حفاظت کاتدی، پتانسیل خط لوله/زمین در جاهایی که پوشش روی خط لوله نقص دارد، در جهت مثبت افزایش می‌یابد. به همین دلیل، جریان تولید شده توسط بستر آندی سیستم حفاظت کاتدی وارد خط لوله می‌شود و جاهایی که پوشش نقص دارد، پس پتانسیل کاهش می‌یابد.

تعیین نواقص پوشش بر اساس روش پیرسون

---

[۳۴۹] . با نصب نقاط آزمایش ([redacted]) این کار عملی می‌شود.

[۳۵۰]. لازم به یادآوری است که جهت جریان عکس جهت حرکت الکترون‌ها است.

روش پیرسون[۳۵۱] معمولاً برای تعیین خودکار نواقص پوشش روی یک سیستم خط لوله استفاده می‌شود. روش پیرسون بر مبنای پایش وقوع تغییرات پتانسیل، به دلیل نقص پوشش، با اعمال یک جریان متناوب با ولتاژ بالا به سیستم خط لوله است.
روش پیرسون همچنین می‌تواند برای خطوط لوله‌ای که تحت جریان حفاظت کاتدی هستند به کار برده شود به شرطی که از جریان مستقیم به جای جریان متناوب و همچنین از یک تقویت‌کننده متفاوت، استفاده شود. علاوه بر این، امروزه دستگاه‌هایی موتوری ارائه شده‌اند که با حرکت در کنار خط لوله، سیگنال‌ها را تشخیص می‌دهند.

اندازه‌گیری پتانسیل در امتداد خط لوله

روش کابل طویل

پتانسیل را می‌توان در فواصل مساوی در امتداد خط لوله از طریق روش کابل طویل و با استفاده از یک کابل به اندازه کافی طویل اندازه‌گیری کرد که دارای یک سطح مقطع ضخیم است. مقاومت کابل را می‌توان هنگام عملی کردن روش کابل‌های طویل نادیده انگاشت. اگر سازه‌هایی که مسیر را مسدود می‌کند وجود نداشته باشد، پتانسیل حداکثر تا ۱ کیلومتر را خط لوله را می‌توان از طریق این روش اندازه‌گیری کرد.

روش الکترود دوتایی

ازآنجاکه، نصب یک کابل طولانی در امتداد خط لوله با توجه به وجود سازه‌های مختلف در مسیر معمولاً میسر نیست، دیگر روش مورد استفاده برای اندازه‌گیری پتانسیل در امتداد یک خط لوله، روش الکترود دوتایی است، بنابراین؛ پتانسیل در کنار این خط لوله با استفاده از دو مرجع الکترود اندازه‌گیری می‌شود.

تعمیر و نگهداری سامانه‌های حفاظت کاتدی خطوط لوله

معمولاً عمر سامانه‌های حفاظت کاتدی مورد استفاده برای حفاظت از خوردگی سیستم‌های خطوط لوله، ۱۰ تا ۱۵ سال پیش‌بینی می‌شود. سامانه‌های حفاظت کاتدی باید حداقل یک بار در سال بررسی شوند، حتی اگر هیچ نقص و یا خرابی مانند موارد زیر به وجود نیاید:

- پتانسیل خط لوله/زمین باید در هر ایستگاه اندازه‌گیری در امتداد خط لوله بررسی شود؛
- در نواحی مشکوک به خوردگی، اندازه‌گیری پتانسیل اضافی باید از طریق روش الکترود دوتایی و یا کابل‌های طویل انجام شود؛
- مقاومت پوشش باید در طول خط لوله بررسی شود و در جاهایی که پوشش آسیب دیده است، اندازه‌گیری پتانسیل اضافی انجام گیرد؛
- بازده جریان دستگاه T/R باید بررسی شود؛
- در مورد سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، مقاومت بستر آندی باید بررسی شود؛
- در مورد سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده، پتانسیل آندی و شدت جریان دریافتی از آند باید بررسی شود؛

3 5 1

- در محل تقاطع دو خط لوله، اندازه‌گیری جریان باید در هر دو وضعیت «روشن (on)» و «خاموش (off)»، به ترتیب در زمان اعمال جریان حفاظت کاتدی و هنگامی که جریان قطع شده است، انجام شود؛
- در جاهایی که در آن لوله‌ها از درون غلاف عبور می‌کند، پتانسیل لوله‌های غلاف و خط لوله باید بررسی شود تا تعیین شود که آیا اتصالی بین این سازه‌های فلزی وجود دارد یا نه؛
- بخش‌هایی از خط لوله تحت حفاظت و خط لوله بیگانه و یا سازه فلزی بیگانه که اثرات تداخل دارند، باید بررسی شود؛
- کیفیت عایق فلنج‌های عایقی باید از طریق اندازه‌گیری مقاومت آنها بررسی شود؛
- محیط اطراف خود لوله باید برای سازه‌هایی که در ابتدا وجود نداشته‌اند، مانند خطوط انتقال ولتاژ بالا و سیستم‌های راه‌آهن که با جریان مستقیم کار می‌کنند و دیگر سازه‌های فلزی بیگانه، بررسی شود.

ایستگاه‌های اندازه‌گیری

صرف‌نظر از نوع سامانه حفاظت کاتدی مورد استفاده، سیستم‌های خط لوله باید ایستگاه‌های اندازه‌گیری در امتدادخط لوله داشته باشند. این ایستگاه‌های اندازه‌گیری باید به گونه‌ای نصب شده باشند که به‌راحتی در دسترس باشند و به آسانی روشن و خاموش شوند و در برابر عوامل خارجی مقاوم باشند. ارتفاع ۱ متر بالاتر از سطح زمین برای نصب آنها مناسب است و ممکن است نصب در این ارتفاع همیشه قابل اجرا نباشد؛ بااین‌حال، در محدوده شهری، آنها را روی یک بلوک بتنی و یا در داخل زمین نصب می‌کنند. ایستگاه‌های اندازه‌گیری عمدتاً پتانسیل خط لوله/زمین، جریان‌های سرگردان و خوردگی به علت خرابی پوشش را تعیین می‌کنند و شامل زیر – واحدهایی است که با کنترل‌ها و اندازه‌گیری‌های زیر در ارتباط است:

۱. اندازه‌گیری منظم پتانسیل خط لوله/زمین از طریق ایستگاه‌های STP
۲. اندازه‌گیری شدت جریان شار یافته روی خط لوله از طریق ایستگاه‌های ATP
۳. اندازه‌گیری جریان و پتانسیل در اتصالات آند گالوانیک از طریق ایستگاه‌های SATP
۴. کنترل عایق‌بندی فلنج‌های عایقی از طریق ایستگاه‌های SIF
۵. کنترل جریان‌های سرگردان[۳۵۲] تقاطع‌ها از طریق ایستگاه‌های EPC
۶. کنترل تماس لوله و غلاف عبوری از طریق ایستگاه‌های CTP

ایستگاه‌های اندازه‌گیری منظم STP

ایستگاه‌های اندازه‌گیری منظم STP در فواصلی به‌صورت دوره‌ای در امتداد خط لوله نصب و از طریق دو کابل به خط لوله متصل می‌شوند. اگرچه ممکن است برای اندازه‌گیری پتانسیل خط لوله/زمین تنها از یکی از کابل‌ها استفاده شود، اما بااین‌حال کابل دوم نصب می‌شود. ازاین‌رو، اگر لازم شود جریان از طریق یکی از کابل‌ها اعمال شود، کابل دیگر را می‌توان برای اندازه‌گیری پاتانسیل خط لوله/زمین استفاده کرد.

3 [illegible] 5 2

ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان ATP

ایستگاه‌های ATP شدت جریان شار یافته روی خط لوله را اندازه‌گیری می‌کند. به همین دلیل، دو کابل با فاصله ۳۰ متر از هم به خط لوله متصل می‌شود. برای اعمال جریان، دو کابل در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از کابل‌های قبلی هم به خط لوله متصل می‌شود. یکی از کابل‌ها به رنگ سیاه و کابل دیگر به رنگ سفید انتخاب می‌شود تا جهت جریان را بتوان تعیین کرد.

ایستگاه‌های اندازه‌گیری آندهای گالوانیک SATP

آندهای گالوانیک به طور مستقیم به سیستم خط لوله متصل نمی‌شوند، بلکه از طریق یک ایستگاه اندازه‌گیری آندهای گالوانیک (SATP) که دارای دو کابل است، به خط لوله متصل می‌شوند. یکی از این کابل‌ها به کابلی که از آند می‌آید، متصل شده و در هنگام نیاز ممکن است برای تنظیم جریان خروجی از آند، یک مقاومت در وسط آن قرار گیرد، درحالی‌که، کابل دیگر برای اندازه‌گیری پتانسیل خط لوله/زمین در هر دو موقعیت «روشن» و «خاموش» به ترتیب برای زمانی استفاده شود که آندها در سرویس هستند و زمانی که آنها در سرویس نیستند.

ایستگاه‌های اندازه‌گیری فلنج عایقی SIF

ایستگاه اندازه‌گیری فلنج عایقی SIF کیفیت عایق فلنج را بررسی می‌کند و در نتیجه در جایی که فلنج عایقی وجود دارد، نصب می‌شود. به همین دلیل دو مجموعه از دو کابل به هر دو طرف فلنج در فاصله ۱۰ سانتی‌متری، یک مجموعه به رنگ سفید و مجموعه دیگر به رنگ مشکی، متصل می‌شوند. هنگامی که مقاومت فلنج عایقی به واسطه این چهار کابل اندازه‌گیری می‌شود، دو کابل که در خارج هستند برای اعمال جریان و دو کابل داخلی برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل استفاده می‌شوند.

ایستگاه‌های اندازه‌گیری پتانسیل معادل EPC

ایستگاه‌های اندازه‌گیری پتانسیل معادل EPC جریان‌های سرگردان را در محل تقاطع دو سیستم خط لوله مختلف کنترل می‌کند. دو مجموعه از دو کابل با رنگ‌های متفاوت به هر سیستم خط لوله متصل شده، که دو کابل برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل استفاده می‌شود. درحالی‌که، دو کابل دیگر که سطح مقطع ضخیم‌تری از کابل‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری‌های پتانسیل دارند، برای قرار دادن یک مقاومت اتصال تداخلی بین خطوط لوله برای کنترل جریان‌های سرگردان استفاده می‌شوند.

ایستگاه‌های اندازه‌گیری CTP

ایستگاه‌های اندازه‌گیری CTP، اندازه‌گیری می‌کنند که آیا لوله‌های غلاف که در اطراف هستند با لوله عبوری در تماس هستند یا نه. به همین دلیل، دو کابل به خط لوله و یک کابل به لوله غلاف متصل می‌شود.

الکتریسیته ساکن و جلوگیری از آن

علاوه بر اثرات تداخل سامانه‌های حفاظت کاتدی خط لوله که با جزئیات در بخش «اثرات تداخل سامانه‌های حفاظت کاتدی» مورد بحث قرار گرفت. موضوع الکتریسیته ساکن هم وجود دارد که باید از ایجاد آن جلوگیری شود. هنگامی که موادی دارای رسانایی بسیار پایین هستند، مانند مشتقات نفتی و هیدروکربن‌ها و از طریق خط حمل می‌شوند، الکتریسیته ساکن رخ می‌دهد. الکتریسیته ساکن ممکن است در فلز خط لوله انباشته شود و بسته به نرخ جریان، ممکن است به هزار ولت و چند آمپر نیز برسد. انباشت این بار[۳۵۳]کن به طور خودبه‌خودی است، اما خیلی آرام و به اتمسفری و زمین تخلیه می‌شود.

برای تبدیل بار ساکن به یک بار آسیب‌رسان، باید تلاطم[۳۵۴]وجود داشته باشد و میزان جریان و نرخ جریان و مقدار سیال حمل شده باید از یک حدی بیشتر باشد. به‌علاوه، تماس سطح سیال و سطح داخلی لوله باید به اندازه کافی بزرگ باشد. مقاومت سیال معیار مهمی است، زیرا اگر از $5 \times 10^{12}\text{ohm.cm}$ بیشتر باشد، سرعت تخلیه الکتریسیته ساکن از سرعت انباشت آن در خط لوله آهسته‌تر خواهد بود؛ بنابراین، مقدار قابل توجهی از الکتریسیته ساکن ممکن است در لوله انباشته شود. مشتقات نفتی سبک دارای مقاومتی در حدود 10^{11}ohm.cm هستند و در نتیجه الکتریسیته ساکن در کمتر از ۱ ثانیه انباشته می‌شود. در هنگام ورود سیال به خط لوله، سیال تعداد مساوی بار مثبت و منفی دارد؛ بااین‌حال، در مورد سرعت جریان بالا، بارهای منفی سیال توسط یون‌های فلز رساناتر خط لوله جذب می‌شوند، در نتیجه سیال بار مثبت و خط لوله بار منفی کسب می‌کند. اگر پوشش خط لوله خوب نباشد، ازآنجاکه، الکتریسیته انباشته شده می‌خواهد در زمین تخلیه شود، زیرا پتانسیل الکتریسیته ساکن خط لوله نباید بیش از یک مقدار معین و کمتر از ۱۵۰۰ ولت باشد، تخلیه به شکل جرقه نخواهد بود. بااین‌حال، در پتانسیل‌های بالاتر، ممکن است جرقه همراه با خطر آتش‌سوزی رخ دهد و لوله را سوراخ کند. اگر هیچ عایق‌بندی بین محل انباشت الکتریسیته ساکن و مخزن ذخیره وجود نداشته باشد، الکتریسیته ساکن ممکن است به مخزن برسد. از طرف دیگر، یک محافظ برق ضدانفجار[۳۵۵]ژ محل فلنج عایقی افزوده می‌شود.

نرخ جریان نباید بیش از ۰/۹ m/s باشد، به خصوص در ایستگاه‌هایی که در آن مخازن ذخیره روزمینی، با فرآورده‌های نفتی موجود در کشتی‌ها پر می‌شوند و همچنین سیستم‌های خط لوله‌ای که فرآورده‌های نفتی را حمل می‌کنند، در نتیجه یک خط لوله که دارای قطر ۱۰ cm است می‌تواند حداکثر $2/27m^3/min$سیال را حمل کند. وقتی که مشتقات نفتی با کشتی حمل می‌شوند، به دلیل ارتعاشات و تکان‌ها، الکتریسیته ساکن می‌تواند در آن انباشته شود. زمانی که مشتقات نفتی از کشتی تخلیه می‌شود، الکتریسیته ساکن باید به زمین انتقال یابد، تا به مخزن ذخیره منتقل نشود، که این کار می‌تواند از طریق نصب یک فلنج عایقی در مسیر لوله متصل‌کننده کشتی به مخزن، انجام شود.

حفاظت کاتدی خطوط توزیع سوخت فرودگاه

از لحاظ تئوری و به دلایل اقتصادی و فنی، حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده برای حفاظت کاتدی خطوط توزیع سوخت فرودگاه مناسب است؛ بااین‌حال، مسائلی به شرح زیر معمولاً به وجود می‌آیند:

- پیدا کردن مکانی مناسب و در دسترس در فرودگاه برای نصب آندهای گالوانیک بسیار مشکل است؛

3	5	3
3	5	4
3	5	5

- ایستگاه‌های اندازه‌گیری برای آندها نمی‌تواند نصب شوند؛
- مدیریت عملیات تعمیر و نگهداری، به خصوص در طول یک خرابی خیلی مشکل است.

بااین‌وجود، علی‌رغم این واقعیت که بستر آند چاهی عمیق از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست، استفاده می‌شوند و سامانه‌های حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان ترجیح داده می‌شوند.

حفاظت کاتدی خطوط لوله آب

برای جلوگیری از خوردگی خطوط لوله با استفاده از حفاظت کاتدی، جریان مستقیم با اندازه و پتانسیل کافی به خطوط لوله اعمال می‌شود. اختلاف خط لوله/زمین در مقایسه با الکترود مس/سولفات مس (CSE) و در هر نقطه از خط لوله، حداقل mV ۸۵۰- کافی است، درحالی‌که، برای خطوط لوله پوشش داده شده با پلی اتیلن (PE) و پلی وینیل کلرید (PVC)، این اختلاف پتانسیل، حداکثر mV ۱۲۰۰- و برای خطوط لوله پوشش داده شده با قیر، حداکثر mV ۲۵۰۰- است. بااین‌حال، اگر خط لوله در زمین دفن نشده باشد، اختلاف پتانسیل خط لوله/زمین ممکن است دقیق نباشد و در نتیجه نباید اندازه‌گیری و به مقدار آن اعتماد شود، مگر نیاز شود. اگر جریان اعمالی یک جریان سرگردان باشد، به‌عنوان مثال، به دلیل نزدیکی بستر آندی به راه‌آهن، پس ممکن است حفاظت کاتدی مؤثر نباشد. برای جلوگیری از چنین مشکلی، ممکن است محل بستر آندی تغییر کند یا نوع آن از بستر آندی افقی به بستر آندی عمودی تغییر یابد. به‌علاوه، از آندهای آلیاژهای مقاوم، مانند آندهای تیتانیم پوشش داده شده با مخلوط اکسیدهای فلزی (MMO)، می‌توان استفاده کرد.

مثال عملی طراحی دوره □□□□ برای خطوط لوله انتقال

فولاد پوشش‌دار/یک‌سوکننده/بسترهای آندی متداول

توصیف

هدف، ساخت یک شاه لوله انتقال آب از واحد فیلتراسیون موجود به یک واحد ذخیره‌سازی جدید است. در این مسیر، چند محل تلاقی[۳۵۶] لوله‌کشی توزیع و انتقال موجود وجود خواهد داشت. این شاه لوله، شامل ۷۶۴۶ متر (۲۵۰۸۰ فوت) لوله به قطر ۹۲ سانتی‌متر (۳۶ اینچ) بین واحد فیلتراسیون و محل تلاقی به یک خط اصلی انتقال موجود هست. از محل‌های تلاقی دیگر با سامانه توزیع تا واحد ذخیره‌سازی جدید، ۶۴۰۲ متر (۲۱۰۰۰ فوت) لوله به قطر ۱۲۸ سانتی‌متر (۴۲ اینچ) ایجاد خواهد شد. ضخامت اسمی جداره لوله، ۱/۲۷ سانتی‌متر (۰/۵ اینچ) خواهند بود. نیاز به چندین انشعاب تخلیه[۳۵۷]، شیرهای هوا و شیرهای کنترل سیال نیز وجود دارد. مسیر شاه لوله، از طریق بخش‌های کشاورزی و برون شهری عبور می‌کند. چندین تقاطع با لوله‌های توزیع آب و گاز و با چندین خط لوله نفت و گاز دارای حفاظت کاتدی وجود خواهد داشت. یک سامانه ریل انتقال سریع (که با منبع جریان DC کار می‌کند) نیز وجود دارد. نباید هیچ تقاطع مستقیمی با این سامانه ریلی وجود داشته باشد. لوله‌های با اپوکسی قطران[۳۵۸] پوشش داده شده و به‌صورت مکانیکی به یکدیگر متصل می‌شوند. طول اتصالات لوله، ۱۲/۲ متر (۴۰ فوت)

3	. □□□□□□□□□□□□□□□□	5
3	□□□ □□□ □□□□□	5
3	□□□ □□□□□□□□□□□□□□	5

6
7
8

می‌باشند. تأسیسات آب نیازمند حداقل طول عمر ۴۰ سال از این شاه لوله است. به‌عنوان یک مهندس خوردگی، این طراحی را مرور کنید و پیشنهادهای خود را برای کنترل خوردگی ارائه دهید.

روش

۱- طراحی‌ها و مشخصات فنی خط لوله را مرور کنید. ۲- ارزیابی پیش از ساخت را برای مقدمات خاک، منابع جریان، مکان سازه‌های خارجی، فعالیت جریان سرگردان و توپوگرافی کلی انجام دهید. سوابق موجود درباره خوردگی تجهیزات زیرزمینی در منطقه مورد نظر را مرور کنید. ۳- طراحی مفهومی برای کنترل خوردگی ایجاد کنید ۴- مکان‌های اتصالات عایق الکتریکی و ایستگاه‌های آزمون کنترل خوردگی را تعیین کرده و مشخصات فنی ساخت برای موارد کنترل خوردگی مربوط به شاه لوله انتقال آب را آماده کنید. ۵- آزمون‌های میدانی برای خط انتقال آب انجام دهید. ۶- سامانه حفاظتی را فعال کنید.

پارامترهای پیش از ساخت

عوامل طراحی لوله	
ماده	فولاد کربنی
پوشش	قطران و نوارپیچی
اتصال	اتصالات مکانیکی
متعلقات	تعداد محدود
اتصال‌ها[۳۵۹]	چندین ولو
ابعاد	۷۶۵۰ متر لوله به قطر ۹۲ سانتی‌متر و ضخامت ۱/۲۷ سانتی‌متر ۶۴۵۰ متر لوله به قطر ۱۲۸ سانتی‌متر و ضخامت ۱/۲۷ سانتی‌متر
مساحت	۴۸۰۴۸ مترمربع

پارامترهای محیطی (از ارزیابی پیش از ساخت)	
مقاومت	۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ اهم سانتی‌متر (میانگین ۵۰۰۰ اهم سانتی‌متر)
رطوبت	در کل سال
دما (۱۸- تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد)	دما
جریان‌های سرگردان	در واحدهای موجود وجود دارد.
تاریخچه‌های خوردگی	نفوذهای ۹/۵ میلی‌متر (۰/۳۷۵ اینچ) و ۱۲/۷ میلی‌متر (۰/۵ اینچ) در جداره لوله برای لوله‌هایی با طول عمر ۲۰ و ۳۰ سال

3 5 9

خلاصه داده‌ها و چک لیست، در انتهای این طراحی آمده است. از این اطلاعات می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد:

۱- برای لوله‌های بدون حفاظت با طول عمر ۲۰ تا ۳۰ سال، باید انتظار خوردگی داشت. اگر انتظار طول عمر بالا از این خط لوله می‌رود، نیاز به حفاظت کاتدی خواهد بود.

۲- جریان سرگردان ناشی از سامانه‌های انتقال جرم در منطقه، بر شاه لوله آب تأثیرگذار خواهد بود. میزان واقعی این اثر را نمی‌توان قبل از ساخت خط تعیین کرد.

۳- تعداد محدود محل‌های تلاقی با لوله‌های دیگر، اعمال عایق الکتریکی برای خط انتقال را تبدیل به یک گزینه عملی می‌کند.

۴- حتی با یک پوشش باکیفیت بالا، تعداد زیاد اتصال‌ها (شیر، شیرهای هوا، اتصالات مکانیکی و خروجی‌ها) منجر به نشتی جریان لوله به خاک می‌شود. در مقاومت خاک متوسط ۵۰۰۰ اهم سانتی‌متر، انتظار نمی‌رود که هدایت پوشش کمتر از مقدار زیر باشد:

$$g'A = 5/0 \times 10^{-4}/5 = 1/0 \times 10^{-4}\text{Siemens/m}^2 \times (9/3 \times 10^{-6}\text{Siemens/ft}^2)$$

برای کل خط انتقال با مساحت ۴۸۰۴۸ مترمربع، پایین‌ترین هدایت مورد انتظار نسبت به زمین بدین صورت خواهد بود:

$$G=g'A_s = 1/0 \times 10^{-4}\text{S/m}^2 \times 48048m^2 = 4/8\ \text{Siemens}$$

$$R = 1/G = \frac{1}{4/8} = 0/21\text{ohm}$$ مقاومت نسبت به زمین

پوشش ضعیف می‌تواند هدایت آن نسبت به زمین را به مقدار زیر برساند:

$$g' = \frac{5/0 \times 10^{-3}}{5} = 1/0 \times 10^{-3}\text{Siemens/m}^2 \times (9/3 \times 10^{-5}\text{Siemens/ft}^2) = 1/04$$

$$G=g'A_s = 1/0 \times 10^{-3}\text{S/m}^2 \times 48048m^2 = 48\ \text{Siemens}$$

$$R = 1/G = 1/48S = 0/21\text{ohm}$$ مقاومت نسبت به زمین برای کل خط

۵- نمی‌توان برای ایجاد هدایت الکتریکی بین لوله‌ها به اتصالات مکانیکی تکیه کرد. اگر باید برای خط انتقال از حفاظت کاتدی استفاده کرد، به سیم اتصال ۳ژ طول این نقاط نیاز خواهد بود.

۶- نباید قبل از شروع عملیات ساخت، منابع جریان حفاظت کاتدی را طراحی کرد. چندین پارامتر نامعلوم مهم (جریان سرگردان، اندازه و الگو، کیفیت پوشش و مجاورت سازه‌های دیگر با خط آب) وجود دارند که می‌توانند بر طراحی تأثیرگذار باشند.

معیارهای کنترل خوردگی (علاوه بر پوشش) که برای مرحله ساخت لوله مورد نیاز هستند، در ادامه آمده است:

۱- نصب اتصالات عایق در انتهای خط انتقال و در تمام محل‌های تلاقی و انشعابات از خط اصلی. باید در هرکدام از این اتصالات عایق، یک ایستگاه آزمون نصب شود.

جدول ۹-۲ نمونه‌ای از مقادیر هدایت نشتی ویژه برای پوشش‌های حفاظتی در خاک با مقاومت ۱۰۰۰ اهم سانتی‌متر

3 6 0

خطوط لوله طولانی با اتصال‌های کم	هدایت ویژه متوسط پوشش (g')	
	زیمنس/فوت‌مربع	زیمنس/مترمربع
کیفیت پوشش		
عالی	$< 1 \times 10^{-5}$	$> 1 \times 10^{-4}$
خوب	1×10^{-5} تا 5×10^{-5}	1×10^{-4} تا 5×10^{-4}
متوسط	5×10^{-5} تا 1×10^{-4}	5×10^{-4} تا 1×10^{-3}
ضعیف	$> 1 \times 10^{-4}$	$> 1 \times 10^{-3}$
لوله لخت (۲ تا ۱۲ اینچ)	4×10^{-3} تا 2×10^{-2}	4×10^{-2} تا 2×10^{-2}
توزیع گاز یا آب با تعداد زیادی اتصال		
کیفیت کار		
عالی	$< 5 \times 10^{-5}$	$< 5 \times 10^{-4}$
خوب	5×10^{-5} تا 1×10^{-4}	5×10^{-4} تا 1×10^{-3}
متوسط	1×10^{-4} تا 5×10^{-4}	1×10^{-3} تا 5×10^{-3}
ضعیف	$> 5 \times 10^{-4}$	$> 5 \times 10^{-3}$
لوله لخت (۲ تا ۱۲ اینچ)	2×10^{-2} تا 4×10^{-3}	2×10^{-1} تا 4×10^{-2}

۲- باید در طول تمام اتصالات مکانیکی در لوله، اتصال الکتریکی برقرار شود[۳۶۱]. برای حصول اطمینان باید حداقل دو سیم مسی N9.2 AWG برای هر اتصال نصب شوند. مقاومت خطی لوله فولادی (با فرض مقاومت $2/06 \times 10^{-5}$ اهم سانتی‌متر برای فولاد) برای هر اتصال (واحد طول) بدین صورت است:

$$R_P = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho.L}{\frac{\pi}{4}(OD^2 - ID^2)}$$

که R_P مقاومت طولی لوله، ρ مقاومت ویژه فولاد، L طول خط لوله، A سطح مقطع فولاد، OD قطر خارجی لوله و ID قطر داخلی لوله است. برای لوله به قطر ۹۲ سانتی‌متر و ضخامت جداره ۱/۲۷ سانتی‌متر:

$$R_p = \frac{2/06 \times 10^{-5}\text{ohm.cm} \times 1220\text{cm}}{\frac{\pi}{4}((92\text{cm})^2 - (89/46)^2)} = 0/00007\text{ohms/unit} = 7 \times 10^{-5}$$
$$= \text{ohms/unit}$$

برای لوله به قطر ۱۲۸ سانتی‌متر و ضخامت جداره لوله ۱/۲۷ سانتی‌متر:

3 6 1

$$R_p = \frac{2/06 \times 10^{-5}\text{ohm.cm} \times 1220\text{cm}}{\frac{\pi}{4}((128\text{cm})^2 - (12.46)^2)} = 0/00007\text{ohms/unit} = 5 \times 10^{-5}$$
$$= \text{ohms/unit}$$

مقاومت سیم مسی No.2 AWG به طول ۴۶ سانتی‌متر:

$$R_B = \frac{R_w.\mathrm{L}_w}{N_w}$$

که R_B مقاومت کل اتصال الکتریکی، R_w مقاومت سیم در واحد طول، L_w طول کل اتصال الکتریکی، N_wتعداد سیم‌های موازی است.

$$R_B = \frac{7/9 \times 10^{-6}\,\frac{\text{ohm}}{\text{cm}} \times 46\text{cm}}{2} = 0/000018\text{ohms/bond} = 1/8 \times 10^{-4}$$
$$= \text{ohms/bond}$$

علاوه بر مقاومت‌های لوله و اتصال الکتریکی، مقاومت ناشی از جمع شدن جریان در اطراف نقطه جوش اتصال در جداره لوله نیز وجود دارد. این اثر، مقاومت «محاطی» نامیده می‌شود. مقاومت محاطی را می‌توان با رابطه زیر تخمین زد:

$$R_f = 2 \times \mathrm{OD} \times \mathrm{R}_L \times \ln\left(\frac{\mathrm{OD}}{\mathrm{N}\ \mathrm{d}_b}\right)$$

که R_f مقاومت محاطی (اهم)، OD قطر خارجی لوله (سانتی‌متر)، R_L مقاومت خطی لوله، N تعداد اتصال‌های الکتریکی در هر اتصال و d_b قطر انتهای جوش اتصال (سانتی‌متر) است. مقاومت محاطی برای اکثر لوله‌های فولادی، بین $1/0 \times 10^{-5}$ تا 3×10^{-5} اهم در هر اتصال بوده و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. در این مثال، مقاومت محاطی قابل صرف‌نظر است. با توجه به این محاسبات، اکثر مقاومت خطی لوله، مربوط به اتصال‌های الکتریکی است.

۳- ایستگاه‌های آزمون اندازه‌گیری جریان باید تقریباً در هر ۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متر در امتداد خط نصب شوند. ایستگاه‌های آزمون، برای کنترل خوردگی به خصوص وقتی که جریان‌های سرگردان حضور داشته باشند، اهمیت دارند.

۴- حداقل ۳۰ سانتی‌متر فاصله بین سازه‌های زیرزمینی متقاطع (لوله‌ها، کابل‌ها و غیره) وجود داشته باشد. یک پد دی‌الکتریک بین (و نه در تماس با) خط آب و سازه دیگر قرار داده شود. این کار فاصله الکتریکی بین سازه‌ها را افزایش داده و منجر به کاهش تداخل خورندگی می‌گردد.

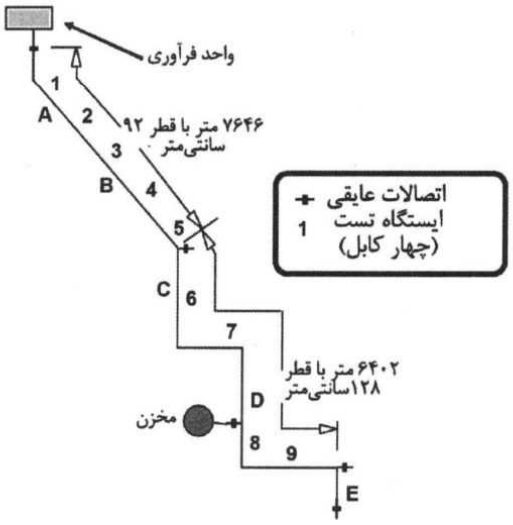
پارامترهای پس از ساخت

شکل ۹-۷، نمای کلی خط انتقال آب است. مکان‌های عدد گذاری شده، ایستگاه‌های آزمون افت اهمی (که جریان را اندازه‌گیری می‌کنند) می‌باشند (سیم چهارم) که در حدود ۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متر از یکدیگر فاصله دارند. آزمون‌های اول، برای ارزیابی پیوستگی الکتریکی و عایق بودن خط می‌باشند. در مکان E (شکل ۹-۷)، یک خط لوله گاز جوشکاری شده بدون پوشش وجود دارد. مقاومت بین خط لوله آب و خط لوله گاز، ۰/۱۸۰ اهم است. ۰/۱۶۸ اهم از این مقاومت، مقاومت بین خط لوله آب و زمین دور[۶۲]و[۳] ۰/۰۱۲ اهم، مقاومت خط لوله گاز و زمین دور است. فرایند اندازه‌گیری، توسط اعمال یک جریان

3 □□□ □□ □□□□□□□□ 6 2

معلوم بین خط لوله گاز و خط لوله آب که از یکدیگر عایق شده‌اند (از لحاظ الکترود)، انجام می‌گیرد. از تقسیم تغییر سریع پتانسیل لوله نسبت به زمین بر جریان اعمالی، تقریب مناسبی از مقاومت‌های نسبی دو سازه نسبت به زمین به دست می‌آید. الکترود مرجع به کار رفته برای اندازه‌گیری تغییر پتانسیل لوله نسبت به زمین باید تا حد ممکن از هر دو سازه فاصله داشته باشد. به‌صورت ایدئال، الکترود مرجع باید به اندازه‌ای دور باشد که افزایش بیشتر فاصله منجر به تغییر در مقادیر اندازه‌گیری شده نشود. در این زمان، آزمون‌ها نشان می‌دهند که پتانسیل بین خط لوله آب و گاز، بین ۰/۵ + ولت و ۰/۵ – ولت متغیر است. رابطه این پتانسیل با پتانسیل خط لوله آب نسبت به الکترود مرجع نزدیک به نقطه E نشان می‌دهد که ضرورتاً تمام فعالیت، در پتانسیل خط لوله آب نسبت به زمین است.

جدول ۹-۳، درصد جریان آزمون اعمالی بین خط لوله آب و خط لوله گاز در ایستگاه‌های آزمون افت اهمی در امتداد خط لوله آب را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۷ نمای خط پوشش‌دار انتقال آب

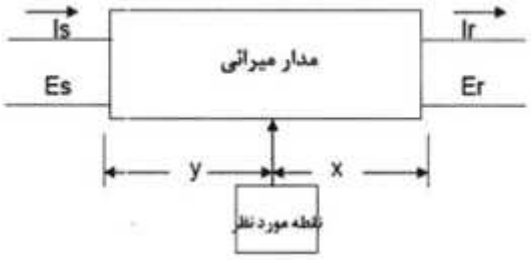
جدول ۹-۳ تغییر آزمون

شماره ایستگاه آزمون	فاصله از □ (کیلومتر)	درصد جریان آزمون در خط
۹	۰/۴	۹۳/۰
۷	۲/۳۵	۸۰/۰
۶	۴/۱۸	۶۴/۳
۵	۶/۴۰	۴۱/۳
۴	۷/۹۰	۳۰/۴
۲	۹/۷۰	۱۳/۰

۱	۱۲/۶	۸/۶

تغییر پتانسیل لوله به خاک در واحد فرآوری، ۰/۰۶ ولت بر آمپر است.

این داده‌ها نشان‌دهنده میرایی قابل توجه جریان در طول خط لوله آب هستند. برای تخمین مقاومت مشخصه سامانه (R_G)، از معادلات ارائه شده در فصل قبل استفاده می‌شود. رابطه‌ها در اینجا دوباره آمده‌اند (شکل ۹–۸). معادله ۶ شکل ۹–۸، روشی برای تخمین R_G ارائه می‌دهد.



شکل ۹–۸ رابطه‌های میرایی DC

ثابت میرایی یا انتشار $\alpha = \sqrt{\mathrm{rg}}$

مقاومت مخصوص (اهم) $R_G = \sqrt{\frac{r}{g}}$

مقاومت خطی واحد، (اهم/واحد طول) R =

هدایت واحد نسبت به زمین، (زیمنس/واحد طول) g =

تعداد واحدها طول از انتها گیرنده X=

تعداد واحدهای طول از انتهای فرستنده Y=

پتانسیل انتهای گیرنده $= E_r$	۱) $\mathrm{E}=\mathrm{E}_r\cosh(\mathrm{ax})+\mathrm{R}_G I_r\sinh(\mathrm{ax})$
جریان انتهای گیرنده $= I_r$	۲) $\mathrm{E}=\mathrm{E}_r\cosh(\mathrm{ax}) + \left(\frac{E_r}{R_G}\right)\sinh(\mathrm{ax})$
پتانسیل انتهای فرستنده $= E_s$	۳) $\mathrm{E}=\mathrm{E}_s\cosh(\mathrm{ay})\text{-}\mathrm{R}_G I_s\sinh(\mathrm{ay})$
جریان انتهای فرستنده $= I_s$	۴) $\mathrm{I}=\mathrm{I}_s\cosh(\mathrm{ay}) - \left(\frac{E_s}{R_G}\right)\sinh(\mathrm{ay})$
مقاومت خط باز $= R_{\mathrm{so}}$	۵) $R_G = R_{\mathrm{so}}\coth(\mathrm{ax})$
مقاومت خط کوتاه شده $= R_{\mathrm{ss}}$	۶) $R_G = \sqrt{R_{\mathrm{so}}R_{\mathrm{ss}}}$

$$\mathrm{R_G} = (\mathrm{R_{SO}R_{SS}})^{0.5}$$

R_{SO}، مقاومت نسبت به زمین، اندازه‌گیری شده در مکان E و در هنگام عایق بودن لوله از واحد فرآوری است. مقدار اندازه‌گیری شده، ۰/۱۶۸ اهم بود. با ایجاد مدار کوتاه در اتصال عایق در واحد (یعنی ایجاد پیوستگی خط با واحد فرآوری) و تکرار اندازه‌گیری در E، R_{SS} به دست می‌آید. مقدار R_{SS} از این آزمون، ۰/۱۴۷ اهم است. از معادله ۶ در شکل ۹-۸:

$$R_G = (0/168\text{ohm} \times 0/147\text{ohm})^{0/5} = 0/157\text{ohm}$$

از آنجایی که $R_G = (\text{r/g})^{0/5} \Rightarrow R_g^2 = \text{r/g}$، اگر R_G معلوم باشد و بتوان r را تخمین زد، می‌توان g را محاسبه نمود. اگر فرض کنیم که واحد طول خط لوله ۱ کیلومتر باشد، تعداد اتصالات در واحد طول بدین صورت است:

$$N_j = \frac{L_u}{L_j} = \frac{1000\frac{m}{\text{unit}}}{12/2\frac{m}{\text{jt}}} = 81/96\text{jts/unit} = 82\text{jts/unit}$$

که N_j تعداد اتصال‌ها در واحد طول، L_u واحد طول و L_j طول یک اتصال است. مقاومت متوسط لوله‌ای به طول واحد، تقریباً برابر با مقدار زیر است:

$$\text{r=N}_j = \left(R_B + R_p\right) = 82(0/00018\text{ohms} + 0/00006\text{ohms}) = 0/0197\text{ohms/unit}$$

که $0/00006\text{ohms/joint}$ مقاومت متوسط دو سایز لوله است. بنابراین هدایت پوشش در واحد طول لوله برابر است با:

$$\text{g=r}/R_G^2 = 0/0197\text{ohms}/0/025\text{ohms}^2 = 0/78\text{Siemens/unit}$$

هدایت ۱۴/۱ کیلومتر خط لوله برابر با ۱۱ زیمنس است. از آنجایی که مساحت خط لوله ۴۸۰۴۸ مترمربع است، هدایت ویژه متوسط توسط پوشش در خاکی با مقاومت ۵۰۰۰ اهم - سانتی‌متر، برابر با $2/3 \times 10^{-4}$زیمنس بر متر مربع است. این عدد در خاکی با مقاومت ۱۰۰۰ اهم - سانتی‌متر، $1/15 \times 10^{-3}$ است. با مراجعه به جدول ۹-۲، هدایت نشتی ویژه لوله نسبت به زمین برای پوشش‌های حفاظتی در خاکی به مقاومت ۱۰۰۰ اهم - سانتی‌متر، کیفیت پوشش باید متوسط در نظر گرفته شود. ثابت میرایی برابر است:

$$\alpha=(\text{rg})^{0/5} = (0/0197\text{ohms} + 0/78S)^{0/5} = 0/124$$

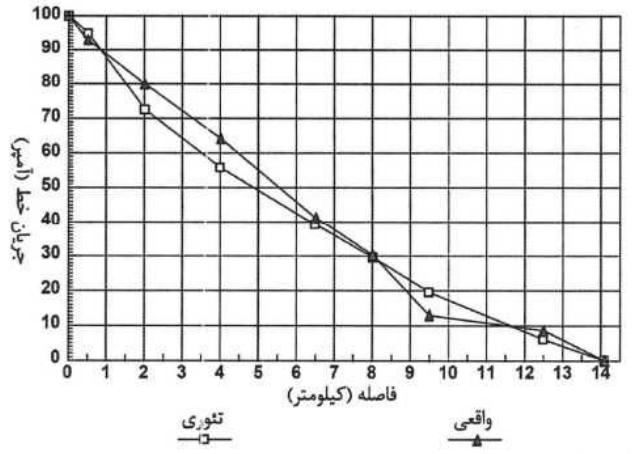
اگر معادله ۴ در شکل ۹-۸ برای مکان‌های آزمون جدول ۹-۳ به کار رود، مقادیر لیست شده در جدول ۹-۴ به دست می‌آید. برای سهولت در انجام محاسبات، جریان ۱۰۰ آمپر برای منبع جریان (I_s) به کار می‌رود. ولتاژ منبع، ۱۶/۸ ولت خواهد بود $(I_s R_{SO})$.

جدول ۹-۴ جریان تئوری

شماره ایستگاه آزمون	فاصله از □ (کیلومتر)	درصد جریان آزمون در خط
۹	۰/۴	۹۴/۸

۷	۲/۳۵	۷۲/۵
۶	۴/۱۸	۵۵/۷
۵	۶/۴۰	۳۹/۰
۴	۷/۹۰	۲۹/۵
۲	۹/۷۰	۱۹/۴
۱	۱۲/۶	۶/۰

شکل ۹-۹، نموداری است که نشان‌دهنده منحنی‌های واقعی و تئوری جریان در خط لوله انتقال است. رابطه آنها، خوب و نشان‌دهنده عدم تخلیه ناخواسته جریان به سازه‌های دیگر است.



شکل ۹-۹ نمودار میرایی جریان

تجزیه‌وتحلیل فعالیت جریان سرگردان در مسیر خط لوله تأیید می‌کند که فعال‌ترین ناحیه در نزدیکی مکان E قرار دارد. تغییرات ۰/۵ + مولتی پتانسیل خوردگی، در این ناحیه به‌صورت منظم در طول دوره‌های حداکثری جریان سرگردان رخ می‌دهد. ضروری است که جریان اعمالی حفاظت کاتدی قادر به برطرف کردن این شرایط باشد. تجربه در این ناحیه نشان داده است که جابه‌جایی ۰/۳ ولتی پتانسیل لوله نسبت به خاک، معمولاً برای پلاریزه کردن لوله فولادی در تماس با خاک کافی است. طراحی حفاظت کاتدی باید به گونه‌ای باشد که حداقل این معیار را برآورده سازد (به طور متوسط در کل خط).

میرایی در خط انتقال آب

با توجه به خواص میرایی خط باید چند منبع جریان برای حفاظت کاتدی در نظر گرفت. منحنی میرایی جریان (شکل ۹-۹) نشان می‌دهد که در حدود نیمی از جریان اعمالی به خط از یک انتها، به ۵ کیلومتر اول (یک سوم طول کل خط) می‌رسد. انتظار می‌رود که قرار دادن سه منبع جریان حفاظت کاتدی در فواصل یک ششم، سه ششم و پنج ششم از یکی از دو انتهای خط، یکنواخت‌ترین توزیع جریان را فراهم کند. مکان‌های ممکن برای بسترهای اعمال جریان، در شکل ۹-۷ با حروف A تا

Cنشان داده شده‌اند. این مکان‌ها، یک منبع تغذیه تجاری دارند و با فاصله از سایر سازه‌های زیرزمینی قرار گرفته‌اند. امکان نصب آنها در مکان‌های D و E نیز وجود دارد، اما در این مناطق با سازه‌های دیگر تداخل خواهند داشت. فاصله‌ها از انتهای خط در مکان E ، در جدول ۹-۵ نشان داده شده است.

جدول ۹-۵ مکان‌های امکان‌پذیر برای بستر

مکان در شکل ۷-۹- الف	فاصله از □ (کیلومتر)
□□	۱۲/۰
□	۸/۵
□	۵/۰
□	۲/۰
□	۰/۰

اکنون امکان استفاده از یک‌سوکننده و بستر در مکان C را بررسی می‌کنیم. C در ۹/۱ کیلومتری از واحد فرآوری و ۵ کیلومتری از E قرار دارد. برای اینکه اثرات جریان سرگردان حذف شوند باید پتانسیل لوله نسبت به خاک در نقطه E، حداقل ۰/۵ ولت منفی‌تر گردد. همچنین برای اطمینان از پلاریزاسیون خط در این مکان می‌بایست ۰/۳ ولت دیگر تغییر پتانسیل ایجاد شود. با استفاده از معادله ۱ (از شکل ۹-۸):

$$E=E_r\coth(\alpha x)+R_G I_r \sinh(\alpha x)$$

E_r برابر با ۰/۸۰۰ ولت، جابه‌جایی مورد نیاز پتانسیل لوله نسبت به زمین در نظر گرفته می‌شود. x برابر با ۵ کیلومتر، a برابر با ۰/۱۲۴، R_G برابر با ۰/۱۵۷ اهم، I_r برابر با صفر (اتصال عایق) می‌باشند، بنابراین E پتانسیل مورد نیاز لوله نسبت به زمین در $C(E=0.8V\coth(0.124\times5)+0=0.959V)$ است.

مقاومت لوله نسبت به زمین در C به سمت انتهای E، از معادله ۵ (شکل ۹-۸) به دست می‌آید:

$$R_{SO}=R_G\coth(\alpha x)=0.157\Omega\coth(0.124\times5)=0.285\Omega$$

خروجی جریانی از مسیر E بدین صورت خواهد بود:

$$I=0.959V/0.285\Omega=3.365A$$

مقاومت به سمت واحد فرآوری برابر است با:

$$R=157\Omega\coth(0.124\times9.1)=0.194\Omega$$

جریان خروجی از مسیر واحد فیلتراسیون برابر است با:

$$I=0.959V/0.194\Omega=4.94A$$

و جریان کل برابر است با (آمپر$3.365\times4.94=8.305$).

تغییر پتانسیل لوله نسبت به خاک در نقطه C از این طریق، بیش از سه برابر مقدار مورد نیاز برای پلاریزاسیون لوله است.

گزینه ۲

در ادامه یک راه حل جایگزین در نظر گرفته می‌شود. برای خنثی کردن اثرات جریان سرگردان در نقطه E از یک‌سوکننده با قابلیت کنترل پتانسیل استفاده شود تا ۰/۳۰۰ ولت تغییر پتانسیل مورد نیاز فراهم گردد. اثر سه یک‌سوکننده اضافی در مکان‌های B، A و C بررسی شود. مقاومت‌های محاسبه شده به‌سمت هرکدام از جهت‌ها از مکان یک‌سوکننده‌ها در جدول ۹-۶ آمده است.

جدول ۹-۶ مقاومت و جریان از مکان‌های ممکن برای بستر

مکان منبع	به‌سمت واحد فرآوری		به‌سمت □	
	مقاومت R_{SO} (اهم)	جریان I_s (آمپر)	مقاومت R_{SO} (اهم)	جریان I_s (آمپر)
□□	۰/۶۱۶	۰/۲۴۴	۰/۱۷۴	۰/۸۶۲
□	۰/۲۶۱	۰/۵۷۵	۰/۲۰۰	۰/۷۵۰
□□	۰/۱۹۴	۰/۷۷۳	۰/۲۸۵	۰/۵۲۶
□□	۰/۱۶۷	□□□	□□□	□□□□

فرض کنید نصف تغییر پتانسیل مورد نیاز لوله (۰/۱۵۰ ولت) در مکان‌های B ، A و C ، توسط یک‌سوکننده در آن مکان ایجاد خواهد شد. فرض کنید که اثرات ترکیبی یک‌سوکننده‌های دیگر، بقیه ۰/۳۰۰ ولت را فراهم می‌کند. با استفاده از مقادیر جریان از جدول ۵ - ۵ برای I_s و y (فاصله از منبع تغذیه تا نقطه مورد نظر در طول خط)، R_G برابر با ۰/۱۵۷ اهم، برابر با ۰/۱۲۴ و E_s برابر با ۰/۱۵ ولت می‌توان منحنی تغییر پتانسیل لوله نسبت به خاک را برای خط لوله با سه منبع تغذیه با جریان ثابت به دست آورد. این کار با استفاده از معادله ۳ در شکل ۹-۸ انجام می‌شود. پس از اینکه اثر این سه منبع (A، B و C) برای مکان E محاسبه شد، ملزومات و اثر یک یک‌سوکننده تحت کنترل پتانسیل در E را می‌توان تعیین کرد. در جدول ۹-۷ خلاصه محاسبات آمده است.

جدول ۹-۷ تغییر پتانسیل لوله نسبت به خاک ایجاد شده توسط منابع جریان

منبع	جریان (آمپر)		موقعیت لوله									
	شمال	جنوب	واحدهای فرآوری		□□		□□		□□		□	
			□ (کیلومتر)	ΔE (ولت)	□□ (کیلومتر)	ΔE (ولت)	□ (کیلومتر)	ΔE (ولت)	□ (کیلومتر)	ΔE (ولت)	y (کیلوتر)	ΔE (ولت)
□□	۰/۲۴۴	۰/۸۶۲	۲/۱	۰/۱۴۵	۰	۰/۱۵۰	۳/۵	۰/۱۰۴	۷/۰	۰/۱۰۳	۱۲	۰/۰۶۵
□	۰/۵۷۵	۰/۷۵۰	۵/۶	۰/۱۲۰	۳/۵	۰/۱۲۴	۰	۰/۱۵۰	۳/۵	۰/۱۱۲	۸/۵	۰/۰۹۳

□	۰/۷۷۳	۰/۵۲۶	۹/۱	۰/۰۸۸	۷	۰/۰۹۱	۳/۵	۰/۱۱۰	۰	۰/۱۵۰	۵	۰/۱۲۵
کل	۱/۵۹۲	۲/۱۳۸		۰/۳۵۳		۰/۳۶۵		۰/۳۶۴		۰/۳۶۵		۰/۲۸۳
□ (متغیر)	۰/۱۰۱ ۲/۹۸۰	(پایه) (حداکثر)	۱۴/۱	۰/۰۰۶ ۰/۱۷۷	۱۲	۰/۰۰۶ /۱۸۰	۸/۵	۰/۰۰۷ ۰/۲۱۵	۵	۰/۰۱۰ ۰/۲۹۰	۰	۰/۰۱۷ ۰/۵۰۰

معادله:

$$E=E_s\coth(\alpha y)-R_{SO}I_s\sinh(\alpha y)$$

ثابت‌ها: α برابر با ۰/۱۲۴، R_G برابر با ۰/۱۵۷ اهم، E_s برابر با ۰/۱۵۰ ولت.

تغییرات پتانسیل ناشی از هر منبع جریان، برای هرکدام از موقعیت‌ها جمع می‌شوند. برای مثال منبع A در واحد فرآوری، باعث ایجاد تغییر پتانسیل لوله نسبت به زمین به میزان ۰/۱۴۵ ولت می‌شود. منابع B و C، به ترتیب تغییر پتانسیل‌های ۰/۱۲۰ و ۰/۰۸۸ ولت ایجاد می‌کنند. مجموع این تغییر پتانسیل‌ها، ۰/۳۵۳ است. منبع جریان متغیر (E)، بسته به خروجی جریان در زمان، تغییر پتانسیلی بین ۰/۰۰۶ و ۰/۱۷۷ ولت ایجاد می‌کند. کل جریان تخمین زده شده برای رسیدن به حداقل ۰/۳۰۰- ولت تغییر پتانسیل لوله نسبت به خاک در طول خط انتقال، در مقایسه با یک منبع تغذیه با جریان ثابت ۸/۳ آمپر، از ۳/۸ تا ۶۷/۷ آمپر متغیر است. این جریان کل پایین‌تر، برای پوشش ضرر کمتری داشته و احتمالاً اثرات تداخل کمتری خواهد داشت.

محاسبات بستر

برای این خط لوله، بسترهای متداول پیشنهاد می‌شود. شرایط زیرزمینی، برای استفاده از آندهای عمیق مناسب نیست. شکل ۹-۱۰، نمونه‌ای از طراحی بستر آندی را نشان می‌دهد. گرافیت انتخاب خوبی برای ماده اولیه آند است. هزینه این آندها نسبتاً پایین و برای مکان‌های نسبتاً خشک انتخاب مناسبی می‌باشند. مقاومت خاک‌های سطحی در همه مکان‌ها پیشنهادی برای یک‌سوکننده‌ها بین ۵۰۰۰ تا ۷۰۰۰ اهم سانتی‌متر است؛ اما در اندازه‌گیری‌های مقاومت به دست آمده توسط روش چهار پین ونر (در حالتی که فاصله پین‌ها ۳۰ متر باشد (که برابر با طول بسترهای آندی پیشنهادی است))، مقادیر متوسط ۱۲۰۰۰ سانتی‌متر به دست آمده بود. تجربه نشان داده است که خاک‌های زیرزمین با هدایت الکتریکی پایین (صخره)، تأثیر بسیار زیادی بر مقاومت زمین برای یک بستر آندی با ابعاد بزرگ دارند. این مورد شامل طول ۳۰ متر نیز می‌شود. با قرار دادن پین‌ها در فواصلی در حدود ابعاد بستر آندی، مقادیر مقاومت لایه‌های عمیق‌تر نیز در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از رابطه دوایت برای مقاومت یک میله افقی در زمین، مقاومت بستر محاسبه می‌شود. مقاومت خاک را ۱۲۰۰۰ اهم سانتی‌متر فرض کنید.

$$R=\frac{0/005\rho}{\pi L}\left(ln\left(\frac{4L}{d}\right)+ln\left(\frac{L}{h}\right)-2+\frac{2h}{L}\right)$$

که ρ برابر با ۱۲۰۰۰ اهم سانتی‌متر (مقاومت)، L برابر با ۳۰/۵ متر (طول بستر)، d برابر با ۰/۳۰۵ متر (قطر بستر)، h برابر با ۱ متر (قطر مرکز بستر) است. در نتیجه:

$$R = 0/629[ln(400) + ln(30/5) - 2 + 0/07] = 4/4\text{ohms}$$

مطلوب است که بین آند و لوله تا حد ممکن چنین فاصله‌ای ایجاد شود. این کار برای به حداقل رساندن اثر شیب ولتاژ آند بر روی لوله است. تخمینی از افزایش ولتاژ در زمین در اثر شار جریان آند، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_r = \frac{0/005\text{I}\rho}{\pi\text{L}}\left(ln\left(\frac{L + (L^2 + r^2)^{0/5}}{r}\right)\right)$$

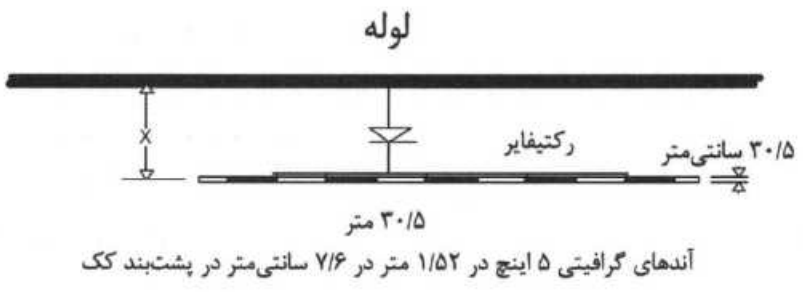
که E_r افزایش ولتاژ در فاصله r (متر) از آند، ρ مقاومت خاک (۱۲۰۰۰ اهم سانتی‌متر)، I جریان آند (۱/۲ آمپر)، L طول آند (۳۰ متر) و r فاصله شعاعی از آند (۳۰ متر) است. با توجه به الزامات عملی در مکان‌های A، B و C، فاصله X (شکل ۹-۱۰) نمی‌تواند بسیار بیشتر از ۳۰ متر باشد. افزایش تقریبی ولتاژ لوله نسبت به خاک در اثر جریان ۱/۲ آمپری آند در مکان‌های بستر آندی برابر است با:

$$E_r = \frac{0/005 \times 1/2 \times 12000}{\pi \times 30}(ln(2/41)) = 0/672\text{volts}$$

افزایش کلی ولتاژ بستر نسبت به زمین، از ضرب جریان خروجی در مقاومت بستر آندی به زمین به دست می‌آید:

$$E_T = \text{IR} = 1/2A \times 4/7\Omega = 5/64\text{volts}$$

درصد افزایش در ۳۰ متری برابر است با $(0/672V/5/64V)\%100 = \%12$، یعنی ۱۲٪ افزایش کل.



شکل ۹-۱۰ بستر آندی معمول

طراح باید در نظر داشته باشد که افزایش پتانسیل لوله نسبت به خاک به دلیل شیب ولتاژ آند، تجمع جریان بر روی سازه در عیوبی که در معرض پتانسیل‌های بیشتر هستند را افزایش خواهد داد. اگر در نواحی که پتانسیل لوله نسبت به خاک افزایش یافته، بخش قابل توجهی از فلز در تماس با خاک قرار گرفته باشد، توزیع واقعی جریان در طول سازه می‌تواند از توزیع پیش‌بینی شده توسط رابطه‌های میرایی (که در آن این انحراف‌ها از رفتار «زمین دور» در نظر گرفته نشده بود) متفاوت باشد. در واقعیت زمین دور وجود ندارد.

مقاومت لوله نسبت به زمین و مقاومت کابل‌ها، در مقایسه با مقاومت بستر آندی کوچک هستند و می‌توان آنها را نادیده گرفت. اگرچه جریان مورد نیاز برای یک‌سوکننده‌های موقعیت‌های A، B و C کمتر از ۲ آمپر و برای موقعیت E برابر ۳ آمپر است، اما لازم است که ظرفیت یک‌سوکننده‌ها بیشتر از این مقادیر باشد تا در آینده بتوان با توجه به شرایط موجود و تخریب احتمالی پوشش، جریان مورد نیاز را تنظیم کرد. همچنین ممکن است تداخل ناشی از تأسیسات دیگر ایجاد شود که برای رفع آن نیاز به هم پتانسیل کردن (ایجاد اتصال الکتریکی) سازه‌ها است. این کار بازده سامانه حفاظت کاتدی را کاهش و جریان مورد نیاز را افزایش می‌دهد. بنابراین یک‌سوکننده‌هایی با حداقل جریان ۴ آمپر باید انتخاب شوند. حداقل ولتاژ یک‌سوکننده نیز باید (ولت $18/8$ = اهم $4/7$ × آمپر $E = 4$) باشد. ازآنجاکه پتانسیل آندهای گرافیتی، در حدود ۲ ولت مثبت‌تر از فولاد است، ۱ تا ۲ ولت دیگر باید به ظرفیت یک‌سوکننده افزوده شود. بنابراین یک‌سوکننده‌های مورد نیاز، ۴ آمپر و ۲۰ ولت خواهد بود. یک‌سوکننده برای موقعیت E باید از نوع کنترل پتانسیل به‌صورت خودکار باشد.

پس از تکمیل ساخت بسترهای آندی و یک‌سوکننده، کارآیی سامانه باید آزموده شود. خروجی یک‌سوکننده‌ها در جریان طراحی مطرح می‌شوند. اثر هر یک‌سوکننده، در بحرانی‌ترین نقاط که در طول ارزیابی اولیه خط لوله انتقال تعیین شده بودند، اندازه‌گیری می‌شود. پتانسیل‌های لوله نسبت به زمین برای بررسی پلاریزه شده لوله، در نقاط مختلف اندازه‌گیری می‌شود. ازآنجاکه جریان‌های سرگردان از فعالیت‌های جابه‌جایی ریلی در لوله وجود دارد، پتانسیل‌های لوله نسبت به زمین باید در طول دوره‌های حداقل فعالیت یا توسط برون‌یابی فعالیت جریان سرگردان به صفر ارزیابی شوند (تجزیه‌وتحلیل جریان سرگردان دینامیک، در محدوده این بخش قرار ندارد). پلاریزاسیون را می‌توان با اندازه‌گیری پتانسیل لوله نسبت به یک مرجع در حالتی که تمام یک‌سوکننده‌ها روشن هستند و سپس با کم کردن اثر افت اهمی هرکدام از منابع تغذیه از عدد خوانده شده تعیین کرد. سپس پتانسیل‌های بدون افت اهمی با پتانسیل به دست آمده قبل از فعال‌سازی سامانه‌های حفاظت کاتدی مقایسه می‌شود. اگر مقدار پتانسیل حاصل قابل قبول باشد، عملکرد سامانه حفاظت کاتدی مؤثر است. برای تنظیم سامانه می‌توان از تنظیم جریان خروجی از یکی از یک‌سوکننده‌ها یا تمام آنها استفاده کرد. آزمون‌های تداخل باید در حضور نمایندگان واحدهای عملیاتی یا خطوط لوله دیگر در ناحیه انجام شود. اگر نیاز به هم پتانسیل کردن (اتصال الکتریکی) باشد، اثر حفاظت کاتدی باید مورد آزمایش قرار گرفته و تنظیمات لازم صورت بگیرد.

خلاصه داده‌ها و چک لیست

عنوان پروژه: پروژه خط لوله انتقال آب

توضیح کلی: ۷/۶۵ کیلومتر (۲۵۱۰۰ فوت) به قطر ۹۲ سانتی‌متر (۳۶اینچ) و ۶/۴۵ کیلومتر (۲۱۱۰۰ فوت) به قطر ۱۲۸ سانتی‌متر (۴۲اینچ) لوله فولادی پوشش‌دار.

تاریخچه	بلی	خیر
طراحی سازه (هنوز ساخته نشده)		
انجام ارزیابی پیش از ساخت		

سازه موجود	□□□	
انجام ارزیابی شرایط	□□	
طول عمر سازه	حداقل ۴۰ سال	

سطوحی که باید تحت حفاظت قرار بگیرند

توصیف	مساحت کل (متر مربع)
خارجی	۴۳۵۰۰
داخلی	□□
طول کل	۱۴۱۰۰ متر

مواد بکار رفته

فلز (آلیاژ)	حساس به قلیا		حساس به هیدروژن		حساس به سرعت		مساحت
	بله	خیر	بله	خیر	بله	خیر	(سانتیمترمربع)
فولاد کربنی		■		■		■	□□

روش ساخت: جوش ذوبی... مکانیکی... و گسکت‌ها...

پوشش‌های حفاظتی

نوع پوشش	ضخامت	تلرانس حفاظت کاتدی		درصد پوشش تخمین زده شده
		بله	خیر	
کول تار	۵ میلی‌متر	■		۹۵

عایق الکتریکی و اتصال به زمین

	بله	خیر
سازه عایق شده	■	
سازه می‌تواند عایق شود	■	

اگر سازه عایق شده، نیاز به محافظ تغییرات ناگهانی دارد		

محیط

توصیف	روستایی، برون‌شهری
مقاومت (اهم.سانتی‌متر)	۵۰۰۰
سرعت (سانتی‌متر/ثانیه)	□□□
دما (درجه سانتی گراد)	۲۰

	بله	خیر
منبع تغذیه تجاری در دسترس است		
سازه‌های مجاور وجود دارند		
وجود جریان‌های سرگردان		
خطر آتش‌سوزی و انفجار		

نگرانی‌های احتمالی در مورد سامانه حفاظت کاتدی

	بله	خیر
میرایی الکتریکی در سازه		
میرایی الکتریکی در آند		
تردی هیدروژنی در سازه		
تولید هیدروژن بر روی سازه		
تأثیر حفاظت کاتدی بر فرایند		
تداخل جریان سرگردان		
ملاحظات ایمنی		

فولاد بدون پوشش/یک‌سوکننده/آندهای توزیع شده

توصیف

تعدادی نشتی ناشی از خوردگی، در یک خط لوله فولادی انتقال آب (به قطر ۷۶ سانتی‌متر) رخ داده است. نشتی‌ها در یک ناحیه جمع شده و آن قسمت را مرطوب کرده بودند، در نتیجه مقاومت خاک در آنجا به ۳۰۰۰ اهم سانتی متر رسیده بود.

بررسی لوله در ناحیه نشتی نشان‌دهنده خوردگی حفره‌ای ناشی از فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی احیاکننده سولفات است. سازه زیرزمینی دیگری در این قسمت وجود ندارد. یک منبع تغذیه AC در تقاطع جاده در این ناحیه وجود دارد. ارزیابی خاک ناحیه نشان می‌دهد که خاک رس مرطوب ناشی از خوردگی، محدود به ۴۳۰ متر از لوله می‌شود. مسئله، طراحی سامانه حفاظت کاتدی برای این بخش از لوله است.

تجزیه‌وتحلیل

خط لوله از جنس فولاد بدون پوشش بوده و به‌صورت اتصال پرچی ساخته شده است؛ بنابراین نباید مشکلی در مورد پیوستگی الکتریکی در سازه وجود داشته باشد. امکان نصب اتصالات عایق در خط وجود ندارد، بنابراین نیاز به سامانه آندهای توزیع شده منظم وجود دارد. مساحت سطح لوله در تماس با بخش خورنده، در حدود ۱۰۳۰ متر مربع است. تحقیقات پیشنهاد می‌کنند که برای حفاظت کاتدی فولاد در شرایط SRB نیاز به چگالی جریان 3×10^{-6} آمپر بر سانتی‌مترمربع است. جریان مورد نیاز برای این بخش از لوله برابر است با:

$$\mathrm{I}=\mathrm{i}\times\mathrm{A}_s = 3 \times 10^{-6}\mathrm{A/cm}^2 \times 1030m^2 \times 10000\mathrm{cm}^2/m^2 = 31A$$

با استفاده از رابط دوایت، مقاومت یک سامانه آندی پیوسته از نوع نواری[۳۶۳] نسبت به زمین برابر است با:

$$\mathrm{R}=\frac{0/005\rho}{\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{4L}{d}\right)+ln\left(\frac{L}{h}\right)-2+\frac{2h}{L}\right)$$

که ρ مقاومت خاک (۳۰۰۰ اهم سانتی‌متر)، L طول بستر آندی (۴۳۰ متر)، d قطر بستر آندی (۰/۲۵متر)، h عمق بستر آندی (۱ متر) است، بنابراین:

$$\mathrm{R} = 0.011[\ln(68800) + \ln(430) - 2 + 0.0] = 0.167\mathrm{ohms}$$

حداکثر ولتاژ محرکه ناشی از منیزیم پتانسیل بالا به فولاد پلاریزه نشده، در حدود ۱/۲ ولت است. حداکثر جریان قابل دستیابی از یک آند نواری فداشونده، برابر خواهد بود با:

$$I = \frac{1/20V}{0/167\Omega}$$

این جریان در حدود ٪۲۰ جریان مورد نیاز احتمالی است. بنابراین احتمالاً سامانه آند فداشونده قادر به حفاظت از خط لوله نخواهد بود.

یک سامانه آند توزیع شده اعمال جریان را در نظر بگیرید. اگر فاصله آندها برابر با ۱۰ متر انتخاب شود، ۴۴ آند نیاز خواهد بود. با فرض اینکه حداکثر جریان مورد نیاز ۴۰ آمپر باشد، لازم است که هرکدام از آندها در حدود ۱ آمپر جریان فراهم کنند. آندها، استوانه‌ای با سیلیسیم بالا (طول ۱۰۶/۷ سانتی‌متر و قطر خارجی ۶/۷ سانتی‌متر) و مساحت آنها ۲۲۴۶ سانتی‌مترمربع است. چگالی جریان متوسط آندها، ۰/۴۴۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع است. وزن یک آند، ۱۴ کیلوگرم است. تحت بدترین شرایط، نرخ مصرف نباید بیشتر از ۰/۳ کیلوگرم بر سال بر آمپر شود. در کارایی ٪۵۰، و عمر آندها ۲۳ سال خواهد بود. برای عملکرد

3 6 3

بهتر در خاک، آندها در زغال کک (با قطر ۰/۳ متر و طول ۱/۵ متر) قرار داده می‌شوند. با استفاده از معادله ساند، تخمینی از مقاومت یک سامانه آندی توزیع شده مانند شکل ۹-۱۱ به دست می‌آید:

$$R_N = \frac{0/005\rho}{\pi NL}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2h}{L}(ln(0/656N))\right)$$

که ρ مقاومت خاک (۳۰۰۰ اهم سانتی‌متر)، N تعداد آندها (۴۴ عدد)، L طول هر آند (۱/۵ متر)، dقطر آند و پشت‌بند (۰/۳ متر) و s فاصله بین آندها (۱۰ متر) است. با این اعداد، مقاومت بستر برابر با ۰/۲۶۸ اهم به دست می‌آید.

مقاومت سیم مسی No.4 AWG، $8/2 \times 10^{-4}$اهم/متر یا $8/2 \times 10^{-3}$ اهم برای ۱۰ متر فاصله بین آندهاست. هدایت متوسط یک آند نسبت به زمین برابر است با:

$$g = 1/(44 \times 0/268) = 0/084\text{Siemens}$$

ثابت میرایی برای آند برابر است با:

$$\alpha = (\text{r.g})^{0/5} = (6/9 \times 10^{-4})^{0/5} = 0/026$$

مقاومت مشخصه برابر است با:

$$R_G = (\text{r/g})^{0/5} = 0/312ohm$$

مسیر طولانی‌تر آند از یک‌سوکننده تا موقعیت ۲ (شکل ۹-۱۱)، ۳۰۰ متر است. مقاومت این قسمت نسبت به زمین برابر است با:

$$\text{R}=\text{R}_G\coth(\alpha x) = 0/312\, coth(0/78) = 0/478\Omega$$

برای هر ولت بین آند و زمین (لوله بدون پوشش)، جریان ارسالی برابر خواهد بود با:

$$I_s = (1/0V)/(0/478\Omega) = 2/09A$$

ولتاژ محرکه آخرین آند مسیر برابر است با:

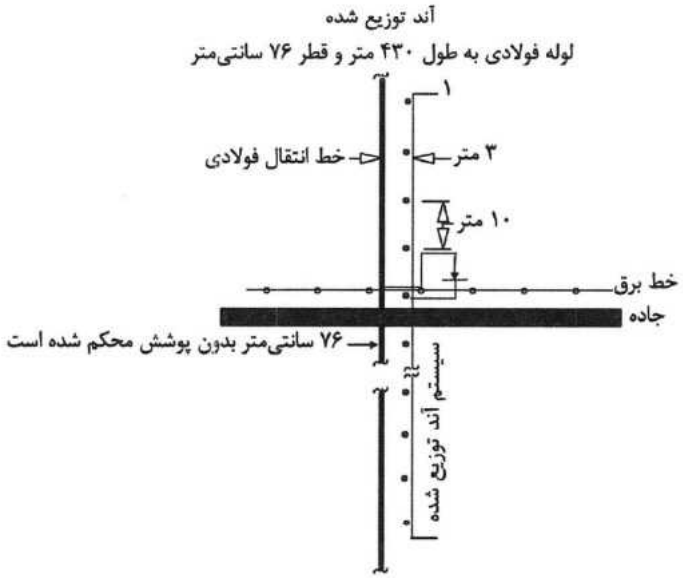
$$\text{E}=\text{E}_s = \coth(\alpha y) = R_G I_s\, sinh(\alpha y)$$
$$= 1/0V\, cosh(0/78) - 0/31\Omega \times 2/09A\, sinh(0/78) = 0/760V$$

افت ولتاژ ۲۵ درصدی در مسیر آند، در حدود بزرگ‌ترین میرایی قابل قبول است. این امر بدان معنی است که ٪۷۵ از جریانی که توسط آندی انتهایی تأمین می‌شوند، توسط آندها در انتهای منبع تغذیه فراهم می‌شوند. روش دیگری را در نظر می‌گیریم، آندهای نزدیک منبع باید ٪۳۳ بیشتر از آندهای انتهایی فعالیت داشته باشند تا جریان کافی به انتهای منطقه برسد. از آنجایی که عمر آند، تابعی از چگالی جریان است، قرار دادن آندها به سامانه‌ای که در حدود ٪۳۳ انحراف از طول عمر مورد انتظار دارد می‌تواند منجر به مشکلات نگهداری در آینده شود. سیم مسی No.4 AWG ، سیم مناسبی است.

ایستگاه‌های آزمون بر روی لوله، در انتهای مسیرهای آندی ایجاد می‌شود. همچنین می‌توان یک ایستگاه آزمون در انتهای دور سیم‌های اتصال آندها ایجاد کرد. این ایستگاه‌های آزمون باید در برابر نشت الکتریکی محافظت شوند تا از خوردگی الکترولیتی اجتناب شود.

آزمون‌ها پس از ساخت

پس از کامل کردن ساخت آند و قبل از انتخاب یک‌سوکننده، آزمون تعیین جریان لازم (E برحسب log i) انجام می‌شود. این آزمون برای سازه‌های بدون پوشش تحت شرایط موجود در این مورد، معتبر و قابل اتکا است. سپس بر اساس نتایج این آزمون، یک‌سوکننده مناسب انتخاب می‌شود. ازآنجاکه لوله بدون پوشش است، تخریب پوشش در طول زمان نخواهد داشت. جریان اولیه، ماکزیمم جریان مورد نیاز خواهد بود. پس از پلاریزاسیون لوله، جریان‌های بعدی احتمالاً کمتر خواهند بود.



شکل ۹-۱۱ سامانه آند توزیع شده

خلاصه داده‌ها و چک لیست

عنوان پروژه: حفاظت «نقاط مهم»[۳۶۴]

توضیح کلی: ۴۳۰ متر از خط لوله فولادی انتقال آب به قطر ۷۶ سانتی‌متر.

تاریخچه	بله	خیر
طراحی سازه (هنوز ساخته نشده)		
انجام ارزیابی پیش از ساخت		
سازه موجود		
انجام ارزیابی شرایط		
طول عمر سازه	۲۰ سال	

سطوحی که باید تحت حفاظت قرار بگیرند

3 6 4

توصیف	مساحت کل (مترمربع)
خارجی	۱۰۳۰
داخلی	□□
طول کل	۴۳۰ متر

مواد به کار رفته

	حساس به قلیا		حساس به هیدروژن		حساس به سرعت		مساحت
فلز (آلیاژ)	بله	خیر	بله	خیر	بله	خیر	(سانتی‌مترمربع)
فولاد کبریتی							□□

روش ساخت: جوش ذوبی... مکانیکی... گسکت‌ها...

پوشش‌های حفاظتی

نوع پوشش	ضخامت	تلرانس حفاظت کاتدی		درصد پوشش تخمین زده شده
		بله	خیر	
بدون پوشش	–			–

عایق الکتریکی و اتصال به زمین

	بله	خیر
سازه عایق شده		
سازه می‌تواند عایق شود		
اگر سازه عایق شده، نیاز به محافظ تغییرات ناگهانی دارد		□□□

محیط

توصیف	برون شهری
مقاومت (اهم سانتی‌متر)	۳۰۰۰

سرعت (سانتی‌متر/ثانیه)	□□□
دما (درجه سانتی گراد)	محیط

	بله	خیر
منبع تغذیه تجاری در دسترس است	■	
سازه‌های مجاور وجود دارند		■
وجود جریان‌های سرگردان		■
خطر آتش‌سوزی و انفجار	■	

نگرانی‌های احتمالی در مورد سامانه حفاظت کاتدی

	بله	خیر
میرایی الکتریکی در سازه		■
میرایی الکتریکی در آند	■	
تردی هیدروژنی در سازه		■
تولید هیدروژن بر روی سازه		■
تأثیر حفاظت کاتدی بر فرایند		■
تداخل جریان سرگردان		■
ملاحظات ایمنی		■

فولاد پوشش‌دار/یک‌سوکننده/آندهای عمیق

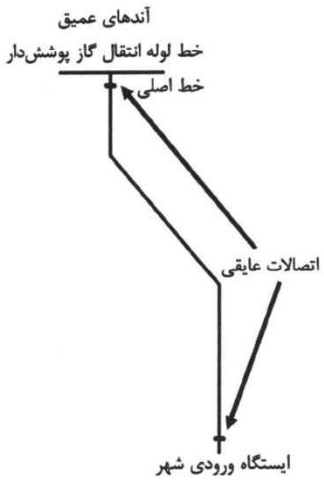
توصیف

قرار است که خط لوله گاز به طول ۱۲۱ کیلومتر، بین یک خط لوله انتقال گاز اصلی و یک ایستگاه ورودی گاز شهر ایجاد شود. قطر لوله ۴۰/۶۵ سانتی‌متر و ضخامت جداره آن ۷/۹۵ سانتی‌متر خواهد بود. در دو انتهای لوله باید اتصالات عایقی نصب شود. پوشش لوله، پلی‌اتیلن اکسترود شده با کیفیت بالا خواهد بود. مسیر خط لوله خارج از جاده اصلی است. عمر طراحی خط ۴۰ سال در نظر گرفته شده است. در مسیر خط لوله چندین تقاطع جاده‌ای (اکثراً با خطوط توزیع برق) وجود دارند. منبع تغذیه برای حفاظت کاتدی اعمال جریان نیز وجود دارد. شکل ۹-۱۲، نمای کلی خط است.

در ارزیابی پیش از ساخت مسیر پیشنهادی خط لوله، مقاومت خاک برابر با ۴۰۰۰ اهم سانتی‌متر است. مقاومت متوسط، برابر با میانگین آماری اندازه‌گیری‌های مقاومت خاک در امتداد مسیر پیشنهادی خط لوله در عمق متوسط خط لوله است. هدفی، طراحی سامانه حفاظت کاتدی است که بتوان آن را هم‌زمان با خط لوله نصب کرد.

تجزیه‌وتحلیل

خلاصه داده‌ها و چک لیست ایجاد می‌شوند. انتظار می‌رود که عدم وجود اتصالات به لوله، منجر به بالا رفتن کیفیت برقراری عایق الکتریکی شود. با توجه به طول خط لوله (۱۲۰/۷ کیلومتر) نیاز است که میرایی در طراحی سامانه حفاظت کاتدی در نظر گرفته شود. اولین گام در تجزیه‌وتحلیل طراحی، تخمین میرایی با استفاده از روابط میرایی است. تمام تغییرات پتانسیل لوله نسبت به زمین، علامت منفی دارند.



شکل ۹-۱۲ خط لوله انتقال گاز پوشش‌دار به طول ۱۲۰/۷ کیلومتر و قطر ۴۰/۶ سانتی‌متر

۱. مقاومت خطی ۱ کیلومتر (طول واحد) از لوله محاسبه شود:

$$\mathrm{r} = \frac{\rho.\mathrm{L}}{\frac{\pi}{4}(\mathrm{OD}^2 - \mathrm{ID}^2)}$$

مقاومت فولاد برابر است با $2/06 \times 10^{-5}$ اهم سانتی‌متر، بنابراین:

$$r = \frac{2/06 \times 10^{-5}\text{ohm-cm} \times 100000\text{cm}}{\frac{\pi}{4}((40/65\text{cm})^2 - (39/06)^2)} = 0/0207\text{ohms/uni}$$

۲. فرض می‌شود که پوشش با کیفیتی خوب و با هدایت نشتی ویژه 1×10^{-4} زیمنس/مترمربع در خاک با مقاومت ۱۰۰۰ اهم سانتی‌متر است. هدایت طول واحد خط لوله در خاک با مقاومت ۴۰۰۰ اهم سانتی‌متر برابر است با:

$$\mathrm{g}=\mathrm{g}' \times A_S/4 = 1 \times 10^{-4}\mathrm{S/m^2}(3/14 \times 0/406m \times 1000m)/4 = 0/032\ /\text{unit}$$

۳. ثابت میرایی برابر است با:

$$\alpha = (r \times g)^{0/5} = (0/0207\Omega \times 0/032S)^{0/5} = 0/0257$$

۴. مقاومت مشخصه برابر است با:

$$R = (\mathrm{r/g})^{0/5} = \left((0/0207\Omega)/(0/032S)\right)^{0/5} = 0/804\mathrm{ohm}$$

۵. میرایی از یک بستر آندی در مرکز خط لوله محاسبه می‌شود. مقاومت از هر سمت مرکز برابر است با:

$$R_{\mathrm{so}} = R_G \coth(\alpha x) = 0/804\Omega\, coth(0/0257 \times 60/5) = 0/879\mathrm{ohm}$$

جریان در دو جهت از مرکز برای ایجاد ۱/۰ ولت تغییر پتانسیل در منبع برابر است با (جریان کل منبع، ۲/۲۸ آمپر است):

$$I_s = \mathrm{E}_s/\mathrm{R}_{\mathrm{so}} = 1/0V/0/878\Omega = 1/14A$$

تغییر پتانسیل در دو انتهای خط لوله برای ۱/۰ ولت تغییر پتانسیل در منبع برابر است با:

$$\mathrm{E} = \mathrm{E}_s \coth(\alpha y) - \mathrm{R}_G I_s\, sinh(\alpha y) = 1/0V\, cosh(1/55) - 0/804\Omega \times 1/14A\, sinh(1/55) = 0/400V$$

یک منبع تغذیه در مرکز خط لوله یا در نزدیکی آن می‌تواند از کل خط تحت این شرایط مفروض بدون ایجاد حفاظت اضافی[۳۶۵]در بخش مرکزی محافظت کند. اگر کیفیت پوشش پایین‌تر از حد مورد انتظار باشد، میرایی می‌تواند به طور قابل توجهی بیشتر شود. با گذشت عمر خط لوله، هدایت لوله نسبت به خاک افزایش یافته و منبع تغذیه حفاظت کاتدی، وظیفه رساندن جریان به دو انتهای خط لوله را خواهد داشت.

۶. سامانه‌ای با دو منبع تغذیه که در ایستگاه‌های ۳۰ و ۹۰ کیلومتری از خط لوله نصب شده‌اند، بررسی خواهد شد. مقاومت و توزیع جریان ناشی از هرکدام از منبع تغذیه‌ها محاسبه می‌شود. با ۳۰ کیلومتر که حرکت به سمت انتهای عایق شده از منبع تغذیه‌ها داریم:

$$R_{\mathrm{so}} = R_G \coth(\alpha x) = 0/804\Omega\, coth(0/0257 \times 30) = 1/242\mathrm{ohm}$$

$$I_s = \mathrm{E}_s/\mathrm{R}_{\mathrm{so}} = 1/0V/1/242\Omega = 0/805A$$

برای x برابر با ۹۰ کیلومتر:

$$R_{\mathrm{so}} = R_G \coth(\alpha x) = 0/804\Omega\, coth(0/0257 \times 90) = 0/820\mathrm{ohm}$$
$$I_s = (1/0V)/(0/820\Omega) = 1/220A$$

هرکدام از منبع تغذیه‌ها، پتانسیل انتهای خط خود را به مقدار زیر جابه‌جا می‌کنند (y برابر با ۳۰ کیلومتر):

$$\mathrm{E} = \mathrm{E}_s \cosh(\alpha y) - \mathrm{R}_G \mathrm{I}_s \sinh(\alpha y) = 1V \cosh(0.771) - (0.804\Omega \times 0.805\mathrm{A}) \sinh(0.771) = 0.762\mathrm{V}$$

و هرکدام از منبع تغذیه‌ها، پتانسیل انتهای دیگر خط را به مقدار زیر جابه‌جا می‌کنند (y برابر با ۹۰ کیلومتر):

$$\mathrm{E} = \mathrm{E}_s \cosh(\alpha y) - \mathrm{R}_G I_s \sinh(\alpha y) = 1V\, cosh(2/313) - (0/804\Omega \times 01/220A)\, sinh(2/313) = 0/195V$$

بنابراین کل تغییر پتانسیل در دو انتهای خط برابر است با:

3 6 5

$$E=0/762V + 0/195V = 0/957v\text{olts}$$

در موقعیت هرکدام از منبع تغذیه‌ها، ۰/۱ ولت به اضافه مقدار زیر ناشی از منبع دیگر، پتانسیل جابه‌جا می‌شود (y برابر با ۶۰ کیلومتر):

$$E=E_s\cosh(\alpha y)\text{-}R_G I_s\sinh(\alpha y) = 1/0V\ cosh - 0/804\Omega \times 1/220A\ sinh(1/542) = 0/257V$$

در نتیجه میزان تغییر پتانسیل در موقعیت هرکدام از منبع تغذیه‌ها برابر است با:

$$E=1/000V + 0/257V = 1/25\text{volts}$$

تغییر پتانسیل در مرکز خط لوله از هرکدام از منابع تغذیه برابر است با (y برابر با ۳۰ کیلومتر):

$$E=E_s\cosh(\alpha y)\text{-}R_G I_s\sinh(\alpha y) = 1V\ cosh(0/771) - (0/804\Omega \times 1/22A)\ sinh(0/771) = 0/479V$$

بنابراین کل تغییر پتانسیل در مرکز خط لوله برابر است با:

$$E=0/479V + 0/479V = 0/958\text{volts}$$

نسبت بیشترین تغییر پتانسیل خط لوله به کمترین تغییر پتانسیل آن در حرکت یک منبع تغذیه و دو منبع تغذیه، به ترتیب برابر است با $(2/5 = 0/4 \div 1)$ و $(1/31 = 0/957 \div 1/257)$ تمام تغییرات پتانسیل نسبت به زمین، مقادیر منفی دارند. توزیع پتانسیل برای حالت یک منبع تغذیه، به طور قابل توجهی بهتر است.

نصب آند عمیق

در مثال ذکر شده، جای مناسبی برای نصب بسترهای آندی معمولی وجود ندارد. آزمون‌های مقاومت لایه بارنس[۶۶] نشان‌دهنده وجود لایه زیرزمینی بین اعماق ۵۰ تا ۸۰ متری در هر دو موقعیت ۳۰ کیلومتر و ۹۰ کیلومتر با مقاومت ۱۰۰۰ تجزیه‌وتحلیل می‌باشند. بنابراین استفاده از آندهای عمیق، گزینه مناسبی برای اجرای سامانه حفاظت کاتدی خط لوله است.

طراحی نشان داده شده در شکل ۹-۱۳، مناسب است. در طول طراحی آندهای عمیق لازم است که تمام مقررات محیط زیستی مربوط به آلوده نشدن آب‌های سطحی و زیرزمینی در نظر گرفته شود. بعد x، ۵۰ متر خواهد بود (میزان عمق تا لایه با مقاومت ۱۰۰۰ اهم سانتی‌متر). میزان جریان تخمین زده شده مورد نیاز (در حدود ۱/۰ آمپر از هرکدام از بسترها) پایین است. به منظور در نظر گرفتن کیفیت پایین پوشش و تخریب پوشش در آینده، هرکدام از بسترها باید به گونه‌ای طراحی شوند که ظرفیت ۴/۰ آمپری داشته باشند. برای این پروژه، ماده اولیه آند اهمیت اساسی ندارد. در این مورد برای حصول اطمینان بیشتر، ۴ آند جداگانه ۳ متری در هر بستر نصب می‌شود. هرکدام از آندها باید نیمی از کل جریان بستر (۲ آمپر) را در طول عمر طراحی خود فراهم کنند. طول عمر بیشتر از ۲۰ سال برای سامانه آند عمیق، تقریباً امکان پذیر نیست. برای این بسترها، هرکدام از آندهای اولیه

3 [illegible] 6 6

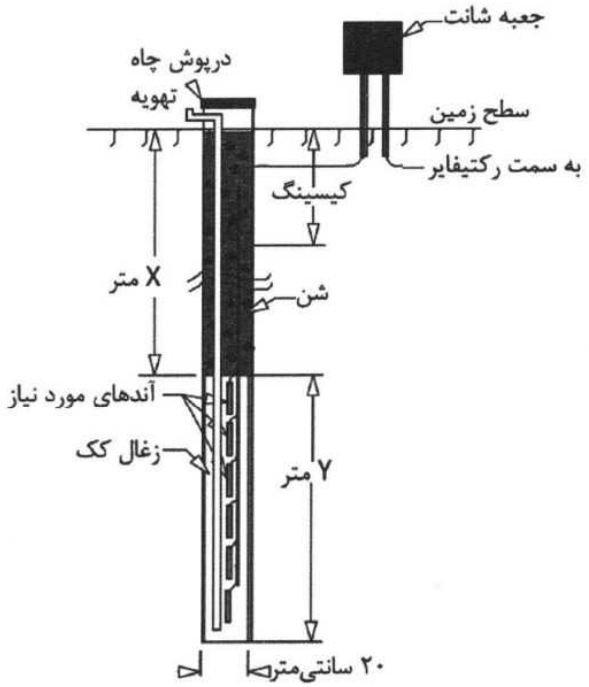
باید به گونه‌ای انتخاب شوند که بتوانند با جریان متوسط ۲ آمپر، در حدود ۲۰ سال کار کنند. چگالی جریان باید در حدود ماده انتخاب شده برای آند باشد.

بعد y برابر با ۱۲ متر $(4 \times 3 = 12)$ است. با استفاده از رابطه دوایت برای یک میله (لوله) عمودی در زمین داریم:

$$\mathrm{R}=\frac{0/005\rho}{\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right)$$

که بالای آند در سطح زمین است ρ برابر با ۱۰۰۰ اهم سانتی‌متر، L برابر با ۱۲ متر و d برابر با ۰/۲ متر است. بنابراین:

$$R = (0/133\Omega)(5/175) = 0/69\mathrm{ohm}$$



شکل ۹-۱۳ نصب آند عمیق.

معادله بالا، بر اساس یک آند است که از سطح زمین به‌سمت پایین امتداد دارد. معادله دیگری برای وقتی وجود دارد که کل الکترود (بستر آندی) بی‌نهایت عمیق است. این معادله بدین صورت است:

$$\mathrm{R}=\frac{0/005\rho}{\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{4L}{d}\right)-1\right)$$

که در این معادله، بالای آند بی‌نهایت عمیق است. با استفاده از معادله برای مورد حاضر داریم:

$$R = (0/133\Omega)(4/481) = 0/596\mathrm{ohm}$$

مقاومت محتمل برای یک آند عمیق، بین این مقادیر است. با فرض مقادیر معادله اول (استاندارد)، ولتاژ مورد نیاز یک‌سوکننده برابر است با:

$$E=IR=4A \times 0/69\Omega = 2/75volts$$

با در نظر گرفتن ولتاژ برگشتی لوله به‌سمت آند (در حدود ۲/۰ ولت)، یک‌سوکننده‌ای با خروجی جریان ۰ تا ۴ آمپر و ولتاژ ۵ تا ۶ ولت می‌بایست انتخاب شود. در خطوط لوله طویل مانند مورد اخیر، تجهیزات پایش و کنترل خوردگی زیر نیز مورد نیاز می‌باشند:

- حفاظت در برابر صاعقه برای اتصالات عایق و یک‌سوکننده‌ها
- ایستگاه‌های آزمون در تمام تقاطع‌ها با خطوط لوله دیگر یا سامانه‌های کابلی.
- ایستگاه‌های آزمون جریان (افت اهمی) در همه یا اکثر تقاطع‌های جاده‌ای.
- برنامه‌ای منظم برای پایش کارایی سامانه حفاظت کاتدی.

خلاصه داده‌ها و چک لیست

عنوان پروژه: حفاظت کاتدی با بستر آندی عمیق

توضیح کلی: ۱۲۰/۷ کیلومتر خط لوله انتقال گاز پوشش‌دار به قطر ۱۲۰/۷ سانتی‌متر (۴۰/۶ اینچ).

تاریخچه	بله	خیر
طراحی سازه (هنوز ساخته نشده)		
انجام ارزیابی پیش از ساخت		
سازه موجود	□□	
انجام ارزیابی شرایط	□□	
طول عمر سازه	۴۰ سال	

سطوحی که باید تحت حفاظت قرار بگیرند

توصیف	مساحت کل (متر مربع)
خارجی	۱۵۱۶۸۰
داخلی	□□
طول کل	۱۲۰۷۰۰ متر

مواد به کار رفته

فلز آلیاژ	حساس به قلیا		حساس به هیدروژن		حساس به سرعت		مساحت
	بله	خیر	بله	خیر	بله	خیر	(سانتی‌مترمربع)
فولاد کربنی							□□□

روش ساخت: جوش ذوبی... مکانیکی... گسکت‌ها...

پوشش‌های حفاظتی

نوع پوشش	ضخامت	تلرانس حفاظت کاتدی		درصد پوشش تخمین زده شده
		بله	خیر	
پلی اتیلن	۱/۲میلی‌متر			۹۹

عایق الکتریکی و اتصال به زمین

	بله	خیر
سازه عایق شده		
سازه می‌تواند عایق شود		
اگر سازه عایق شده، نیاز به محافظ تغییرات ناگهانی دارد		

محیط

توصیف	روستایی
مقاومت (اهم سانتی‌متر)	۴۰۰۰
سرعت (سانتی‌متر/ثانیه)	□□
دما (درجه سانتی گراد)	محیط

	بله	خیر
منبع تغذیه تجاری در دسترس است		
سازه‌های مجاور وجود دارند		
وجود جریان‌های سرگردان		
خطر آتش‌سوزی و انفجار		

نگرانی‌های احتمالی در مورد سامانه حفاظت کاتدی

	بله	خیر

میرایی الکتریکی در سازه	■	
میرایی الکتریکی در آند		■
تردی هیدروژنی در سازه		■
تولید هیدروژن بر روی سازه		■
تأثیر حفاظت کاتدی بر فرایند		■
تداخل جریان سرگردان	■	
ملاحظات ایمنی	■	

فولاد پوشش‌دار/آندهای توزیع شده منیزیمی

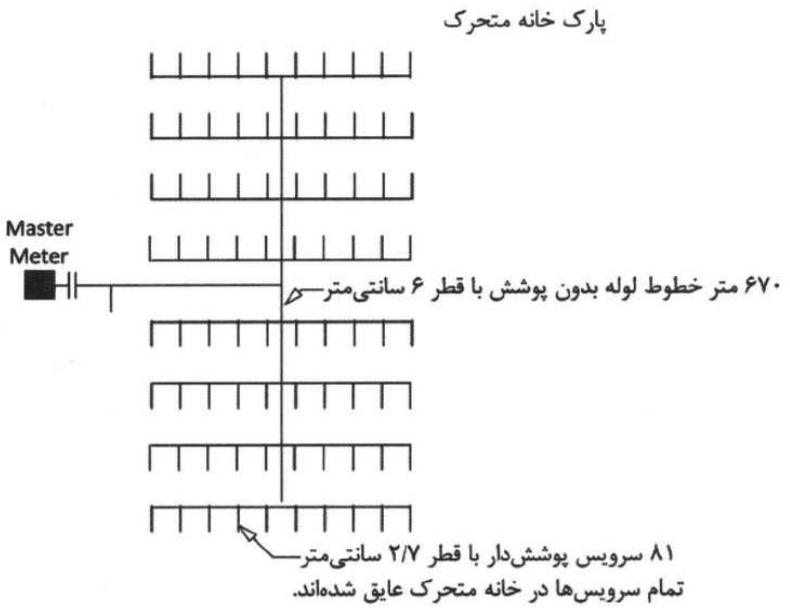
توصیف

یک پارک خانه‌های متحرک، دچار افزایش نشتی در سرویس‌های فولادی شده است. مشخص شده که علت نشتی‌ها، خانگی است. کل سامانه گاز شامل ۶۷۰ متر خط لوله اصلی به قطر ۶ سانتی‌متر و ۸۱ شاخه لوله ۳ تا ۹ متری به قطر ۲/۷ سانتی‌متر است. تمام سرویس‌های دارای ضخامت نسبتاً کم، با لوله‌های فولادی دارای پوشش اپوکسی با همان سایز تعویض شده‌اند. سرویس‌ها مستقیماً به خط فولادی قدیمی بدون پوشش متصل شده‌اند، اما در درون خانه عایق شده‌اند. یک اتصال عایق، در مستر متر[۳۶۷] برای پارک نصب شده است. نمای کلی پارک خانه‌های متحرک در شکل ۹-۱۴ آمده است. هدف در این قسمت، طراحی سامانه حفاظت کاتدی با طول عمر حدوداً ۲۰ سال برای لوله‌های سامانه گاز در پارک خانه‌های متحرک است.

نقشه کار

۱. داده‌های شیمیایی و مقاومت خاک تهیه شود.
۲. عملیات خاک‌برداری و بررسی لوله برای تعیین نوع خوردگی انجام شود.
۳. کارایی عایق آزمایش شود.
۴. ارزیابی وضعیت لوله نسبت به خاک انجام گیرد.
۵. آزمون جریان مورد نیاز انجام شود.
۶. جزئیات یک طراحی مناسب آماده شود.

3 6 7



شکل ۹-۱۴ سامانه آند گالوانیک توزیع شده

نتایج ارزیابی

۱. مقادیر مقاومت خاک بین ۱۰۰۰ تا ۳۴۰۰ اهم سانتی‌متر است. به طور کلی، مقاومت متوسط یک ناحیه (که شامل حدوداً ۶ درصد لوله‌ها است)، در حدودا ۳۴۰۰ اهم سانتی‌متر بوده و بقیه نواحی (۹۴ درصد لوله‌ها)، مقاومتی در حدود ۱۴۰۰ اهم سانتی‌متر دارند. در تجزیه‌وتحلیل شیمیایی خاک، کلر یا سولفید قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد. pH خاک تا حدودی اسیدی است (برابر با ۵/۷).

۲. خاک‌برداری از خط لوله اصلی گاز (بدون پوشش) در ناحیه‌ای با مقاومت ۱۵۰۰ اهم سانتی‌متر نشان‌دهنده خوردگی عمومی فلز با شکل سطحی نامنظم است. ظاهر خوردگی، از نوع گالوانیک است.

۳. از طریق ارزیابی مکان‌یاب تماسی، یک اتصال عایق حذف شده، تشخیص داده شد. در نتیجه سرویس، عایق شده و سامانه گاز از نظر اتصالات عایق و اتصال‌های کوتاه مجدداً مورد ارزیابی قرار گرفت و موردی مشاهده نشد.

۴. ارزیابی کلی پتانسیل‌های لوله نسبت به زمین انجام می‌شود. اندازه‌گیری‌ها نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس اشباع بین ۶۰۰ – تا ۷۴۰– میلی‌ولت می‌باشند.

۵. برای آزمون جریان مورد نیاز، سطح تماس فولاد با خاک تخمین زده می‌شود:

$$A_s=\pi dL=\pi \times 0/06 \times 670 = 126m^2$$

فرض کنید که چگالی جریان ۲/۱۵ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع، از لوله فولادی عایق شده در برابر خوردگی گالوانیک محافظت به عمل خواهد آورد. کل جریان مورد نیاز برابر است با:

$$I=iA_s = 2/5 \times 10^{-6}A/cm^2 \times 1/26 \times 10^6 cm^2 = 2/71A$$

عوامل مربوط به لوله، دقتی در حدود ٪۱۰ دارند، بنابراین جریان مورد نیاز حدوداً ۳/۰ آمپر تخمین زده می‌شود. با استفاده از یک لوله تخلیه فولادی عایق شده به‌عنوان آند آزمون و یک باتری اتومبیل ۱۲ ولتی (تنها منبع جریان در دسترس)، تغییر پتانسیل لوله نسبت به زمین برای جریان عبوری اندازه‌گیری می‌شود. اندازه جریان، ۵/۱ آمپر و تغییر متوسط پتانسیل لوله نسبت به زمین در انتهای چندین سرویس پوشش‌دار،۵۰۵ میلی‌ولت است یا:

$$R(\text{couplingfactor}) = \Delta V/\Delta I = -505\text{mV}/5/1A = -99\text{mV/A}$$

تغییر پتانسیل لوله نسبت به خاک ناشی از جریان تخمین زده شده مورد نیاز ۳ آمپری (بر اساس۲/۱۵ میکروآمپر بر اساس سانتی‌مترمربع) برابر است با:

$$\Delta V = R\Delta I = -99\text{mV/A} \times 3/0A = -297\text{mV}$$

برای چک کردن، این مقدار با تغییر ۳۰۰- میلی‌ولتی پتانسیل نسبت به زمین مطابقت خوبی دارد. این تغییر پتانسیل اغلب برای ایجاد پلاریزاسیون الکتروشیمیایی مناسب است و چندین معیار مربوط به حفاظت کاتدی را برآورده می‌سازد.

۶. خلاصه داده‌ها و چک لیست پروژه آماده می‌شود.

محاسبات طراحی برای این مثال

با توجه به وسعت زیاد لوله‌های بدون پوشش، برای ایجاد توزیع جریان قابل قبول نیاز به آند عمیق (در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر)، یک بستر آندی معمولی در فاصله دور یا یک سامانه آندی توزیع شده وجود دارد. تخمین زده می‌شود که آند عمیق برای این پروژه خاص، در حدود ۲۵۰۰۰ دلار هزینه دارد (در سال ۱۹۹۹). استفاده از بستر آندی معمولی عملی نیست، زیرا محدوده ملک مورد نظر (۱۰۰ تا ۲۰۰ متر)، برای ایجاد فاصله مناسب بین بستر تا لوله‌ها، به اندازه کافی بزرگ نیست. اولین انتخاب منطقی برای طراحی سامانه حفاظت کاتدی، سامانه آندهای توزیع شده است. مقاومت نسبتاً پایین (۱۴۰۰ تا ۳۵۰۰اهم سانتی‌متر) باید محیطی مناسب برای آندهای گالوانیک ایجاد کند. منیزیم پتانسیل بالا، پتانسیلی در حدود ۱/۷۵- ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس اشباع شده دارد. متوسط پتانسیل سامانه گاز، ۰/۶۷۰- ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس اشباع بود. پتانسیل محرکه اولیه خالص برای فعال‌سازی حفاظت کاتدی برابر است با:

$$\text{E=-}1/750V - (-0/670V) = -1/080\text{volts}$$

یک آند پتانسیل بالای ۱۴/۵ کیلوگرمی، تقریباً ۰/۵ متر طول و ۱۳/۵ سانتی‌متر قطر دارد. رابطه دوایت برای مقاومت یک میله عمومی در خاک دارای مقاومت ۱۴۰۰ اهم سانتی‌متر بدین صورت است:

$$\text{R}=\frac{0/005\rho}{\pi\text{L}}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right) = 4/456 \times 2/43 = 10/8\text{ohm}$$

حداقل جریان خروجی از یک آند برابر است با:

$$I = (1/08V)/(10/8\Omega) = 0/100A$$

مقاومت و جریان خروجی آندها در خاک دارای مقاومت ۳۴۰۰ اهم سانتی‌متر برابر است با:

$$R = 10.8\Omega \times (3400/1400) = 26.2\text{ohm}$$

$$I = \frac{1.08V}{26.2\Omega} = 0.041A$$

شش درصد لوله در خاک دارای مقاومت ۳۴۰۰ اهم سانتی‌متر قرار دارد. فرض می‌شود که جریان مورد نیاز، ۶ درصد کل جریان تخمین زده شده برای پارک باشد:

$$I_{(3400)} = 0/06 \times 3/0A = 0/180A$$

بقیه جریان کل (۲/۸۲ آمپر)، برای قسمت مربوط به خاک دارای مقاومت ۱۴۰۰ اهم سانتی‌متر مورد نیاز خواهد بود. فرض می‌شود که در توزیع، آندها به اندازه کافی از یکدیگر فاصله داشته (در حدود ۶ متر) به گونه‌ای که تداخل الکتریکی با یکدیگر ایجاد نمی‌کنند. تعداد آندهای مورد نیاز در ناحیه دارای مقاومت ۳۴۰۰ اهم سانتی‌متر برابر خواهد بود با (I_T جریان کل، I_aجریان خروجی هر آند):

$$N=I_T/I_a = 0.180A/\ 0.041A = 4.3 = 5\text{anodes}$$

و در خاک دارای مقاومت ۱۴۰۰ اهم سانتی‌متر، تعداد آندها برابر است با:

$$N=2.82A/0.100A = 28.2 = 29\text{anodes}$$

آندها باید با فواصل یکسان در طول لوله بدون پوشش در نواحی مربوط قرار داده شوند. آندها می‌بایست در حدود ۱ متر از لوله فاصله داشته باشند و بالای آندها باید در حدود بخش پایینی لوله باشد. هزینه تخمین زده شده برای آند نصب شده، ۲۸۰ دلار است (سال ۱۹۹۹) و کل سامانه با ۹۵۲۰ دلار تحت حفاظت قرار می‌گیرد. این مقدار کمتر از نصف هزینه یک آند عمیق است. طول عمر آند را می‌توان تخمین زد. فرض می‌شود که لوله فولادی تا پتانسیل حداقل ۰/۸۵۰- میلی ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس پلاریزه خواهد شد. در نتیجه پتانسیل محرکه خالص برای آندها برابر است با:

$$E=-1/75V - (-0/850V) = -0/90\text{volt}$$

در ناحیه دارای مقاومت ۱۴۰۰ اهم سانتی‌متر، جریان هر آند برابر خواهد بود با:

$$I=0/90V/10/8\Omega = 0/083A$$

در بازده ٪۵۰، ظرفیت منیزیم ۱۱۰۰ آمپر - ساعت بر کیلوگرم است. با تقسیم ۱۱۰۰ بر ۸۷۶۶ (ساعت در یک سال)، ۰/۱۲۵ آمپر - سال بر کیلوگرم به دست می‌آید. عمر متوسط یک آند (برحسب سال) در ناحیه دارای مقاومت ۱۴۰۰ اهم سانتی‌متر بدین صورت است:

$$t=\frac{f_u C_a W}{I}$$

که f_u عامل کاربرد برابر با ٪۸۵، C_a ظرفیت آند در بازده ٪۵۰ برابر با ۰/۱۲۵ آمپر – سال / کیلوگرم، Wوزن یک آند برابر با ۱۴/۵ کیلوگرم و I جریان متوسط خروجی در طول عمر آند می‌باشند. با قرار دادن این مقادیر در رابطه بالا، عمر آند برابر با ۱۸/۶ سال به دست می‌آید. این طول عمر تخمین زده شده، در حدود ٪۷ کمتر از طول عمر طراحی است. سایز استاندارد بزرگ‌تر آندها، وزنی برابر با ۲۱/۸ کیلوگرم (۴۸ پوند) دارد. طول عمر تخمین زده شده برای آندهای بزرگ‌تر برابر است با:

$$t = (0/85 \times (0/125\text{A×yr/kg}) \times 21/8\text{kg})/0/083A = 27/9\text{years}$$

در خاک دارای مقاومت ۳۴۰۰ اهم سانتی‌متر، طول عمر آندهای ۱۴/۵ کیلوگرمی برابر است با:

$$\text{I}=0/90\text{V}/26/2\Omega = 0/034A$$
$$t = (0/85 \times (0/125\text{A×yr/kg}) \times 14/5\text{kg})/0/034A = 45/3\text{years}$$

خلاصه داده‌ها و چک لیست

عنوان پروژه: آندهای گالوانیک توزیع شده/فولاد بدون پوشش/عایق شده

توصیف کلی: ۶۷۰ متر لوله‌های توزیع گاز به قطر ۶ سانتی‌متر با ۸۱ لوله پوشش‌دار به قطر ۲/۷ سانتی‌متر.

تاریخچه	بله	خیر
طراحی سازه (هنوز ساخته نشده)		
انجام ارزیابی پیش از ساخت		
سازه موجود		
انجام ارزیابی شرایط		
طول عمر سازه	۲۰ سال	

سطوحی که باید تحت حفاظت قرار بگیرند

توصیف	مساحت کل (مترمربع)
خارجی	۱۲۶
داخلی	□□
طول کار	۶۷۰ متر

مواد به کار رفته

فلز (آلیاژ)	حساس به قلیا		حساس به هیدروژن		حساس به سرعت		مساحت
	بله	خیر	بله	خیر	بله	خیر	(سانتی‌مترمربع)
فولاد کربنی							□□□

روش ساخت: جوش ذوبی... مکانیکی... گسکت‌ها...

پوشش‌های حفاظتی

نوع پوشش	ضخامت	تلورانس حفاظت کاتدی		درصد پوشش تخمین زده شده
		بله	خیر	
بدون پوشش	–			–

عایق الکتریکی و اتصال به زمین

	بله	خیر
سازه عایق شده		
سازه می‌تواند عایق شود		
اگر سازه عایق شده، نیاز به محافظ تغییرات ناگهانی دارد		

محیط

توصیف	برون شهری
مقاومت (اهم سانتی‌متر)	۱۴۰۰ و ۳۴۰۰
سرعت (سانتی‌متر/ثانیه)	□□□
دما (درجه سانتی گراد)	محیط

	بله	خیر
منبع تغذیه تجاری در دسترس است.		
سازه‌های مجاور وجود دارند		
وجود جریان‌های سرگردان		
خطر آتش‌سوزی و انفجار		

نگرانی‌های احتمالی در مورد سامانه حفاظت کاتدی

	بله	خیر
میرایی الکتریکی در سازه		
میرایی الکتریکی در آند		
تردی هیدروژنی در سازه		

تولید هیدروژن بر روی سازه		
تأثیر حفاظت کاتدی بر فرایند		
تداخل جریان سرگردان		
ملاحظات ایمنی		

اطلاعات تکمیلی: طول لوله‌های سرویس، از ۳ تا ۹ متر می‌باشند. تمام آنها با فولاد پوشش‌دار تعویض شده و فقط در انتهای خود در خانه عایق می‌شوند. با مراجعه به سوابق ناحیه، چگالی جریان۲/۱۵ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع برای فولاد بدون پوشش پیشنهاد می‌شود که این چگالی جریان برای پلاریزه کردن فولاد مدفون در این خاک مورد نیاز است، آزمون‌های میدانی نشان می‌دهند که چگالی جریان بالا باعث تغییر پتانسیل لوله به میزان ۳۰۰- میلی‌ولت می‌شود.

□

آندهای توزیع شده/منیزیم/چدن

توصیف

چندین لوله توزیع آب شهری باید با لوله‌های چدنی تعویض شوند. لوله‌های به طول ۵/۵ متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر بوده و اتصالات گسکت لاستیکی دارند. مقاومت متوسط خاک این ناحیه، ۱۰۰۰ اهم سانتی‌متر بوده و به طور کلی مربوط است. می‌توان سرویس‌های آب را از طریق وارد کردن یک لوله پلاستیکی کوتاه در خط سرویس، از خط اصلی عایق کرد و می‌توان اتصالات لوله را برای ایجاد پیوستگی الکتریکی، با سیم به هم متصل کرد. هدف، طراحی یک سامانه حفاظت کاتدی با عمر ۳۰ سال با استفاده از آندهای فداشونده است. همچنین باید خلاصه داده‌ها و چک لیست نیز آماده شود.

محاسبات

مساحت تقریبی هرکدام از اتصالات لوله برابر است با:

$$A_s = \pi dL = 3/5 m^2/\text{joint}$$

جریان مورد نیاز برای حفاظت از کل سطح طول واحد لوله با استفاده از چگالی جریان ۲/۱۵ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع برابر است با:

$$I = iA_s = 2/5 \times 10^{-6} A/cm^2 \times 3/5 \times 10^4 cm^2 = 0/075 A/\text{joint}$$

حداقل عمر سامانه آندی باید ۳۰ سال باشد. آندهای منیزیمی در ٪۵۰ بازدهی، ظرفیت جریانی برابر با ۱۱۰۰ آمپر – ساعت / کیلوگرم (۰/۱۲۵ آمپر – سال / کیلوگرم) دارند. وزن منیزیم مورد نیاز برای تأمین ۳۰ سال عمر طراحی، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W=\frac{I.t}{f_u.C_a}$$

که W وزن آند برحسب کیلوگرم، I جریان خروجی متوسط در طول عمر آند برحسب آمپر، t طول عمر آند برحسب سال، f_u ضریب کاربری (۸۵٪)، C_a ظرفیت جریان آند برحسب آمپر - سال/کیلوگرم هستند. جریان متوسط (I) باید از مقاومت یک الکترود عمومی معمولی به دست آمده از رابطه دوایت و پتانسیل مورد انتظار برای لوله پلاریزه شده تخمین زده شود (مقاومت خاک ۱۰۰۰ اهم سانتی‌متر، طول آند ۰/۵ متر و قطر آند ۰/۱۳ متر فرض می‌شوند):

$$R=\frac{0.005\rho}{2\pi L}\left(\ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right)=3.183\times 2.43=7.73\text{ohm/anode}$$

فرض می‌شود که پتانسیل اولیه لوله نسبت به خاک، ۵۴۰- میلی ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس باشد. پتانسیل منیزیم استاندارد (آلیاژ H-1)، ۱۵۵۰ -میلی‌ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس است. بنابراین پتانسیل محرکه خالص برابر است با:

$$E=-1150\text{mV}-(-540)\text{mV}=-1010\text{mV}=-1.0\text{V}$$
$$I=1.01\text{V}/7.73\Omega=0.131\text{A/anode}$$

چگالی جریان در یک اتصال لوله برای برابر خواهد بود با:

$$i=0.131\text{A}/3.5\text{m}^2=0.037\text{A/m}^2=3/7\mu\text{A/cm}^2$$

انتظار می‌رود که لوله در این چگالی جریان به طور قابل توجهی پلاریزه شود. فرض می‌شود که پتانسیل پلاریزه لوله، ۱۰۰۰- میلی‌ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس باشد. بنابراین پتانسیل محرکه یک آند منیزیم استاندارد برابر خواهد بود با:

$$E=-1550\text{mV}-(-1000\text{mV})=-550\text{mV}=-0.55\text{volts}$$

جریان پایدار هر آند برابر است با:

$$I=(0.55\text{V})/(7.73\Omega)=0.071\text{A}$$

با قرار دادن این جریان در رابطه وزن آند داریم:

$$W=\frac{(0.071\text{A}\times 30\text{yr})}{(0.125\text{A}\times \text{yr/kg}\times 0.85)}=20\text{kg}$$

نزدیک‌ترین آند تجاری به این وزن، ۲۱/۵ کیلوگرم است. این آندها، همان قطر فرض شده در محاسبه مقاومت (۱۳ سانتی‌متر) را دارند، اما طول آنها ۰/۸ متر است. افزایش طول آند، مقاومت آند را به ۷/۱ اهم کاهش می‌دهد؛ اما این موضوع تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد. طراحی برای حفاظت لوله چدنی باید شامل ۲۱/۵ کیلوگرم آند منیزیمی استاندارد متصل به هرکدام از اتصالات لوله باشد. ایستگاه‌های آزمون باید بررسی جریان خروجی و پتانسیل باید شامل چندین نقطه در طول خط باشند.

خلاصه داده‌ها و چک لیست

عنوان پروژه:

توصیف کلی:

تاریخچه	بله	خیر
طراحی سازه (هنوز ساخته نشده)		
انجام ارزیابی پیش از ساخت		
سازه موجود		
انجام ارزیابی		
طول عمر سازه		

سطوحی که باید تحت حفاظت قرار بگیرند

توصیف	مساحت کل (مترمربع)
خارجی	
داخلی	
طول کل	

مواد به کار رفته

فلز (آلیاژ)	حساس به قلیا		حساس به هیدروژن		حساس به سرعت		مساحت (سانتی‌مترمربع)
	بله	خیر	بله	خیر	بله	خیر	
فولاد کربنی							

روش ساخت: جوش ذوبی... مکانیکی... گسکت‌ها...

پوشش‌های حفاظتی

نوع پوشش	ضخامت	تلرانس حفاظت کاتدی		درصد پوشش تخمین زده شده
		بله	خیر	

عایق الکتریکی و اتصال به زمین

	بله	خیر
سازه عایق شده		
سازه می‌تواند عایق شود		
اگر سازه عایق شده، نیاز به محافظ تغییرات ناگهانی دارد		

محیط

توصیف	روستایی، برون شهری
مقاومت (اهم سانتی‌متر)	
سرعت (سانتی‌متر/ثانیه)	
دما (درجه سانتی گراد)	

	بله	خیر
منبع تغذیه تجاری در دسترس است		
سازه‌های مجاور وجود دارند		
وجود جریان‌های سرگردان		
خطر آنش‌سوزی و انفجار		

نگرانی‌های احتمالی در مورد سامانه حفاظت کاتدی

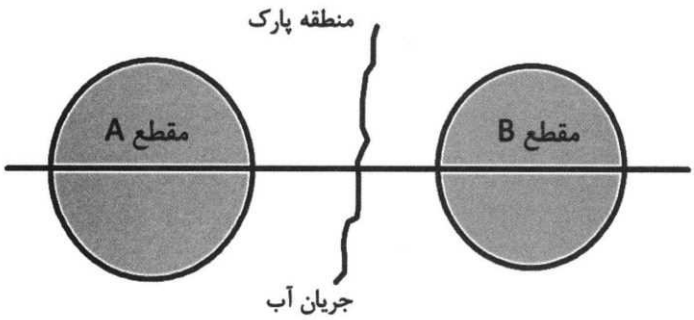
	بله	خیر
میرایی الکتریکی در سازه		
میرایی الکتریکی در آند		
تردی هیدروژن در سازه		
تولید هیدروژن بر روی سازه		

تأثیر حفاظت کاتدی بر فرایند		
تداخل جریان سرگردان		
ملاحظات ایمنی		

فولاد پوشش‌دار/یک‌سوکننده/بسترهای آندی متداول

توصیف

یک زیرمجموعه خانگی تحت ساخت است. این زیر مجموعه شامل لوله‌های فولادی جوشکاری شده سامانه توزیع گاز است. قطر لوله‌های گاز، ۲/۱۵ سانتی‌متر بوده و دارای پوشش اپوکسی باند ذوبی[۶۸](FBE) هستند. کل طول خط‌های گاز، ۳۷۰۰ متر است. سرویس‌ها، پلاستیکی هستند. محل‌های اتصال به خطوط تأمین گاز موجود، دارای اتصالات عایق هستند. بین دو بخش از زیر مجموعه، یک ناحیه پارک و آبراهه کوچک وجود دارد (شکل ۹-۱۵).



شکل ۹-۱۵ زیر مجموعه (لوله‌های توزیع)

پس از انجام عملیات عمومی در تأسیسات گازی، ایستگاه‌های آزمون در تمام اتصالات عایق اصلی و در چندین نقطه در سرتاسر زیر مجموعه نصب می‌شوند. هدف طراحی یک سامانه حفاظت کاتدی مناسب برای لوله‌های توزیع گاز است.

تجزیه‌وتحلیل

اولین گام، به دست آوردن داده‌های محیط و پارامترهای الکتریکی سامانه توزیع گاز است. در این مورد داده‌ها نشان می‌دهند که لوله‌های توزیع، از زمین و اتصالات عایق شده‌اند. خاک طبیعی بوده و عاری از زباله و خرده سنگ است. مقاومت خاک متغیر و مقدار متوسط آن، ۵۰۰۰ اهم سانتی‌متر است. خلاصه داده‌ها و چک لیست در انتها ارائه شده‌اند. حضور یک ناحیه باز به همراه یک آبراهه طبیعی در مرکز شبکه لوله‌کشی، مکان مناسبی برای نصب بستر آندی است. آبراهه راه حلی آسان برای آزمون در جای حفاظت کاتدی قبل از اجرا و ساخت است. یک بسته ورق نازک آلومینیمی، در طول جریان آب و عمود بر

3 6 8

خط لوله گاز قرار داده می‌شود. جریان معلوم، بین خط و ورق نازک اعمال شده و پارامترهای الکتریکی (تغییر ولتاژ به ازای یک آمپر از جریان آزمون) در مکان‌های مختلف زیر مجموعه اندازه‌گیری می‌شوند.

مقدار متوسط اندازه‌گیری شده، ۰/۱۸۰ ولت به ازای ۱ آمپر است. این مقدار برای لوله پوشش‌دار پایین است. جست‌وجو برای یافتن یک یا چند نقطه تماس یا اتصال به زمین با سازه‌های دیگر انجام می‌شود. همین نقطه تماس یا عیبی در پوشش مشاهده نشد. آزمون E برحسب log i، روشی دیگر برای تعیین جریان مورد نیاز، زمانی است که چندین عیب پوشش (مقاومت لوله نسبت به زمین کم باشد) و غلظت کم اکسیژن در سطح لوله وجود داشته باشد. تخمینی از جریان مورد نیاز با استفاده از مقدار ۰/۳۰۰- ولت جابه‌جایی پتانسیل لوله نسبت به خاک انجام می‌شود (R، مقدار ولت به ازای آمپر (اهم) اندازه‌گیری شده است):

$$\mathrm{R}=\frac{0/005\rho}{\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right)=3/183\times 2/43=7/73\mathrm{ohm/anode}$$

برای انجام این آزمون E برحسب log i قابل قبول، نیاز به منبع جریان است که بتواند در محدود ۴ برابر جریان مورد نیاز برای حفاظت را فراهم کند. در این مورد، ظرفیت جریان منبع تغذیه آزمون باید در حدود ۷ آمپر باشد. اگر مقاومت بستر ورق آلومینیمی ۳ اهم باشد، ولتاژ منبع تغذیه باید برابر با ۲۱ ولت باشد (۳ اهم × ۷ آمپر). برای به دست آوردن داده‌های E برحسب log i، نیاز به خروجی پیوسته و متغیر از منبع تغذیه است. نتایج آزمون E برحسب log i نشان‌دهنده رفتار تافل در جریان‌های بالای ۱/۲ آمپر است. برای اینکه زوال ویژگی‌های الکتریکی لوله‌ها در آینده در نظر گرفته شود، بستر آندی باید جریانی در حدود ۲/۵ آمپر ایجاد کند. از آنجایی که ناحیه نصب آندها، در محوطه پارک قرار دارد، ولتاژ آند باید در محدوده ایمن نگهداری شود. ولتاژ ۱۲ ولت، به‌عنوان حد بالایی انتخاب شده است. براین‌اساس، مقاومت نهایی بستر آندی نسبت به زمین برابر است با:

$$\mathrm{R}=\mathrm{E}/\mathrm{I}=(10V)/(2/5A)=4\mathrm{ohms}$$

در این رابطه R مقاومت مطلوب، E ماکزیمم پتانسیل مجاز منهای ولتاژ برگشتی لوله/آند (۱۲ منهای ۲ ولت) و I ماکزیمم جریان مورد نیاز (۲/۵ آمپر) است. آندهای اکسید فلزی مخلوط (MMO) از پیش بسته‌بندی شده، سبک و نصب آنها آسان است. طول و قطر این آندها معمولاً ۱/۵ متر و ۷/۶۲ سانتی‌متر است. با استفاده از رابط دوایت برای یک میله عمودی داریم:

$$\mathrm{R}=\frac{0/005\rho}{\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right)=5/3\times 4/059=21/5\mathrm{ohm/anode}$$

تعداد آندها برای داشتن بستری با مقاومت ۴ اهم (شامل آندهایی با فواصل زیاد) برابر است با (N تعداد آندهای موازی، R_a مقاومت یک آند، R_T مقاومت کل بستر):

$$\mathrm{N}=\mathrm{R}_a/\mathrm{R}_T=5/4=6\mathrm{anodes}$$

اگر فاصله آندها ۳ متر در نظر گرفته شود، با استفاده از رابط ساند داریم (S فاصله آندها):

$$R_N = \frac{0/005\rho}{\pi NL}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2L}{s}ln(0/656N)\right)$$
$$= 0/884[ln(157) - 1 + 1 \times ln(3/936)] = 4/8 ohms$$

این مقاومت، ٪۲۰ بیشتر از مقاومت مطلوب است. بنابراین تعداد آندها از ۶ به ۷ عدد افزایش داده خواهند شد تا نتیجه مورد نظر به دست آیند.

خلاصه داده‌ها و چک لیست

عنوان پروژه: فولاد پوشش‌دار/یک‌سوکننده/بستر آندی متداول

توصیفی کلی: ۳۷۰۰ متر خطوط توزیع گاز پوشش‌دار و عایق شده به قطر ۱۵/۲ سانتی‌متر.

تاریخچه	بله	خیر
طراحی سازه (هنوز ساخته نشده)		
انجام ارزیابی پیش از ساخت		
سازه موجود		
انجام ارزیابی شرایط	□□□	
طول عمر سازه	۳۰ سال	

سطوحی که باید تحت حفاظت قرار بگیرند

توصیف	مساحت کل (مترمربع)
خارجی	۱۷۶۷
داخلی	□□
طول کل	۳۷۰۰ متر

مواد به کار رفته

فلز (آلیاژ)	حساس به قلیا		حساس به هیدروژن		حساس به سرعت		مساحت (سانتی‌مترمربع)
	بله	خیر	بله	خیر	بله	خیر	
فولاد کربن							□□□

روش ساخت: جوش ذوبی... مکانیکی... گسکت‌ها...

پوشش‌های حفاظتی

نوع پوشش	ضخامت	تلرانس حفاظت کاتدی		درصد پوشش تخمین زده شده
		بله	خیر	
۱. اپوکسی با باند ذوبی (□□□)	۱میلی‌متر	■		–

عایق الکتریکی و اتصال به زمین

	بله	خیر
سازه عایق شده	■	
سازه می‌تواند عایق شود	■	
اگر سازه عایق شده، نیاز به محافظ تغییرات ناگهانی دارد		■

محیط

توصیف	برون شهری
مقاومت (اهم سانتی‌متر)	۵۰۰۰
سرعت (سانتی‌متر/ثانیه)	□□
دما (درجه سانتی گراد)	محیط

	بله	خیر
منبع تغذیه تجاری در دسترس است	■	
سازه‌های مجاور وجود دارند	■	
وجود جریان‌های سرگردان		■
خطر آتش‌سوزی و انفجار		■

نگرانی‌های احتمالی در مورد سامانه حفاظت کاتدی

میرایی الکتریکی در سازه	بله	خیر
میرایی الکتریکی در آند		■
تردی هیدروژنی در سازه		■
تولید هیدروژن بر روی سازه		■

تأثیر حفاظت کاتدی بر فرایند		
تداخل جریان سرگردان		
ملاحظات ایمنی		

خلاصه مثال‌ها

۱. مثالی که از طراحی حفاظت کاتدی که شامل مشخصه‌های زیر است:

- فولاد پوشش‌دار عایق شده که شامل عیوب متعددی در پوشش است.
- اتصالات مکانیکی
- میرایی قابل توجه جریان
- جریان‌های سرگردان دینامیک
- بسترهای آندی متداول چندتایی

۲. مثالی که حفاظت «نقاط مهم»[۳۶۹] برای یک خط انتقال آب فولادی. طراحی حفاظت کاتدی این مورد شامل مؤلفه‌های زیر است:

- بدون پوشش حفاظتی
- سازه از نظر الکتریکی، عایق نشده است.
- سامانه آند جریان اعمالی توزیع شده
- محاسبه میرایی در مسیر آندها

۳. مثالی از حفاظت کاتدی یک خط لوله انتقال طولانی با پوشش مناسب توسط آندهای عمیق:

- پوشش با کیفیت خوب
- میرایی در اثر طول زیاد خط لوله
- طراحی سامانه آند عمیق
- هشدار در رابطه با القاء ولتاژهای بالا

۴. مثالی از حفاظت کاتدی خط لوله فولادی توزیع گاز (بدون پوشش، از لحاظ الکتریکی عایق شده) توسط آندهای گالوانیک توزیع شده:

- تخمین جریان مورد نیاز برای فولاد بدون پوشش قرار گرفته در معرض خاک توسط آزمون‌های میدانی
- تعیین تعداد آندهای فداشونده مورد نیاز در خاک‌های دارای مقاومت‌های متفاوت
- تخمین طول عمر آند

3 6 9

۵. مثالی از حفاظت کاتدی یک خط چدنی توزیع آب (که از لحاظ الکتریکی ناپیوسته است) در خاک مرطوب با مقاومت پایین با استفاده از آندهای فداشونده.
۶. مثالی از حفاظت کاتدی خطوط و سرویس‌های توزیع گاز عایق شده توسط یک بستر آندی اعمال جریان. در مثال مذکور، از آزمون در محل برای کمک به طراحی حفاظت کاتدی سازه جدید استفاده شده است.

حفاظت کاتدی مخازن ذخیره

خوردگی و حفاظت کاتدی سطوح داخلی مخازن ذخیره نفت خام و موادنفتی

ذخیره نفت خام و موادنفتی

مخازن ذخیره نفت حاوی محموله‌های سنگین و با حجم بسیار زیاد نفت هستند. آنها در معرض رطوبت و مواد شیمیایی خورنده قرار دارند، به‌ویژه زمانی که در نزدیکی دریا واقع شوند، که منجر به خوردگی می‌شود. خوردگی در مخازن ذخیره نفت گاهی اوقات به نشتی منجر شده، در نتیجه باعث اتلاف فرآورده‌های نفتی می‌شود به خصوص مخازن زیرزمینی که عمرشان بیش از ۱۰ سال است و فاقد اقدامات حفاظت از خوردگی هستند. در مخازن نو، خوردگی حفره‌ای در مقایسه با انواع دیگر خوردگی، شایع‌ترین نوع خوردگی مشاهده شده می‌باشد، درحالی‌که، در مخازن قدیمی‌تر، خوردگی یکنواخت عمده‌ترین نوع خوردگی است، زیرا به مرور زمان، نواحی کاتدی و آندی به لحاظ سطحی که در بر می‌گیرند، به هم نزدیک می‌شوند.
بخش زیرین مخازن ذخیره نفت که با باران جمع شده و آب‌های زیرزمینی در تماس است یا داخل مخزن، به خصوص به دلیل وجود آب دریا در داخل مخزن، همراه با مواد ذخیره شده مانند نفت خام، در معرض خوردگی قرار دارد. از خوردگی قسمت زیرین مخازن ذخیره نفت به علت تماس با باران جمع شده و آب‌های زیرزمینی معمولاً از طریق حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان جلوگیری می‌شود، که در مورد ورق‌های آهنی کارایی ندارد که بخش پایین‌تر مخزن را تشکیل می‌دهند، زیرا که آنها در تماس با زمین نیستند؛ بنابراین هنگامی که مخزن به طور کامل پر یا خالی است، ورق‌های آهنی به‌صورت الاستیک تغییر شکل می‌دهند که سبب ایجاد یک فاصله بین تانک و زمین می‌شود. همچنین از خوردگی قسمت زیرین مخازن ذخیره نفت به علت تماس با باران جمع شده و آب‌های زیرزمینی با استفاده از پوشش مناسب جلوگیری می‌شود؛ بااین‌حال، پوشش‌ها به مرور زمان فرسوده شده و به خوردگی سریع مخزن در محل خرابی پوشش، منجر می‌شود که معمولاً به علت تغیرات در بارهای مخزن رخ می‌دهد. بنابراین، حتی اگر یک یا چند روش پیشگیری از خوردگی به کار گرفته شود، خوردگی مخازن ذخیره نفت باید هنوز هم تحت پایش شود.
در مرحله دوم، مایعات ذخیره شده در مخازن، مانند نفت خام، هم منجر به خوردگی می‌شود. زمانی که معمول‌ترین مایعات در مخازن ذخیره به لحاظ خورندگی مقایسه شوند، سوخت دیزل خورنده‌ترین و پس از آن سوخت رادیاتور، بنزین بدون سرب، نفت کوره، بنزین معمولی، سوخت جت، بنزین و نفت سفید، به ترتیب نزولی قرار دارند. بااین‌حال، تفاوت‌های جزئی بین این مایعات مختلف از نظر خوردگی بیانگر این است که اکثر خوردگی‌ها توسط آب دریا و نمک‌های مانند محلول

کلرایدها ایجاد می‌شود، زیرا با وجود داشتن خورندگی‌های متفاوت این مایعات نفتی ذخیره شده، ازآنجاکه، آنها الکترولیت‌های خوبی نیستند، هیچ‌کدام به تنهایی نمی‌توانند خورندگی قابل توجهی ایجاد کنند.

حفاظت کاتدی سطوح داخلی مخازن ذخیره نفت خام

معمولاً در صنعت از مخازن روزمینی ساخته از فولاد استوانه‌ای شکل، برای ذخیره نفت خام استفاده می‌شود. در طی مرحله ساخت و برای جلوگیری از خوردگی، سطوح پایین‌تر این مخازن با پوشش مناسب پوشش داده می‌شود؛ بااین‌حال، به دلیل انباشته شدن مایعات خورنده در فاز پایین‌تر که شامل نمک‌های محلول غلیظ و اسیدهای آلی همراه با رطوبت مخزن، خوردگی هنوز در مخازن ذخیره نفت رخ داده که منجر به نشتی و به مرور سوراخ شدن ته مخزن می‌شود که می‌تواند از کنترل خارج شود. به علت بارهای سنگین و به دلیل تنش‌های ایجاد شده توسط چرخه‌های متناوب فرایندهای بارگیری و تخلیه و همچنین به علت تغییر شکل این مخازن که معمولاً در ۵ تا ۱۰ سال اتفاق می‌افتد، خوردگی عمدتاً به شکل خوردگی حفره‌ای رخ می‌دهد.

برای تعمیر پوشش آسیب دیده، مخازن ذخیره نفت خام هر ۵ تا ۱۰ سال تخلیه شده و تحت تعمیر قرار می‌گیرند که در آن رنگ و پوشش آسیب دیده برداشته می‌شود، که همه اینها سبب ایجاد مشکلاتی می‌شود و در نتیجه مخزن برای مدت طولانی خارج از سرویس خواهد بود. علاوه بر این، در طی زمان تعمیرات، نشتی‌ها و سوراخ‌های ناشی از خوردگی، تعمیر و رسوبات حاصل از خوردگی تمیز می‌شوند. ازآنجاکه، سطح باید تا نزدیک به سفید شدن (SP - 10) تمیز شود به‌طوری‌که پوشش رنگ و یا فایبرگلاس تقویت شده پلاستیکی جدید بتواند باداوم باشد، با استفاده از اسپری شن و ماسه، رنگ کهنه برداشته می‌شود. روند بازسازی پوشش مخزن ذخیره به خصوص در گذشته، با تغییر شکل مخازن ذخیره نفت خام همراه بود و همچنین مقدار هزینه و پول زیادی نیاز داشت. ازاین‌رو، حفاظت کاتدی می‌تواند مقرون‌به‌صرفه‌تر از پوشش مجدد رنگ می‌باشد.

پیشگیری از خوردگی

برای حفاظت بهتر، جایی‌که مخزن روی آن قرار داده می‌شود به‌صورت ویژه‌ای آماده می‌شود، از سنگ‌های خردشده که با شن و ماسه متراکم شده است، در قسمت پایین و آسفالت در قسمت بالا، استفاده می‌شود. حتی پوشش بسیار قوی از پلاستیک و فایبرگلاس بهترین راه حل نیست، زیرا آنها نیاز به تمیز کردن سطح دارند که نیاز به غیرقابل استفاده کردن مخزن برای مدت بسیار طولانی در مدت تعمیر دارد. بنابراین، همراه با یک پوشش مناسب، حفاظت کاتدی بهترین روش پیشگیری از خوردگی برای مخازن ذخیره نفت خام است.

حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده

آندهای آلومینیم آلیاژ شده با ایندیم برای حفاظت کاتدی آند گالوانیکی مخازن ذخیره نفت ترجیح داده می‌شوند. لایه اکسیدی که سطح مخزن را پوشانده، بزرگ‌ترین مانع استفاده از روش حفاظت کاتدی به‌عنوان یک روش پیشگیری از خوردگی است، که باید با استفاده از یک آند با پتانسیل بالا برداشته می‌شود. بنابراین، یک سیستم آند دوتایی با استفاده از منیزیم و آلومینیم مناسب است. در این روش، آندها به موازات یکدیگر نصب می‌شوند و آند منیزیم که دارای پتانسیل بالاتری است خیلی زود

بعد از اعمال جریان حفاظت کاتدی شروع به کار می‌کند و عملیات قطبش سطح پایین داخل مخزن که با اکسید پوشیده شده است، شروع می‌شود. بنابراین، بیشتر جریان حفاظت کاتدی اعمال شده برای کاهش لایه $\gamma - Fe_2O_3$ موجود در سطح داخلی مخزن استفاده می‌شود. پس از آند منیزیم، لایه اکسید کاهش می‌یابد و آند آلومینیوم در مدار قرار می‌گیرد و یک جریان مورد نیاز برای حفظ پتانسیل سطوح قطبیده به‌صورت کاتدی فراهم می‌کند.

در سیستم آندهای گالوانیک دوتایی، پس از اعمال جریان حفاظت کاتدی، یک پتانسیل ترکیبی یکی حدود ۸۰۰ mV- از آند منیزیم و ۷۰ mV- از آند آلومینیم، در مجموع به ۸۷۰ mV-، شکل می‌گیرد بزرگی این پتانسیل ترکیبی به واکنش‌های اکسایش و کاهش زیر در آند و کاتد بستگی دارد:

واکنش‌های آندی:

$$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e$$

$$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e$$

واکنش‌های کاتدی که در معادلات زیر نیز بیان شده‌اند:

$$2H^+ + 2e \rightarrow H_2$$
$$Fe_2O_3 + 6H^+ + 2e \rightarrow 2Fe^{2+} + 3H_2O$$

در آند، ابتدا آند منیزیم اکسید می‌شود زیرا پتانسیل منفی بالاتری دارد و در کاتد، ابتدا Fe_2O_3 کاهش می‌یابد، زیرا به پتانسیل مثبت بالاتری نیاز دارد. سپس لایه Fe_2O_3 زدوده می‌شود و تصاعد گاز هیدروژن تنها واکنش کاتدی است که به تغییر منفی در پتانسیل ترکیبی منجر می‌شود. در نهایت بعد از مصرف آند منیزیم، یک تغییر مثبت در حدود ۵۰ mV در پتانسیل ترکیبی رخ می‌دهد. بااین‌حال، حتی زمانی که افزایش ۵۰ mV مدنظر قرار می‌گیرد، پتانسیل ترکیبی، منفی‌تر ۷۸۰ mV- در مقایسه با الکترود مرجع SCE است که نسبت به مقدار اولیه ۳۸۰ mV- درست پس از اعمال جریان حفاظت کاتدی افزایش می‌یابد.

جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده

برای مخازنی با سطوح دارای رسوبات خوردگی و بدون پوشش، در ابتدا میانگین جریان حفاظت کاتدی $40mA/m^2$ نیاز است، که پس از حدود ۲ ماه مقدار آن به $15mA/m^2$ کاهش می‌یابد. بنابراین، به نظر می‌رسد میانگین $20mA/m^2$ برای تأمین حفاظت کاتدی برای یک دوره ۱۰ ساله تا انجام تعمیرات نگهداری بعدی، کافی باشد، که می‌تواند توسط یک مقدار معین از آندهای آلومینیم تأمین شود.

ازسوی‌دیگر، مقدار و تعداد آندهای منیزیم در درجه اول به ضخامت لایه زنگی که در ابتدا باید زدوده شود، بستگی دارد. معمولاً یک جریان بین ۸۰ تا $120mA/m^2$ در ساعات اعمال می‌شود. درحالی‌که، $50mA/m^2$در ساعت برای حذف لایه اکسید در نظر گرفته می‌شود. یک الکترود مرجع، مانند SCE که توسط نفت خام داخل مخزن آسیب نبیند، به‌صورت ویژه‌ای طراحی و برای کنترل جریان تأمین شده توسط آندها و کنترل پتانسیل مخزن - الکترولیت، در مخزن نصب می‌شود.

به دلیل ماهیت نمکی مایعات خورنده انباشته شده در فاز پایین‌تر نفت خام ذخیره شده در مخزن، همه آندهای منیزیم، روی و آلومینیم می‌توانند استفاده شوند.

الف) آندهای منیزیم

اختلاف پتانسیل بین آندهای منیزیم و فولاد حدود ۶۵۰ الی ۷۰۰ mV است که نتیجه آن قطبش فولاد در یک دوره کوتاه است، به همین دلیل آند منیزیم را می‌توان در آب با مقاومت بالا هم استفاده کرد. بااین‌حال، بازده جریان آندهای منیزیم حدود ٪۵۰ است. ظرفیت جریان آنها نسبت به دیگر آندها نیز پایین‌تر است، بنابراین، عمر حفاظت کاتدیک با آندهای منیزیم به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است و برای حفاظت از مخازن نفت خام استفاده نمی‌شوند، زیرا تعمیرات مخازن نفت خام هر ۵ تا ۱۰ سال انجام می‌شود که این زمان خیلی طولانی‌تری از مدتی است که آندهای منیزیم می‌توانند حفاظت کاتدی تأمین کنند.

ب) آندهای روی

بازده جریان آندهای روی بیش از ۹۰٪ است؛ با این حال، اختلاف پتانسیل بین روی و فولاد تنها ۲۵۰ mV است، دریافت جریان خروجی به مقدار مطلوب، یک مسئله است. آند روی به طور معمول در مراحل اولیه قطبش پایه مخزن ذخیره استفاده می‌شود. با قطبش فولاد، اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد کاهش می‌یابد و در نتیجه جریان خروجی به طور خودکار تعدیل می‌شود.

ج) آندهای آلومینیم

آندهای آلومینیم آلیاژ شده با ایندیم مناسب‌ترین آندها برای حفاظت کاتدی سطوح داخلی مخازن ذخیره نفت خام هستند. اختلاف پتانسیل بین آندهای آلومینیم و فولاد نیز ۲۵۰ mV است؛ بااین‌حال، بازده جریان آنها ۹۰٪ است و دارای ظرفیت جریان $3/5kg/A.year$ هستند، یعنی به لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر است، چون اجازه می‌دهد تا آنها برای مدت زمان طولانی، ۵ تا ۱۰ سال، استفاده شوند. یک کیلوگرم آند آلومینیم آلیاژ شده با ایندیم می‌تواند مساحت $1/5m^2$ سطح مخزن را به مدت ۱۰ سال محافظت کند.

د) آندهای دوتایی آلومینیم و منیزیم

هنگامی که سیستم‌های آندهای دوتایی منیزیم و آلومینیم مورد استفاده قرار می‌گیرند، ابتدا، آند منیزیم که پتانسیل منفی بیشتری دارد با پتانسیل بالای خود عمل می‌کند که فولاد را قطبیده می‌کند، آلومینیم خورده نمی‌شود، زیرا در مقایسه با آند منیزیم به‌عنوان کاتد عمل می‌کند. پس از مصرف کامل آند منیزیم، این بار آندهای آلومینیم به آند تبدیل می‌شوند و با ظرفیت‌های جریان بالا، حفاظت از مخازن در برابر خوردگی برای مدت طولانی را آغاز می‌کنند. به شرطی که جرم هر دو نوع آند به طور دقیق محاسبه شود، داشتن حفاظت کاتدی با عمر تا ۱۰ سال نیز امکان‌پذیر است.

سیستم‌های آندهای دوتایی منیزیم و آلومینیم به‌ویژه برای مخازن بدون پوشش مناسب است، زیرا آند منیزیم یک پتانسیل بالا برای حذف لایه خوردگی تشکیل شده در سطح را تأمین می‌کند که در درجه اول به حدود ۷۰ تا $120A.hour/m^2$ جریان برای کاهش فیلم اکسید آهن (III) به کاتیون‌های آهن (II) نیاز دارد. با حذف لایه اکسید، جریان مورد نیاز نیز کاهش می‌یابد و پتانسیل سیستم تا خارج شدن کامل آندهای منیزیم از سرویس، در جهت منفی افزایش می‌یابد. پس از آن، پتانسیل سیستم

شروع به افزایش در جهت مثبت می‌کند و در این نقطه آند آلومینیم هم شروع به کار می‌کند و پتانسیل را در بالاتر از معیار پتانسیل ۸۵۰ mV- حفظ می‌کند که عمر دلخواه با ظرفیت‌های جریان بالا فراهم می‌آورد.

مشکلات حفاظت کاتدی مخازن ذخیره

بزرگ‌ترین مشکل در مواجهه با اجرای حفاظت کاتدی این است که نمی‌توان یک جریان حفاظت کاتدی یکنواخت در مخزن تأمین کرد و در نتیجه اختلاف پتانسیل قابل توجهی به‌ویژه در مخازن بسیار بزرگ بین مرکز مخزن و پیرامون آن به وجود می‌آید. به‌عنوان یک نتیجه می‌توان گفت مسائلی رخ می‌دهد، زیرا پتانسیل مرکز مخزن باید به پتانسیل مورد نیاز معیارهای حفاظت کاتدی برسد.

به‌علاوه، اندازه‌گیری دقیق پتانسیل مرکزی مخزن با الکترود مرجع امکان‌پذیر نیست، زیرا آنها در خارج از مخزن نصب شده‌اند. لازم است که الکترود مرجع تا آنجا که امکان دارد نزدیک به سطحی که پتانسیل آن اندازه‌گیری خواهد شد، قرار داده شود؛ بنابراین، در طول مراحل ساخت و نصب مخازن، یک الکترود مرجع باید در یک لوله سوراخ شده در زیر مرکز سطح پایین‌تر مخزن نصب شود. سپس مخزن و الکترود مرجع به‌صورت خارجی به واحد اندازه‌گیری متصل می‌شوند.

برای مخازنی که در زیر مرکز سطح پایین‌تر مخزن الکترود مرجع نصب نشده است، اندازه‌گیری پتانسیل مرکز مخزن ممکن نیست؛ بنابراین، افت پتانسیل اُهمی IR از حاشیه به مرکز مخزن باید با استفاده از فرمول زیر محاسبه شود:

$$\Delta E = \rho \frac{i \times r}{2}$$

که در آن ΔE تغییر پتانسیل در فاصله r از اطراف مخزن است، i چگالی جریان (A/cm^2) حفاظت کاتدی و ρ مقاومت ohm.cm است.

با افزایش چگالی جریان حفاظت کاتدی و مقاومت زمین، اختلاف پتانسیل بین اطراف و مرکز مخزن هم افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، برای یک مخزن با قطر ۷۲ متر و برای جریان حفاظت کاتدی $10^{-4} mA/cm^2$در یک مقاومت برابر 5000 ohm.cm.

$$\Delta E = 5000(0/0001 \times 3600)/2 = 900mV$$

در نتیجه برای دستیابی به معیار ۸۵۰ mV- در مرکز مخزن، پتانسیل باید به مقدار $-850mV + (-900mV) = -1/750V$ برسد بااین‌حال، در عمل، پتانسیل بالاتر از ۱/۵ V- براساس الکترود CSE، برای اجتناب از حفاظت بیش از حد، لازم نیست. راهکارهای زیر برای غلبه بر این مشکل انجام می‌شوند:

۱. آندها در اطراف مخزن با فاصله مساوی از یکدیگر و ۱/۵ و ۲ متر از پایه مخزن و به‌صورت عمودی و حداقل در ۱/۵ متری داخل زمین قرار داده می‌شوند. کابل آندها با استفاده از یک فنر حلقوی، به قطب مثبت دستگاه T/R متصل می‌شود؛

۲. در روش دوم، آندها به‌صورت افقی و در فواصل مساوی از یکدیگر در زیر مخزن قرار داده می‌شوند. اما، این روش تنها می‌تواند برای مخازن جدید به کار می‌رود؛

۳. در راهکار سوم، توزیع یکنواخت پتانسیل با استفاده از یک بستر آندی که ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر دورتر از مخزن است، حاصل می‌شود. اگر چندین مخزن، به‌صورت کاتدی حفاظت شود، این راهکار مقرون‌به‌صرفه خواهد بود؛

۴. در راهکار دیگر، اگر تنها یک مخزن باید به صورت کاتدی حفاظت شود، آندها را می‌توان با یک زاویه ۴۵ درجه نسبت به پایه مخزن نصب کرد که به توزیع یکنواخت جریان در پایه مخزن منجر می‌شود و در نتیجه پتانسیل در مرکز مخزن تا رسیدن به مقدار مورد نظر افزایش می‌یابد. عمق بستر آندی که در آن آندها مایل قرار داده می‌شوند، بر مبنای اندازه مخزن، می‌تواند بین ۷ تا ۱۰ متر باشد، به‌طوری‌که فاصله آندها به مرکز و به پیرامون مخزن یک مقدار بهینه باشد.

مثال عملی طراحی دوره□□□□ برای حفاظت کاتدی مخازن زیرزمینی ذخیره نفت خام و مواد نفتی

مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی[37] (UST) با پوشش جدید

شرح

سه مخزن ذخیره‌سازی جدید با ظرفیت ۱۲۳۰۰۰ لیتر (۳۵۰۰۰ گالن) قرار است در یک محوطه مخزن کوچک، همان‌طور که در شکل ۹-۱۶ نشان داده شده است، نصب شوند. مخازن دارای قطر ۳/۶۶ متر (۱۲ فوت) و ارتفاع ۱۲/۲ متر (۴۰ فوت) هستند. تقریباً ۹۰ متر (۲۹۵ فوت) لوله‌کشی با قطر خارجی ۳/ سانتی‌متر (۲/۸۷۵ اینچ) مستقیماً به مخازن متصل خواهند شد. لوله‌کشی در اتصال‌های بینابینی به سایر سازه‌ها، جداسازی خواهد شد. یک سامانه حفاظت کاتدی با طول عمر حداقل ۲۰ سال برای تأسیسات مخزن طراحی کنید. فرض کنید که پوشش محافظ روی مخازن و لوله فولادی متصل به ترتیب کارایی ۹۰ درصد (۱۰ درصد بدون پوشش) و ٪۹۵ (۵ درصد بدون پوشش) خواهند داشت. مقاومت ویژه خاک در منطقه ohm-cm ۴۰۰۰ است.

روش کار

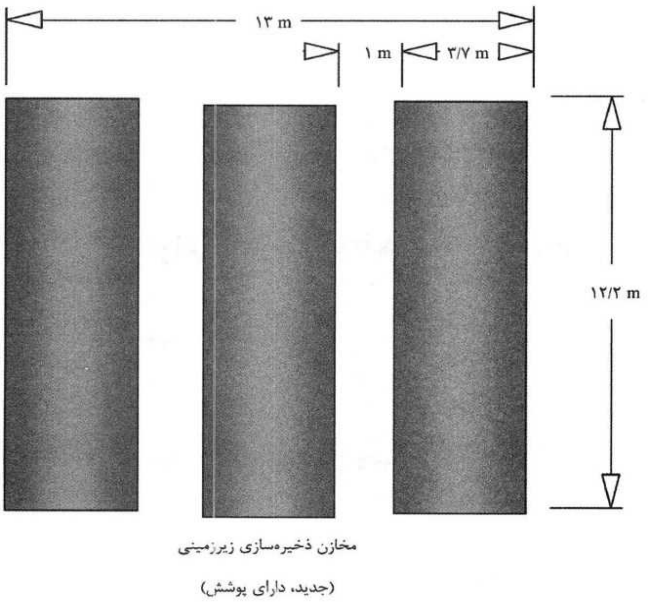
اولین قدم در طراحی حفاظت کاتدی، محاسبه مساحت سطح هر مخزن و لوله‌کشی متصل به آن است.

مساحت سطح هر مخزن برابر خواهد بود با:

$$A_s = 2\pi^2 r + \pi d L$$

---

37 □□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□



شکل ۹-۱۶ آرایش مخازن

که در این رابطه:

A_s: مساحت (متر مربع)

r: شعاع مخزن (۱/۸۳ متر)

d: قطر مخزن (۳/۶۶ متر)

L: طول مخزن (۱۲/۲ متر)

$$A_s = 161/3m^2(1735\text{ft}^2)$$

مساحت سطح کل برای سه مخزن ۴۸۳/۹ مترمربع خواهد بود. مساحت سطح لوله‌کشی متصل برابر است با: $A_s=\pi dL$

که در این رابطه:

d: قطر لوله (۰/۰۷۳ متر)

L: طول لوله (۹۰ متر)

$$A_s = 20/6m^2(222\text{ft}^2)$$

فلز بدون پوشش روی مخازن و لوله‌ها را می‌توان به روش زیر محاسبه کرد:

مخازن: $$A_s = 0/10 \times 439/9m^2 = 48/4m^2(521\text{ft}^2)$$

لوله‌کشی: $$A_s = 0/05 \times 20/6m^2 = 1m^2(10/8\text{ft}^2)$$

بنابراین سطح کل بدون پوشش که از این محاسبات به دست آمده برابر ۴۹/۴ مترمربع (۵۳۲ فوت‌مربع) یا ۴۹۴۰۰۰ سانتی‌مترمربع است. فرض کنید که جریان مورد نیاز در خاک‌های موجود در محوطه مخازن ۲/۱۵ میکرو آمپر به ازای یک سانتی‌مترمربع باشد (2mA/ft^2) کل جریان مورد نیاز برای ۴۹۴۰۰۰ سانتی‌مترمربع فولاد بدون پوشش برابر است با:

$$\text{I}=2/5 \times 10^{-6}\text{A/cm}^2 \times 4/94 \times 10^5\text{cm}^2 = 1/06A$$

در قدم بعد مقدار منیزیم مورد نیاز برای تأمین ۲۰ سال جریان خروجی مداوم ۱/۰۶ آمپر را محاسبه کنید.

منیزیم دارای ظرفیت $0/125\text{A-yr/kg}$ در کارایی ٪۵۰ است.

$$W=(tI)C_a$$

که در این رابطه:

W: مقدار منیزیم مورد نیاز (kg)

t: زمان (۲۰ سال)

I: جریان (۱/۰۶ آمپر)

C_a: ظرفیت $(0/125\text{A-yr/kg})$

$W = (20\text{yr} \times 1/06A)/(0/125\text{A-yr/kg}) = 169/6\text{kg}$ (۳۷۳ پوند)

تذکر: ظرفیت (C) شامل ضریب کارایی «خوردگی»[۳۷۱] الکتروشیمیایی می‌شود. هرگز ممکن نیست که از تمام ماده آندی که به‌صورت نظری موجود است، در زمان مصرف آن، استفاده کرد. اندازه فیزیکی ویا یکپارچگی مکانیکی تا حدی که آند قادر به عملکرد نباشد، کاهش خواهد یافت. به‌صورت معمول یک ضریب استفاده ٪۸۵ نیز اعمال می‌شود. این بدان معنی است که زمانی که ٪۸۵ از آند مصرف شده است، دیگر نمی‌توان برای عملکرد مؤثر به‌عنوان آند به آن تکیه کرد، بنابراین وزن تعدیل شده آن برابر است با:

$$W = 169.6/0.85 = 199.5 = 200\text{kg}$$

آندهای منیزیمی ۱۴/۵ کیلوگرمی (۳۲ پوند) را در نظر بگیرید. تعداد این آندها که برای تأمین ۲۰۰ کیلوگرم مورد نیاز است را تعیین کنید.

$$N = 200\text{kg}/14.5\text{kg} = 13.8$$

۱۴ آند مورد نیاز خواهد بود. در قدم بعد مقاومت تقریبی یک تک آند در خاک با مقاومت ۴۰۰۰ اهم سانتی‌متر را محاسبه کنید. اثرات مجاورت و مقاومت مخازن به زمین را نادیده بگیرید.

محاسبات بعدی، تخمینی از مقاومت واقعی را نشان می‌دهند.[۳۷۲]

با استفاده از رابطه دوایت:

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right)$$

که در این رابطه:

R= مقاومت آند (اهم)

ρ= مقاومت ویژه (۴۰۰۰ اهم سانتی‌متر)

3 7 1

[۳۷۲] .مقاومت واقعی مدار از مقاومت‌های سری متعلق به مخازن به زمین، سیم بین مخازن و آندها، و مقاومت آند به زمین تشکیل شده است. همچنین اثرات بار مشترک (مجاورت) در اجزای مختلف وجود دارد که بر مقاومت مؤثر تأثیر می‌گذارند. رابطه‌های استفاده شده بر اساس مقاومت به زمین دور هستند. ازآنجاکه، مخازن و آندهای نسبت به یکدیگر در زمین دور نیستند، محاسبات فقط تقریب هستند.

L= طول آند (۰/۵ متر)

d: قطر آند (۰/۱۳ متر)

$R = (12/7\Omega)(2/43) = 30/9$ اهم

با نادیده گرفتن ابعاد و مقاومت ویژه پشت‌بند مخصوص و مقاومت مخزن به زمین دور، مقاومت تقریبی یک آند ۳۱اهم خواهد بود. چنانچه منیزیم پتانسیل بالا که در پتانسیل ۱/۷۵ ولت نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس عمل می‌کند و مخازن پلاریزه شده در ۸۵۰ mV- (۰/۸۵ V-) را در نظر بگیریم، پتانسیل محرکه خاص ۰/۹- ولت خواهد بود. جریان خروجی یک تک آند (با نادیده گرفتن اثرات مجاورت) با استفاده از این رابطه به دست می‌آید.

$I = 0/9V/31\Omega = 0/03A$ آند

۰/۰۳ آمپر به ازای آند در حداقل تعداد آند مورد نیاز برای تأمین وزن ضروری (۱۴) ضرب شده و جریان کل را نتیجه می‌دهد:

$I = 14 \times 0/03\text{A}=0/42A$

این جریان کمتر از نیمی از مقدار مورد نیاز برای حفاظت مخازن در چگالی جریان پیشنهادی، ۲/۱۵ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع است.

روش دیگر

آندهای ۹ کیلوگرمی را در نظر بگیرید. این آندها طولی برابر ۱/۵ متر و قطر ۵ سانتی‌متر دارند.

با استفاده مجدد از رابطه دوایت با استفاده از مقادیر جدید برای L و d:

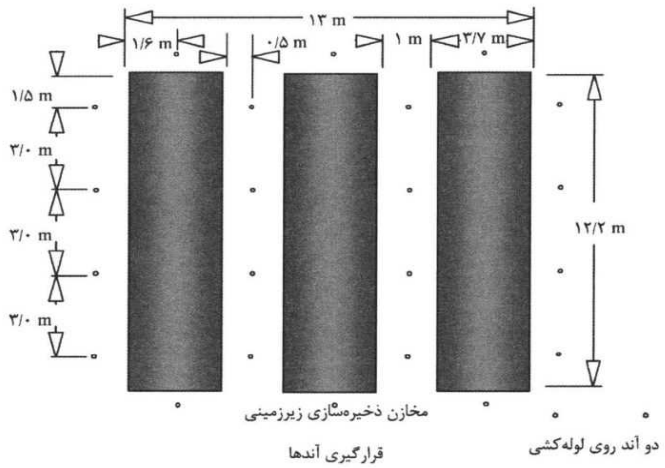
خروجی جریان به ازای آند:

$I = 0/9V/19\Omega = 0/047\text{A}/$

تعداد آند ضروری برای تولید ۱/۰۶ آمپر برابر خواهد بود با:

$I = 1/06A/0/047\text{A}=22/6$

به نزدیک‌ترین عدد صحیح تبدیل می‌شود، ۲۳ آند. وزن کل منیزیم در ۲۳ آند ۹ کیلوگرمی، ۲۰۷ کیلوگرم است. این مقدار از حداقل وزن ۲۰۰ کیلوگرم برای دوام در ۲۰ سال بیشتر است؛ بنابراین، می‌بایست آندها از ۲۰ سال بیشتر دوام بیاورند. برای تقارن، از ۲۴ آند به جای ۲۳ آند استفاده کنید. این آندها می‌توانند به‌صورتی‌که در شکل ۹-۱۷ نشان داده شده است، چیده شوند، ۲۲ آند اطراف مخازن و ۲ آند روی لوله‌کشی متصل.



شکل ۹-۱۷ پیکربندی آند

نصب نوعی از الکترودهای مرجع دائمی در نقطه‌ای زیر کف مخزن، همچنین نزدیک یا روی سطح مفید است. از این الکترودها می‌توان برای بررسی عملکرد سامانه حفاظت کاتدی با زمان و همچنین تعیین دقیق جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی پس از نصب مخازن استفاده کرد. همچنین اتصال گروه آندها به یکدیگر از طریق یک شنت اندازه‌گیری جریان مناسب است. در این اتصال می‌توان مقاومت کنترل قرار داد که می‌تواند شار جریان را محدود و از جریان خروجی زیادی و غیرضروری برای حفاظت ممانعت کند.

مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی موجود/یک‌سوکننده/توزیعی

شرح

مخازن موجود با همان ابعاد و پیکربندی ذکر شده در مسئله قبل از در نظر بگیرید. این مخازن پوشش محافظ مؤثر سرتاسری ندارند، اما از نظر الکتریکی از سایر سازه‌ها جداسازی شده‌اند. یک سامانه آند توزیعی با منبع یک‌سوکننده که حفاظت کاتدی را برای این مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی تأمین می‌کند، طراحی کنید.

روش کار

قدم اول بررسی عایق بودن مخازن موجود از نظر الکتریکی است. این کار را می‌توان با اندازه‌گیری مقاومت مخزن به زمین دور یا سازه‌ای که به‌خوبی به زمین متصل، شده انجام داد. آشکارساز تماس AC نیز ممکن است مفید باشد. فرض کنید که ۲ میکرومتر بر سانتی‌مترمربع برای حفاظت کاتدی مخازن مورد نیاز است. با استفاده از مساحت سطح کل مخازن که در مسئله قبل محاسبه شده، جریان کل مورد نیاز به‌وسیله رابطه زیر داده خواهد شد:

$$I_T = A_S i$$

که در این رابطه:

$I_T =$ جریان کل (آمپر)

$A_S =$ مساحت سطح کل مخزن $(4/84 \times 10^6 \text{cm}^2)(1/9 \text{mA/ft}^2)$

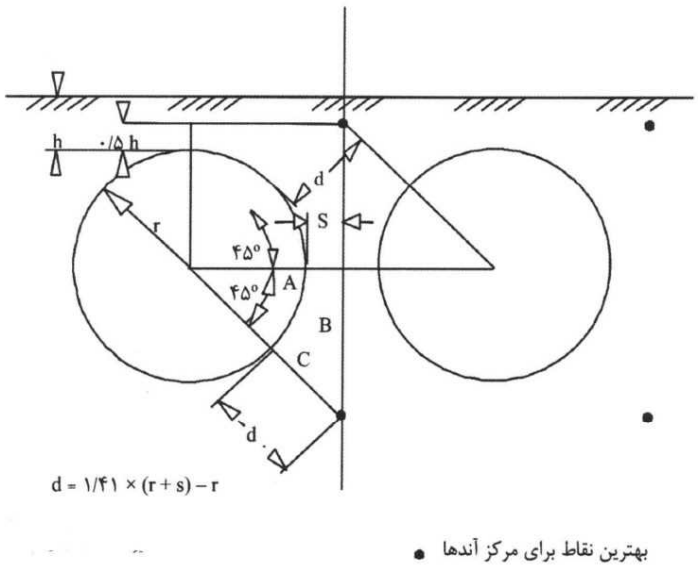
i = چگالی جریان مورد نیاز برای حفاظت $(1/9\text{mA/ft}^2)(2/0 \times 10^6\text{A/cm}^2)$

$$I_T = 9/7A$$

بنابراین جریان مورد نیاز ۹/۷ آمپر است.

قدم بعدی تأیید عدم وجود سازه‌های زیرزمینی دیگر در مجاورت مخازن است که امکان دارد تحت تأثیرات منفی نصب آندهای توزیعی در اطراف مخازن قرار بگیرند. فرض می‌کنیم چنین سازه‌ای پیدا نمی‌شود. برای این مشکل آندهای اکسید فلزی مخلوط از نوع میله‌ای با قطر ۰/۶۴ سانتی‌متر (۰/۲۵ اینچ) و طول ۱۲۲ سانتی‌متر (۴ فوت) را انتخاب می‌کنیم. این آندها که در محفظه‌های فلزی با قطر ۷/۶ سانتی‌متر (۳ اینچ) و طول ۱۵۲ سانتی‌متر (۵ فوت) پر شده با زغال کک، بسته‌بندی می‌شوند، به شکلی هستند که برای قرار دادن در حفره‌های کوچک در نزدیکی مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی که فاصله محدود است، مناسب‌اند.

قدم بعدی تعیین آرایشی است که بهترین توزیع جریان به تمام سطوح مخازن مدفون را فراهم می‌آورد. شکل ۹-۱۸ نشان‌دهنده هندسه برای ۳ مخزن نمونه از این گروه سه تایی است. در این مورد انفصال میان مخازن و پوشش روی آنها تقریباً برابر است. در این پیکربندی، هندسه برای نصب آندهای سطحی (آندهایی با تقریباً نصف عمق میان بالای مخزن و سطح زمین) به‌صورت افقی موازی با طول مخازن و در وسط ردیف آنها مناسب است. پیکربندی آند مشابهی برای مخازن بیرونی این گروه استفاده می‌شود. برای پوشش دادن یک چهارم پایینی مخازن، آندهای عمودی می‌بایست به‌صورتی نصب شوند که مرکز آندها به اندازه کافی زیر مخازن قرار گیرد تا توزیع مناسبی از جریان رو به بالا، به سمت سطوح زیرین داشته باشد. معادله‌های نشان‌دهنده فاصله میان سطح یک چهارم پایینی مخزن در زاویه ۴۵ درجه زیر خط وسط ۳و۳ نقطه میانی آند در شکل ۹-۱۸ داده شده است.



شکل ۹-۱۸ هندسه آند

3 7 3

معادله‌ها به‌صورت زیر هستند:

$$\cos 45°=(r+s)/(r+d)$$
$$d = (r+s)/\cos 45° - r$$
$$d=\sqrt{2}(r+s) - r$$
$$d = 1/41(r+s) - r$$

که در این رابطه:

d= فاصله میان سطح سطح مخزن ۴۵ درجه زیر خط وسط (متر)

r= شعاع مخزن (۱/۸۳ متر)

s= ۰/۵ × فاصله میان مخازن (۰/۵ متر)

d= ۱/۴۶ متر

تجربه نشان می‌دهد که جریان از هر آند، سطحی از مخزن که شامل زاویه‌ای در حدود ۱۲۰ درجه از مرکز آند می‌شود را به‌صورت کافی پوشش می‌دهد. طول تحت پوشش مخزن توسط این رابطه محاسبه می‌شود:

$$L = 2d\ tan\ 60°$$

که در این رابطه:

L= طول تحت پوشش جداره مخزن (متر)

d= فاصله مرکز آند از سطح مخزن (۱/۴۶ متر)

$$L = 2 \times 1/46m \times 1/73 = 5/05m$$

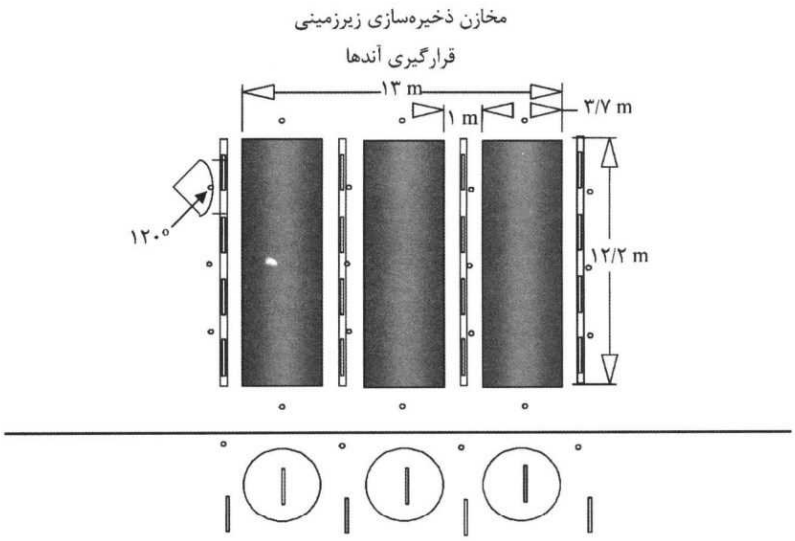
طول تحت پوشش (L) فاصله میان آندها نیز هست. منطق این رابطع بر اساس هندسه است. فاصله میان آند تا نقطه L ۰/۵ در طول سطح مخزن، دو برابر فاصله میان مخزن و آند در نقطه قرارگیری آند است. در مسئله بعدی نشان داده خواهد شد که افزایش ولتاژ در زمین در نتیجه شار جریان از یک آند طویل باریک، تقریباً متناسب با معکوس فاصله از آند است. اگر دو آند L متر از یکدیگر فاصله داشته باشند، هر آند افزایش ولتاژی در نقطه وسط میان آنها تولید خواهد کرد که با نصف افزایش ولتاژ مستقیماً رو به روی هر آند برابر است. اثر افزایشی بر بالا رفتن ولتاژ در زمین در نقطه میان آندها تمایل به یکسان کردن جریان توزیع شده روی سطح مخزن دارد. توزیع حقیقی جریان پیچیده است، اما نتایج عملی این رابطه را در طراحی سامانه‌های حفاظت کاتدی بسیار سودمند می‌کنند. ازآنجاکه، مخزن دارای طول ۱۲/۲ متری هستند، تعداد آندهای مورد نیاز برای توزیع جریان به یکی از یک چهارم‌های پایینی برابر است با:

$$N = 12.2m/5.05m = 2.42 = 3 \quad \text{آند}$$

یک آند اضافی برای توزیع جریان به انتهای هر مخزن مورد نیاز است.

توزیع جریان به یک چهارم‌های بالای مخازن را می‌توان با نصب آندهای افقی، موازی با مخازن به دست آورد. در اینجا چهار آند برای تأمین توزیعی تا حد ممکن یکنواخت از جریان به بالای مخازن انتخاب شده‌اند. تجربه نشان می‌دهد که عمق کم به خصوص در غیاب پوشش محافظ با کیفیت، مانع رسیدن جریان به بالای خط مرکزی مخازن می‌شود. آندها بر طبق پیکربندی نشان داده شده در شکل ۹-۱۹ نصب می‌شوند. می‌بایست بسیار دقت کرد تا از ضربه زدن به مخازن در حین حفاری و تماس

الکتریکی آندها با مخازن یا لوله‌کشی جلوگیری شود. قرار دادن پشت‌بند زغال ککک اطراف محفظه فلزی از تماس مناسب با خاک اطمینان می‌دهد. کابل‌های اصلی توسط یک جعبه تقسیم به‌صورت گروهی و ترجیحاً همراه با شنت‌های جداگانه برای اندازه‌گیری شار جریان به هریک از آندها، به کمک یکدیگر متصل می‌شوند. اتصال‌های منفی از هریک از سه مخزن نیز به یک جعبه اتصال معمولی وارد می‌شوند تا به خروجی منفی یک‌سوکننده آینده متصل شوند.



شکل ۹-۱۹ پیکربندی نهایی آند

در مخازن نصب شده از این نوع، بهتر است تا آزمایش‌های جریان مورد نیاز برای تأیید میزان واقعی جریان لازم برای دستیابی به حفاظت کاتدی انجام شوند. ازآنجاکه، تقریباً ۱۰ آمپر جریان مورد نیاز خواهد بود، منبع توانی با توانایی تولید حداقل ۲ یا سه برابر این مقدار جریان را می‌بایست به کار برد. بسته به مقاومت واقعی آندها، این امر ممکن است به مولد قابل حمل تقریباً بزرگ یا ماشین جوشکاری نیاز داشته باشد. اغلب از یک‌سوکننده‌های آزمایشی برای انجام آزمایش‌های پلاریزاسیون در این نوع از تأسیسات استفاده می‌شود.

مانند مثال قبل، نصب یک یا چند الکترود مرجع در عمقی که حداقل توان بررسی سطح زیرین کف مخازن را داشته باشد، مطلوب است. چنین الکترودی می‌بایست در نقطه وسط بین دو آند عمیق که بین مخازن موازی نصب شده‌اند، قرار گیرد. زمانی که آزمایش‌های جریان مورد نیاز تعیین شدند (با استفاده از E-log I یا معیار پلاریزاسیون خالص) یک یک‌سوکننده مناسب را می‌توان خریداری و نصب کرد. حداکثر جریان به ازای آند به‌وسیله آندهای اکسید فلزی مخلوط با اندازه انتخاب شده، ۱/۸ آمپر به ازای آند است. ازآنجاکه، ۳۴ آند، هریک با توانایی ۱/۸ آمپر در این تأسیسات وجود دارد، آندها می‌بایست به آسانی عمر ۲۰ سال را پیش از نیاز به تعویض فراهم کنند.

مثال عملی طراحی دوره NACE برای حفاظت کاتدی سطوح خارجی مخازن ذخیره نفت خام و مواد نفتی

مثال‌های طراحی کف مخازن ذخیره‌سازی روزمینی

ساخت جدید/یک‌سوکننده/زیر مخزن

شرح

قرار است مخزن سوخت جدیدی با قطر ۳۶/۶ متر (۱۲۰ فوت) ساخته شود. مخزن شامل یک غشای غیرفلزی عایق الکتریکی به‌عنوان کنترل ثانویه است. این غشا تقریباً یک متر زیر مخزن نصب خواهد شد. یک دیواره به شکل حلقه اطراف محیط مخزن نصب و درون آن با ماسه شسته شده پر خواهد شد. ماسه شسته شده خیس به‌صورت معمول دارای مقاومت ویژه ۱۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر یا بیشتر است. انتظار می‌رود که نهایتاً پسماند آب باران، ماسه درون منطقه کنترل را آلوده خواهد کرد و ممکن است منجر به خوردگی سطح زیرین کف مخزن شود. سامانه حفاظت کاتدی را طراحی کنید که کنترل خوردگی ضروری برای سطح زیرین کف این مخزن را تأمین کند. سامانه آند می‌بایست عمر طراحی ۴۰ سال داشته باشد.

روش کار

کنترل ثانویه به‌عنوان حفاظ عایق الکتریکی کف مخزن عمل می‌کند. این امر مانع استفاده مؤثر از آندهای نصب شده زیر این غشا برای حفاظت کف مخزن می‌شود. سامانه آند می‌بایست در منطقه ماسه‌ریزی شده بین کف مخزن و غشا قرار داده شود. فرض کنید جریان ضروری برای تأمین حفاظت کاتدی در ماسه شسته شده، یک میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع باشد. جریان کل مورد نیاز برای مخزن با قطر ۳۶/۶ متر به این صورت محاسبه می‌شود:

$$I_T = A_s i$$

که در این رابطه:

I_T = جریان کل مورد نیاز (آمپر)

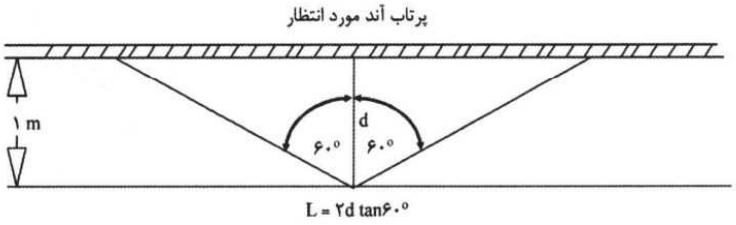
A_s = مساحت کف مخزن $(1/05 \times 10^7 \mathrm{cm}^2)$

i = چگالی جریان مورد نیاز $(1/0 \times 10^{-6} \mathrm{A/cm}^2)$

$$I_T = 10/5A$$

جریان کل تقریباً ۱۰/۵ آمپر است.

ازآنجاکه، فاصله میان کف مخزن و آند محدود خواهد بود (حداکثر یک متر) آندهایی از نوع نوار چندتایی برای تأمین توزیع جریان به کف مخزن مورد نیاز خواهند بود. زاویه‌ای ۱۲۰ درجه بین نوار و کف مخزن، منطقه پوشش احتمالی را تعریف می‌کند. شکل۹-۲۰ این امر را توضیح می‌دهد.



شکل ۹-۲۰ پوشش آند

منطقه تحت پوشش با استفاده از رابطه زیر داده می‌شود:

$$L = 2d\ tan\,60°$$

که در این رابطه:

L= عرض منطقه تحت پوشش از آند نواری (متر)

d= فاصله میان آند نواری و کف مخزن (۱ متر)

$L = 2 \times 1/0m \times 1/73 = 3/46$ متر

بنابراین حداکثر فاصله میان آندهای نواری که دقیقاً بالای غشا قرار داده شده‌اند و می‌توانند به‌صورت مؤثری کف مخزن را پوشش دهند، ۳/۴۶ متر خواهد بود. برای ملاحظات طراحی، حداکثر فاصله میان آندهای نواری را ۳ متر در نظر بگیرید. قدم بعدی محاسبه حداقل طول کل سامانه آند مورد نیاز با فاصله سه متر است.

$$N=d/s$$

که در این رابطه:

N= تعداد آندهای نواری به‌صورت موازی

d= قطر مخزن (۳۶/۶ متر)

S= فاصله میان نوارها (۳ متر)

$N = 36/6m/3m = 12/2$

می‌بایست ۱۳ آند با فاصله ۳ متر استفاده شوند. برای حداقل پیکربندی، رابطه زیر (فرمی از قضیه پیتاگورن)[۳۷]طول هر یک از نوارها از مرکز مخزن به یک سمت را تعریف می‌کند.

$$y=(\ \ ^2 - x^2)^{0/5}$$

که در این رابطه:

x= فاصله از مرکز مخزن

y = نصف طول نوار، با X متر فاصله از نوار مرکزی

r= شعاع مخزن (۱۸/۳ متر)

جدول ۹-۸ محاسبه‌های کل طول آند نواری مورد نیاز برای حداقل پیکربندی را خلاصه می‌کند.

3 7 4

جدول ۹–۸ طول نوارهای آند

y (متر)	x (متر)
۱۸/۳	۰
۱۸/۱	۳
۱۷/۳	٦
۱۵/۹	۹
۱۳/۸	۱۲
۱۰/۵	۱۵
۳/۳	۱۸
۹۷/۲	کل

نوار مرکزی در دو قسمت از چهار قسمت دایره مشترک است. حداقل طول کل آند نواری مورد نیاز برای تأمین پوشش کافی کف مخزن برابر است با:

$$L = 4 \times (97/2m - 18/3m) + 2 \times 18/3m = 352$$ متر

انتخاب ماده آند

عملکرد آندهای نوع فداشونده در این نوع سامانه حفاظت کاتدی قابل تصور است. همچنین ممکن است که آندهای اکسید فلزی مخلوط با منبع توان یک‌سوکننده را در نظر گرفت. ابتدا آندهای فداشونده را در نظر بگیرید. داده‌های زیر برای آند نوع نواری منیزیم پتانسیل بالا است:

آلیاژ: منیزیم (پتانسیل بالا)

ظرفیت: ۱۱۰۰ آمپر ساعت بر کیلوگرم $(500A\ hr/Ib)$

نرخ مصرف: ۹ کیلوگرم (۱۷/۶ پوند) بر آمپر سال

ابعاد نوار: ۰/۹۴ سانتی‌متر (۰/۳۷ اینچ) در ۱/۹ سانتی‌متر (۰/۷۵ اینچ)

وزن: ۰/۳۶ کیلوگرم بر متر $(0/24\ Ib./ft)$

وزن منیزیم مورد نیاز برای تأمین ۱۰/۵ آمپر جریان برای ۴۰ سال را محاسبه کنید.

$$W = atIC_r$$

که در این رابطه:

W= وزن فلز (کیلوگرم)

t= زمان (۴۰ سال)

I= جریان مورد نیاز (۱۰/۵ آمپر)

C_r= نرخ مصرف $(8kg/A\text{-}yr)$

$$W = 40yr \times 10/5A \times 8kg/A\text{-}yr = 3360kg(7390Ibs.)$$

طول نوار مورد نیاز با استفاده از رابطه زیر داده خواهد شد:

$$L = W_T/w$$

که در این رابطه:

L= طول نوار مورد نیاز (متر)

W_T= وزن کل (۳۳۶۰ کیلوگرم)

w= وزن بر متر نوار آند (0/36kg/m).

$$L = 3360\text{kg}/0/36\text{kg}/m = 9333m(30600\text{ft})$$

با احتساب ۳/۷۵ دلار به ازای هر متر (در سال ۱۹۹۹)، قیمت ماده آند ۳۵۰۰۰ دلار خواهد بود. نوار روی را در نظر بگیرید. داده‌های بعدی برای روی هستند.

آلیاژ: روی

ظرفیت: ۷۳۸ آمپر ساعت به ازای هر کیلوگرم (335 A-hr/Ib)

نرخ مصرف: (25 Ib./A-yr)11/9kg/A-yr

ابعاد نوار: ۲/۵ در ۳/۲ سانتی‌متر (۱ در ۱/۲۵ اینچ)

وزن به ازای هر متر: (2/4 Ib./A-yr)3/57kg/m

وزن کل روی مورد نیاز برای تأمین ۱۰/۵ آمپر برای ۴۰ سال برابر است با:

$$W=tIC_r$$

که در این رابطه:

W= وزن فلز (کیلوگرم)

t= زمان (۴۰ سال)

I= جریان مورد نیاز (۱۰/۵ آمپر)

C_r= نرخ مصرف (26 Ib./A-yr)(11/9kg/A-yr)

$$W = 40\text{yr} \times 10/5A \times 11/9\text{kg/A-yr} = 4998 \quad \text{کیلوگرم}$$

طول نوار مورد نیاز با استفاده از این رابطه داده خواهد شد:

$$L=W_T/w$$

که در این رابطه:

L= طول نوار موردنیاز

W_T= وزن کل (۴۹۹۸ کیلوگرم)

w= وزن به ازای هر متر نوار آند (3/57kg/m)

$$L = 4998\text{kg}/3/57\text{kg}/m = 1400m(4592\text{ft})$$

با احتساب ۲۸ دلار به ازای هر متر (۱۹۹۹)، قیمت ماده آند ۳۹۲۰۰ دلار خواهد شد. آند نواری اکسید فلزی مخلوط پوشش شده روی تیتانیم را در نظر بگیرید. خواص این ماده عبارت‌اند:

ظرفیت: 0/016A/m (5 m/A./ft) برای عمر ۴۰ سال

ابعاد: ۰/۶۴ در ۰/۶۴ سانتی‌متر (۰/۲۵ در ۰/۲۵ اینچ)

فصل نهم : طراحی عملی سیستم حفاظت کاتدی با ذکر مثال | 601

کل طول نوار مورد نیاز برای تأمین ۱۰/۵ آمپر جریان با استفاده از رابطه زیر داده می‌شود:

$$L=I/C_a$$

که در این رابطه:

L= طول نوار مورد نیاز (متر)

I= جریان کل (۱۰/۵ آمپر)

C_a= (۰/۰۱۶ آمپر بر متر)

$$L = 1/05A/0/016A/m = 656/3m(2153\text{ft})$$

ازآنجاکه، طول ضروری، تقریباً ۱/۹ برابر مقداری است که برای حداقل پیکربندی توزیع جریان مورد نیاز است، کاهش فاصله میان نوارها از ۳ متر به مقدار کوچک‌تر لازم است. با آزمون و خطا، ۱/۶ متر تقریباً فاصله ضروری برای ۶۵۶ متر آند را نتیجه می‌دهد.

طول کل نوار برابر است با:

$$L = 4 \times (174/2m - 18/3A/m) + 2 \times 18/3m = 660/2m(2156\text{ft})$$

در هنگام استفاده از آندهای نوار اکسید فلزی مخلوط ضروری است تا میله‌های مدار اتصال بینابینی نصب شوند تا یکپارچگی الکتریکی بدون میرایی بیش از حد به دست آید. نوار در نظر گرفته شده برای این طراحی، مساحت سطح مقطعی در حدود ۰/۰۴ سانتی‌متر مربع دارد. «راهنمای فلزات»[375] جامعه فلزات آمریکا[376] مقاومت ویژه تیتانیم خالص تجاری را به میزان 42×10^{-6} تا 52×10^{-6} اهم سانتی‌متر ذکر کرده است. آلیاژها ممکن است متفاوت باشند. با استفاده از 42×10^{-6} اهم سانتی‌متر، مقاومت به ازای هر متر از نوار برابر است با:

$$R=\rho L/A_x$$

ρ= مقاومت ویژه تیتانیم (42×10^{-6} اهم سانتی‌متر)

L= طول آند نواری (۱۰۰ سانتی‌متر به ازای هر متر)

A= مساحت سطح مقطع نوار تیتانیم (۰/۰۴ سانتی‌متر مربع)

R= مقاومت خطی نوار (اهم)

جدول ۹-۹ طول نوارهای آند

y (m)	x (m)
۱۸/۳	۰
۱۸/۲	۱/۶
۱۸/۰	۳/۲
۱۷/۷	۴/۸

---

[375] Metals Handbook - ASM vol. 2, 10 ED., Metals Handbook ', 1990, P620

[376] American Society for Metals (ASM)

۱۷/۱	۶/۴
۱۶/۵	۸/۰
۱۵/۶	۹/۶
۱۴/۵	۱۱/۲
۱۳/۱	۱۲/۸
۱۲/۳	۱۴/۴
۸/۹	۱۶/۰
۵/۰	۱۷/۶
۱۷۴/۲	مجموع

اهم به ازای هر متر

$$R = 42 \times 10^{-6}\text{ohm-cm} \times 100\text{cm}/0/04\text{cm}^2 = 0/105$$

تخمینی از مقاومت آند به کف مخزن را می‌توان انجام داد. متأسفانه وجود غشا عایق الکتریکی، پیکربندی مدار موازی نوارهای آند و مجاورت شبکه آند به کف مخزن، تخمین را پیچیده می‌کند.

طول میانگین نوار آند را به این صورت فرض کنید:

$L_{\text{avg}} = 660m/23 = 28/7$ متر

با استفاده از رابطه اصلاح شده دوایت:

$$\text{R}=\frac{0/005\rho}{\pi\text{L}}\left(ln\left(\frac{4L}{d}\right)+ln\left(\frac{L}{h}\right)-2+\frac{2h}{L}\right)$$

که در این رابطه:

R= مقاومت یک آوند نواری میانگین (اهم)

ρ = مقاومت ویژه (فرض کنید ۱۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر)

L= طول میانگین نوار (۲۸/۷ متر)

d= قطر نوار (تقریباً $1/4/\pi = 0/0045$)

h= عمق نوار (۱ متر)

اهم بر نوار

$$R = 0/555\Omega(10/15 + 3/36 - 2 + 0/07) = 6/42$$

یک نوار میانگین مقاومتی برابر ۶/۴۲ اهم خواهد داشت، یا:

$\text{R}_\text{T} = \frac{6.42\ \Omega}{23} = 0.28$ اهم

برای ۲۳ نوار موازی (با نادیده گرفتن اثرات تداخل مشترک)

همچنین ممکن است که مقاومت را با استفاده از پیکربندی سطح مقطع یک نوار که باریکه‌ای از کف مخزن به عرض ۱۶۰ سانتی‌متر (۱/۶ متر) را «نظاره» می‌کند، تخمین زد. شکل ۹-۲۱ این روش را شرح می‌دهد. باریکه‌ای از ورق کف مخزن به عرض ۱/۶ متر با یکی از آندهای نواری در رأس منشور مثلثی از ماسه ۱۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر را در نظر بگیرید. جریان از نوار (با عرض ۰/۰۰۶۴ متر) از درون مساحت فزاینده ماسه شار می‌کند. مقاومت با طول مسیر و مقاومت ویژه به‌صورت مستقیم و با مساحت سطح مقطع به‌صورت معکوس متناسب است. با استفاده از دیفرانسیل و انتگرال می‌توانیم رابطه‌ای برای مقاومت یک تک آند نواری بسط دهیم. اگر فرض کنیم که W>>D ، مقاومت را می‌توان با استفاده از رابطه زیر تخمین زد:

$$R=\frac{\rho}{2L\tan\theta}\,ln\left(\frac{2D\tan\theta}{w}\right)$$

که در این رابطه:

R= مقاومت آند با L سانتی‌متر طول، اهم

ρ= مقاومت ویژه (۱۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر)

θ= نصف زاویه شکل گرفته میان نوار و باریکه کف $(38/7°)$

L= طول میانگین آند، سانتی‌متر

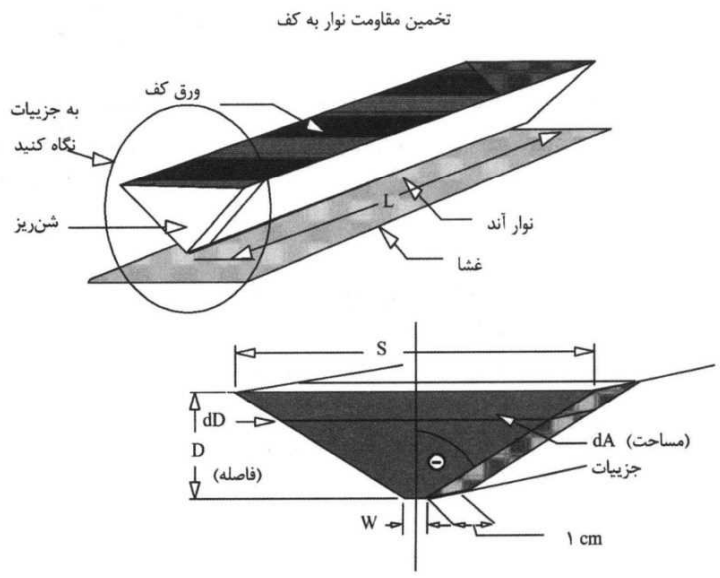
w= عرض آند، متر

D= فاصله میان آند و کف مخزن، متر

اهم

$$R=\frac{10000ohm\text{-}cm}{2/2870\ cm.\tan(38/7)}\,ln\left(\frac{1\times 2\times tang(38/7)}{0/0064m}\right)=12/01$$

این محاسبات، مقاومت تقریبی ۱۲/۰۱ اهم به ازای نوار میانگین یا ۰/۵۲ اهم برای ۲۳ نوار موازی را به دست می‌دهد. منطقی است تصور کنیم که در ماسه شسته شده با مقاومت ۱۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر، مقاومت بین ۰/۳ تا ۰/۵ اهم (میانگین ۰/۴ اهم) خواهد بود. اگر مقاومت ویژه ماسه از ۱۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر بیشتر باشد، مقاومت به‌صورت متناسب بیشتر می‌شود. برای احتیاط، مقاومت ۱/۲ اهمی میان کف مخزن و شبکه آند را در نظر بگیرید (ماسه ۳۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر).



شکل ۹-۲۱ تخمین مقاومت مخزن به آند

در الکترولیت با مقاومت ویژه پایین، میرایی در نوار چشمگیر خواهد بود. این امر در ماسه عامل تأثیرگذاری نیست. اتصال‌های چندتایی به آند برای اطمینان مطلوب است. فاصله میان میله‌های رابط متقاطع برای این هندسه تقریباً ۹ متر انتخاب شده است. این امر ۴ میله کوتاه کننده را به شبکه آند اضافه می‌کند و مسیرهای اضافی را در صورت شکست‌های موضعی اتفاقی در آند نواری فراهم می‌آورد. ابعاد میله‌های رابط متقاطع به این صورت است:

ماده: تیتانیم

عرض: ۱/۲۷ سانتی‌متر

ضخامت: ۰/۱ سانتی‌متر

تعداد میله‌های رابط متقاطع مورد نیاز:

$$N=d/s$$

که در این رابطه:

N= تعداد میله‌ها

d= قطر مخزن (۳۶/۶ متر)

s= فاصله میان میله‌ها (۹ متر)

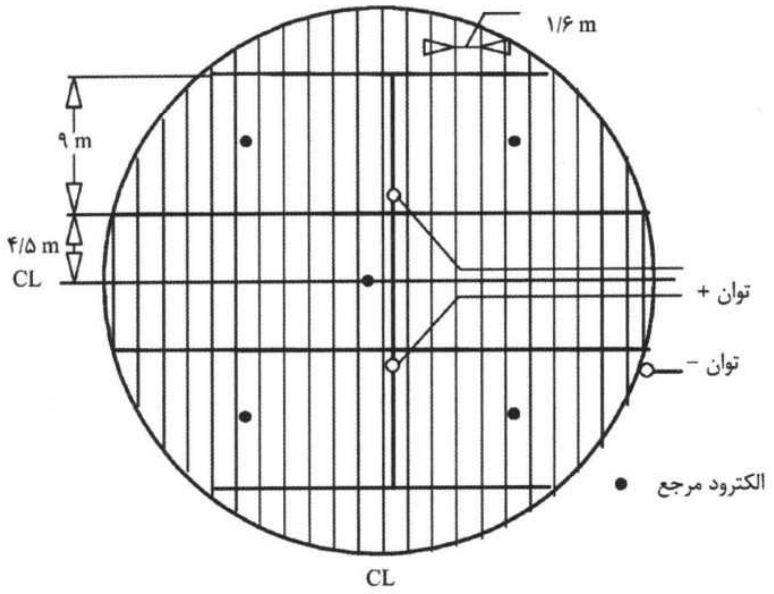
$$N=36/6m/9m = 4$$

با قرار گرفتن میله‌های مرکزی در فاصله ۴/۵ متری دو طرف مرکز مخزن، طول کل میله‌های رابط به ازای یک چهارم دایره، از جدول ۹-۱۰ تقریباً ۳۰ متر است (۲۸/۸ متر چنانچه از نقشه مدرج شکل ۹-۲۲ استفاده شود). به‌علاوه، یک تغذیه متقاطع میان میله‌های رابط نیاز است. این تغذیه متقاطع ۲۷ متر (3×9 متر) طول خواهد داشت. طول کل میله‌های رابط حدود ۱۴۷/۴ متر است.

جدول ۹-۱۰ طول میله‌های تغذیه متقاطع

□ □□□□	□ □□□□□
۱۷/۷	۴/۵
۱۲/۴	۱۲/۵
۳۰/۱ به ازای یک چهارم	

$$L = (4 \times 30/1M) + 27m = 147/4m(483/5\text{ft})$$



شکل۹-۲۲ طراحی شبکه آند

هزینه مواد برای یک سامانه آند اکسید فلزی مخلوط پوشش شده بر روی تیتانیم به این صورت است:

نوار آند: ۶۶۰ متر با قیمت هر متر ۱۰/۵۰ دلار (۱۹۹۹) = ۶۹۳۰ دلار

میله‌های متقاطع: ۱۴۷/۴ متر با قیمت ۵/۷ دلار به ازای هر متر = ۸۴۰ دلار

مجموع: ۷۷۷۱ دلار

هزینه یک‌سوکننده و سیم‌کشی سامانه آند ۲۴۸۰ دلار تخمین زده می‌شود. هزینه کل مواد برای سامانه جریان اعمالی تقریباً ۱۰۲۵۱ دلار است. هزینه مواد برای سامانه اعمال جریان (بدون در نظر گرفتن هزینه نصب خدمات AC یا توان عملیاتی) به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از آندهای گالوانیک است. شکل ۹-۲۲ شبکه آند پیشنهادی برای نصب در تقریباً ۱۰ سانتی‌متر بالای غشا را نشان می‌دهد. ۵ الکترود مرجع نصب شده در فواصل میانی درون شبکه سامانه آند نشان داده شده است. الکترودهای مرجع می‌بایست به کف مخزن نزدیک و در فاصله مناسبی بالای شبکه آند باشند. سیم‌های تغذیه متصل به میله‌های

رابط و اتصال به کف مخزن در منطقه‌ای انجام می‌شود که برای نصب واحد یک‌سوکننده مناسب باشد، ظرفیت یک‌سوکننده توسط این رابطه داده می‌شود:

$$E=IR$$

که در این رابطه:

E= حداکثر ولتاژ مورد نیاز

I= جریان (۱۰/۵ آمپر)

R= مقاومت (۱/۲ اهم)

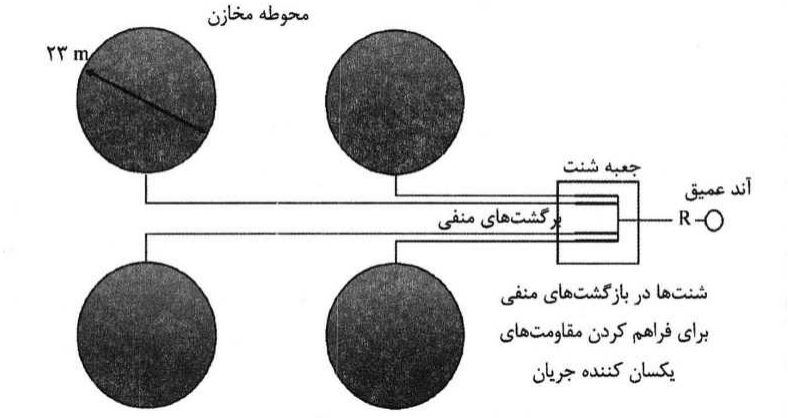
$$E=10/5A \times 1/2\Omega = 12/6 \text{ ولت}$$

نزدیک‌ترین یک‌سوکننده استاندارد که تقریباً ۱۲ ولت و ۱۲ آمپر است را انتخاب کنید. پس از آنکه سامانه و مخزن نصب شدند، رفتار سامانه حفاظت کاتدی را پایش کنید. با استفاده از الکترودهای مرجع نصب شده در زیر مخزن، آزمایش‌های پلاریزاسیون را انجام دهید ویا بر معیارهای پلاریزاسیون نظارت کنید.

مخازن روزمینی موجود/یک‌سوکننده/آند عمیق

شرح

چهار مخزن با ۲۳ متر (۷۵ فوت) قطر که از لوله‌کشی متصل از نظر الکتریکی عایق شده‌اند، مطابق شکل ۹-۲۳ در یک گروه قرار داده شده‌اند. مخازن تقریباً ۲۳ متر (۷۵ فوت) از یکدیگر فاصله دارند. زمین‌شناسی منطقه با داشتن خاک ۲۵۰۰ اهم سانتی‌متر بین عمق ۱۰ متر (۳۳ فوت) و ۵۰ متر (۱۶۴ فوت)، برای سامانه آند عمیق مناسب است. یک آند عمیق می‌تواند در فاصله ۷۰ متر (۲۳۰ فوت) از نزدیک‌ترین مخزن و لوله‌کشی سطحی قرار داده شود. این فاصله، جدایی لازم برای اطمینان از اینکه نزدیک‌ترین مخزن به آند عمیق جریان را به‌صورت ترجیحی مصرف نخواهد کرد، فراهم می‌کند. یک سامانه حفاظت کاتدی آند عمیق برای محوطه مخازن طراحی کنید. سامانه حفاظت کاتدی باید عمر طراحی ۱۵ سال داشته باشد.



شکل ۹-۲۳ محوطه مخازن با آند عمیق

عوامل

۱. تصور کنید که جریان مورد نیاز، ۰/۵ میکروآمپر به ازای هر سانتی‌مترمربع $(0/46\mathrm{mA/ft^2})$ از سطح کف مخزن است.
۲. برای هر مخزن، برگشت منفی جداگانه و ابزار تنظیم میزان جریان برگشتی از کف هر مخزن را تأمین نمایید. (هر مخزن از لوله‌کشی متصل به آن جداسازی شده است. تمام لوله‌کشی‌های متصل بر روی تکیه‌گاه روزمینی هستند.)
۳. عدم وجود مشکلات در مورد سفره‌های آب زیرزمینی را تأیید کنید. این مشکلات ممکن است استفاده یا روش ساخت یک آند عمیق را محدود کند. فرض کنید که مشکل سفره آب در این مورد وجود ندارد.
۴. برای پایین نگه داشتن هزینه‌های برق و اجتناب از ولتاژهای خطرناک، سامانه آند عمیق را به‌نحوی طراحی کنید که حداکثر ولتاژ آند در خروجی جریان اسمی از ۱۸ ولت بیشتر نشود.
۵. عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی باید بین ۱۵ تا ۲۰ سال باشد.

محاسبات

ابتدا مساحت سطح مخازن را محاسبه کنید:

$$A_s=\pi(d/2)^2$$

که در این رابطه:

$\mathrm{A}_s=$ مساحت یک مخزن (مترمربع)

d= قطر مخزن (۲۳ متر)

$$\mathrm{A}_s = 415m^2(4464\mathrm{ft}^2) = 4/15 \times 10^6\mathrm{cm}^2/\,tan\,k$$

جریان مورد نیاز را تخمین بزنید:

$$I_T=\mathrm{Ai}$$

که در این رابطه:

$\mathrm{I}_T=$ جریان مورد نیاز به ازای هر مخزن (آمپر)

$\mathrm{A}_s=$ مساحت کف یک مخزن $(4/15 \times 10^6$ متر مربع)

i= چگالی جریان مورد نیاز $(5/0 \times 10^{-7}\mathrm{A/cm^2})$

به ازای مخزن $\mathrm{I}=4/15 \times 10^6\mathrm{cm}^2 \times 5/0 \times 10^{-7}\mathrm{A/cm}^2 = 2/08A$

(محوطه مخازن) $I_T = 8/32A$

مقاومت بستر مورد نیاز برای حداکثر ولتاژ منبع ۱۸ ولت را تعیین کنید. ولتاژ برگشتی پلاریزه شده کاری بین آند و مخازن را ۲ ولت تصور کنید. ضریب ایمنی برای مقاومت مخزن به زمین و سیم‌کشی را ۲ در نظر بگیرید.

$$\mathrm{R}=(\mathrm{E}/\mathrm{I}_T)=\mathrm{f}$$

که در این رابطه:

R= مقاومت کل میان محوطه مخازن و آند

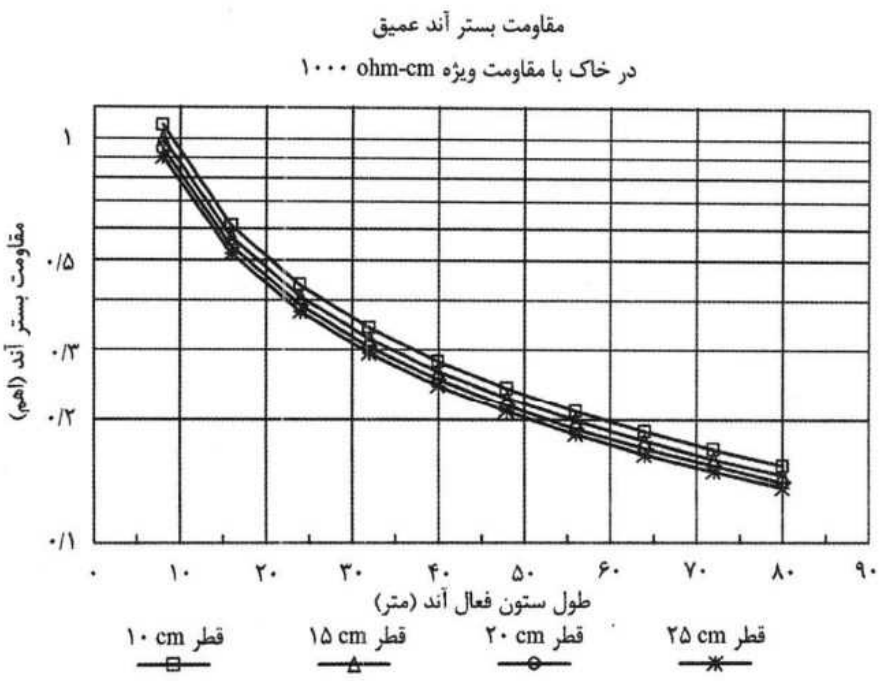
E= ولتاژ محرکه حالص (ولت ۱۶ = ۲ – ۱۸)

I_T= جریان کل (۸/۳۲ آمپر)

f= ضریب ایمنی (۲)

$R = (16V/8/32A)/2 = 0/96$ اهم

طول ستون فعال آند در خاک ۲۵۰۰ اهم سانتی‌متر، مورد نیاز برای تولید مقاومت بستر ۰/۹۶ اهم را تعیین کنید. از شکل ۹-۲۴ استفاده کنید که با استفاده از رابطه‌های دوایت برای یک آند عمودی با چهار قطر متفاوت رسم شده است.



شکل ۹-۲۴ مقاومت به زمین دور در طول فعال آند عمیق متفاوت

ازآنجاکه، نمودار برای خاک ۱۰۰۰ اهم سانتی‌متر است، مقاومت بستر واقعی از مقداری بیشتر است که روی نمودار برای یک طول و قطر ستون آند مشخص، نشان داده شده است. این نسبت با استفاده از رابطه زیر داده می‌شود:

$$R_x = f_c R_g$$

که در این رابطه:

R_x= مقاومت در خاک با x اهم سانتی‌متر مقاومت ویژه

R_g= مقاومت نشان داده شده روی نمودار در مقاومت ویژه ۱۰۰۰ اهم سانتی‌متر

$f_c = \frac{\rho_s}{1000}$ = ضریب تصحیح مقاومت ویژه

ρ_s= مقاومت خاک واقعی (اهم سانتی‌متر)

در این مورد، ضریب تصحیح برابر است با:

$f_c = 2500/1000 = 2/5$

$R_g = R_x/f_c$

$_g = 0/96\Omega/2/5 = 0/38$ اهم

طول ستون فعال آند که با ۰/۳۸ اهم در ۱۰۰۰ اهم سانتی‌متر خاک منطبق است، بسته به قطر آند دارای طول بین ۲۴ تا ۳۰ متر است. در این مثال آند لوله‌ای اکسید فلزی مخلوط با یک کابل را انتخاب می‌کنیم. آندها دارای ۱۲۲ سانتی‌متر طول (۴ فوت) و ۰/۶۴ سانتی‌متر (۰/۲۵ اینچ) قطر هستند. محدوده خروجی جریان، ۱/۸ آمپر به ازای آند است. حداقل تعداد آندهای مورد نیاز برابر است با:

$$\mathrm{N}=\mathrm{I}_T/\mathrm{I}_a$$

که در این رابطه:

N= حداقل تعداد آندها

$\mathrm{I}_T=$ جریان کل (۸/۳۲ آمپر)

$\mathrm{I}_a=$ ظرفیت یک آند (۱/۸ آمپر بر آند)

$\mathrm{N}=8/32A/1/8A = 4/6$ آند

پنج آند در بستر عمیق ظرفیت کافی را خواهند داشت. ازآنجاکه، طول کل آند فعال می‌بایست حدود ۲۷ متر باشد (۸۸/۶ فوت)، این بدان معنی است که یک آند ۱/۲۲ متر برای هر ۵/۴ متر زغال کک در بستر مورد نیاز است. تجربه نشان می‌دهد که فاصله آندهای اصلی نباید از دو تا سه برابر طول آند فعال بیشتر باشد. برای یک آند ۱/۲۲ متری، حداکثر فاصله میان آندها نباید از ۳/۷ متر نجاوز کند. در این مورد، فاصله میان آندهای ۱/۲۲ متری فعال، ۴/۱۸ متر است (۵/۴۰ m – ۱/۲۲ m). افزایش تعداد آندها به ۶، فاصله را به ۳/۲۸ متر کاهش می‌دهد (۱/۲۲ – ۲۷/۶). تعداد آندهای مورد نیاز ۶ عدد خواهد بود. حداکثر چگالی جریان تخلیه شده از پشت‌بند کربنی نباید از ۱/۶ آمپر بر هر مترمربع $(150\mathrm{mA}/ft^2)$ از جداره چاه عمیق بیشتر شود. اگر قطر چاه ۱۵/۲ سانتی‌متر (۶ اینچ) باشد، مساحت سطح خارجی آند فعال به این میزان خواهد بود:

$$A_s=\pi\mathrm{dL}$$

که در این رابطه:

$\mathrm{A}_s=$ مساحت فصل مشترک خاک/پشت‌بند کربنی (مترمربع)

d= قطر پشت‌بند (۰/۱۵۲)

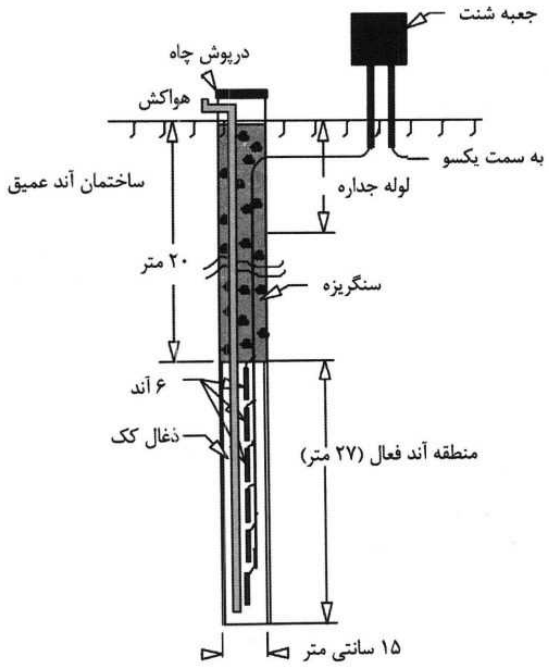
L= طول آند فعال (۲۷ متر)

$$A_s=\pi \times 0/152m \times 27m = 12/9m^2(138/8\mathrm{ft}^2)$$

چگالی جریان برابر است با:

$$\mathrm{i}=8/32\mathrm{A}/12/9m^2 = 0/645m^2(59/9\mathrm{mA}/\mathrm{ft}^2)$$

شکل ۹-۲۵ طراحی آند عمیق را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۲۵ طراحی آند عمیق

سیم‌کشی برگشت منفی

حداقل اندازه سیم به دلایل مکانیکی، مس AWG ۸ ($2/10 \times 10^{-3}$ اهم به ازای هر متر) انتخاب شده است. اگر فاصله مسیر سیم از دو مخزن دورتر از یک‌سوکننده، ۷۰ متر و از مخازن نزدیک‌تر ۳۵ متر باشد، به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۰۷۴ اهم مقاومت در مسیرهای برگشت منفی وجود خواهد داشت.

بسته به تغییر در مقاومت کف هریک از چهار مخزن به زمین دور، ممکن است جریان بستر به‌صورت مساوی بین چهار مخزن تقسیم نشود. کنترل توزیع جریان به تنظیم مقاومت چهار مخزن نیاز دارد. مقاومت الکتریکی (۰/۵ اهم با ۵ آمپر ظرفیت) کنترل کافی را به‌صورت کلی فراهم می‌کند. پس از نصب، می‌بایست آزمایش‌های جریان مورد نیاز برای تأیید اندازه مناسب یک‌سوکننده انجام شوند. به طور کلی تنظیم مقاومت در مسیرهای برگشت منفی برای اهداف آزمایشی مطلوب‌تر است، به این ترتیب جریان‌های برابری از هر یک از مخازن درگیر باز خواهد گشت.

مثال عملی طراحی دوره□□□□ برای حفاظت کاتدی لوله‌های جداره چاه

مثال‌های طراحی لوله‌های جداره چاه

موجود/خورشیدی/بستر سطحی

شرح

یک چاه آب با لوله جداره فولادی و منبع توان بادی در قسمت دوری از یک گاوداری واقع شده است. قرار است حفاظت کاتدی برای لوله جداره با استفاده از منبع توان خورشیدی و آند سطحی اعمال شود. با استفاده از داده‌های زیر سامانه حفاظت کاتدی را طراحی کنید.

داده‌ها

عمق چاه= ۸۵/۴ متر (۲۸۰ فوت)

قطر (قطر خارجی) = ۱۶/۸ سانتی‌متر (۶/۶۲۵ اینچ)

مقاومت خاک = ۳۵۰۰۰ اهم سانتی‌متر $\pm$ ۱۰۰۰ اهم سانتی‌متر به عمق ۱ متر (۳۲/۸ فوت) شرایط نیمه خشک

روش کار

۱. جریان مورد نیاز را تخمین بزنید.
۲. بستر آزمایشی را برای آزمایش E log i طراحی کنید.
۳. فاصله میان آند و چاه را تعیین کنید.
۴. اندازه منبع تغذیه فتوولتائیک را تعیین کنید.
۵. آند مناسب برای منبع توان را طراحی کنید

جریان مورد نیاز و محل آند

در چاه‌ها، دسترسی کم برای اندازه‌گیری پتانسیل منطقه‌ای سازه به خاک مانع استفاده از بسیاری روش‌های معمول مورد استفاده در خطوط لوله و سازه‌های نزدیک سطح زمین می‌شود. آزمایش‌های E log i معمولاً عملی‌ترین آزمایش اندازه‌گیری جریان مورد نیاز الکتروشیمیایی روزمینی در دسترس برای چاه‌ها است. در چاه‌های عمیق (نفت و گاز) انجام اندازه‌گیری‌ها در پایین حفره ممکن هستند که تعیین شار جریان کوچک روی لوله جداره چاه را عملی می‌سازد. روش کار بسیار پر هزینه است. اما در حال حاضر قابل اعتمادترین روش آزمایش حفاظت کاتدی است. در این مورد، استفاده از اندازه‌گیری‌های روزمینی E log i برای تعیین جریان مورد نیاز برای حفاظت لوله جداره چاه را انتخاب می‌کنیم. ابتدا جریان مورد نیاز بر اساس مساحت سطح و ۲ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع را تخمین بزنید.

مساحت سطح لوله جداره چاه:

$$A_s = \pi dL$$

که در این رابطه:

d= قطر، ۱۶/۸ سانتی‌متر (۶/۶۲۵ اینچ)

L= طول (عمق) لوله جداره، ۸۵۴۰ سانتی‌متر (۲۸۰ فوت)

A_s= مساحت (سانتی‌مترمربع)

$$A_s = \pi \times 16/8\text{cm} \times 8540\text{cm} = 4/51 \times 10^5$$ سانتی‌مترمربع

جریان مورد نیاز را تخمین بزنید:

$$I=A\ \ i$$

که در این رابطه:

I= کل جریان مورد نیاز (آمپر)

A_s= مساحت ($4/51 \times 10^5$سانتی‌مترمربع)

i= چگالی جریان مورد نیاز ($2/0 \times 10^{-6}$ آمپر بر سانتی‌مترمربع)

$I=4/51 \times 10^5 cm^2 \times 2/0 \times 10^{-6} A/cm^2 = 0/90$ آمپر

برای به دست آوردن یک نمودار E log i که به درستی تعریف شده، به تغییر پلاریزاسیون کل از پتانسیل خوردگی طبیعی به پتانسیل آزمایشی نهایی، به مقداری بین ۱۰۰- تا ۱۵۰- میلی‌ولت نیاز است. شیب نمودار E log i (ثابت تافل) معمولاً حدود ۱۲۰- میلی‌ولت به ازای ۱۰ برابر شدن جریان آزمایش است. اگر ۹۰٪ آمپر جریان مورد انتظار در آغاز قسمت E log i نمودار باشد، در آن صورت یک دهه (ده برابر شدن) افزایش جریان (۹/۰ آمپر) می‌بایست پلاریزاسیون اضافی به میزان ۱۲۰- میلی‌ولت ایجاد کند. چنانچه منبع توانی که قادر به تولید حداکثر خروجی ۱۰ آمپر و ۱۰۰ ولت DC داشته باشیم، مقاومت تقریبی بستر آزمایشی به این صورت محاسبه می‌شود.

$$R=E/I$$

که در این رابطه:

E= حداکثر ولتاژ منبع غذایی (۱۰۰ ولت)

I= حداکثر جریان آزمایشی مطلوب (۹ آمپر)

R= مقاومت بستر (اهم)

$R = 100/9/0 = 11$ اهم

میله‌های زمین، آندهای آزمایشی مناسبی هستند. با استفاده از رابطه دوایت برای یک الکترود عمودی، مقاومت یک میله به طول ۱/۵۳ متر (۵ فوت) و قطر۱/۲۷ متر (۰/۵ اینچ) برابر است با:

$$R=\frac{0/005\rho}{\pi L}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right)$$

که در این رابطه:

L= طول میله (۱/۵۳ متر)

d= قطر میله (۰/۰۱۲۷ متر)

ρ = مقاومت ویژه میانگین (۳۵۰۰ اهم سانتی‌متر)

R= مقاومت به زمین دور (اهم)

$R=\frac{0/005\times3500}{\pi 1/53\times}\left(ln\left(\frac{1/53\times8}{0/0127}\right)-1\right)=21/4$ اهم

برای اطمینان از اینکه جریان آزمایشی کافی از منبع توان در دسترس خواهد بود، از ۳ میله با فاصله ۵ متر (۱۶/۴ فوت) از یکدیگر برای آند آزمایشی استفاده کنید. برای اطمینان از اینکه بالا و پایین چاه در معرض شیب ولتاژ یکسانی از آند آزمایشی

قرار گرفته‌اند، آند آزمایشی می‌بایست به اندازه کافی از چاه دور باشد. افزایش پتانسیل زمین در هر نقطه، x، که توسط ورود جریان به زمین ایجاد شده است، با استفاده از این رابطه به دست می‌آید:[۳۷]

$$E_r = \frac{0/005\text{I}\rho}{\pi\text{L}}\left(ln\left(\frac{\text{L}+(L^2+r^2)^{0/5}}{r}\right)\right)$$

که در این رابطه:

I= جریان منتقل شده (توسط آند) به زمین (آمپر)

ρ= مقاومت ویژه میانگین زمین (اهم سانتی‌متر)

L= طول میله زیر زمین (متر)

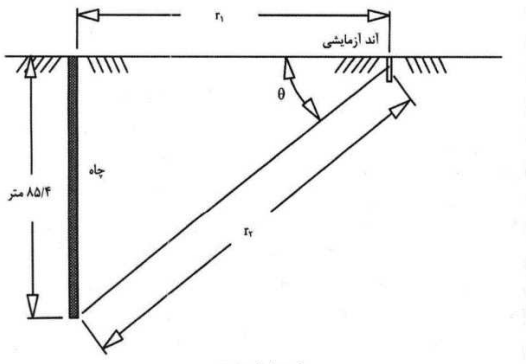
r= فاصله (متر) از مرکز آند تا نقطه x

E_r= افزایش ولتاژ در x (ولت) نسبت زمین دور

اگر r بزرگ‌تر از ۱۰ برابر L باشد، رابطه به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$E_r = \frac{0/0016\text{I}\rho}{r}$$

از این رابطه خلاصه شده مشخص است که افزایش ولتاژ (E_r) به‌صورت معکوس با فاصله r از منبع جریان (آند) متناسب است. همان‌طور که در شکل ۹-۲۶ نشان داده شده است، برای منبع سطحی (آند) بالای چاه همواره از پایین آن به آند نزدیک‌تر است. به همین دلیل r_1 همواره از r_2 کوتاه‌تر است.



شکل ۹-۲۶ هندسه آند - چاه

اگر زاویه θ ، ۶۰ درجه باشد.

$r_1 = 85/4m/\ tan\,6\,0° = 49/3$ متر (۱۶۲ فوت)

3 [illegible] 7 [illegible] 7 [illegible]

$r_2 = 85/4m/\ sin\,6\,0° = 98/6$ متر (۳۲۳ فوت)

در خاک با مقاومت ۳۵۰۰ اهم سانتی‌متر، افزایش ولتاژ در بالای چاه به ازای هر آمپر جریان از تک آند آزمایشی سطحی با فاصله ۴۹/۳ متر از چاه به این صورت است:

$$E_r = \frac{0/0016\mathrm{I}\rho}{r}$$

که در این رابطه:

I= جریان (۱ آمپر)

ρ= مقاومت ویژه میانگین (۳۵۰۰ اهم سانتی‌متر)

r= فاصله از آند (۴۹/۳ متر)

$\mathrm{E_{rt}}$= افزایش ولتاژ در بالای چاه (ولت)

$E_{\mathrm{rt}} = 0/0016 \times 3500/49/3 = 0/114$ ولت به ازای هر آمپر

افزایش ولتاژ در پایین چاه با فاصله ۹۸/۶ متر از آند آزمایشی برابر است با:

$E_{\mathrm{rb}} = 0016 \times 3500/89/6 = 0/057$ ولت به ازای هر آمپر

تفاوت میان تغییر پتانسیل بالا و پایین چاه به زمین برابر است با:

$$E_{\mathrm{rt}} - E_{\mathrm{rb}} = 0/114\mathrm{V/A} - 0/057\mathrm{V/A} = 0/057\mathrm{V/A}$$

می‌دانیم که یک تک میله آزمایشی، دارای مقاومتی به زمین دور در حدود ۲۱ اهم است (محاسبات بالا را مشاهده کنید). با افزایش جریان ۱ آمپر، افزایش ولتاژ آند برابر خواهد بود با:

$$\mathrm{E=IR}$$

که در این رابطه:

I= ۱ آمپر

R= مقاومت آند به زمین دور (۲۱ اهم)

E= ولتاژ میان آند و زمین دور (ولت)

$\mathrm{E}=1A \times 21\Omega = 21$ ولت

اگر افزایش ولتاژ در بالای چاه ۰/۱۱۴ ولت بر آمپر باشد، در این صورت بالای چاه در معرض درصدی از افزایش ولتاژ آند به این میزان است.

$$\%\mathrm{V}_a = \mathrm{E_{rt}/E} \times 100$$

به بیان دیگر چاه تقریباً بیرون از ٪۹۹/۵ شیب ولتاژ احاطه کننده آند آزمایشی با فاصله ۵۰ متر (۱۶۴ فوت) است. نرخ افزایش ولتاژ در نقطه‌ای با فاصله (r) از آند عمودی، نسبت به افزایش ولتاژ آند که نسبت به زمین دور اندازه‌گیری شده است را می‌توان با استفاده از معادله نرخ افزایش ولتاژ در (I) آمپر تخمین زد:

$$E_r = \frac{0/005\mathrm{I}\rho}{\pi\mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{\mathrm{L}+(L^2+r^2)^{0/5}}{r}\right)\right)$$

برای یک آند عمودی، رابطه دوایت را در I آمپر ضرب کنید:

$$\mathrm{E=IR=I}\left(\frac{0/005\mathrm{I}\rho}{\pi\mathrm{L}}\right)\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right)$$

انجام تقسیم‌ها نتیجه می‌دهد:

$$\frac{E_r}{\mathrm{IR}}=\frac{ln\left(\frac{\mathrm{L}+(L^2+r^2)^{0/5}}{r}\right)}{ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1}$$

بنابراین درصد افزایش ولتاژ آند کل $(\%\mathrm{V}_a)$ در نقطه r بالای زمین دور برابر است با:

$$\%\mathrm{V}_a=\frac{E_r}{\mathrm{IR}}100\%=\frac{ln\left(\frac{\mathrm{L}+(L^2+r^2)^{0/5}}{r}\right)}{ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1}100\%$$

که در این رابطه:

$\%\mathrm{V}_a=$ درصد افزایش ولتاژ بالای زمین دور در نقطه r

$\mathrm{E}_r=$ افزایش ولتاژ در فاصله r متر از آند (ولت)

IR= افزایش ولتاژ آند به زمین دور (ولت)

L= طول آند (متر)

d= قطر آند (متر)

برای این آند با استفاده از تک آند میله‌ای با این داده‌ها:

I= ۱ آمپر

L= ۱/۵۳ متر

d= ۱/۲۷ سانتی‌متر (۰/۰۱۲۷ متر)

r= ۵۰ متر

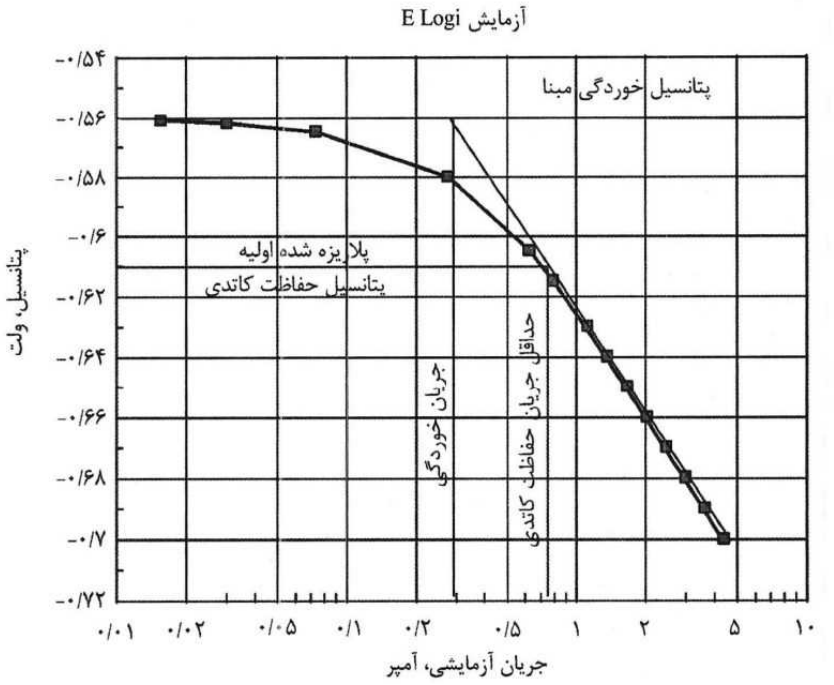
$$\%\mathrm{V}_a=\frac{ln\left(\frac{1/53\mathrm{m}+((1/53m)^2+(50m)^2)^{0/5}}{50m}\right)}{ln\left(\frac{8\times1/53}{0/0127m}\right)-1}100\%=0/52\%$$

لازم به ذکر است که این رابطه از مقاومت ویژه و جریان مستقل است. این رابطه اجازه می‌دهد تا تخمینی از «دوری» نسبی یک آند نسبت به سازه‌های منطقه انجام شود.

شکل ۹-۲۷ نمودار E log i از پلاریزاسیون چاه، در پاسخ به جریان اعمالی بین چاه و آرایه آند آزمایشی است. حداقل جریان نشان داده شده مورد نیاز برای کنترل خوردگی حدود ۰/۷۰ آمپر است. سامانه باید برای تأمین حدود ۱ آمپر طراحی شود. گاهی اوقات در نظر گرفتن اینکه چه درصدی از افزایش ولتاژ کل آند در نقطه r بیرونی است تا درونی $(\%\mathrm{V}_{\mathrm{out}})$ آسان‌تر

است. در این مورد می‌بایست درصد افزایش ولتاژ در r $(\%V_a)$ را از درصد افزایش کل به زمین دور که صددرصد است، کم کنیم.

$$\%V_{out} = \%100 - \left(\frac{E_r}{IR}\%100\right) = \%100 - \left(\frac{\ln\left(\frac{L+\left(L^2+r^2\right)^{0.5}}{r}\right)}{\ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1}100\%\right)$$



شکل ۹-۲۷ نمودار E logi

تعیین اندازه منبع توان خورشیدی

سازنده‌های آرایه‌های خورشیدی معمولاً اطلاعات طراحی را فراهم می‌نمایند تا به محاسبه اندازه منبع توان کمک کنند. تشعشع خورشید با منطقه روی زمین، آب و هوا و فصول تغییر می‌کند. انرژی خورشیدی با استفاده از صفحات خورشیدی به الکتریسیته تبدیل می‌شود. نیروی الکتریکی تولید شده در زمان تابش خورشید بر روی صفحات در باتری‌های با قابلیت پر شدن مجدد، ذخیره می‌شود. باتری‌ها به‌عنوان محل ذخیره در زمانی که توان با نرخ ثابت به سامانه کنترل حفاظت کاتدی منتقل می‌شود، عمل می‌کنند. چنانچه آندهای دائمی را برای مقاومت ۱۰ اهم و ظرفیت جریان ۱ آمپر طراحی کنیم، ولتاژ منبع توان باید به این میزان باشد:

$$E = I(R_a + R_w + R_{ck}) + E_0$$

که در این رابطه:

I= ۱ آمپر

R_a= ۱۰ اهم

R_w= مقاومت چاه به زمین (از رابطه دوایت ۰/۵ اهم تخمین زده شده است)

R_{ck}= مقاومت سیم و مدار منبع تغذیه (۱ اهم تخمین زده شده است)

E_b= ولتاژ برگشتی پلاریزه شده بین آند و سازه (۲ ولت)

E= حداقل ولتاژ حروجی مورد نیاز از منبع تغذیه

$E=1A(10\Omega+0/5\Omega+1\Omega)+2V=(1A\times 11/5\Omega)+2V=13/5$ ولت

سامانه ۱۲ ولت اسمی کافی خواهد بود.

نرخ توان:$P=EI$

که در این رابطه:

E= ولتاژ خروجی (۱۲ ولت)

I= جریان (۱ آمپر)

P= وات

$P=12V\times 1A=12$ وات

انرژی مورد نیاز:

$$E=Pt$$

که در این رابطه:

P= توان (۱۲ وات)

t= ساعت / روز (۲۴ ساعت / روز)

E= وات ساعت از انرژی بر روز

$E=12W\times 24\text{hrs/day}$ (watt hrs/day) وات ساعت بر روز

سامانه توان خورشیدی می‌بایست قادر به تأمین حداقل این میزبان از انرژی ورودی در بدترین شرایط (زمستان) در محل باشد. ظرفیت باتری کافی برای رساندن به میانگین (لازم) در اثر نوسان‌های انرژی موجود، می‌بایست تأمین شود. اطلاعاتی که می-بایست به سازنده واحد توان خورشیدی داده شود، شامل این موارد می‌شود:

۱. نوع سامانه (حفاظت کاتدی)
۲. منطقه جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی)
۳. ولتاژ سامانه (۱۲ ولت)
۴. تخلیه جریان (۱ آمپر)
۵. دماهای مورد انتظار در محیط (درجه سانتی‌گراد و فارنهایت)
۶. تخمینی از تعداد روزهای پی‌درپی بدون خورشید (بدترین مورد برای منطقه)

۷. شرایط کاری خاص غیرمعمول

بستر

برای این پروژه، آندهای گرافیت از پیش بسته‌بندی شده را برای بستر انتخاب می‌کنیم. آندهای دارای قطر ۷/۶۲ سانتی‌متر (۳ اینچ) و طول ۱/۵۲ متر (۵ فوت) هستند که در استوانه فولادی با قطر ۲۰ سانتی‌متر (۸ اینچ) و طول ۲/۱۲ متر (۷ فوت) قرار داده شده‌اند. استوانه از پیش با پشت‌بند کربنی بسته‌بندی شده‌اند. گرافیت ماده آند خوبی برای شرایط خاک نیمه خشک است. با استفاده از رابطه دوایت برای آند عمودی:

$$\mathrm{R}=\frac{0/005\rho}{\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right)$$

که در این رابطه:

ρ = مقاومت ویژه خاک (۳۵۰۰ اهم سانتی‌متر)

L= طول کلی آند (۲/۱۳ متر)

d= قطر خارجی آند (۲ متر)

$R = (2/62\Omega)(3/445) = 9/03$ اهم

ازآنجاکه، نتیجه از ۱۰ اهم موردنظر کمتر است، یک آند هدایت ضروری را خواهد داشت. چگالی جریان از آند اصلی در یک آمپر برابر است با:

$$i_a=\mathrm{I}/(\pi \mathrm{dL})$$

که در این رابطه:

I= خروجی جریان (۱ آمپر)

d= قطر آند گرافیت (۷/۶۲ سانتی‌متر)

L= طول آند (۱۵۲ سانتی‌متر)

i_a= چگالی جریان آند، آمپر بر سانتی‌متر مربع

$$i_a = 1A/(\pi \times 7/62\mathrm{cm} \times 152\mathrm{cm}) = 1A/3639m^2 = 0/000275A/m^2$$

این چگالی جریان به اندازه کافی از حداکثر $0/001A/m^2$ توصیه شده توسط سازنده برای آندهای گرافیت، کمتر است؛ بنابراین بستر با یک آند مناسب است. آند می‌بایست در فاصله‌ای تقریباً برابر با فاصله آند آزمایشی از چاه قرار داده شود.

موجود/یک‌سوکننده/آند عمیق

شرح

گروهی متشکل از سه چاه نفت در منطقه وسیعی از چاه‌ها، با فاصله از سازه‌های دیگر قرار گرفته‌اند. سر چاه‌ها به یکدیگر نزدیک هستند (با فاصله حدوداً ۳۰ متری) و در زیر زمین از هم دور می‌شوند. هریک از چاه‌ها از یکدیگر و از خطوط جمع‌آوری که نفت خام را به خطوط لوله منتقل می‌کنند، جداسازی شده‌اند. آزمایش‌های جریان مورد نیاز برای حفاظت

کاتدی چاه‌ها با استفاده از روش‌های E log i انجام شده‌اند. برای اطمینان از این که اغتشاش موضعی در توزیع جریان نزدیک سر چاه‌ها بر اندازه‌گیری‌ها تأثیر بسیار نداشته، الکترود مرجع (نیم پیل مس/سولفات مس) در روی زمین با فاصله حدوداً ۳۰۰ متری از نزدیک‌ترین چاه قرار داده شد. آزمایش‌های E log i نشان دادند که جریان مورد نیاز برای لوله‌های جداره چاه، بین ۸ تا ۱۰ آمپر به ازای هر چاه است. این طراحی ۱۲ آمپر برای هر چاه یا جریان طراحی کل ۳۶ آمپر را فرض خواهد کرد با استفاده از داده‌هایی که در زیر آورده شده، یک سامانه حفاظت کاتدی آند عمیق با منبع یک‌سوکننده برای این میدان چاه طراحی کنید. تصور کنید که خطوط لوله جمع‌آوری دارای پوشش خوب و مقدار ناچیزی فلز بدون پوشش هستند.

داده‌ها

عمق لوله جداره: ۱۸۲۹ متر (۶۰۰۰۰ فوت)

قطر لوله جداره: ۲۳ سانتی‌متر (۹ اینچ)

مقاومت ویژه میانگین خاک از سطح زمین تا عمق ۵۰۰۰ متر (۱۶۴۰ فوت) = ۴۰۰۰ اهم سانتی‌متر

محدود مقاومت‌های ویژه ثبت شده چاه = ۴۰۰ تا ۱۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر

طول عمر = ۲۰ سال

۶ متر (۲۰ فوت) از بالای آند قرار است غلاف شود.

روش کار

۱- یک آند عمیق برای دستیابی به جریان تخمین زده شده و عمر مورد انتظار طراحی کنید.

۲- فاصله مورد نیاز بین آند و سر چاه برای توزیع جریان مناسب را تعیین کنید.

۳- یک‌سوکننده مورد نیاز را تعیین کنید.

طراحی آند

برای این طراحی آندهای لوله‌ای آهن پر سیلیسیم را به‌عنوان آند اصلی انتخاب می‌کنیم.

وزن ماده آند مورد نیاز برابر است با:

$$W_T = C_r t I / f_u$$

که در این رابطه:

C_r = نرخ مصرف $(0/227 kg/A\text{-}yr)$

t= عمر طراحی (۲۰ سال)

I= جریان میانگین مورد نیاز در عمر طراحی (۳۶ آمپر)

f_u = ضریب کارایی در کک (۰/۷۵)

W_T = وزن کل ماده آند مورد نیاز (کیلوگرم)

$$W_T = (0/227 kg/A\text{-}yr) \times 20 yr \times 36A/0/75 = 218$$

یک آند آهن پر سیلیسیم لوله‌ای استاندارد برای این طراحی انتخاب کنید. یک آند لوله‌ای بلند معمول با وزن و اندازه معقول برای کاربرد آند عمیق دارای وزن ۲۸/۶ کیلوگرم (۳۶ پوند)، ۶/۷۵ سانتی‌متر (۲/۶۵۶ اینچ) قطر و ۲/۱۳ متر (۸۴ اینچ) طول است. تعداد مورد نیاز این آندها برای تأمین وزن ضروری ماده برابر است با:

$$N=W\ /W_a$$

که در این رابطه:

W_T= وزن کل ماده آند مورد نیاز (۲۱۸ کیلوگرم)

W_a= وزن یک آند (۲۸/۶ کیلوگرم)

N= تعداد آند مورد نیاز

$N=218kg/28/6kg = 7/6 = 8$ آند

آندهای آهن پر سیلیسیم درصورتیکه چگالی جریان کمتر یا مساوی 5×10^{-4} آمپر بر سانتی‌مترمربع $(0/5 \times A/ft^{-4})$ باشد، می‌بایست نرخ مصرف طراحی را برآورده کنند. مساحت سطح کل آند برای ۸ آند پر سیلیسیم برابر است با:

$$A_s=N\pi dL$$

که در این رابطه:

N= تعداد آندها

d= قطر آند، ۶/۷۵ سانتی‌متر (۲/۶۵۶ اینچ)

L= طول آند، ۲۱۳ سانتی‌متر (۸۴ اینچ)

$A_s = 8\pi(6/75cm)(213cm) = 36134$ سانتی‌مترمربع

چگالی جریان میانگین برابر است با:

$$i_a=I=A_s$$

که در این رابطه:

I= جریان کل (۳۶ آمپر)

A_s = مساحت سطح آند (۳۶۱۳۴ سانتی‌مترمربع)

i_a= چگالی جریان آند برحسب آمپر بر سانتی‌مترمربع

$i_a = 36A/36134cm^2 = 9/96 \times 10^{-4}$ آمپر بر سانتی‌مترمربع

این چگالی جریان تقریباً دو برابر مقدار ارزیابی شده است؛ بنابراین تعداد آندها می‌بایست دو برابر شود. پیشنهاد شده تا قسمت فعال آند عمیق با پشت‌بند کربنی پر شود. حداکثر چگالی جریان تخلیه در سطح مشترک کربن و زمین در سامانه آند عمیق می‌بایست در تقریباً ۱/۶ آمپر بر سانتی‌مترمربع $(0/150A/ft^{-4})$ محدود شود تا از تولید بیش از حد گاز یا خشک شدن جلوگیری شود. برای دستیابی به این حد، مساحت سطح خارجی ستون کک می‌بایست به این میزان باشد:

$$A_{sc}=I_T/i_c$$

که در این رابطه:

I_T= جریان کل (۳۶ آمپر)

i_c= چگالی جریان مجاز (۱/۶ آمپر بر مترمربع)

A_{sc} مساحت سطح خارجی ستون کک (مترمربع)

$A_{sc}= 36A/1.6\ A/m^2 = 22.5$ مترمربع

چنانچه قطر اسمی حفره آند ۲۰ سانتی‌متر باشد، طول ستون کک می‌بایست این مقدار باشد.

$$L=A_{sc}/\pi d$$

که در این رابطه:

A_{sc}= مساحت سطح ستون کک (۲۲/۵ مترمربع)

d= قطر ستون (۰/۲۰ متر)

$L = 22.5m^2/0.628m = 35.8(117ft)$ متر

برای قطر حفره ۳۰/۵ سانتی‌متر (۱۲ اینچ).

$L = 22.5m^2/0.958m = 35.5$ متر

با استفاده از ستون کک با قطر ۳۰/۵ سانتی‌متر (۱۲ اینچ)، فاصله میان ۱۶ آند این میزان خواهد بود:

$S = 23.5m/16 = 1.5$ متر

با استفاده از ستون کک با قطر ۲۰ سانتی‌متر (۸ اینچ)، فاصله میان ۱۶ آند این میزان خواهد بود:

$S = 35.8m/16 = 2.2$ متر

بسته به زمین‌شناسی و هزینه‌ها، راه حل زیر ممکن است بهتر باشد:

دو آند عمیق با قطر ۲۰ سانتی‌متر (۸ اینچ) و ۱۸ متر (۵۹ فوت) طول ستون کک.

هریک از آندهای عمیق، ۸ آند آهن پر سیلیسیم خواهند داشت:

$S = 18m/8 = (7.4ft)$ فاصله میان آندها به متر

هر دوی این راه حل‌ها دارای مساحت سطح خارجی ستون کک یکسان هستند (۲۲/۵ مترمربع).

آزمایش دوری آندها

شکل‌های ۹–۲۸ تا ۹–۳۰ نمودارهایی از رابطه‌ای هستند که قبلاً استخراج شده و در زیر برای آندهایی با طول ۳۵/۸ متر و قطر ۲ سانتی‌متر، طول ۲۳/۵ متر و قطر ۳۰/۵ سانتی‌متر و طول ۱۸ متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر داده شده است.

$$\%V_{out} = \%100 - \left(\frac{E_r}{IR}\%100\right) = \%100 - \left(\frac{\ln\left(\frac{L+\left(L^2+r^2\right)^{0.5}}{r}\right)}{\ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1}100\%\right)$$

که در این رابطه:

$V_{out}\%$= درصد افزایش ولتاژ که r خارجی است.

E_r= افزایش ولتاژ در فاصله r متر از آند

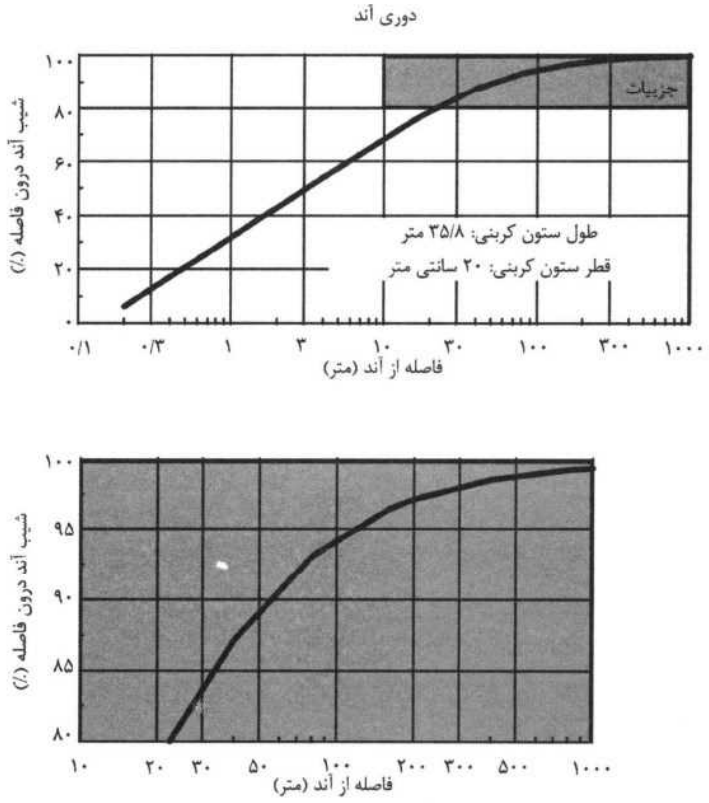
IR= ولتاژ آند که نسبت به زمین دور در جریان I آمپر اندازه‌گیری شده است.

L= طول آند زیر سطح (متر)

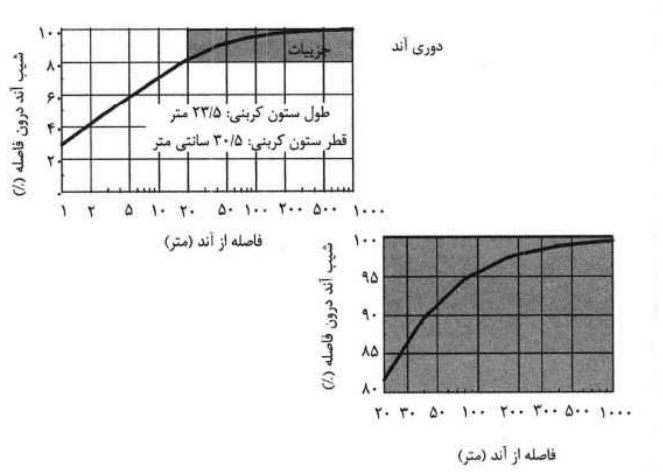
d= قطر آند (متر)

r= فاصله از آند (متر) تا نقطه اندازه‌گیری

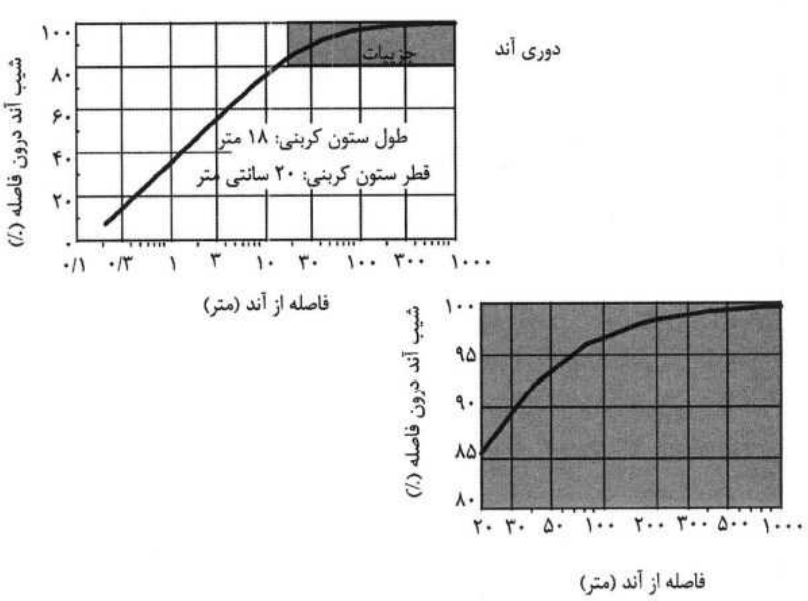
برای اطمینان از این که بالای چاه‌ها در معرض بیش از ۵ درصد شیب ولتاژ آند قرار نمی‌گیرد، آند می‌بایست به اندازه کافی از سر چاه دور باشد به نحوی که سر چاه خارج از ۹۵ درصد آند قرار گیرد. دوری تابعی از طول و قطر ستون کک است. براس ستونی با طول ۳۵/۸ متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر (جدول ۶-۴)، نقطه ۹۵ درصد در حدود ۱۲۰ متری آند قرار می‌گیرد. جدول ۹-۱۱ داده‌های شیب ۹۵ درصد که از شکل‌های ۹-۲۸ تا ۹-۳۰ گرفته شده را خلاصه می‌کند.



شکل ۹-۲۸ دوری آند با طول ۳۵/۸ متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر



شکل ۹-۲۹ دوری آند با طول ۲۳/۵ متر و قطر ۳۰ سانتی‌متر



شکل ۹-۳۰ دوری آند با طول ۱۸ متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر

جدول ۹-۱۱ دوری نسبی آند

مرجع	قطر آند		طول آند		۹۵ درصد فاصله شیب ولتاژ آند به چاه		مقاومت تقریبی
شکل	□□	□□	□	□□	□	□□□	اهم
۱۳-۱۳	۲۰	۸	۳۵/۸	۱۱۷	۱۲۰	۳۹۴	۱/۱۱
۱۴-۱۳	۳۰/۵	۱۲	۲۳/۵	۷۷	۸۵	۲۷۹	۱/۴۷
۱۵-۱۳	۲۰	۸	۱۸	۵۹	۷۰	۲۳۰	۱/۹۷
۰/۹۹							

	(۲ آند)

از سه حالت در نظر گرفته شده، دو آند عمیق کمترین توان کاری را نیاز خواهند داشت (به دلیل مقاومت آند پایین‌تر) و ممکن است در عمر طراحی سامانه، قابل اعتمادترین باشند. ما استفاده از سامانه ۲ آند عمیق، همان‌طور که در شکل‌های ۹-۳۱ و ۹-۳۲ نشان داده شده است را انتخاب می‌کنیم.

عوامل دیگری که می‌بایست در اکثر موارد ارزیابی کرد شامل:

۱. زمین‌شناسی زیر خاک که ممکن است بر حفاری و کارایی آندها تأثیر بگذارد.
۲. هزینه‌های نسبی حفاری، شامل قطر و عمق حفره.
۳. جاده دسترسی برای آند.

ولتاژ یک‌سوکننده مورد نیاز

اکنون مقاومت مدار برای هریک از آندهای عمیق محاسبه می‌شود.

$$R_T = R_a + R_w + R_u + R_c$$

که در این رابطه:

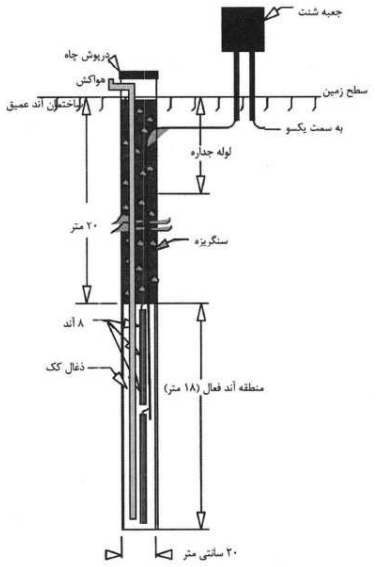
R_a = مقاومت آند به زمین دور

R_w = مقاومت سیم

R_u = مقاومت اجزای داخلی ناشناخته

R_c = مقاومت کاتد (چاه) به زمین دور

R_T = مقاومت مدار کل



شکل ۹-۳۱ طراحی آند

مقاومت آند بر اساس رابطه دوایت به این صورت است:

$$\mathrm{R}=\frac{0/005\rho}{\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right)-1\right)$$

که در این رابطه:

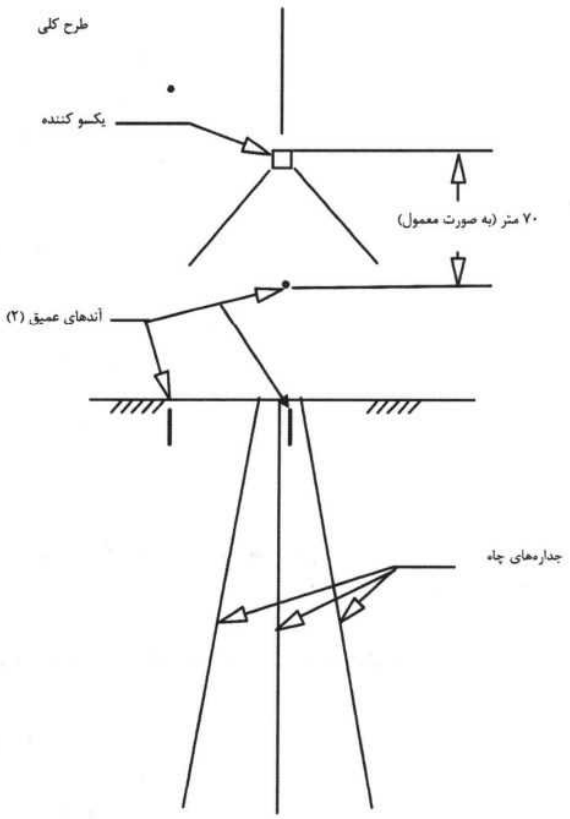
ρ = ۴۰۰۰ اهم سانتی‌متر

L= ۱۸ متر

d= ۰/۲ متر

$R = (0/354\Omega)(5/579) = 1/973$ اهم

$R_a = 1/973$ اهم



شکل ۹-۳۲ قرارگیری آند

اگر از سیم مسی شماره ۸ AWG ($2/099 \times 10^{-3}$ اهم بر متر) برای تمام آندها استفاده شود:

$$R_w = R_1 + R_2 + R_3$$

که در این رابطه:

R_1 = مقاومت معادل ۸ سیم موازی به پایین حفره به هر یک از آندهای آهن پرسیلیسیم.

$$\frac{\mathrm{RL}}{8} = R_1$$

R= مقاومت سیم ($2/099 \times 10^{-3}$ اهم بر متر)

L= طول میانگین ۸ سیم تغذیه (۲۷ متر)

$7/08 \times 10^{-3} R_1$ اهم

R_2 = مقاومت سیم بین آند عمیق و یک‌سوکننده

$$\mathrm{RL} = R_2$$

R= مقاومت سیم ($2/099 \times 10^{-3}$ اهم بر متر)

L= طول سیم از آند تا یک‌سوکننده (۷۰ متر)

$R_2 = 2/099 \times 10^{-3} \times 70 = 0/147$ اهم

R_3 = مقاومت سیم بین یک‌سوکننده و چاه نفت

$$R_3 = \mathrm{RL}$$

R= مقاومت سیم ($2/099 \times 10^{-3}$ اهم بر متر)

L= طول سیم میان یک‌سوکننده و چاه نفت (تقریباً ۲۰ متر)

$R_3 = 2/099 \times 10^{-3} \times 20 = 0/042$ اهم

$R_w = 0/007 + 0/147 + 0/042 = 0/196$ اهم

Ru=0.500 ohm فرضی

Rc=0.100 ohm فرضی

(رابطه دوایت مقاومت را کمتر از ۰/۰۵ اهم تعیین می‌کند)

$R_T = 1/973 + 0/196 + 0/500 + 0/100 = 2/769$ اهم

حداکثر شار جریان طراحی در هر یک از مدارهای آند عمیق برابر است با:

$$\mathrm{I} = \mathrm{I}_T/2$$

که در این رابطه:

I_T= جریان طراحی کل (۳۶ آمپر)

I= جریان یک آند عمیق (آمپر)

$\mathrm{I} = 36A/2 = 18$ آمپر

ولتاژ یک‌سوکننده:

$$\mathrm{E} = \mathrm{IR} + \mathrm{E}_P$$

که در این رابطه:

I= جریان تک آند عمیق معمول (۱۸ آمپر)

R= مقاومت مدار آند عمیق معمول (۲/۷۶۹ اهم)

E_P= ولتاژ برگشتی پلاریزه شده (۲ V @ .EST)

$\mathrm{E} = 18A \times 2/769\Omega + 2V = 51/8$ ولت

یک‌سوکننده‌ای استاندارد با حداقل ۴۰ آمپر و ۶۰ ولت ظرفیت، خروجی کافی برای سامانه را فراهم خواهد کرد. با در نظر گرفتن توان مورد نیاز این سامانه، چنانچه برق AC سه فاز موجود باشد، کارایی به طور قابل ملاحظه‌ای با استفاده از یک‌سوکننده سه فاز بهبود خواهد یافت.

خلاصه

۱. مثالی از طراحی حفاظت کاتدی برای مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی که شامل این مشخصات می‌شود:

- پوشش محافظ روی مخازن و لوله‌کشی
- جداسازی الکتریکی از سازه‌های متصل به زمین
- منبع جریان آند فداشونده

۲. مثالی از طراحی حفاظت کاتدی مخزن ذخیره‌سازی روزمینی جدید که شامل این مشخصات است:

- پوشش محافظ ناچیز روی مخازن
- جداسازی الکتریکی از سازه‌های متصل به زمین
- سامانه آند اعمال جریان با منبع توان یک‌سوکننده

۳. مثالی از طراحی حفاظت کاتدی یک مخزن ذخیره‌سازی روزمینی جدید که شامل این مشخصات است:

- ساخت جدید بدون پوشش محافظ روی ورق‌های کف
- غشا محدودکننده عایق الکتریکی ثانویه
- آند نوع نواری و توزیع شده زیر ورق‌های کف
- منبع توان اعمال جریان

۴. مثالی از طراحی حفاظت کاتدی مخزن ذخیره‌سازی روزمینی موجود که شامل مشخصات زیر می‌شود:

- محوطه مخازن موجود
- بدون محدودکننده ثانویه عایق الکتریکی
- حفاظت کاتدی با استفاده از یک‌سوکننده و آند عمیق
- کنترل مدار برگشتی توزیع جریان به کف هر یک از مخازن

۵. مثالی از طراحی حفاظت کاتدی برای لوله جداره چاه آب کم عمق با استفاده از منبع توان خورشیدی

۶. مثالی از طراحی حفاظت کاتدی برای گروه کوچکی از چاه‌های نفت با استفاده از آندهای عمیق اعمال جریان

مثال عملی طراحی دوره NACE برای حفاظت کاتدی سازه‌های دریایی و دور از ساحل

مثال‌های طراحی برای کاربردهای دریایی و دور از ساحل

مثال‌های طراحی حفاظت کاتدی خطوط لوله دریایی

جدید/دستبندی[۳] روی

توصیف

یک بخش ۱۵۲۵ متری عایق الکتریکی شده از خطوط لوله دریایی به قطر ۵۰/۸ (۲۰ اینچ)، باید نصب شود. هدف، طراحی سامانه حفاظت کاتدی برای خط لوله با استفاده از آندهای فداشونده روی از نوع دستبندی است.

داده‌ها

داده‌های مورد نیاز برای طراحی در زیر آمده است:

عمق متوسط آب: ۳۰ متر (۹۸/۴ فوت)

طول خط لوله: ۱۵۲۵ متر (۵۰۰۰ فوت)

قطر لوله: ۵۰/۸ سانتی‌متر (۲۰ اینچ)

کلاس لوله: ASA SCH 30

ضخامت جداره لوله: ۱/۲۷ سانتی‌متر (۰/۵۰۰ اینچ)

مقاومت خطی: $6/800 \times 10^{-6}$ اهم بر متر ($2/073 \times 10^{-6}$ اهم بر فوت)

پوشش- چسب دی‌الکتریک: ۳٪ تخریب پوشش

محیط اطراف لوله: ۸۰٪ آب دریا با مقاومت ۳۰ اهم سانتی‌متر، ۲۰٪ گل کف دریا با مقاومت ۳۰۰ اهم سانتی‌متر

طول عمر طراحی: ۲۰ سال

ملزومات جریان طراحی:

آب دریا: ۶/۵ میکروآمپر بر سانتی‌متر

گل: ۲/۲ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع

جنس آند: روی (MIL-A-18001H)

طرفیت جریان: ۷۳۸ آمپر- ساعت/کیلوگرم (۳۶۰ آمپر- ساعت/پوند)

نرخ مصرف: ۱۱/۹ کیلوگرم/ آمپر- سال (۲۴ پوند/آمپر. سال)

ضریب کاربردی: ۰/۹

پتانسیل خوردگی در آب دریا: ۱/۰- ولت نسبت به نقره/کلرید نقره

وزن آند دستبندی: ۲۳۵ کیلوگرم (۵۱۸ پوند)

محاسبات

تخمین مساحت در معرض محیط لوله

$$A_s = \pi IL \times \%bare$$

3 [illegible] 7 8

که A_s کل مساحت فلز قرار گرفته در معرض محیط (برحسب سانتی‌مترمربع)، d قطر لوله (۵۰/۸ سانتی‌متر)، L طول خط لوله ۱۵۲۵۰۰ سانتی‌متر، bare% کسری از فلز که در معرض محیط قرار گرفته (۳٪) است. بنابراین:

$$A_s = \pi \times 0/508m \times 1525m \times 0/03 = 73m^2 (786\text{ft}^2)$$

مساحت فولاد بدون پوشش در معرض آب دریا برابر است با:

$$A_{\text{sw}} = 73m^2 \times 0/8 = 58/4m^2 (629\text{ft}^2)$$

مساحت فولاد بدون پوشش در معرض گل برابر است با:

$$A_m = 73m^2 \times 0/2 = 14/6m^2 (157\text{ft}^2)$$

تخمین جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی

آب دریا

$$I_{\text{sw}} = \text{A}_{\text{sw}}.\text{i}_{\text{sw}}$$

که I_{sw} جریان مورد نیاز در آب دریا (برحسب آمپر)، A_{sw} مساحت فولاد قرار گرفته در معرض آب دریا ($5/84 \times 10^5$ سانتی‌متر مربع) و i_{sw} چگالی جریان مورد نیاز در آب دریا ($6/5 \times 10^{-6}$ آمپر بر سانتی‌مترمربع) هستند. بنابراین:

گل و لای

$$I_m = \text{A}_m.\text{i}_m$$

که I_m جریان مورد نیاز در گل (برحسب آمپر)، A_m مساحت فولاد قرار گرفته در معرض گل ($1/46 \times 10^5$ سانتی‌متر مربع) و i_m چگالی جریان مورد نیاز در گل ($2/2 \times 10^{-6}$ آمپر بر سانتی‌مترمربع) است. بنابراین:

$$I_m = 1/46 \times 10^5 \text{cm}^2 \times 2/2 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2 = 0/32A$$

کل جریان مورد نیاز

$$\text{I} = \text{I}_{\text{sw}} + I_m = 3/80 + 0/32 = 4/12A$$

ظرفیت مورد نیاز برای آند

$$C_a = \text{I.t}$$

که C_a ظرفیت الکتروشیمیایی (آمپر- سال)، I جریان (۴/۱۲ آمپر) و t طول عمر مورد انتظار (۲۰ سال) است. بنابراین:

$$C_a = 4/12A \times 20\text{yr} = 82/4\text{A.yr}$$

وزن آندهای روی مورد نیاز

$$\text{W} = \frac{C_a.\text{C}_r}{f_u}$$

که W وزن آند (برحسب کیلوگرم)، C_a ظرفیت مورد نیاز (۸۲/۴ آمپر، سال)، C_r نرخ مصرف روی در آب دریا (۱۱/۹ کیلوگرم/ آمپر- سال) و f_u ظرفیت کاربردی (۰/۹) است. بنابراین:

$$\text{W} = \frac{82/4 \times 11/9}{0/9} = 1090\text{kg}$$

تعداد آندهای مورد نیاز

$$\mathrm{N}=\frac{W}{W_a}$$

که W وزن آندهای روی (۱۰۹۰ کیلوگرم) و W_a وزن هرکدام از آندها (۲۳۵ کیلوگرم) است. بنابراین:

$$\mathrm{N}=\frac{1090}{235}=4.64$$

نزدیک‌ترین عدد به عدد بالا، ۵ است، بنابراین تعداد ۵ آند برای کل خط لوله یا یک آند برای هر ۳۰۵ متر از لوله مورد نیاز است. دو آند، در ۱۵۲/۵ متری از دو انتهای خط و بقیه با فاصله ۳۰۵ متری از آنها نصب می‌شوند.

میرایی

اکنون احتمال میرایی بررسی می‌شود. در محیط‌های دارای هدایت بالا (مانند آب دریا)، میرایی می‌تواند عامل مهمی در طراحی حفاظت کاتدی باشد. مقاومت خط لوله بدون پوشش با ابعاد داده شده در این مثال، توسط رابطه دوایت برای یک الکترود افقی تخمین زده می‌شود. ازآنجاکه فقط ۳٪ سطح لوله بدون پوشش است. عدد قطر در معادله دوایت باید ۳٪ قطر لوله باشد تا مقاومت بخش پوشش‌دار از لوله نسبت به زمین به دست آید:

$$R=\frac{0/005\rho}{\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{4L}{d}\right)+ln\left(\frac{L}{h}\right)-2+\frac{2h}{L}\right)$$

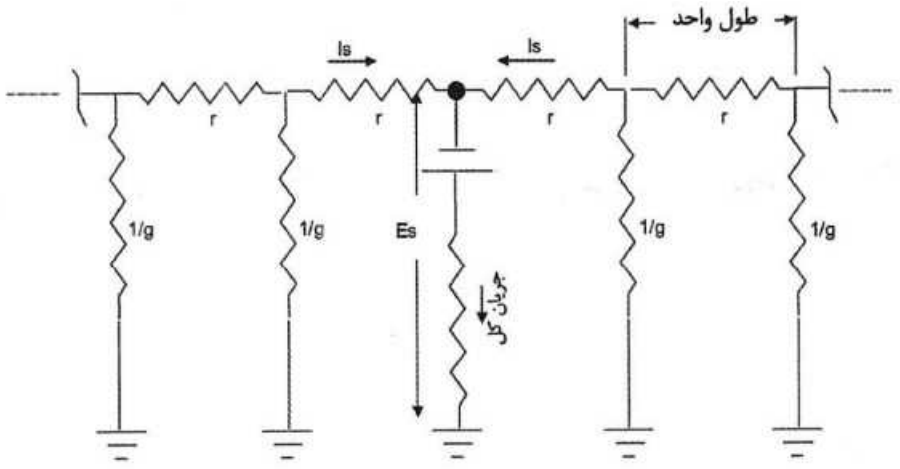
که در این رابطه ρ مقاومت محیط برابر با ۳۰ اهم سانتی‌متر، L طول خط لوله برابر با ۱۵۲۵ متر، d قطر تصحیح شده لوله برابر با $0/03\times 0/508$ متر و h عمق خط لوله برابر با ۳۰ متر است. بنابراین:

$$R=\frac{0/005\times 30}{\pi\times 1525}\left(ln\left(\frac{4\times 1525}{0/01524}\right)+ln\left(\frac{1525}{30}\right)-2+\frac{2\times 30}{1520}\right)=4/65\times 10^{-4}\mathrm{ohms}$$

مقاومت $4/65\times 10^{-4}$ اهم، به‌صورت هدایت برابر با ۲۱۴۸ زیمنس است. با انتخاب ۱ متر به‌عنوان طول واحد و تقسیم کردن هدایت خط لوله بر تعداد کل طول‌های واحد، هدایت در طول واحد به دست می‌آید:

$$g=\frac{2148S}{1525m}=1/41\ \mathrm{S/m}$$

با استفاده از رابطه‌های میرایی ارائه شده در شکل ۹-۳۴، مدار معادل شکل ۹-۳۳ و داده‌های لوله فولادی از جدول ۹-۱۲ و ۹-۱۳، ثابت میرایی و مقاومت مشخصه محاسبه می‌شود.



شکل ۹-۳۳ دیاگرام مداری در مکان اتصال آند

$$\alpha=(r.g)^{0/5}$$
$$R_G = (r/g)^{0/5}$$

که r مقاومت لوله در طول واحد ($6/8 \times 10^{-6}$ اهم بر متر) و g هدایت لوله در واحد طول (۱/۴۱ زیمنس بر متر) است، بنابراین:

$$\alpha = \left(6/8 \times 10^{-6}\Omega \times 1/41S()^{0/5^{-3}}\right)$$
$$R_G = \left(\frac{6/8 \times 10^{-6}\Omega}{1/41S}()^{0/5^{-3}}\text{ohm}\right)$$

وضعیت آند وسطی در خانه لوله را بررسی می‌کنیم. معادله ۵ در شکل ۹-۳۴، امکان محاسبه مقاومت در یک جهت از آند به بعد را فراهم می‌کند.

جدول ۹-۱۲ داده‌های مقاومت لوله (داده‌های لوله فولادی برای محاسبات خوردگی)

= مقاومت ویژه فولاد	4.292E-06	Ohms-sq.in./in.
	1.344E.05	Ohms-sq.in./in.

مقاومت خطی		وزن		ضخامت دیواره		قطر خارجی			اندازه اسمی	
اهم بر متر	اهم بر متر	در هر متر کیلوگرم	در هر فوت پوند	سانتی متر	اینچ	سانتی متر	اینچ	شماره برنامه	سانتی متر	اینچ
6.562E-05	2.001E-05	4.90	10.79	0.602	0.237	11.4	4.500	40	10	4
5.493E-05	1.675E-05	5.85	12.89	0.476	0.188	16.8	6.625		15	6
4.731E-05	1.442E-05	6.80	14.97	0.556	0.219	16.8	6.625		15	6
4.160E-05	1.268E-05	7.73	17.02	0.635	0.250	16.8	6.625		15	6
3.732E-05	1.138E-05	8.62	18.98	0.711	0.280	16.8	6.625	40	15	6
2.478E-05	7.556E-06	12.97	28.58	1.097	0.432	16.8	6.625	80	15	6

6	15	120	6.625	16.8	0.562	1.427	36.40	16.52	5.932E-06	1.946E-05
8	20	20	8.625	21.9	0.250	0.635	22.37	10.15	9.654E-06	3.167E-05
8	20	30	8.625	21.9	0.277	0.704	24.70	11.21	8.742E-06	2.867E-05
8	20	40	8.625	21.9	0.322	0.818	28.56	12.97	7.561E-06	2.480E-05
8	20	60	8.625	21.9	0.406	1.031	35.64	16.18	6.058E-06	1.987E-05
10	25	20	10.750	27.3	0.250	0.635	28.04	12.73	7.701E-06	2.526E-05
10	25	30	10.750	27.3	0.307	0.780	34.25	15.55	6.305E-06	2.068E-05
10	25	40	10.750	27.3	0.365	0.927	40.49	18.38	5.333E-06	1.749E05
10	25	60	10.750	27.3	0.500	1.270	54.74	24.85	3.944E-06	1.294E-05
12	30	20	12.750	32.4	0.250	0.635	33.38	15.15	6.468E-06	2.122E-05
12	30	30	12.750	32.4	0.330	0.838	43.78	19.88	4.932E-06	1.618E-05
12	30		12.750	32.4	0.375	0.953	49.57	22.51	4.356E-06	1.429E-05
12	30	40	12.750	32.4	0.406	1.031	53.53	24.30	4.033E-06	1.323E-05
12	30		12.750	32.4	0.500	1.270	65.43	29.70	3.300E-06	1.082E-05
14	36	10	14.00	35.6	0.250	0.635	36.72	16.67	5.880E-06	1.929E-05
14	36	20	14.00	35.6	0.312	0.792	45.62	20.71	4.733E-06	1.552E-05
14	36	30	14.00	35.6	0.375	0.953	54.58	24.78	3.956E-06	1.298E-05
16	41	10	16.00	40.6	0.250	0.635	42.06	19.10	5.134E-06	1.684E-05
16	41	20	16.00	40.6	0.312	0.792	52.28	23.74	4.130E-06	1.355E-05
16	41	30	16.00	40.6	0.375	0.953	62.59	28.42	3.450E-06	1.132E-05
16	41	40	16.00	40.6	0.500	1.270	82.78	37.58	2.608E-06	8.555E-06

$$R_{so}=R_G.\coth(\alpha x)$$

که R_G مقاومت مشخصه $(2/2 \times 10^{-3})$، a ثابت میرایی $(3/1 \times 10^{-3})$، x تعداد طول‌های واحد بین انتهایی خط و موقعیت آند: ۱۵۲۵ تقسیم بر ۲ (۷۶۲/۵ طول واحد) است، بنابراین:

$$R_{so} = 2/2 \times 10^{-3}\coth(3/1 \times 10^{-3} \times 762/5) = 2/24 \times 10^{-3}\text{ohm}$$

ازآنجاکه مقاومت ورودی در مرکز خط به‌سمت یک جهت، بسیار نزدیک به مقاومت مشخصه است (با اختلاف ۲٪)، این خط در هر دو جهت از مرکز خط، از لحاظ الکتریکی طولانی است. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که میرایی می‌تواند مسئله‌ساز باشد. مگر اینکه آندها در فاصله‌های مناسبی قرار داده شوند. آند دستبندی، شباهت زیادی به کره‌ای با شعاع ۳۰ سانتی‌متر دارد. مقاومت یک کره نسبت به زمین دور برابر است با:

$$R_a = \frac{\rho}{4\pi r}$$

که ρ مقاومت محیط (۳۰ اهم سانتی‌متر)، r شعاع کره (۳۰ سانتی‌متر) و R_a مقاومت آند نسبت به زمین دور (برحسب اهم) است. بنابراین:

$$R_a = \frac{30\ \text{ohm.cm}}{4\pi \times 30\text{cm}} = 0/08\text{ohm}$$

اگر پتانسیل محرکه بین آند و لوله را برابر با ۰/۵ ولت (پتانسیل آند منهای پتانسیل فولاد نسبت به الکترود مرجع: $[1/0 - (-50)]$) فرض کنیم، کل جریان ایجاد شده توسط یک آند از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I=\frac{E}{\left(\frac{R_{so}}{2}+R_a\right)}=\frac{0/5V}{\left[\left(\frac{2/24\times10^{-3}\Omega}{2}\right)+0/080\Omega\right]A}$$ (۳/۰۸ آمپر در هر جهت)

از معادله ۲ (شکل ۹-۳۴) برای محاسبه تغییر ولتاژ لوله نسبت به زمین در انتهای گیرنده[۳۷۹]استفاده می‌شود ۳/۰۸ آمپر در مرکز، از سمت جهت اندازه‌گیری ولتاژ به آند برمی‌گردد□

$$I=I_r.\cosh(ax)+\left(\frac{E_r}{R_G}\right)$$

که I_r برابر با صفر، x برابر با ۷۶۲/۵ واحد، I برابر با ۳/۰۸ آمپر، a برابر با $3/1\times10^{-3}$ و R_G برابر با $2/2\times10^{-3}$ می‌باشند. با نوشتن مجدد معادله و حل آن برای به دست آوردن E_r داریم:

$$E_r=\frac{IR_G}{sinh(ax)}=\frac{3/08\times2/2\times10^{-3}}{sinh(3/1\times10^{-3}\times762/5)}=0/00129V$$

سپس می‌توان نمودار میرایی ولتاژ را تعیین کرد. در این مورد، میرایی قابل توجه است (همان‌گونه که در زیر نشان داده شده است). ولتاژ بین لوله و زمین در موقعیت آند برابر است با معادله ۱ از شکل ۹-۳۴):

$$E_r=E_r.\cosh(ax)+R_G.I_r.sinh(ax)$$

که E_r تغییر پتانسیل در انتهای باز (۰/۰۰۱۲۹ ولت)، a ثابت میرایی $(3/1\times10^{-3})$، x فاصله منبع از انتهای باز (۷۶۵/۵ واحد) و R_G مقاومت مشخصه ($2/2\times10^{-3}$ اهم) است، بنابراین:

$$E=0/00129.cosh(2/36)+0=0/00689\text{volt}$$

میرایی ولتاژ در امتداد لوله از آند مرکزی برابر است با $\left(\frac{[0/00689-0/00129]}{0/00689}=0/81\right)\%81$ که کمتر از میرایی آندهای دیگر است. بنابراین ماکزیمم فاصله بین آندها، عامل مهمی خواهد بود□

جدول۹-۱۳ داده‌های مقاومت لوله برای اندازه‌های بزرگ (داده‌های لوله فولادی برای محاسبه خوردگی)

مقاومت خطی		وزن		ضخامت دیواره		قطر خارجی		اندازه اسمی		
اهم بر متر	اهم بر متر	در هر متر کیلوگرم	در هر فوت پوند	سانتی متر	اینچ	سانتی متر	اینچ	شماره برنامه	سانتی‌متر	اینچ
□□□□□□□	□□□□□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□	□□	□□□
□□□□□□□	□□□□□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□□	□□	□□	□□
□□□□□□□	□□□□□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□□	□□	□□	□□
□□□□□□□	□□□□□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□□		□□	□□
□□□□□□□	□□□□□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□□	□□	□□	□□

3 □□□□□□□□□□□□□□□□ 7 9

خط موجود/یک‌سوکننده/اسلد[۳۸۰]

توصیف

یک خط لوله فولادی پوشش‌دار به قطر ۲۰/۳۳ سانتی‌متر (۸ اینچ)، از یک خلیج عبور می‌کند. طول مسیر عبور، ۳۲۰۱ متر است. خط لوله، از خطوط لوله متصل به آن در دو ساحل توسط فلنج عایق شده است. با توجه به داده‌های زیر باید یک سامانه حفاظت کاتدی برای این خط لوله طراحی کرد.

داده‌ها

داده‌ها از آزمون‌های میدانی و مدارک طراحی به دست آمده‌اند.

- عمق متوسط آب: ۱۲ متر (۴۰ فوت)
- طول خط لوله: ۳۲۰۱ متر (۱۰۵۰۰ فوت)
- قطر لوله: ۲۰/۳ متر (۸ اینچ)
- کلاس لوله: ASA Sch 40
- ضحامت جداره لوله: ۰/۸۱۸ سانتی‌متر (۰/۳۲۲ اینچ)

3 8 0

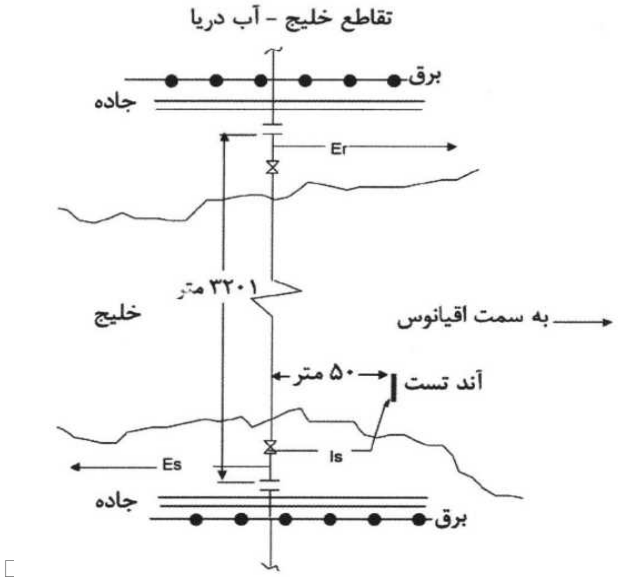
- مقاومت خطی: $2/480 \times 10^{-5}$ اهم بر متر ($7/561 \times 10^{-6}$ اهم بر فوت)
- پوشش: اپوکسی، درصد تخریب شده پوشش نامعلوم است
- محیط اطراف لوله: آب دریا و ماسه با مقاومت ۳۰ اهم سانتی‌متر
- طول عمر طراحی حفاظت کاتدی: ۲۰ سال؛ نیروی الکتریکی در هر دو ساحل، در دسترس است. خط لوله از فولاد جوشکاری شده ساخته شده است و در هر دو ساحل شامل شیرهای فلنجی است

داده‌های آزمایش حفاظت کاتدی

۱. آند آزمایشی با فاصله زیاد از لوله قرار داده شده است. گرادیان قابل توجهی از آند در نزدیکی لوله مشاهده نمی‌شود
۲. آزمایش‌ها در مرکز اعمال جریان (شکل ۹-۳۵) نشان می‌دهد که برای پلاریزه شدن کافی خط لوله در نقطه آزمایش، نیاز به تغییر پتانسیل ۰/۱۵ ولتی بین لوله و یک الکترود مرجع «دور» است
۳. تغییر پتانسیل بین لوله و الکترود مرجع «دور» به‌عنوان آند آزمایشی در همان ساحل، ۰/۰۵- ولت بر آمپر است
۴. تغییر ولتاژ بین لوله و الکترود مرجع «دور» ناشی از آند آزمایشی در ساحل مقابل، ۰/۰۱- ولت بر آمپر است.

روش

۱. عوامل میرایی الکتریکی خط لوله تعیین شود
۲. تعداد و ظرفیت منابع جریان حفاظت کاتدی مورد نیاز برای حفاظت از خط لوله تعیین شود
۳. آندها و منابع جریان مورد نیاز طراحی شود



شکل ۹-۳۵ چیدمان آزمایشی

محاسبات

ثابت میرایی و مقاومت مشخصه خط لوله با استفاده از معادلات عمومی شکل ۹-۳۴ محاسبه می‌شود. داده‌های آزمایش در زیر آمده است:

I_S برابر با ۱ آمپر، E_S برابر با ۰/۰۵ ولت، E_r برابر با ۰/۰۱ ولت، I_r برابر با ۰ آمپر (با فرض اینکه فلنج‌ها، عایق خوبی هستند)، $y = x$ برابر با ۳۲۰۱ متر (فاصله بین منبع جریان آزمایشی و نقطه اندازه‌گیری انتهای گیرنده[1] در ساحل مقابل). از معادله ۳ در شکل ۹-۳۴ داریم:

$$E=E_s.\cosh(ax)-R_G.I_s.\sinh(ax)$$

که E_S تغییر ولتاژ منبع (۰/۰۵ ولت)، I_S جریان منبع (۱/۰ آمپر)، a ثابت میرایی، y تعداد واحدهای طول ۱ متری از انتهای فرستنده[2] تا موقعیت E (۳۲۰۱)، E تغییر ولتاژ انتهای گیرنده (۰/۰۱ ولت) و R_G مقاومت مشخصه است. تنها مجهول‌های معادله ۳، مقاومت مشخصه و ثابت میرایی می‌باشند. از معادله ۵ در شکل ۹-۳۴ داریم:

$$R_{so}=R_G.\coth(ax)$$

با حل این معادله برای R_G داریم:

$$R_G = \frac{R_{so}}{\coth(ax)}$$

که R_{so} مقاومت به سمت انتهای باز خط (منبع) $R_{so} = E_S/I_S$ برابر با ۰/۰۵ اهم) است. در نتیجه برای x=y=3201.

$$R_G = \frac{0/5}{\coth(ax)} = \frac{0/5\, sinh(ay)}{\cosh(ay)}$$

با قرار دادن RG و مقادیر معلوم دیگر در معادله ۳ (شکل ۹-۳۴)، ثابت میرایی تعیین خواهد شد.

$$E=E_s.\cosh(ay)-R_G.I_s.\sinh(ay)$$

$$0/01 = 0/05\cosh(ay) - \left(\frac{0/05\sinh(ay)}{\cosh(ay)}\right).\sinh(ay)$$

$$0/01 = 0/05\cosh(ay) - \frac{0/05\sinh^2(ay)}{\cosh(ay)}$$

با ضرب کردن هر دو سمت معادله در $\cosh(ay)$ و فاکتورگیری از آن داریم:

$$0/01\cosh(ay) = 0/05[\cosh^2(ay) - \sinh^2(ay)]$$

هر دو سمت معادله تقسیم بر ۰/۰۱ می‌شود.

$$0/01\cosh(ay) = 5[\cosh^2(ay) - \sinh^2(ay)]$$

---

3 [illegible] 8 1

3 [illegible] 8 2

با جایگذاری $\cosh^2(ay) - \sinh^2(ay) = 1$ داریم:

$$\cosh(ay) = 5$$

با گرفتن معکوس cosh از دو سمت معادله و حل آن برای به دست آوردن ثابت میرایی داریم:

$$\cosh^{-1}(cosh(ay)) = \cosh^{-1}(5) \Rightarrow ay = 2/2924 \Rightarrow a = \frac{2/2924}{3201} = 7/162 \times 10^{-4}$$

اکنون مقاومت مشخصه محاسبه خواهد شد:

$$E = E_s \times cosh(ay) - R_G \times I_s \times sinh(ay)$$

از رابطه‌های میرایی داریم:

$$a = (r.g)^{0/5} \Rightarrow a^2 = r.g \Rightarrow r = \frac{a^2}{g}$$

و

$$R_G = \left(\frac{r}{g}\right)^{0/5} \Rightarrow R_G^2 = \frac{r}{g}$$

از آنجاکه $r = \frac{a^2}{g}$ است:

$$R_G^2 = \frac{a^2}{g} \Rightarrow g^2 = \frac{a^2}{R_G^2} \Rightarrow g = \left(\frac{a^2}{R_G^2}\right) = 0/0146 \text{ Simens/unit}$$

بنابراین:

$$r = \frac{a^2}{g} = 3/513 \times 10^{-5} \text{ ohm/unit}$$

مقاومت خطی واحد، شامل چندین اتصال فلنجی در شیرها است. مقاومت خطی بخش خط لوله (r)، بزرگ‌تر از مقدار ارائه شده در کتاب برای این اندازه و کلاس از لوله است ($2/480 \times 10^{-5}$ اهم بر متر).

از معادله ۳ (شکل ۹-۳۴)، پروفیل تغییر ولتاژ برای بخش عبوری از خلیج از y برابر با صفر تا سمت مقابل (یعنی y برابر با ۳۲۰۱ متر) رسم می‌شود. جریان ۱ آمپر به‌عنوان جریان منبع انتخاب می‌شود تا پروفیل نسبی باشد.

$$E = E_s \cosh(ay) - R_G I_s \sinh(ay)$$

که E_s ولتاژ منبع (۰/۰۵ ولت)، I_s جریان منبع (۱ آمپر)، R_G مقاومت مشخصه (۰/۰۴۹ اهم)، a ثابت میرایی ($7/162 \times 10^{-4}$)، y تعداد طول‌های واحد از سواحل سمت منبع و E تغییر پتانسیل در مکان y (برحسب ولت) هستند شکل ۹-۳۶، نمودار این داده‌ها می‌باشد.

داده‌ها به وضوح نشان می‌دهند که جابه‌جایی پتانسیل لوله نسبت به خاک به میزان مورد نظر (۰/۱۵ ولت) در تمام طول خط، توسط یک منبع جریان امکان‌پذیر نیست. هر آمپر جریان اعمالی در ساحل سمت منبع جریان، پتانسیل لوله را در طرف مقابل به میزان ۰/۰۱- ولت جابه‌جا می‌کند. برای رسیدن به تغییر پتانسیل ۰/۱۵- ولت در لوله، نیاز به منبع جریانی با دامنه $I_s = \frac{E_S}{R_{r,s}}$

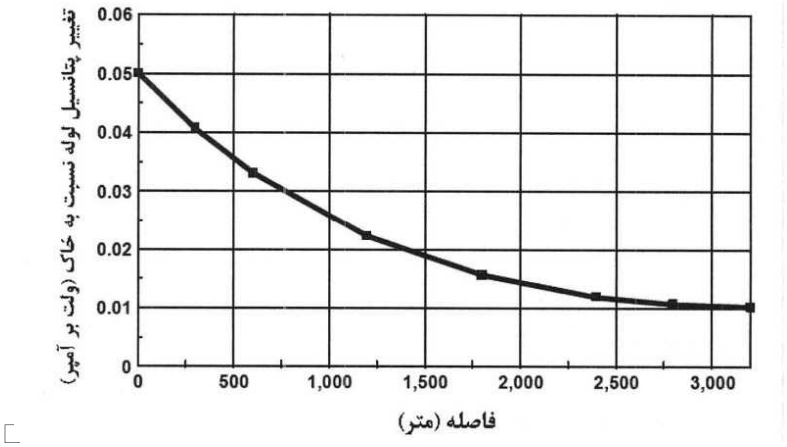
است که $R_{r,S}$ تغییر پتانسیل لوله نسبت به خاک (کوپل الکتریکی) ایجاد شده در انتهای گیرنده به ازای یک آمپر جریان اعمالی در منبع (۰/۰۱- ولت بر آمپر)، I_S جریان منبع (آمپر)، E_S تغییر پتانسیل در سمت فرستنده (۰/۱۵- ولت) است. بنابراین I_S برابر با ۰/۱۵- تقسیم بر ۰/۰۱- یا ۱۵ آمپر خواهد بود. اعمال ۱۵ آمپر، منجر به تغییر پتانسیل لوله در منبع به میزان زیر خواهد شد:

$$E_S = I_S . R_{r,S}$$

که I_S جریان منبع (۱۵ آمپر)، $R_{r,S}$ تغییر پتانسیل لوله نسبت به خاک (کوپل الکتریکی) ایجاد شده در انتهای گیرنده به ازای یک آمپر جریان منبع (۰/۰۵ ولت بر آمپر) و E_S تغییر پتانسیل در سمت فرستنده (ولت) است.

$$E_S = 15 \times (-0/05) = 0/75 \text{volt}$$

این مقدار، بیش از ۵ برابر تغییر پتانسیل مورد نیاز برای حفاظت لوله در سمت منبع جریان است.



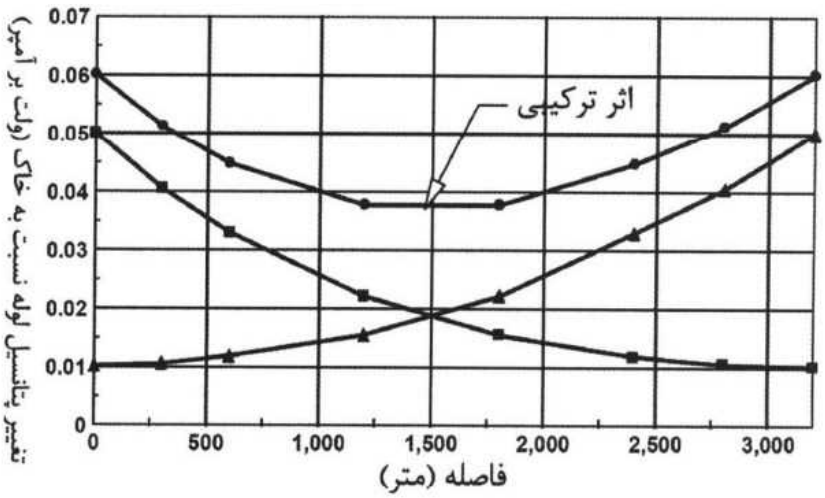
شکل ۹-۳۶ میرایی پتانسیل لوله نسبت به خاک

اکنون طراحی یا دو منبع جریان (هرکدام در یک سمت از ساحل) بررسی می‌شود. فرض می‌شود که عوامل کلی شبکه، مشابه با یک آند ور در سمت گیرنده (دور) خط هستند. شکل ۹-۳۷، پروفیل پتانسیل با دو منبع جریان (هرکدام در یکی از دو سمت خط لوله) را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که در این حالت، مینیمم تغییر پتانسیل در مرکز خط بوده و مقداری برابر با ۰/۰۳۵ ولت تأثیر همزمان ۱ آمپر از هرکدام از منبع جریان‌ها دارد (۰/۰۱۷۵- ولت بر آمپر از هر منبع).

برای رسیدن به ۰/۱۵- ولت تغییر پتانسیل در مرکز خط باید از مقادیر زیر استفاده کرد:

$$E_c = I_s R_{c,s} + I_r R_{c,r}$$

که I_S جریان از سمت منبع جریان اولیه (آمپر)، I_r جریان از سمت گیرنده اولیه (آمپر)، $R_{c,S}$ کوپل الکتریکی برای تغییر پتانسیل در مرکز خط که توسط جریان I_S ایجاد شده (۰/۰۱۷۵- ولت بر آمپر)، $R_{c,r}$کوپل الکتریکی تغییر پتانسیل در مرکز خط که توسط جریان I_r ایجاد شده (۰۱۷۵- ولت بر آمپر) و E_c کل تغییر پتانسیل لوله نسبت به زمین در مرکز خط لوله (۰/۱۵- ولت مورد نیاز) است.



شکل ۹-۳۷ پروفیل دو منبع

اگر I_s برابر با I_r (جریان‌های مساوی از هر دو منبع جریان) و $R_{c,s}$ و $R_{c,r}$ و $R_{c,i}$ یکسان و برابر با ۰/۰۱۷۵ ولت بر آمپر باشند:

$$E_c = 2\mathrm{I}.\mathrm{R}_{c,i} \Rightarrow I = \frac{E_c}{2R_{c,i}} = \frac{-0/15V}{0/035\Omega} = 4/3A$$

(از هرکدام از ۲ منبع جریان)

بنابراین کل جریان مورد نیاز، از ۱۵ آمپر (از یک منبع جریان) به ۸/۶ آمپر کاهش می‌یابد. تغییر پتانسیل در ساحل در اثر ۴/۳ آمپر برای هر منبع جریان برابر است با:

□□ □□□□□□□□□□□□□□□□ = ۴ □۳□(−۰ □۵Ω)+۴ □۳□(−۰ □۱) = −۰ □۲۶□□□

$$E_r = \mathrm{I}_s R_{r,s} + \mathrm{I}_r R_{r,r} = 4/3A(-0/05\Omega) + 4/3A(-0/01) = -0/26\mathrm{volt}$$

که □ و E_r تغییر پتانسیل لوله در هرکدام از ساحل‌ها (برحسب ولت)، I_s و I_s جریان خروجی از هرکدام از دو منبع جریان (۴/۳ آمپر) و $R_{x,y}$ کوپل‌های الکتریکی در موقعیت x ایجاد شده توسط منبع جریان موقعیت y است ($R_{s,s} = R_{r,r}$ برابر با ۰/۰۵- ولت بر آمپر و $R_{s,r} = R_{r,s}$ برابر با ۰/۰۱- ولت بر آمپر).

بنابراین تغییر ولتاژ ایجاد شده در موقعیت منابع جریان (۰/۲۶- ولت)، تنها ۱/۷ برابر مقدار مورد نیاز است (در مقایسه با ۵ برابر نیاز در حالت یک منبع جریان).

طراحی آند

خطوط پوشش‌دار قدیمی‌تر در دریا، در معرض نیروهای زیادی قرار دارند که می‌تواند کارایی پوشش حفاظتی را به طور قابل توجهی کاهش دهند. برای خط لوله‌ای مانند مثال اخیر، در نظر گرفتن افزایش جریان مورد نیاز در آینده، روش مناسبی است.

همچنین اجتناب از ایجاد حفاظت بیش از حد، به جلوگیری از اعمال تنش اضافی به پوشش کمک خواهد کرد. طراحی سامانه حفاظت کاتدی خط لوله مذکور با استفاده از دو منبع جریان انجام می‌شود.

نیروی الکتریکی در هر دو سمت خلیج در دسترس است. یک آند از نوع اسلد[۳۸۳] که با یک‌سوکننده تغذیه می‌شود، ملزومات مورد نیاز را برآورده می‌سازد. اسلدها برای سامانه‌های اعمال جریان معمولاً با استفاده از اعضاء ساختاری غیرفلزی ساخته می‌شوند تا در اثر جریان‌های تداخلی مربوط به عملکرد آند، دچار خوردگی نشوند. اگر از چوب برای حمایت آند استفاده شود، نیاز به نوعی ایجاد لنگر است تا از غوطه‌وری و حرکت با جریان و موج آب جلوگیری شود. هدف از اسلد، حمایت و حفاظت از آندها است. آند می‌تواند آهن سیلیسیم دار، تیتانیم یا نیوبیم پلاتینیزه شده، MMO یا بلوک‌های گرافیتی باشد. برای این طراحی از آندهای آهن دارای سیلیسیم بالا به شکل استوانه استفاده می‌شود. عوامل طراحی بدین صورت هستند:

چگالی جریان خروجی آند: ۱/۶ میلی آمپر بر سانتی‌متر مربع (۱/۵ آمپر بر فوت مربع)

نرخ مصرف: ۰/۴ کیلوگرم بر آمپر سال (۰/۹ پوند بر آمپر سال)

ضریب کاربردی: ۰/۶

جریان طراحی: ۵ آمپر برای هر سلد

طول عمر طراحی: ۲۰ سال

مساحت آندها: $A_s=\mathrm{I/i}$ که I کل جریان خروجی (۵ آمپر)؛ i چگالی جریان بهینه طراحی (۰/۰۰۱۶ آمپر بر سانتی‌متر مربع) و A_s کل مساحت آند (برحسب سانتی‌متر مربع) است. بنابراین:

$$A_s = \frac{5A}{0/0016\mathrm{A/m^2}} = 3125\mathrm{cm^2} = 0/3125$$

حداقل وزن آند $\mathrm{W=C_r.t.I/f_u}$ که C_r نرخ مصرف (۰/۴ کیلوگرم بر آمپر، سال)، t طول عمر طراحی (۲۰ سال)، I جریان طراحی (۵ آمپر)، f_u ضریب کاربردی (۰/۶) و W وزن آند (برحسب کیلوگرم) است. بنابراین:

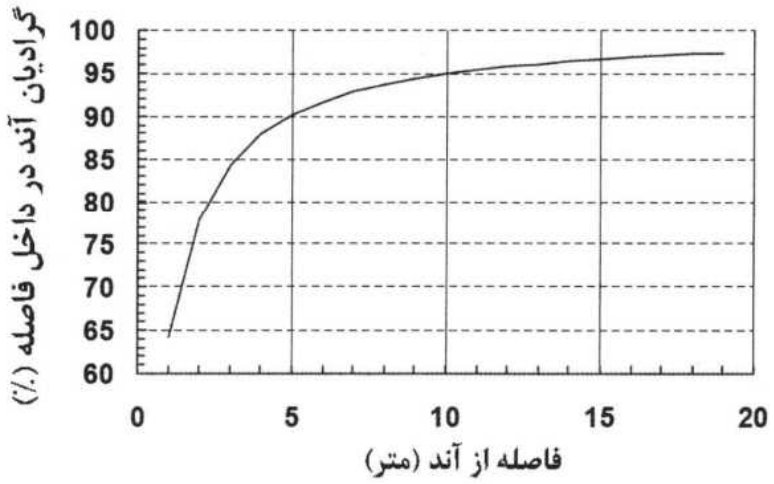
$$\mathrm{W}=\frac{0/4\mathrm{kg/A.yr}\times 20\mathrm{yr}\times 5A}{0/6} = 66/7\mathrm{kg}$$

دو آند ۳۹ کیلوگرمی به طول ۲/۱۳۴ متر و قطر ۹/۵ سانتی‌متر، برای طول عمر ۲۰ سال مناسب خواهد بود. مساحت هرکدام از آنها، ۶۴۰۰ سانتی‌متر مربع (۶/۹ فوت مربع) است. مساحت خروج جریان، در حدود ۴ برابر مقدار طراحی است. این موضوع نباید مسئله قابل توجهی برای این نوع آند باشد. زیرا چگالی جریان پایین‌تر معمولاً از چگالی جریان اضافی، قابل قبول‌تر است. ضریب کاربردی ۰/۶، محافظه‌کارانه است. هرکدام از اسلدها شامل دو آند استوانه‌ای ۳۹ کیلوگرمی قرار داده شده در یک قاب چوبی بودند که برای جلوگیری از تخریب تصادفی توسط قایق‌های کوچک، توسط تجهیزاتی به ساحل محکم شده‌اند.

دوری[۳۸۴]

3	□□□□□□□	8	3
3	□□□□□ □□□□□□□□	8	4

برای به حداقل رساندن گرادیان آند در خط لوله، فاصله اسلد آند از لوله باید به اندازه کافی باشد تا اطمینان حاصل شود که لوله در خارج از ۹۵٪ گرادیان ولتاژ آند قرار دارد. شکل ۹–۳۸، نمودار دوری برای یک آند به طول ۲/۱۳ متر و قطر ۹/۵ سانتی‌متر است. این نمودار چیدمان اسلد قرار گرفته در عمق ۲ متری آب را تخمین می‌زند. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که اسلدهای آند باید حداقل در فاصله ۱۰ متری از خط لوله قرار داده شوند.



شکل ۹–۳۸ دوری آند (طول آند: ۲۱۳/۴ سانتی‌متر، قطر آند: ۹/۵ سانتی‌متر)

اندازه منطقی برای اسلدهای آند، ۲/۵ در ۱/۵ متر بوده و همچنین آندها به‌صورت جانبی و با فاصله ۱ متری از یکدیگر قرار داده می‌شوند.

منبع تغذیه

از رابطه ساند برای تخمین مقاومت آندها نسبت به زمین دور افتاده می‌شود:

$$R_N = \frac{0/005\rho}{\pi \mathrm{NL}}\left(ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2L}{s}ln(0/656N)\right)$$

که R_N مقاومت بستر آندی (برحسب اهم)، ρ متوسط مقاومت محیط (۳۰ اهم. سانتی‌متر)، N تعداد آندهای موازی (۲ عدد)، L طول یک آند (۲/۱۳۴ متر)، d قطر آند (۰/۰۹۵ متر) و d فاصله آندها (۱ متر) است. بنابراین:

$$R_N = 0/01119(ln(180) - 1 + 4/268\, ln(1/312)) = 0/06\mathrm{ohm}$$

در این مورد، مقاومت آند نسبت به زمین و همچنین مقاومت لوله نسبت به زمین، کوچک هستند. اگر سیم AWG No.8 برای تغذیه آند به کار رود و اسلدها در فاصله ۵۰ متری از لوله و یک‌سوکننده قرار داده شوند، مقاومت موازی دو کابل تغذیه آند برابر خواهد بود با (r مقاومت واحد سیم شماره ۸ برابر با $2/06 \times 10^{-3}$ اهم بر متر)، L طول سیم (۵۰ متر)، R_W مقاومت دو کابل موازی تغذیه آند):

$$R_W = \frac{\text{r.L}}{2} = \frac{2/06 \times 10^{-3}\Omega/m \times 50m}{2} = 0/025\Omega$$

مقاومت کل مدار برابر است با (R_N مقاومت آندها نسبت به زمین دور (۰/۰۶۰ اهم)، R_W مقاومت کابل‌های آندی (۰/۰۵۲ اهم)، R_X مقاومت‌های داخلی منبع تغذیه و اتصال به لوله (۰/۱ اهم تخمین زده شده) و R_P مقاومت لوله نسبت به زمین دور در نقطه اتصال (۰/۰۵ اهم)):

$$R_T = R_N + R_W + R_X + R_P = 0/060 + 0/052 + 0/100 + 0/050 = 0/262\text{ohm}$$

با قرار دادن ۲ ولت برای ولتاژ برگشتی بین لوله و آند، ولتاژ مورد نیاز یک‌سوکننده برای طراحی برابر خواهد بود با (I جریان طراحی یک‌سوکننده (برابر با ۵ آمپر)، R_T مقاومت مدار خط لوله- آند (برابر با ۰/۲۶۲ اهم)):

$$E_o = \text{I}.R_T + 2/0 = 5A \times 0/262\Omega + 2/0V = 3/31V$$

طراحی شامل دو یک‌سوکننده (هرکدام در یکی از دو ساحل) است. نزدیک‌ترین یک‌سوکننده تجاری به عوامل محاسبه شده؛ ۸ آمپر و ۸ ولت است. آندها شامل دو مجموعه استوانه‌ای (آهن سیلیسیم بالا) قرار گرفته بر روی اسلدها متصل در ۵۰ متری از خط لوله خواهند بود.

مثالی از جکت دریایی

جدید/ایستاده/آلومینیم

اصول کلی

سازه‌های دریایی اغلب پیچیده هستند. برخلاف خطوط لوله و مخازن، هندسه سازه‌های دریایی ترکیبی از ستون‌ها و خرپاها است که چالش سختی برای طراحی حفاظت کاتدی هستند. افرادی که در زمینه کنترل خوردگی سازه‌های دریایی کار می‌کنند، غالباً برای طراحی از تعدادی از نرم‌افزارهای تجاری کمک می‌گیرند. این نرم‌افزارها به خصوص در مورد حفاظت کاتدی با اعمال جریان به کار می‌روند. در مثال حاضر در مورد طراحی سامانه حفاظت کاتدی برای یک جکت دریایی، از نرم‌افزارهای کامپیوتری استفاده نشده است. اطلاعات بیشتر درباره سکوهای دریایی را می‌توان را NACE PR0174-94 به دست آورد.

توصیف

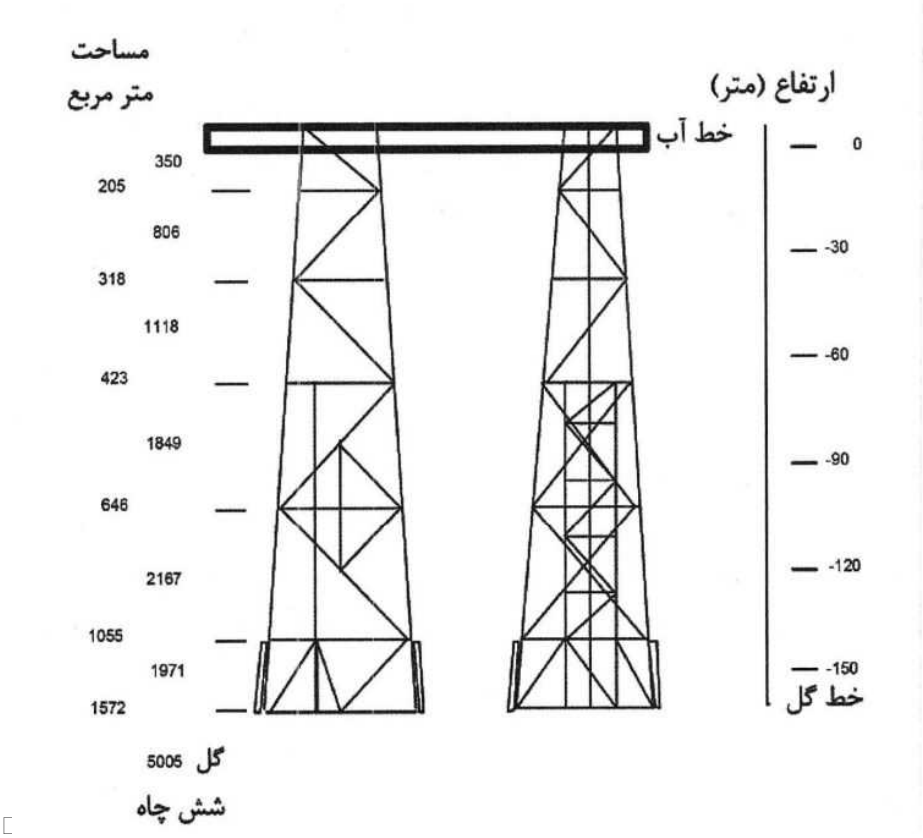
شکل ۹-۳۹، نمای کلی یک جکت سه پایه برای نصب در خلیج مکزیک را نشان می‌دهد. نواحی سطحی آورده شده در شکل، از نقشه‌های مهندسی جکت به دست آمده‌اند. در ستون سمت راست، نواحی اعضای ساختاری در عضوهای هرکدام از دهانه‌بندها آمده است. در ستون سمت چپ نواحی اعضای افقی و اعضای عمودی در داخل حدود ۱ متری از هرکدام از اتصالات بین دهانه‌بندها نشان داده شده است. علاوه بر سازه نشان داده شده، شمع‌کوبی در زیر خط گل و شش چاه تولید نیز وجود دارد.

ملزومات خاص برای طراحی

۱. عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی باید ۲۰ سال باشد.
۲. چگالی جریان برای حفاظت کاتدی در ناحیه آب: ۶/۴۶ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع (۶ میلی‌آمپر بر فوت‌مربع) (نگهداری)، ۲۸ میکروآمپر سانتی‌مترمربع (۲۶ میلی‌آمپر بر فوت‌مربع) (شروع).
۳. چگالی جریان برای حفاظت کاتدی در ناحیه گل: ۱/۰۸ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع (۱ میلی‌آمپر بر فوت‌مربع).
۴. ۲ آمپر اضافی برای جریان طراحی حفاظت کاتدی برای هرکدام از کیسینگ‌های چاه در نظر گرفته شود (در مجموع ۱۲ آمپر برای ۶ چاه در این جکت).
۵. سازه باید حداقل پتانسیل ۰/۸- ولت نسبت به الکترود مرجع نقره/کلرید نقره داشته باشد. فرض می‌شود که میانگین پتانسیل طبیعی، ۰/۵۶- ولت نسبت به الکترود مرجع نقره/کلرید نقره باشد.
۶. حفاظت کاتدی باید توسط آندهای گالوانیک آلیاژ آلومینیم اعمال شود.

آندهای قرار گرفته در معرض آب، فقط باید دارای ترکیب زیر باشد:

روی: ۰/۳۵٪ تا ۰/۵۰٪؛ سیلیسیم: ماکزیمم ۰/۰۱٪؛ جیوه: ۰/۰۳۵٪ تا ۰/۰۴۸٪؛ آلومینیم: باقیمانده؛ پتانسیل باید ۱/۰۵ ولت نسبت به نقره/کلرید نقره باشد.



شکل ۹-۳۹ نمای کلی جکت

آندهای قرار گرفته به‌صورت جزئی یا کامل در تماس با گل باید ترکیب وزنی زیر را داشته باشند:
روی: ۳/۰٪ ؛ سیلیسیم: ۰/۰۱٪؛ ایندیوم: ۰/۰۱۵٪؛ آلومینیم: باقیمانده؛ پتانسیل ۱/۰۹ ولت نسبت به نقره/کلرید نقره.

۷. نرخ مصرف آندهای به کار رفته در این طراحی باید به‌صورت زیر باشد:
- آندهای آب دریا: ۳/۱ کیلوگرم بر آمپر. سال (۶/۸ پوند بر آمپر سال)
- آندهای خط گل: ۳/۴ کیلوگرم بر آمپر. سال (۷/۶ پوند بر آمپر سال)

۸. ضریب کاربردی: ۰/۹

۹. توزیع آندها باید براساس سطوح موجود در ناحیه تأثیر، نسبت مستقیم با ملزومات جریان داشته باشد

۱۰. آندها نباید در عرض اتصالات سازه‌ای نصب شوند یا اینکه به گونه‌ای قرار داده شوند که از سازه بیرون بزنند که در این صورت احتمال آسیب دیدن آنها وجود دارد.

روش

۱. کل مساحت سازه در آب دریا و نواحی حاوی گل محاسبه شود

۲. جریان مورد نیاز برای شروع (جریان اولیه) و نگهداری سامانه حفاظت کاتدی مورد محاسبه قرار بگیرد

۳. حداقل وزن مور نیاز برای آندها با طول عمر ۲۰ سال محاسبه شود

۴. مقاومت مؤثر آند نسبت به سازه تخمین زده شود

۵. تعداد و اندازه آندهای مورد نیاز تعیین شود.

مساحت‌ها

مساحت‌ها از نقشه‌های طراحی جکت استخراج شده و در شکل ۳۹-۹ خلاصه شده است. A_{sw} مساحت در آب دریا (۱۲۴۸۰ مترمربع) و A_{sm} مساحت در کل (۵۰۰۵ مترمربع) است.

جریان مورد نیاز

جریان مورد نیاز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I=i.A_s$$

در آب دریا

چگالی جریان مورد نیاز برابر با ۰/۲۸ آمپر بر مترمربع (چگالی جریان اولیه) و ۰/۰۶۵) آمپر بر مترمربع (چگالی جریان نگهداری)، A_{sw} برابر با ۱۲۴۸۰ مترمربع است. بنابراین:

$$I=0/28A/m^2 \times 12480m^2 = 3494/4A(\text{start-up})$$
$$I=0/065A/m^2 \times 12480m^2 = 811/2A(\text{maintenance})$$

در گل:

چگالی جریان مور نیاز برابر با ۰/۰۱۰۸ آمپر بر مترمربع و A_{sm} برابر با ۵۰۰۵ مترمربع است. بنابراین:

$$I=0/010A/m^2 \times 5005m^2 = 54/1A$$

برای چاه‌ها:

i=12 A (برای ۶ چاه)

کل جریان مورد نیاز:

$$I_{\text{start-up}} = 3494/4 + 54/1 + 12 = 3560/5A$$
$$I_{\text{Maintenance}} = 811/2 + 54/1 + 12 = 877/3A$$

وزن آند

وزن مورد نیاز برای آندها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{W}=\frac{C_r.\text{t.I}}{f_u}$$

که C_r نرخ مصرف (کیلوگرم بر آمپر. سال)، t طول عمر طراحی (سال)، I جریان (آمپر)، f_u ضریب کاربردی (۰/۹) و W وزن مورد نیاز (کیلوگرم) است.

وزن مورد نیاز برای شروع حفاظت کاتدی برابر است با:

فرض می‌شود که پلاریزاسیون کامل در یک ماه حاصل خواهد شد (۰/۰۸۳ سال). از تفاوت نرخ‌های مصرف آند در میان آلیاژهای آلومینیم مختلف صرف‌نظر می‌شود.

C_r برابر با ۳/۱ کیلوگرم بر آمپر. سال، t برابر با ۰/۰۸۳ سال، I برابر با ۳۵۶۰ آمپر و f_u برابر با ۰/۹ است. بنابراین:

$$\text{W}=\frac{3/1\text{kg/Ag.yr} \times 0/083\text{yr} \times 3560A}{0/9} = 1018\text{kg}$$

وزن مورد نیاز برای نگهداری:

C_r برابر با ۳/۱ کیلوگرم بر آمپر. سال، t برابر با ۲۰ منهای $19/9 = 0/083$ سال، I برابر با ۸۷۷ آمپر و f_u برابر با ۰/۹ است، بنابراین:

$$\text{W}=\frac{3/1\text{kg/Ag.yr} \times 19/9\text{yr} \times 877A}{0/9} = 60113\text{kg}$$

کل وزن آند مورد نیاز برابر خواهد بود با:

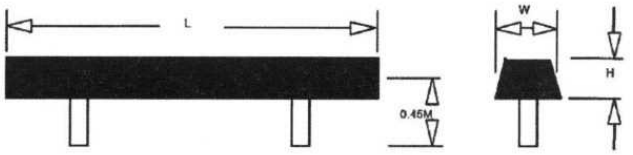
$$\text{W}=60113\text{kg}+1018\text{kg} = 6113\text{kg}(134488\text{lbs.})$$

مقاومت آند نسبت به سازه

آندهای گالوانیک به کار رفته در کاربردهای دریایی، هسته‌های فولادی سنگین دارند که مستقیماً به سازه جوش می‌شوند. مقاومت محل تماس به‌اندازه کافی پایین بوده و قابل صرف‌نظر است. با توجه به اندازه بزرگ سازه نسبت به زمین دور نیز قابل چشم‌پوشی خواهد بود. تنها مقاومت قابل توجه مقاومت آند نسبت به زمین دور است. تشکیل سریع رسوبات آهکی در نزدیکی یک آند، بر اثرات مجاورت غلبه می‌کند اور ولتاژ (پلاریزاسیون) سطح و رسوبات، به‌عنوان یک پوشش محافظ عمل کرده و باعث می‌شوند که آند از سازه، دور به نظر برسد. NACE، برای محاسبه مقاومت آند نسبت به زمین دور، پیشنهاد استفاده از معادله دوایت برای یک آند عمودی را داده است:

$$R = \frac{0/005\rho}{\pi L}\left(ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1\right)$$

که ρ مقاومت محیط (اهم سانتی‌متر)، L طول آند (متر)، r شعاع آند (متر) و R مقاومت آند نسبت به زمین دور (اهم) است. شکل ۹-۴۰، ابعاد چند اندازه مناسب برای آندهای این سازه را نشان می‌دهد. مقاومت محاسبه شده نسبت به زمین دور در آب دریای خلیج مکزیک (با مقاومت ۲۰ اهم سانتی‌متر)، در ستون کنار آندها نشان داده شده است. ازآنجاکه با گذشت زمان آند مصرف می‌شود، شعاع مؤثر آن کاهش پیدا خواهد کرد. NACE برای کاهش شعاع آند، پیشنهاد استفاده از رابطه r/۲ را می‌کند.



r = 2(H + W)/2 π = (H + W)/ π
R = 0.005. ρ/π L[ln(4L/r) - 1]
ρ = 20 ohm -cm

نوع طراحی	وزن آلومینیم کیلوگرم	وزن آلومینیم پوند	W متر	H متر	L متر	r متر	R اهم	Derated r متر	Values R اهم
A	148	325	0.165	0.152	2.44	0.101	0.047	0.050	0.056
B	329	725	0.241	0.216	2.44	0.145	0.042	0.073	0.051
C	375	825	0.305	0.280	1.52	0.186	0.052	0.093	0.067
D	415	915	0.305	0.267	1.83	0.182	0.047	0.091	0.059
E	454	1000	0.305	0.254	2.13	0.178	0.043	0.089	0.053
F	490	1080	0.305	0.229	2.44	0.170	0.040	0.085	0.049
G	536	1180	0.305	0.229	2.74	0.170	0.037	0.085	0.045
H	572	1260	0.305	0.229	3.05	0.170	0.034	0.085	0.041
I	612	1348	0.305	0.229	3.35	0.170	0.032	0.085	0.039

شکل ۹-۴۰ اندازه‌های آند

تعداد و اندازه آندهای مورد نیاز

فرض می‌شود که اثرات متقابل بین آندها ناچیز باشد (خروجی هر آند تحت تثیر خروجی آندهای دیگر قرار نمی‌گیرد).

بر اساس وزن:

N = کل وزن مورد نیاز تقسیم بر وزن آند = ۶۱۱۳۱ کیلوگرم تقسیم بر وزن آند.

$$I_a = \frac{E}{R_a}, \mathrm{N} = \frac{I_T}{I_a} \Rightarrow N = \frac{I_T.\mathrm{R}_a}{E}$$

که E برابر با E_a-E_s (پتانسیل مدار باز یا پتانسیل شروع)، E_a پتانسیل مدار باز آند نسبت به الکترود مرجع (۱/۰۵- ولت) و E_s پتانسیل طبیعی سازه نسبت به الکترود مرجع (۰/۵۶- ولت) است. بنابراین:

$$E = -1/05V + 0/56V = 0/49V$$

I_a جریان شروع حفاظت کاتدی از یک آند (آمپر)، R_a مقاومت یک آند (اهم) و I_T کل جریان شروع حفاظت کاتدی (۳۶۵۰ آمپر) است.

E پتانسیل پلاریزه بین آند و سازه (ولت $-1/05 + 0/80 = -0/25$) و I_T کل جریان نگهداری (۸۷۷ آمپر) است.

در جدول ۹-۱۴، خلاصه محاسبات وزن، جریان شروع و جریان نگهداری برای هرکدام از اندازه‌های آند نشان داده شده در شکل ۹-۴۰، آورده شده است. به جزء آند نوع A (۱۴۸ کیلوگرم)، برای اعمال جریان شروع حفاظت کاتدی نیاز به بیشترین تعداد آند است. هزینه نصب نسبت به هزینه آند، یکی از عوامل در انتخاب نوع آند است. اگر در طول نصب آندها نیاز به غواصی باشد، هزینه‌های نصب عاملی تعیین‌کننده خواهد بود عامل دیگر تعداد آندهای مورد نیاز برای توزیع مؤثر جریان در سرتاسر سازه است.

در این مثال، نسبت تعداد آندهای مورد نیاز برای فراهم کردن جریان شروع کافی به تعداد مورد نیاز برای تأمین حداقل وزن در طول عمر طراحی برای آندهای نوع C تا I، در حدود ۳ به ۱ است. بنابراین استفاده از آندهای سبک‌تر به جای آندهای سنگین‌تر باعث صرفه‌جویی اقتصادی در هزینه مواد نمی‌شود. بر این اساس، مبنای انتخاب، حداقل تعداد آندهای مورد نیاز برای ایجاد پوشش کافی خواهد بود. به نظر می‌رسد، که آندهای نوع H یا I، بهترین گزینه برای این مثال هستند.

کل آندها بای بر پایه مساحت نواحی بر روی جکت توزیع شوند. کل سطح جکت در آب دریا، ۱۲۴۸۰ مترمربع است. از کل جریان شروع حفاظت کاتدی (۳۵۶۰ آمپر)، ۳۴۹۴ آمپر مربوط به سطوح موجود در آب دریا است. مقدار، ۹۸٪ جریان است. بنابراین فقط ۲٪ جریان (و تعداد آندها) مربوط به ناحیه گل و چاه‌ها خواهد بود. برای آندهای نوع I، تعداد آندهای اختصاص داده شده به ناحیه گل برابر است با:

$$N_m = 0/02 \times 283 = 5/66 \text{anodes}$$

شش آند به انتهای ناحیه آب دریا اضافه خواهد شد. ۲۷۷ آند به نسبت مساحت نواحی مختلف بر روی جکت توزیع خواهد شد□

□

جدول ۹-۱۴ تعداد آندهای مورد نیاز

نوع	وزن آلومینیم	مقاومت	تعداد آندهای مورد نیاز		
			براساس وزن	براساس جریان	
طراحی	کیلوگرم	اهم		شروع	نگهداری
□□	۱۴۸	۰/۰۵۶	۴۱۳	۴۰۷	۱۹۶
□□	۳۲۹	۰/۰۵۱	۱۸۶	۳۷۱	۱۷۹
□□	۳۱۸	۰/۰۶۷	۱۶۳	۴۸۸	۲۳۵
□□	۴۱۵	۰/۰۵۹	۱۴۷	۴۲۹	۲۰۷
□□	۴۵۴	۰/۰۵۳	۱۳۵	۳۸۵	۱۸۶

□□	۴۹۰	۰/۰۴۹	۱۲۵	۳۵۶	۱۷۵
□□	۵۳۶	۰/۰۴۵	۱۱۴	۳۲۷	۱۵۸
□□	۵۷۲	۰/۰۴۱	۱۰۷	۲۹۹	۱۴۴
□□	۶۱۲	۰/۰۳۹	۱۰۰	۲۸۳	۱۳۷

در جدول ۹-۱۵، مساحت‌های نسبی جکت و توزیع آند برای نزیک‌ترین نوع آند آمده است.
ازآنجاکه سازه، یک پایه است، می‌توان برای متقارن کردن طراحی یک سری تغییرات جزئی اعمال کرد. آندهای ناحیه انتهایی، به دلیل احتمال قرار گرفتن در معرض گل، باید از آلیاژ آلومینیم- ایندیم ساخته شوند. می‌توان از طریق در نظر گرفتن آندهایی با اندازه‌های متفاوت برای هر ناحیه، طراحی را بهینه‌تر کرد. روش دیگر می‌تواند شامل استفاده از آندهای آلومینیمی برای ملزومات نگهداری درازمدت، درعین‌حال استفاده از آندهای منیزیمی یا یک سامانه جریان اعمالی موقت برای ملزومات شروع سامانه حفاظت کاتدی است. علاقه‌مندان می‌توانند این روش‌ها را بررسی کنند.

خلاصه

۱- مثالی از یک خط لوله دریایی با آندهای گالوانیک توزیع شده و مسائل میرایی.

مثالی از یک سامانه حفاظت کاتدی با اعمال جریان، اسلد، طراحی برای یک خط لوله دریایی دارای مسئله میرایی.
مثالی از یک سامانه حفاظت کاتدی با آند گالوانیک برای یک جکت دریایی.

جدول ۹-۱۵ مساحت‌ها و آندهای مورد نیاز در ارتفاع‌های مختلف

ارتفاع (متر)	مساحت (متر مربع)	نسبت‌های سطح	تعداد آندها
۰ تا ۱۴-	۳۵۰	۰/۰۲۸	۸
۱۴-	۲۰۵	۰/۰۱۶	۴
۱۴- تا ۳۸-	۸۰۶	۰/۰۶۵	۱۸
۳۸-	۳۱۸	۰/۰۲۵	۷
۳۸- تا ۶۹-	۱۱۱۸	۰/۰۹۰	۲۵
۶۹-	۴۲۳	۰/۰۳۴	۹
۶۹- تا ۱۰۵-	۱۸۴۹	۰/۱۴۸	۴۱
۱۰۵-	۶۴۶	۰/۰۵۲	۱۴
۱۰۵- تا ۱۴۳-	۲۱۶۷	۰/۱۷۴	۴۸
۱۴۳-	۱۰۵۵	۰/۰۸۵	۲۴
۱۴۳- تا ۱۶۰-	۱۹۷۱	۰/۱۵۸	۴۴

−۱۶۰	۱۵۷۲	۰/۱۲۶	$35 + 6 = 41$
مجموع	۱۲۴۸۰	۱/۰۰۰	۲۸۳

مثال عملی طراحی دوره NACE برای حفاظت کاتدی مخازن آب، کندانسورهای سطحی و غلیظ‌کننده‌ها

مثال‌های طراحی برای مخازن آب، کندانسورهای سطحی و غلیظ‌کننده‌ها

مثال‌های طراحی مخازن آب

موجود/یک‌سوکننده/آهن سیلیسیم دار

توصیف

پوشش حفاظتی بر روی یک مخزن ذخیره آب (در ارتفاع) تخریب شده است. مخزن در منطقه‌ای قرار گرفته که در زمستان، دچار یخ‌زدگی نمی‌شود. هدف طراحی یک سامانه حفاظت کاتدی با جریان اعمالی توسط آندهای آهنی حاوی سیلیسیم است. این مخزن، بدون پوشش در نظر گرفته می‌شود. که داده‌های لیست شده در زیر برای طراحی استفاده خواهد شد.

داده‌ها

- ظرفیت مخزن: ۱۸۹۳ متر مکعبی (۵۰۰۰۰۰ گالن)
- ارتفاع مخزن از زمین (تا کف مخزن): ۳۵ متر (۱۱۵ فوت)
- قطر مخزن: ۱۷/۰۸ متر (۵۶ فوت) – سطح آب $\frac{3}{85}$ مخزن: ۱۰/۷ متر (۳۵ فوت)
- کل عمق مخزن: ۱۱/۹ متر (۳۹ فوت) – ارتفاع شل عمودی: ۳/۳۵ متر (۱۱ فوت)
- قطر لوله رایزر: ۱/۵۲ متر (۶۰ اینچ) – شکل مخزن: بالا و کف مخزن به‌صورت بیضوی
- جریان مورد نیاز تخمین زده شده: ۴ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع
- منبع تغذیه در دسترس: ۱۲۰ / ۲۴۰ ولت ۶۰ هرتز، تک فاز
- طول عمر طراحی: ۱۰ سال
- میانگین مقاومت آب: ۴۰۰۰ اهم سانتی‌متر
- نرخ مصرف آند در چنگالی جریان ارائه شده توسط سازنده: ۰/۴۵۴ کیلوگرم/آمپر. سال
- ضریب کاربری فرض شده: ٪۵۰
- فرض می‌شود که مقاومت کاتد (مخزن) نسبت به آب قابل صرف‌نظر است.
- فرض می‌شود که پوشش حفاظتی در مخزن تخریب خواهد شد. طراحی حفاظت کاتدی باید بر اساس ٪۱۰۰ سطح مخزن بدون پوشش باشد.

3 □□□□□□□ 8 5

روش

۱- مساحت بخش‌های بالا و پایین در تماس با الکترولیت در درون مخزن محاسبه شود.

۲- جریان مورد نیاز برای حفاظت از لوله رایزر و دیواره‌های مخزن در تماس با الکترولیت تخمین زده شود.

۳- وزن آند مورد نیاز (آهن سیلیسیم دار) برای طول عمر ۱۰ سال محاسبه شود.

۴- بر اساس تعداد آندهای مورد نیاز توسط وزن محاسبه شده، موقعیت آندها تعیین شود تا بهترین توزیع جریان در سطوح ایجاد گردد.

۵- مقاومت الکتریکی آندهای مختلف تخمین زده شود.

۶- ملزومات منبع تغذیه تعیین شود.

محاسبات

محاسبه مساحت سطوح بالا و پایین مخزن

رابطه‌های محاسبه مساحت یک مخزن بیضوی در شکل ۹-۴۱ آمده است. مساحت کل بخش‌های بیضوی (بالا و پایین) مخزن از رابطه زیر به دست می‌آید:

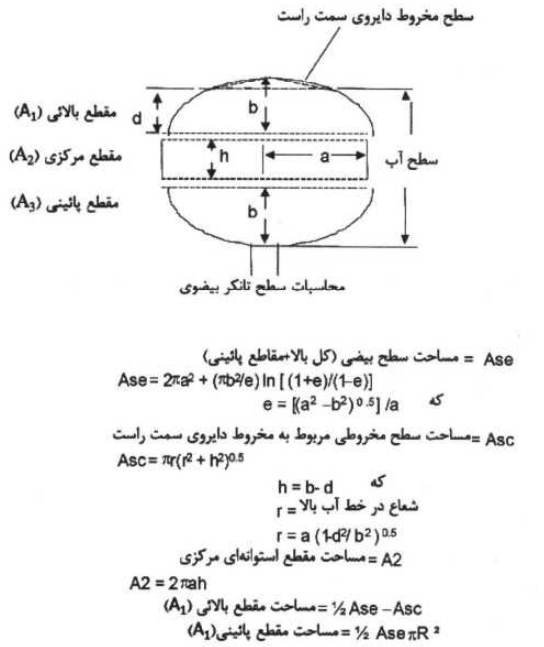
$$A_{se} = 2\pi a^2 + \frac{\pi b^2}{e} ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right)$$

که A_{se} مساحت بیضی، a محور اصلی مخزن بیضوی (۸/۵۴ متر)، b محور فرعی مخزن بیضوی (۴/۲۷ متر) و $e = \frac{(a^2-b^2)^{0/5}}{a}$ برابر با ۰/۸۶۶ است، بنابراین:

$$A_{se} = 2\pi \times 8/54^2 + \frac{\pi \times 4/27^2}{0/866} ln\left(\frac{1+0/866}{1-0/866}\right) = 632/4m^2$$

تراز آب در بخش بیضوی بالایی مخزن برابر است با (d ارتفاع آب در بخش بیضوی بالایی برحسب متر، L_w تراز آب در مخزن (۱۰/۷ متر)، h ارتفاع شل عمودی (۳/۳۵ متر) و b محور فرعی مخزن بیضوی (۴/۲۷ متر) است):

$$d=L_w\text{-}h\text{-}b = 10/7 - 3/35 - 4/27 = 3/08m$$



شکل ۹-۴۱ محاسبات سطوح بیضوی مخزن

مساحت قسمتی از ناحیه بیضوی بالایی که در تماس با الکترولیت قرار ندارد، یک انتگرال ریاضی است و نمی‌توان آن را به یک رابطه ساده خلاصه کرد. اگر قطر تراز آب در مخزن (بخش بیضوی بالایی) در مقایسه با ارتفاع مرکز بالای مخزن در بالای تراز آب بزرگ باشد، مساحت در بالای تراز آب تقریباً برابر با مساحت یک مخروط دایره‌ای قائم[۳۸۶]خواهد بود. رابطه این سطح از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A_{se} = \pi r(r^2 + h_c^2)^{0/5}$$

که r شعاع مخزن در تراز آب (قاعده یک مخروط دایره‌ای قائم) برحسب متر و h_c ارتفاع متر مرکز مخزن در بالای تراز (b - d برابر با ۱/۱۹ متر) است. از معادله یک بیضی داریم:

$$\frac{r^2}{a^2} + \frac{d^2}{b^2} = 1$$

با حل معادله برای r (a محور اصلی بیضی (۸/۵۴ متر)، b محور فرعی بیضی (۴/۲۷ متر) و d ارتفاع تراز آب در بخش بیضوی بالایی (۳/۰۸ متر)):

$$r = a\left(1 - \frac{d^2}{b^2}\right)^{0/5} = 8/54 \times \left(-1\frac{3/08^2}{4/27^2}\right)^{0/5} = 5/92m$$

مساحت مخروط دایره‌ای قائم برابر است با:

$$A_{sc} = \pi \times 5/92(5/92^2 + 1/19^2)^{0/5} = 112/2m^2$$

3 8 6

مساحت ناحیه‌ای از بخش بیضوی بالایی که در تماس با الکترولیت قرار دارد (A_1) برابر است با:

$$A_1 = \left(\frac{A_{se}}{2}\right) - A_{sc}$$

که A_{se} کل مساحت بیضوی مخزن (۶۳۲/۴ مترمربع) و A_{sc} مساحت تقریبی در بالای تراز آب (۱۱/۲ متر مربع) است، بنابراین:

$$A_1 = 316/2 - 112/2 = 204m^2$$

مساحت ناحیه استوانه‌ای مرکزی که در تماس با الکترولیت قرار دارد (A_2) برابر است با:

$$A_2 = 2\pi \times a \times h$$

که a محور اصلی مخزن بیضوی (۸/۵۴ متر) و h ارتفاع شل عمومی (۳/۳۵ متر) است. بنابراین:

$$A_2 = 2\pi \times 8/54 \times 3/35 = 179/8m^2$$

مساحت ناحیه‌ای از بخش پایینی که در تماس با الکترولیت قرار دارد (A_3) برابر است با:

$$A_2 = \frac{A_{se}}{2} - \pi r_p^2$$

که r_p شعاع لوله رایزر (۰/۷۶ متر) و A_{se} کل مساحت بیضوی مخزن (۶۳۲/۴ متر مربع) است، بنابراین:

$$A_3 = \frac{632/4}{2} - \pi \times 0/76^2 = 314/4m^2$$

مجموع سطحی از مخزن که در تماس با الکترولیت قرار دارد برابر است با:

$$A_T = A_1 + A_2 + A_3 = 204 + 179/8 + 314/4 = 698/2m^2$$

مساحت لوله رایزر

$$A_{SR} = 2\pi \times r_p \times h_p = 2 \times \pi \times 0/76 \times 35 = 167/1m^2$$

محاسبه حداکثر جریان طراحی برای حفاظت کاتدی بر اساس ۴ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع برای سطوح بدون پوشش.

سطوح بیضوی مخزن

$$I_B = i \times A_T = 4 \times 10^{-6} A/cm^2 \times 6/982 \times 10^6 cm^2 = 27/9A$$

رایزر

$$I_R = i \times A_{SR} = 4/0 \times 10^{-6} A/cm^2 \times 1/671 \times 10^6 cm^2 = 6/68A$$

محاسبه حداقل وزن آند (آهن سیلیسیم بالا)

آندهای سطوح بیضوی مخزن

$$W = \frac{t.C_r I}{f_u}$$

که w وزن آند (برحسب کیلوگرم)، t طول عمر طراحی (۱۰ سال)، C_r نرخ مصرف آند (۰/۴۵۴ کیلوگرم بر آمپر سال)، I حداکثر جریان طراحی (۲۷/۹ آمپر) f_u ضریب کاربری آند (۰/۵) است، بنابراین:

$$\mathrm{W}=\frac{10\times 0/454\times 27/9}{0/5}=253\mathrm{kg}$$

آندهای رایزر

برای این قسمت، حداکثر جریان طراحی ۶/۶۸ آمپر است، بنابراین:

$$\mathrm{W}=\frac{10\times 0/454\times 6/68}{0/5}=60/7\mathrm{kg}$$

در مخازن ذخیره آب دایره‌ای، آندها معمولاً به‌صورت دایره‌ای چیده می‌شوند تا توزیع جریان یکنواخت ایجاد شود. شپرد[۳۸۷] و گریزر[۳۸۸]ای آندهای مخازن آب، چند پارامتر طراحی تجربی کاربردی ارائه کردند. فاصله انتهای یک آند (یا ریشه آندها) از کف مخزن باید به اندازه فاصله آند تا دیواره جانبی باشد. اگر از بیش از یک رشته آند استفاده شود، شعاع گروه آندی اصلی باید به گونه‌ای باشد که فاصله بین دیواره مخزن و یک آند، تقریباً نصف فاصله بین آندها باشد. چندین ترکیب برای طول، فاصله، تعداد و وزن آندها وجود دارد که می‌توانند کارایی مناسب را ایجاد کنند. شعاع بهینه گروه آندی اصلی (که دیواره‌های جانبی و تمام یا بخشی از کف را پوشش می‌دهد) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$r=\frac{\mathrm{d}\times\mathrm{N}}{2(\pi\times\mathrm{N})}$$

که r شعاع آرایه آندی اصلی (متر)، d متر مخزن (۱۷/۰۸ متر) و N تعداد واحدهای آندی (۱۰ عدد) برای ایجاد وزن/تعداد مناسب (۲۵ کیلوگرم) است، بنابراین:

$$r=\frac{17/08\times 10}{2(\pi\times 10)}=6/5m$$

با توجه به موارد ذکر شده توسط شپرد و گریزر، فاصله از دیوار و کف مخزن باید تقریباً یکسان باشد. این فاصله در حدود نصف فاصله محیطی بین آندها است (شکل ۹-۴۲).

$$S_a=\frac{2\pi\mathrm{r}}{N}$$

که S_a فاصله محیطی بین آندها (متر)، r شعاع حلقه آندی (۶/۵ متر)، N تعداد واحدهای آند (۱۰ عدد) و S_s فاصله آند تا دیواره و کف مخزن است، بنابراین:

$$S_a=\frac{2\times\pi\times 6/5}{10}=4/08m$$

3 □□□□□□□□□ 8 7
3 □□□ □□□□□□□ 8 8

$$S_a = \frac{S_a}{2} = \frac{4/08}{2} = 2/04m$$

طول کابل بین آندها، تقریباً برابر با فاصله محیطی (۴/۰ متر) است.

انتخاب اندازه آندهای اصلی

یک آرایه دایره‌ای با ۱۰ رشته آند فرض شده است. حداقل وزن آندها در هر رشته از آندها برابر است با:

$$W_s = \frac{W}{N}$$

که W_s وزن آند در یک گروه (کیلوگرم در گروه)، W کل وزن آندها در آرایه اصلی (۲۵۳ کیلوگرم) و N تعداد رشته‌های آندی در ارائه است، بنابراین:

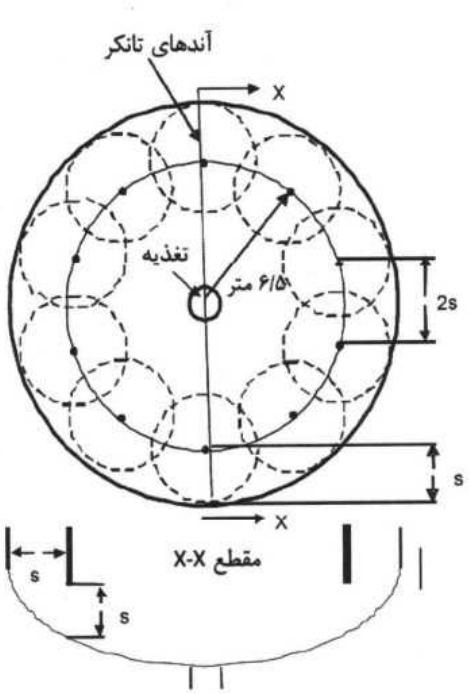
$$W_s = \frac{253\text{kg}}{10\text{string}} = 25/3$$ کیلوگرم در هر رشته

میانگین جریان خروجی در هر رشته

$$I_s = \frac{I}{N}$$

که I_s جریان در هر رشته (آمپر)، I کل جریان مورد نیاز برای حفاظت سطوح بیضوی (۲۷/۹ آمپر) و N تعداد رشته‌های آند است، بنابراین:

$$I_s = \frac{27/9}{10} = 2/79A$$



شکل ۹-۴۲ مکان‌های آند سطوح بیضوی

حداکثر طول گروه آندی

ارتفاع مخزن (کف یا سقف) در مکان دایره آندی اصلی (۶/۵ متر از مرکز مخزن) را می‌توان با رابطه زیر برای بیضی محاسبه کرد:

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$$

که x فاصله شعاعی از مرکز مخزن (۶/۵ متر)، a محور اصلی = شعاع مخزن (۸/۵۴ متر)، y فاصله در بالا و پایین محور اصلی بیضی (متر) و b محور فرعی بیضی (۴/۲۷ متر) است. با بازنویسی رابطه برای به دست آوردن y (فاصله بالا و پایین بخش عمودی مخزن تا شل در حلقه آندی) داریم:

$$y=\left(\left(1-\frac{x^2}{a^2}\right)b^2\right)^{0/5}=\left(\left(1-\frac{6/5^2}{8/54^2}\right)4/27^2\right)^{0/5}=2/27$$

سپس ارتفاع مخزن در مکان رشته آندی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h_c=2\mathrm{y}+\mathrm{h}$$

که h_c ارتفاع مخزن در ۶/۵ متری از مرکز (متر)، y فاصله بالا و پایین محور اصلی بیضی در ۶/۵ متری از مرکز (۲/۷۷ متر) و hارتفاع شل عمودی (۳/۳۵ متر) است، بنابراین:

$$h_s=(2\times 2/77)+3/35=8/9m$$

طول رشته آندی برای حفظ تقارن

$$\mathrm{L}=\mathrm{h}_s-2s$$

که L طول گروه آندی (متر)، h_s ارتفاع مخزن در ۶/۵ متری از مرکز (۸/۹ متر) و s فاصله بالای کف (برابر با آند تا دیواره) (۲/۰۴ متر) است، بنابراین:

$$\mathrm{L}=8/9-(2\times 2/04)=4/8m$$

در این محاسبات نیاز است که آند ۲۵/۳ کیلوگرمی (که می‌تواند جریان ۲/۷۹ آمپر ایجاد کند)، ۴/۸ متر طول داشته باشد. با بررسی لیست آندهای آهن سیلسیم‌دار در دسترس مشخص می‌شود که آند ۱۱/۳۵ کیلوگرمی به ابعاد ۳/۸۱ سانتی‌متر × ۱/۵۲۴ متر می‌تواند ۱/۰ آمپر جریان در آب تازه ایجاد کند حداقل تعداد این آندها که می‌توانند جریان مورد نیاز را تأمین‌کنند برابر است با:

$$\mathrm{N}=\frac{I_s}{I_r}$$

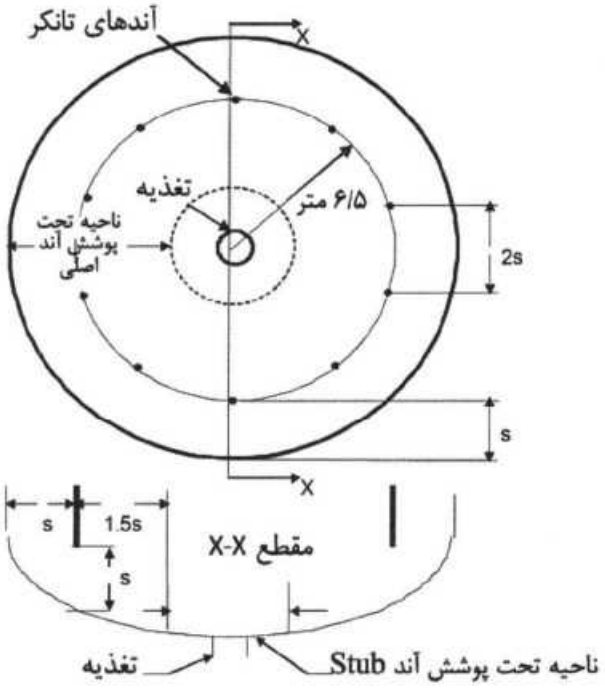
که N تعداد آندها در هر رشته، I_s جریان یک رشته (۲/۷۹ آمپر) و I_r جریان خروجی یک آند (۱/۰ آمپر) است، بنابراین:

$$N=\frac{2/79}{1/0}=2/79=3anodes$$

ازآنجاکه وزن ۳ آند، ۳۴/۱ کیلوگرم (۳ آند ۱۱/۳۵ کیلوگرمی) می‌شود که بیشتر از ۲۵/۶ کیلوگرم مورد نیاز است، مقدار آندها بیش از حد اندازه خواهد بود. طول یک رشته ۳ آندی، ۴/۶ متر (۱/۵۲۴ × ۳ متر) است. برای اهداف عملیاتی در طول نصب می‌توان هر آند را از یک سیم جداگانه آویزان کرد.

آندهای stub

تجربه نشان داده است که آرایه آندی اصلی، انتهای مخزن را از دیواره تا فاصله‌ای در درون حلقه آندی که تقریباً مساوی با ۱/۵ برابر فاصله از انتهای پایینی آند تا انتهای مخزن است، پوشش خواهد داد (شکل ۹-۳۴).



شکل ۹-۴۳ پوشش‌دهی آند

یکی از توضیحات محتمل در هندسه قرار دارد. اگر انتهای یکی از آندهای اصلی به‌عنوان رأس یک مخروط دایره‌ای قائم که ضلعش در زاویه ۶۰ درجه نسبت به خط عمود قرار دارد در نظر گرفته شود، فاصله اندازه‌گیری شده از آند در امتداد ضلع مخروط تا تقاطع با کف، دو برابر فاصله از انتهای آند تا کف است. در این مورد، سطح کف مخزن در خارج محیط مخروط مفروض، در معرض تقریباً نیمی از ولتاژ حاضر در زیر آند خواهد بود. بنابراین چگالی جریان، در حدود نیمی از جریان زیر آند است. شعاع قاعده در یک مخروط ۶۰ درجه، ۱/۷۳ برابر ارتفاع مخروط (فاصله از انتهای آند تا کف مخزن) است. با قرار دادن آندها در حلقه اصلی با فاصله‌ای برابر با دو برابر و فاصله آند تا کف و آند تا دیواره مخزن، هم‌پوشانی از یک آند تا آند بعدی ایجاد خواهد شد که در آنجا اثرات هم‌افزایی از آندهای مجاور، چگالی جریان کافی برای حفاظت از سطح و بدون

ایجاد حفاظت اضافی (overprotection) ناحیه‌ای که مستقیماً زیر آند قرار دارد را فراهم می‌کند. اگرچه شعاع محاسبه شده مخروط، ۱/۷۳ برابر ارتفاع است، اما از ضریب ۱/۵ نیز برای اطمینان بیشتر استفاده خواهد شد زیرا فرض وجود رابطه عکس بین چگالی جریان و فاصله، تقریبی است.

ناحیه در این مورد، توسط منطقه‌ای حلقوی نشان داده شده است که از دیواره عمودی مخزن تا دایره‌ای ۳/۱ متری ($2/04 \times 1/5$ متر) در دایره آندی اصلی نشان داده شده است. شعاع این دایره برابر است با:

$$r_i = \frac{d}{2} - s - 1/5s = \frac{d}{2} - 2/5s$$

که r_i شعاع داخلی پوشش آندی اصلی (متر)، d قطر مخزن (۱۷/۰۸ متر) و s فاصله حلقه آندی اصلی از دیواره(۲/۰۴ متر) است، بنابراین:

$$r_i = \frac{17/08}{2} - (2/5 \times 2/04) = 3/4m$$

برای پوشش دادن ناحیه باقیمانده از لوله رایزر شعاع (۰/۷۶ متری) تا بالای شعاع داخلی بخش پوشش داده شده توسط آندهای اصلی نیاز به چند آند (که به آندهای stub معروف هستند) است. عرض این ناحیه حلقوی برابر است با:

$$w = r_i - r_p$$

که w عرض منطقه حلقوی پوشش داده شده توسط آندهای stub (متر)، r_i شعاع داخلی منطقه پوشش داده شده توسط آندهای اصلی (۳/۴ متر) و r_p شعاع لوله رایزر (۰/۷۶ متر) است، بنابراین:

$$w = 3/4 - 0/26 = 2/64m$$

همان گونه که برای مخروط ذکر شده در بالا بحث شد، ارتفاع آندهای stub در بالای کف برای پوشش دادن این ناحیه برابر است با:

$$S_s = \frac{2/64}{3} = 0/88m$$

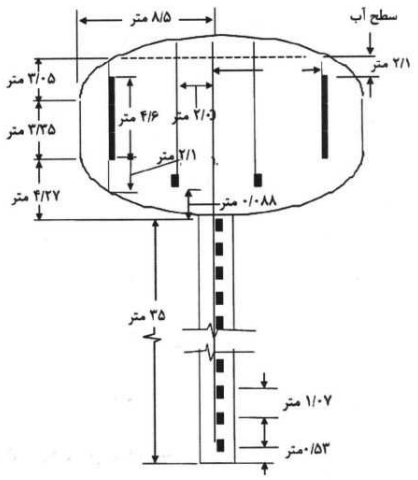
برای حفظ تقارن با آندهای اصلی و پوشش‌دهی فضای بین آندهای اصلی، ۱۰ آند stub در حلقه‌ای با شعاع زیر مورد استفاده قرار خواهد گرفت:

$$r_s = \frac{w}{2} + r_p$$

که r_s شعاع آرایه آندهای stub (متر)، w عرض حلقه پوشش داده شده توسط آندهای stub (۲/۶۴ متر) و r_p شعاع لوله رایزر (۰/۷۶ متر) است، بنابراین:

$$r_s = \frac{2/64}{2} + 0/76 = 2/08m$$

این چیدمان به همراه ابعاد گرد شده، در شکل‌های ۹-۴۴ و ۹-۴۵ آمده است.



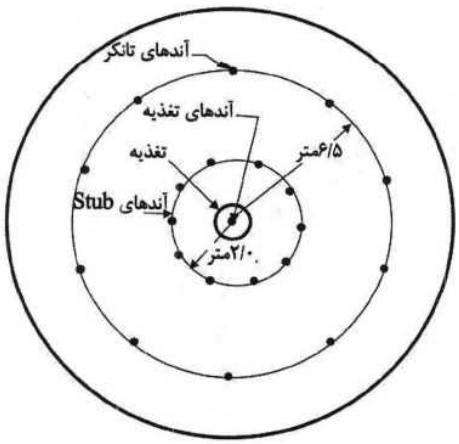
شکل ۹-۴۴ چیدمان آندهای برای ایجاد بهترین پوشش‌دهی

مساحت ناحیه‌ای از سطح مخزن (در معرض الکترولیت) که توسط آندهای stub پوشش داده شده‌اند، برابر است با:

$$A_s = \pi\left(r_i^2 - r_p^2\right)$$

که A_s مساحت ناحیه پوشش داده شده توسط آندهای stub (متر مربع) و r_i شعاع داخلی منطقه پوشش داده شده توسط آندهای اصلی (۳/۴ متر) است، بنابراین:

$$A_s = \pi(11/56 - 0/58) = 34/49m^2$$



شکل ۹-۴۵ نمای صفحه‌ای موقعیت قرارگیری آندها

حداکثر جریان مورد نیاز از آندهای stub

$$I_s = 4/0 \times 10^{-6}\mathrm{A/cm^2} \times 3/449 \times 10^5\mathrm{cm^2} = 1/38A$$

ازآنجاکه لازم نیست که این جریان از آندهای اصلی تأمین شود، جریان ایجاد شده توسط آرایه آندی اصلی برابر است با:

$$I_m = \mathrm{I}_B - \mathrm{I}_S$$

که I_m جریان از آرایه آندی اصلی (آمپر)، I_B کل جریان برای سطوح بیضوی (۲۷/۹ آمپر) و I_S جریان به آرایه آندی stub (۱/۳۸ آمپر) است، بنابراین:

$$I_m = 27/9 - 1/38 = 26/5A$$

استفاده از آندهای ۴/۰۹ کیلوگرمی به ابعاد $6/35 \times 22/9$ سانتی‌متر برای آرایه stub مناسب است. هرکدام از این آندها، ۰/۲۵۰ آمپر جریان ایجاد می‌کنند که در نتیجه ۱۰ آند می‌توانند ۲/۵ آمپر (که بیشتر از مقدار مورد نیاز یعنی ۱/۳۸ آمپر است) تولید کنند.

محاسبات مقاومت

محاسبه مقاومت آند نسبت به الکترولیت برای آندهای استوانه‌ای در مخازن دایره‌ای، با استفاده از رابطه‌ای که توسط شپرد ایجاد شده، تخمین زده می‌شود:

$$R = \frac{0/366\rho}{L} log\left(\frac{d_T}{d_a}\right)$$

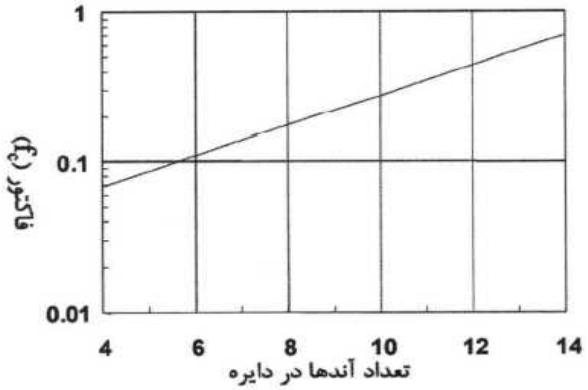
که R مقاومت آند نسبت به مخزن (اهم)، ρ مقاومت الکترولیت (آب) (اهم سانتی‌متر)، d_T قطر مخزن (متر) d_a قطر آند (متر) و L طول یک آند (سانتی‌متر) است. در حالتی که بیش از سه رشته آند وجود داشته باشد، یک رابطه اصلاح شده برای رابطه شپرد پیشنهاد شده است که در تطابق خوبی با نتایج واقعی است:

$$R = \frac{0/366\rho}{L} log\left(\frac{d_T}{a}\right)$$

که R، ρ ، L و d_T، همان عوامل رابطه شپرد هستند.

$$a = f_c d_s$$

که f_c ضریب تصحیح در شکل ۹-۴۶ ارائه شده و d_s قطر آرایه رشته آندی (متر) است.



فاکتور محاسبه قطر معادل آندها در تانکرهای دایروی

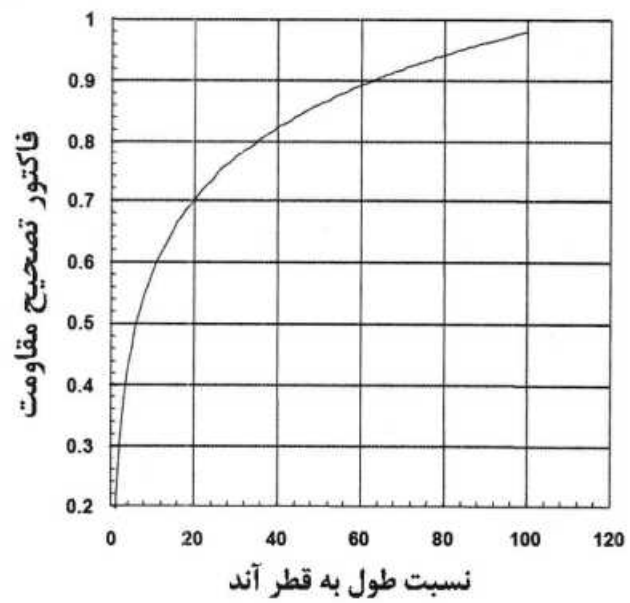
شکل ۹-۴۶ ضریب تصحیح برای تعداد آندها

مقاومت آرایه آندی اصلی

ازآنجاکه بیش از سه آند در آرایه آندی اصلی قرار دارد، رابطه شپرد اصلاح شده به کار می‌رود (ρ مقاومت خاک (۴۰۰۰ اهم سانتی‌متر)، d_T قطر مخزن (۱۷/۰۸ متر)، d_S قطر آرایه رشته آندی (۱۳ متر)، f ضریب برای ۱۰ آرایه آندی از شکل ۹-۴۶ (۰/۲۷۵) و L طول آند ($457/2 = 152/4 \times 3$ سانتی‌متر):

$$R = \frac{0/366\rho}{L} log\left(\frac{d_T}{a}\right) = \frac{0/366 \times 4000}{457/2} log\left(\frac{17/08}{3/58}\right) = 2/17 \text{ ohms}$$

همچنین از MIL-HDBK-1004/10 وقتی که نسبت طول آند به قطر آند (L/d_a) کمتر از ۱۰۰ باشد، باید برای تنظیم فاصله از یک ضریب تصحیح استفاده کرد. ضریب تصحیح از شکل ۹-۴۷ به دست می‌آید.



شکل ۹-۴۷ ضریب تصحیح مقاومت

برای گروه آندی انتخاب شده:

L برابر با ۴۵۷/۲ سانتی‌متر، d_a برابر با ۳/۸۱ سانتی‌متر، بنابراین L/d_a برابر با ۱۲۰ است.

ازآنجاکه نسبت L به d_a بزرگ‌تر از ۱۰۰ است، نیازی به ضریب تصحیح نخواهد بود. مقاومت آرایه آندی اصلی برابر است با:

$$R_m = 2/17 \text{ohm}$$

مقاومت آرایه آندی stub برابر است با:

$$R = \frac{0/366\rho}{L} log\left(\frac{d_T}{a}\right) = \frac{0/366 \times 4000 ohm.cm}{23\text{cm}\, log\left(\frac{17/08}{1/14}\right) \text{ ohms}}$$

برای گروه آندی انتخاب شده:

L برابر با ۲۳ سانتی‌متر، d_a برابر با ۶/۳۵ سانتی‌متر و بنابراین $\mathrm{L/d}_a$ برابر با ۳/۶ است. در اینجا نیاز به ضریب تصحیح است. از شکل ۹-۴۷، ضریب تصحیح در حدود ۰/۴ است.

مقاومت تصحیح شده برای آرایه آندی stub برابر است با:

$$R_s = 0/4 \times 74/8\text{ohms} = 29/9\text{ohms}$$

اگر از کابل No.10 AWG برای تغذیه دو آرایه آندی استفاده شود، مقاومت اضافه شده به آرایه‌ها ناچیز خواهد بود (در حدود ۰/۲ اهم برای یک سیم ۶۰ متری برای هر آرایه).

ملزومات منبع تغذیه سطوح بیضوی

آرایه اصلی

$$E_m = \mathrm{I}_m.\mathrm{R}_m$$

که E_m ولتاژ محرک مورد نیاز برای آرایه (ولت)، I_m جریان مورد نیاز برای آرایه (۲۶/۵ آمپر)، R_m مقاومت آرایه و سیم‌های تغذیه (در حدود ۲/۴ اهم) و f ضریب اطمینان فرض شده (۱/۵) است، بنابراین:

$$E_m = 26/5 \times 2/4 \times 1/5 = 95/4\text{volts}$$

آرایه stub

$$E_s = \mathrm{I}_s.\mathrm{R}_s.f$$

که E_s ولتاژ محرکه مورد نیاز برای آرایه (ولت)، I_s جریان مورد نیاز برای آرایه (۱/۳۸ آمپر)، R_s مقاومت آرایه و کابل‌های تغذیه (۲۹/۹ اهم) و f ضریب اطمینان فرض شده (۱/۵) است، بنابراین:

$$E_s = 1/38 \times 29/9 \times 1/5 = 61/9\text{volts}$$

ازآنجاکه ولتاژهای محرکه مورد نیاز برای هر آرایه متفاوت است، سطوح بیضوی به دو منبع تغذیه جداگانه یا یک مقاومت قابل تنظیم در مدار آند stub برای کاهش ولتاژ به آن آرایه نیاز دارند. اگر نیاز به استفاده از مقاومت باشد، مقاومت آن باید به اندازه‌ای باشد که بتواند جریان را به نصف مقدار مورد انتظار کاهش بدهد. این کار امکان تنظیمات مورد نیاز را فراهم می‌کند.

مقدار مقاومت کنترل برابر است با:

$$R_x = \frac{E_m - \mathrm{E}_s}{\frac{I_s}{f}}$$

که R_x مقاومت کنترل (اهم)، E_m حداکثر. حداقل ولتاژ آرایه (یک‌سوکننده ۱۰۰ ولتی فرض می‌شود)، E_s حداقل ولتاژ مورد انتظار برای stub ولت)، f ضریب مورد نیاز برای کاهش دادن جریان به نصف مقدار تخمین زده شده (۰/۵) و I_s جریان آند stub (۱/۳۸ آمپر) است، بنابراین:

$$R_x = \frac{100 - 25}{\frac{1/38}{0/5}} = 109\text{ohms}$$

و توان منبع برابر خواهد بود با:

$$\mathrm{P}=\mathrm{I}_s^2 \times R_x = 1/38^2 \times 109 = 208\mathrm{watts}$$

طراحی آند رایزر

فاصله آند رایزر از دیواره رایزر، برابر با شعاع است (۰/۷۶ متر). با استفاده از هندسه برای تخمین فاصله آندها، حداکثر فاصله معادل با ۲ برابر فاصله از آند تا دیواره رایزر تعیین می‌شود. به منظور حصول اطمینان بیشتر، ضریب فاصله انتها – تا انتها به کار رفته، ۱/۵ برابر این فاصله خواهد بود:

$$S_{\mathrm{ee}} = 1/5r_2$$

که S_{ee} فاصله انتها – تا انتهای آندها (متر) و r_2 شعاع رایزر (۰/۷۶ متر) است، بنابراین:

$$S_{\mathrm{ee}} = 1/5 \times 0/76 = 1/14m$$

برای رایزر، از آندهای با اندازه ۵/۱ سانتی‌متر (۲/۰ اینچ) در ۲۲/۹ سانتی‌متر (۹ اینچ) استفاده خواهد شد. تعداد آندهای مورد نیاز برابر است با:

$$\mathrm{N}=\frac{h}{(S_{\mathrm{ee}}+\mathrm{L})}$$

که N تعداد آندها در رشته، h ارتفاع رایزر (۳۵ متر)، S_{ee} فاصله آندها (۱/۱۴ متر) و L طول آند (۰/۲۲۹ متر) است، بنابراین:

$$\mathrm{N}=\frac{35}{1/14+0/229} = 25/6 = 25\mathrm{anodes}$$

میانگین جریان خروجی از هر آند باید برابر با مقدار زیر باشد:

$$I_a = \frac{I_R}{N}$$

که I_a جریان یک آند (آمپر)، I_R جریان کل مورد نیاز در رایزر (۶/۶۸ آمپر) و N تعداد آندها در رشته (۲۶ عدد) است، بنابراین I_a برابر با ۰/۲۵۷ آمپر است.

برای این سرویس، آندهای ۵/۱ سانتی‌متر (۲/۰ اینچ) در ۲۲/۹ سانتی‌متری (۹ اینچ) طبق اعلام سازنده، جریان ۰/۲۰۰ آمپر تولید می‌کنند. وزن این آندها ۲/۲۷ کیلوگرم است. کل وزن رشته آندی برابر با ($26 \times 2/27$ کیلوگرم = ۵۹۰۲ کیلوگرم) خواهد بود.

این وزن کمتر از حداقل وزن (۶۰/۷ کیلوگرم) مورد نیاز برای طول عمر طراحی (۱۰ سال) است. بنابراین نیاز به چند آند دیگر نیز وجود دارد، تعداد کل آندهای مورد نیاز برابر خواهد بود با:

$$N = \frac{60/7}{2/27} = 26/7 = 27\mathrm{anodes}$$

با استفاده از حداقل تعداد آندهای مورد نیاز برای ۱۰ سال (۲۷ عدد)، فاصله آندها برابر خواهد بود با:

$$S_{\mathrm{ee}} = \frac{h}{N}\text{-L} = \frac{35}{27} - 0/229 = 1/07$$

مقاومت آند رایزر

طول مؤثر آند رایزر برابر است با:

$$L = 27 \times 22/9\text{cm} = 618\text{cm}$$

در مورد یک رشته آندی، از رابطه استاندارد شپرد استفاده می‌شود:

$$R_R = \frac{0/366\rho}{L} log\left(\frac{d_R}{d_a}\right)$$

که R_R مقاومت آند رایزر تا لوله رایزر (اهم)، ρ مقاومت الکترولیت (آب) (۴۰۰۰ اهم سانتی‌متر)، d_Rمقاومت رایزر (۱/۵۲ متر)، d_a قطر آند (۰/۰۵۱ متر) و L طول مؤثر آند (۶۱۸ سانتی‌متر) است، بنابراین:

$$R_R = \frac{0/366 \times 4000}{618} log\left(\frac{1/52}{0/051}\right) = 3/49 \text{ ohms}$$

لازم است که نسبت L به d برای رشته آندی رایزر چک شود تا مشخص گردد که نیاز به ضریب تصحیح وجود دارد یا نه:

$$\frac{L}{d_a} = \frac{618}{5/1} = 121$$

ازآنجاکه این نسبت بزرگ‌تر از ۱۰۰ است، نیازی به ضریب تصحیح نخواهد بود. همانند آندهای سطوح بیضوی، مقاومت کابل تغذیه No.10 AWG ناچیز است. ولتاژ محرکه مورد نیاز برای آندهای رایزر برابر است با:

$$E_R=I_R.R_R.f$$

که E_R ولتاژ محرکه (ولت)، I_R جریان رایزر (۶/۶۸ آمپر)، R_R مقاومت مدار آند رایزر (۳/۴۹اهم) و f ضریب اطمینان فرض شده است، بنابراین:

$$E_R = 6/68 \times 3/49 \times 1/5 = 34/97\text{volts}$$

این ولتاژ، فقط ٪۳۵ ولتاژ منبع تغذیه سطوح بیضوی است. توان تلف شده در کاهش ولتاژ از حداکثر ۱۰۰ ولت به ۳۴/۹۷ ولت برابر است با:

$$P=E_x.I_R$$

که P توان تلف شده (وات)، E_x افت ولتاژ در طول مقاومت (۱۰۰ منهای ۳۴/۹۷ برابر با ۶۵/۰۳ ولت) و I_Rجریان رایزر (۶/۶۸ آمپر) است، بنابراین:

$$P=65/03 \times 6/68 = 434/4\text{watts}$$

اتلاف پیوسته این توان، غیرمنطقی است. بنابراین به یک منبع تغذیه جداگانه برای سامانه‌های آندهای رایزر نیاز است.
ازآنجاکه نشانه‌ای از تغییر قابل توجه در جریان مورد نیاز برای این مخزن وجود ندارد، یک‌سوکننده‌های تک فازی معمولی، انتخاب خوبی خواهند بود. پس از اینکه سامانه حفاظت کاتدی نصب شد باید جریان بررسی شده و با زمان پایش گردد.

مطلوب است که الکترودهای مرجع دائمی در مخزن نصب شوند تا آزمایش مقادیر پتانسیل آسان شود. در نواحی که تشکیل یخ در زمستان مشکل‌ساز است، طراحی باید به گونه‌ای تغییر کند که از تخریب سامانه‌های آندی پیشگیری شود. از سامانه‌های شناور مختلفی برای کنترل آسیب ناشی از یخ استفاده شده است. هرکدام از وضعیت‌ها باید با توجه به متغیرهای طراحی و هزینه‌های مربوطه مورد بررسی قرار بگیرند.

مخزن نو/یک‌سوکننده/نیوبیم پلاتینیزه شده

توصیف

قرار است که یک مخزن نگهداری آب دریا از فولاد معمولی ساخته شود. مخزن با اپوکسی کول تار که سازگار با حفاظت کاتدی است، پوشش داده خواهد شد. هدف طراحی یک سامانه حفاظت کاتدی برای مخزن با استفاده آندهای سیم نیوبیم پلاتینیزه شده است. این سامانه باید قادر به کنترل خوردگی حتی در صورت تخریب و یک سوم از پوشش باشد. از داده‌های زیر در طراحی استفاده خواهد شد.

داده‌ها

- قطر مخزن: ۲ متر (۶/۶ فوت)
- تراز آب در مخزن: ۳/۹ متر (۱۲/۸ فوت)
- عمق کلی مخزن: ۴ متر (۱۳/۱ فوت)
- شکل مخزن: استوانه‌ای
- جریان مورد نیاز تخمین زده شده: ۱۴ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع
- منبع تغذیه موجود: ۱۲۰ / ۲۴۰ ولت، ۶۰ هرتز تک فاز
- طول عمر: ۱۰ سال
- مقاومت متوسط آب: ۲۷ اهم سانتی‌متر
- نرخ مصرف فرض شده برای پلاتین: $1/2 \times 10^{-5}$ کیلوگرم / آمپر - سال
- ضریب کاربری فرض شده برای آند: ٪۵۰
- وزن پلاتین در سیم آندی: $1/37 \times 10^{-6}$ کیلوگرم بر سانتی‌متر از سیم آندی

محاسبات

مساحت دیواره مخزن در معرض الکترولیت

$$A_{sw}=\pi.d.h$$

که A_{sw} مساحت در معرض الکترولیت از دیواره مخزن (سانتی‌مترمربع)، d قطر مخزن و h ارتفاع آب در مخزن (۳۹۰ سانتی‌متر) است، بنابراین:

$$A_{sw}=\pi \times 200 \times 390 = 2/45 \times 10^5 cm^2$$

مساحت کف مخزن

$$A_{sb}=\pi r^2$$

که A_{sb} مساحت کف مخزن و r شعاع کف مخزن (۱۰۰ سانتی‌متر) است، بنابراین:

$$A_{sb}=\pi r \times 100^2 = 3/1416 \times 10^4 cm^2$$

کل مساحت در معرض الکترولیت مخزن

$$A=A_{sw}+A_{sb} = 2/45 \times 10^5 + 3/1416 \times 10^4 = 2/764 \times 10^5$$

حداکثر سطح فلزی بدون پوشش در معرض الکترولیت A_m

$$A_m = 0/33 \times 2/764 \times 10^5 cm^2 = 9/12 \times 10^4 cm^2 (98ft^2)$$

حداکثر جریان مورد نیاز تخمین زده شده

$$I=i.A_m$$

که I جریان طراحی (آمپر)، i چگالی جریان مورد نیاز ($1/4 \times 10^{-5}$ آمپر بر سانتی‌مترمربع) و A_m حداکثر سطح فلزی بدون پوشش در معرض الکترولیت ($9/12 \times 10^4$ سانتی‌متر مربع) است، بنابراین:

$$I=1/4 \times 10^5 \times 9/12 = 1/28A$$

حداقل وزن پلاتین مورد نیاز

$$W=\frac{t.C_r I}{f_u}$$

که W وزن آند (کیلو گرم)، t طول عمر طراحی (۱۰ سال)، C_r نرخ مصرف آند ($1/2 \times 10^{-5}$ کیلوگرم / آمپر - سال)، I حداکثر جریان طراحی (۱/۲۸ آمپر) و f_u ضریب کاربری آند (۰/۵) است، بنابراین:

$$W=\frac{10 \times 1/2 \times 10^{-5} \times 1/28}{0/5} = 3/1 \times 10^{-4} kg$$

کل طول آند پلاتینی مورد نیاز

$$L_P = \frac{W}{w}$$

که L_P طول آند و پلاتینایزه شده فعال (سانتی‌متر)، W وزن پلاتین مورد نیاز ($3/1 \times 10^{-4}$ کیلوگرم) و w وزن پلاتین در هر سانتی‌متر از سیم ($1/371 \times 10^{-6}$ کیلوگرم بر سانتی‌متر) است، بنابراین:

$$L_P = \frac{3/1 \times 10^{-4}}{1/371 \times 10^{-6}} = 226cm(7/4ft)$$

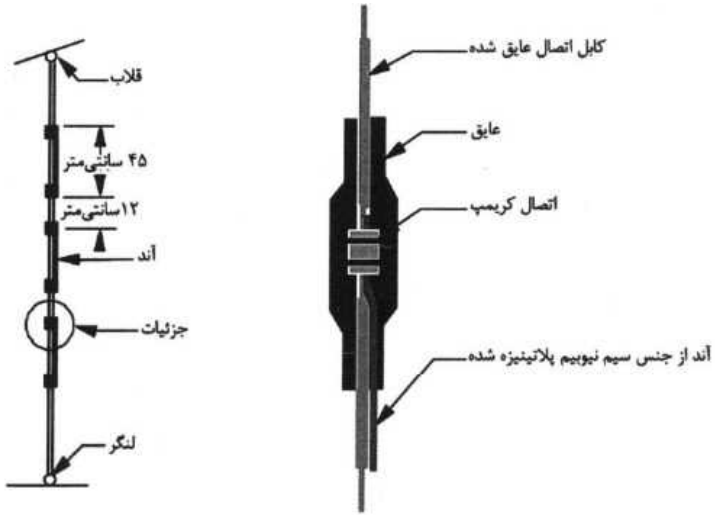
آندهای سیم پلاتینیمی برای مخازن آب را می‌توان مانند شکل ۹-۴۸ ساخت. طول واحد مجموعه آند شامل ۴۵ سانتی‌متر سیم نیوبیمی پلاتینایزشده فعال به اضافه ۱۲ سانتی‌متر کابل اتصال مسی عایق‌دار است. طول واحد این مجموعه، ۵۷ سانتی‌متر است. آند پلاتینیومی فعال، ٪۷۹ طول واحد را تشکیل می‌دهد.

کل طول آند مورد نیاز

$$L=\frac{L_P}{0/79} = \frac{226}{79} = 286cm(9/4ft)$$

تعداد رشته‌های آندی مورد نیاز

$$N=\frac{L}{h}=\frac{390}{286}=0/73\equiv 1string$$



شکل ۹-۴۸ اتصال آند

منطقه تحت پوشش در کف مخزن

حداکثر فاصله آند (پایین‌ترین عضو فعال) از کف مخزن برابر است با:

$$S=h-L=390-286=104cm(3/4ft)$$

کل ناحیه تحت پوشش را از کف مخزن

Z_b شعاع ناحیه تحت پوشش از کف مخزن توسط یک آند است،

$$Z_b=1/5S=1/5\times 104=156cm(5/1ft)$$

شعاع کف مخزن، ۱۰۰ سانتی‌متر است. حفاظت از کف مخزن می‌تواند با یک مجموعه آندی در مرکز مخزن تکمیل شود. چیدمان آند در شکل ۹-۴۹ نشان داده شده است.

محاسبات مقاومت

طول فعال آند برابر است با:

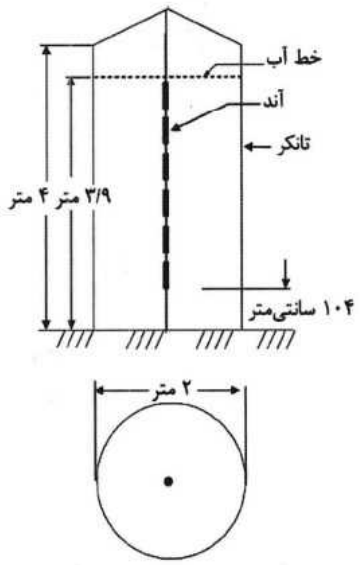
$$L=6\times 45=270cm$$

از رابط استاندارد شپرد برای یک آند استفاده می‌شود:

$$R=\frac{0/366\rho}{L}log\left(\frac{d_T}{d_a}\right)$$

که R مقاومت آند نسبت به مخزن (اهم)، ρ مقاومت الکترولیت (آب) (۲۷ اهم سانتی‌متر)، d_T قطر مخزن (۲۰۰ سانتی متر)، d_a قطر آند (۰/۱۵۷ سانتی‌متر) و L طول فعال آند (۲۷۰ سانتی متر) است. بنابراین:

$$R=\frac{0/366\times 27}{270}log\left(\frac{200}{0/157}\right)=0/114\ ohm$$



شکل ۹-۴۹ چیدمان آند

نسبت L به d_a برای رشته آندی رایزر برابر است با:

$$\frac{L}{d_a} = \frac{270}{0/157} = 1720$$

ازآنجاکه این نسبت بزرگ‌تر از ۱۰۰ است، نیازی به اعمال ضریب تصحیح نخواهد بود.

اگر از کابل مسی No.8 AWG برای ایجاد اتصال از منبع تغذیه به رشته آندی استفاده شود (طول این کابل (L_F)، ۸ متر تخمین زده شده)، مقاومت کابل برابر خواهد بود با (R مقاومت واحد کابل No.8 (۰/۰۰۲ اهم بر متر) است):

$$R_F = L_F \times R = 8 \times 0/002 = 0/16\Omega$$

یک مخزن با پوشش خوب، مقاومت کاتد نسبت به الکترولیت قابل توجهی نشان خواهد داد. پس از اینکه پوشش شروع به تخریب کرد، این مقاومت افت می‌کند. در این حالت، بدترین شرایط (۳۳٪ تخریب پوشش) در نظر گرفته می‌شود. مساحت در تماس با الکترولیت در مقایسه با سامانه آندی، بسیار وسیع است؛ انتظار می‌رود که مقاومت مخزن نسبت به الکترونیک (R_F)، ناچیز باشد. ولتاژ محرکه مورد نیاز برای آندهای اصلی برابر است با:

$$E_M = I_M . R_T$$

که E_M ولتاژ محرکه (ولت)، I_M جریان اصلی (۱/۲۸ آمپر)، R_T مقاومت مدار آندی اصلی (برابر با مجموع R_M، R_F و R_E)، R_M مقاومت آند اصلی (۰/۱۱۴ اهم)، R_F مقاومت کابل تغذیه (۰/۰۱۶ اهم)، R_E مقاومت مخزن نسبت به الکترولیت (کوچک‌تر از ۰/۰۱ اهم فرض شده) بنابراین R_T برابر با $(0 + 0/016 + 0/114 = 0/13$ اهم) است و E_M برابر خواهد بود با:

$$E_M = 1/28 \times 0/13 = 0/1664 \text{volt}$$

در این حالت، ولتاژ برگشتی ایجاد شده توسط آند به پتانسیل گالوانیک مخزن فولادی به اضافه پلاریزاسیون آند و مخزن، از پتانسیل مورد نیاز برای غلبه به مقاومت مدار بزرگ‌تر خواهد بود. ولتاژ برگشتی ۲/۰ ولت فرض می‌شود. بنابراین یک یک‌سوکننده ۸ ولت و ۴ آمپر، گزینه مناسبی برای منبع تغذیه خواهد بود.

بحث

مخازن آب پوشش‌دار که توسط سامانه‌های حفاظت کاتدی اعمال جریان تحت حفاظت قرار می‌گیرند، معمولاً به کنترل خودکار پتانسیل نیاز دارند. برای جلوگیری از اعمال تنش الکتریکی اضافی به پوشش، نقطه تنظیم پتانسیل نباید بیشتر از ۹۰۰ میلی نسبت به الکترود مرجع مس/سولفات مس اشباع باشد. الکترود مرجعی که پتانسیل مخزن را اندازه‌گیری می‌کند باید در نزدیکی دیواره مخزن و در ناحیه‌ای تا حد ممکن دور از آندها قرار داده شود. می‌توان الکترود مرجع را در نزدیکی یک کوپن فولادی بدون پوشش (که به مخزن جوش داده شده یا توسط یک کابل، دارای اتصال الکتریکی با مخزن است) نصب کرد. کوپن، در واقع به‌عنوان یک عیب عمدی در پوشش عمل کرده و در برابر جریان حفاظت کاتدی پاسخ می‌دهد.

رنگ و پوشش‌های نازک دیگر، به‌صورت غشاء رفتار می‌کنند. آب می‌تواند به درون پوشش نفوذ کرده و در نهایت به سطح فلز پایه برسد. اگر حفره و عیبی در پوشش وجود داشته و یا آماده‌سازی سطح مشترک فلز و پوشش نامناسب باشد، آب می‌تواند در منطقه‌ای از سطح تجمع پیدا کند. اگر غلظت یون‌های موجود در آب در فصل مشترک پوشش و فولاد با غلظت یون‌های موجود در محلول اصلی در خارج از پوشش متفاوت باشد، ممکن است اثرات اسمزی ایجاد شود. این اثرات اسمزی می‌توانند مولکول‌های آب و یون‌ها را به میزان بیشتری به درون پوشش ارسال کنند. تجمع این ذرات در فشار در فصل مشترک پوشش/فولاد، در نهایت منجر به ایجاد تاول و تخریب پوشش خواهد شد.

استفاده از حفاظت کاتدی برای سطح فولادی پوشش‌دار غوطه‌ور در آب، باعث اعمال تنش‌های الکتریکی بیشتری به غشاء پوشش می‌شود. الکترو – اسمز، تمایل به فرستادن آب به‌سمت کاتد (فولاد) دارد، بنابراین فشاری تولید می‌کند که می‌تواند باعث ایجاد تاول در پوشش شود. یک سامانه پوشش با چسبندگی نامناسب به پایه، در اثر فشار ناشی از آب ورودی از طریق پوشش توسط پتانسیل حفاظت کاتدی، دچار تاول خواهد شد.

اعمال موفق حفاظت کاتدی در محیط‌های آبی با pH کمتر از ۹، منجر به افزایش pH در فصل مشترک فلز خواهد شد. این امر به دلیل احیاء الکتروشیمیایی یون‌های هیدروژن آب در تماس با سطح فلز است. بنابراین برای این که پوششی سازگار با حفاظت کاتدیک باشد، باید قادر به مقاومت در برابر محیط‌های قلیایی باشد. بسیاری از رنگ‌ها و پوشش‌ها در برابر محیط‌های قلیایی مقاوم نیستند. افزایش pH ایجاد شده توسط حفاظت کاتدی می‌تواند تخریب یک پوشش با اعمال نامناسب، حتی اگر خود پوشش سازگار با شرایط ایجاد شده توسط حفاظت کاتدی باشد را تسریع کند. تخریب سریع و وسیع ناشی از حفاظت کاتدی برای پوششی که به‌صورت نامناسب اعمال شده، عموماً به حفاظت کاتدی نسبت داده می‌شود؛ اما این تخریب معمولاً به دلیل اعمال نامناسب پوشش است.

مثال‌هایی از طراحی مخزن

کندانسور آب/سامانه اعمال جریان

توصیف

کندانسورها در یک واحد نیروگاهی، مجدداً با تیوب‌ها و تیوب شیت‌های تیتانیمی تعمیر شده‌اند. محفظه‌های آب[3] از فولاد با پوشش اپوکسی ساخته شده‌اند. آب خنک‌کننده، شامل آب دریا با هدایت الکتریکی بین ۲۹۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ میکروزیمنس (دارای مقاومت بین ۲۵ تا ۳۵ اهم سانتی‌متر) است.

تیتانیم، فلزی فعال است (مانند آلومینیم) که در آب دریا به سرعت تشکیل یک فیلم بسیار محافظ می‌دهد. این فیلم امکان استفاده از تیتانیم به‌عنوان زمینه‌ای برای آندهای پلاتینیمی و اکسید فلزی مخلوط (MMO) را فراهم می‌سازد. تیتانیم در حضور آب دریا، پتانسیلی نسبتاً نجیب (کاتدی) نشان می‌دهد که معمولاً نسبت به الکترود مرجع نقره/کلرید نقره، بین ۰/۲۰۰+ و ۰/۲۰۰- ولت است. فولاد در آب دریا (در پتانسیلی بین ۰/۵- تا ۰/۷- ولت نسبت به الکترود مرجع نقره/کلرید نقره) وقتی که به یک سطح تیتانیمی بزرگ متصل می‌شود، تحت خوردگی سریع قرار خواهد گرفت. نگرانی که وجود دارد این است که محفظه آب فولادی پوشش‌دار، در عیوب پوشش با نرخی غیرقابل قبول خواهد خورده و منجر به نشتی محفظه آب خواهد شد. برای محفظه‌های آب می‌توان از حفاظت کاتدی استفاده کرد تا تیتانیم، به پتانسیل‌های فعال‌تر (۰/۵۵۰- تا ۰/۶۵۰- ولت نسبت به الکترود مرجع نقره/کلرید نقره) پلاریزه شود. این کار منجر به حذف اختلاف پتانسیل گالوانیک مضر بین تیتانیم و فولاد خواهد شد.

پلاریزاسیون کاتدی تیتانیم نباید به اندازه‌ای منفی باشد که باعث تولید هیدروژن در سطح تیتانیم گردد. اگر هیدروژن تولید شود، تیتانیم می‌تواند تشکیل هیدرویدهایی بدهد که فلز را ترد کرده و می‌توانند منجر به ایجاد ترک و تخریب‌های مکانیکی دیگر در تیوب‌ها شوند. معادل پتانسیلی که طی آن در فشار یک اتمسفر، یون‌های هیدروژن در آب می‌توانند به گاز هیدروژن احیاء شوند (از دیاگرام پوربه)، بدین صورت است:

$$E_0 = 0.000 - 0.0591pH(voltvs.SHE)$$

این معادله نسبت به الکترود مرجع نقره/کلرید نقره، بدین صورت خواهد بود:

$$E_0 = (0.000 - 0.0591pH) - 0.254volt$$

در pH برابر با ۸ (pH معمول برای آب دریا)، پتانسیل تولید هیدروژن نسبت به الکترود مرجع نقره/کلرید نقره برابر است با:

$$E_0 = (-0.591 \times 8pH) - 0.254volt$$

با پلاریزه شدن تیتانیم به پتانسیلی بین ۰/۵۵۰- تا ۰/۶۵۰- ولت نسبت به الکترود مرجع نقره/کلرید نقره، هیدریدهای تیتانیم تشکیل نخواهد شد. این پتانسیل، اختلاف پتانسیل گالوانیک بین تیتانیم و فولاد را از بین خواهد برد. با توجه به داده‌های زیر،

3 [illegible] 8 9

یک سامانه حفاظت کاتدی اعمال جریان برای محفظه‌های آب در این کندانسور طراحی خواهد شد. آندها باید طول عمر اسمی ۱۰ سال داشته باشند.

داده‌ها

۱. از آزمایش‌های آزمایشگاهی در سرعت‌های سیال مشابه با تیوب‌های کندانسور (۱/۸ متر بر ثانیه یا ۶ فوت بر ثانیه)، چگالی جریان مورد نیاز برای پلاریزه شدن تیتانیم تا پتانسیل ۰/۶۵۰- ولت نسبت به الکترود مرجع نقره / کلرید نقره، در حدود ۷۵ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع است.

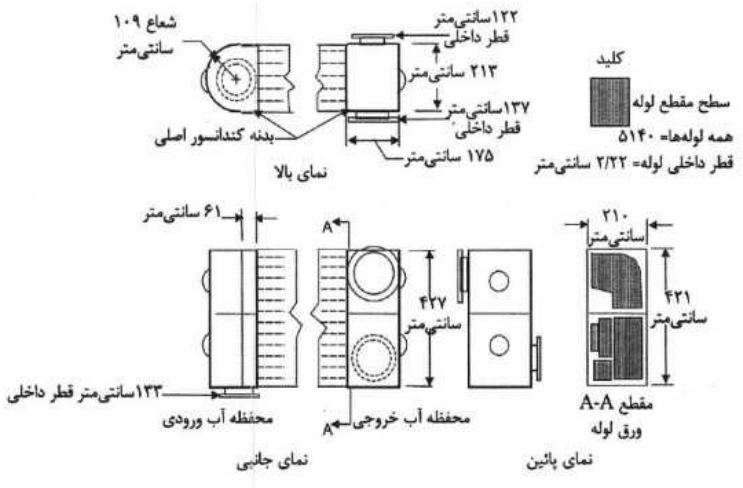
۲. از مطالعات آزمایشگاهی، فاصله مؤثری که در آن پلاریزاسیون رخ می‌دهد، در حدود ۵ برابر قطر تیوب است.

۳. ۵۱۴۰ تیوب تیتانیمی وجود دارد که وارد هرکدام از محفظه‌های آب می‌شوند. قطر تیوب‌ها، ۲/۲۲سانتی‌متر است.

۴. میانگین مقاومت آب، برابر با ۳۰ اهم سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

۵. تمام لوله‌های بزرگ متصل به کندانسور، پوششی محافظ برابر با ۵ قطر لوله کندانسور دارند. ٪۱۰ از تمام سطوح فولادی پوشش‌دار، به‌صورت فلز بدون پوشش در نظر گرفته می‌شوند. فرض می‌شود که تمام سطوح زیر ۵ برابر قطر لوله، چگالی جریان قابله توجهی دریافت نخواهند کرد.

۶. فرض می‌شود که ابعاد محفظه آب، مانند شکل ۵۰-۹ باشد. برای این مسئله تیوب شیت‌های ورودی و خروجی، قرینه یکدیگر هستند.



شکل ۹-۵۰ دیاگرام محفظه آب کندانسور

۷. سرعت آب از تیوب‌های کندانسور، ۱/۸۳ متر بر ثانیه (۶ فوت بر ثانیه) است.

روند کار

۱. مساحت‌های محاسبه می‌شود.

۲. جریان مورد نیاز برای برآورده شدن معیارها محاسبه می‌گردد.

۳. آندها انتخاب می‌شوند.

۴. حداقل تعداد آندهای مورد نیاز برای برآورده شدن ملزومات طول عمر و توزیع جریان تخمین زده می‌شود.

۵. مشخصات یک‌سوکننده تعیین می‌شود.

محاسبات

مساحت‌ها

مساحت مؤثر تیوب‌های تیتانیمی که جریان را دریافت خواهند کرد (۵ برابر قطر تیوب در درون تیوب) برابر است با:

$$A_{\mathrm{st}}=\pi \mathrm{d}(5d)N$$

که d قطر تیوب (۲/۲۲ سانتی‌متر)، A_{st} مساحت سطح داخلی یک تیوب تحت تأثیر جریان حفاظت کاتدی (سانتی متر مربع) و N تعداد تیوب‌ها در تیوب شیت (۵۱۴۰) است، بنابراین:

$$A_{\mathrm{st}}=\pi \times 2/22 \times 5 \times 2/22 \times 5140 = 397913\mathrm{cm}^2 = (428\mathrm{ft}^2)$$

مساحت تیتانیم قرار گرفته در معرض الکترولیت در تیوب شیت

$$A_{\mathrm{ss}}=\mathrm{A_{so}}\text{-}\mathrm{A_{sx}}$$

که A_{so} کل مساحت تیوب شیت ($88410 = 421 \times 210$ سانتی‌مترمربع) و A_{sx} مقطع عرضی تیوپ‌ها $= \left(\pi\left(\frac{d}{2}\right)\right)^2$ که d قطر داخلی تیوب‌ها (۲/۲۲ سانتی‌متر) و N تعداد تیوپ‌ها (۵۱۴۰) است، بنابراین A_{sx} برابر با ۱۹۸۹۶ سانتی‌مترمربع است، بنابراین:

$$A_{\mathrm{ss}} = 88410 - 19896 = 68514\mathrm{cm}^2 = (73/7\mathrm{ft}^2)$$

کل مساحت مؤثر تیتانیم که جریان حفاظت کاتدی را دریافت می‌کند (در هر محفظه آب)، برابر است با:

$$A_T=\mathrm{A_{st}}+\mathrm{A_{ss}}$$

که A_{st} مساحت مؤثر سطح داخلی تیوب‌های تیتانیمی (۳۹۷۹۱۳ سانتی‌مترمربع) و A_{ss} مساحت تیوب شیت در معرض الکترولیت (۶۸۵۱۴ سانتی‌مترمربع) است، بنابراین:

$$A_T = 397913 + 68514 = 466427\mathrm{cm}^2 = (502\mathrm{ft}^2)$$

سطح مؤثر فولاد در محفظه‌های آب

مساحت لوله‌های با قطر بالا، ۵ برابر قطر لوله مستقیم متصل به هر دریچه فرض می‌شود. قطر داخلی اتصال لوله ورودی (A)، ۱۳۳ سانتی‌متر (۵۲ اینچ) است. بنابراین طول لوله ۵ برابر ۱۳۳ سانتی‌متر مربع (۶۶۵ سانتی‌متر) فرض می‌شود.

$$A_{\mathrm{sA}}=\pi \mathrm{dL}=\pi \times 133 \times 665 = 277858\mathrm{cm}^2 = (502\mathrm{ft}^2)$$

دیواره‌های عمودی

۲ برابر هرکدام از سطوح مستطیلی (B):

$$E_M=\mathrm{I}_M.\mathrm{R}_T$$

که w عرض (۶۱ سانتی‌متر) و L ارتفاع محفظه (۴۲۷ سانتی‌متر) است، بنابراین:

$$A_B = 61 \times 427 \times 5 \times 2 = 52094\text{cm}^2 = (56\text{ft}^2)$$

نصف مساحت استوانه (C):

$$A_{sC}=\pi rL$$

که r شعاع منحنی (۱۰۹ سانتی‌متر) و L طول منحفظه (۴۲۷ سانتی‌متر) است، بنابراین:

$$A_{sC} = \pi \times 109 \times 427 = 146219\text{cm}^2(157\text{ft}^2)$$

بالای محفظه (D) (مستطیل + نیم دایره):

$$A_{sD}=wL+0/5\pi r^2 \times (61 \times 4213) + (0/5 \times \pi \times 109^2) = 31656\text{cm}^2(34\text{ft}^2)$$

انتهای محفظه (E) (d قطر لوله ورودی است):

$$A_{sE}=A_{sD} - \frac{\pi d^2}{4} = 31656 - \frac{\pi \times 133^2}{4} = 17763\text{cm}^2(19\text{ft}^2)$$

کل مساحت فولاد پوشش‌دار در لوله‌ها و محفظه ورودی:

$$A_{sIB}=A_{sA} + A_{sB} + A_{sC} + A_{sD} + A_{sE} = 277858 + 52094 + 146219 + 31656 + 17763 = 525590\text{cm}^2$$

مساحت ٪۱۰ فرض شده برای فولاد قرار گرفته در معرض الکترولیت = ۵۲۵۵۹ سانتی‌مترمربع کل مساحت سطوح فلزی (فولاد و تیتانیم) بدون پوشش محفظه آب ورودی

$$A_{sTIB} = 0/1A_{sIB} + A_{sT} = 52559 + 466427 = 518986\text{cm}^2(559\text{ft}^2)$$

اتصال لوله عرضی (F)

این اتصال، اتصالی کوتاه به محفظه آب کندانسور مجاور است که دارای یک شیر دروازه‌ای (فلز بدون پوشش) در محل اتصال است. فرض می‌شود که مساحت فلز بدون پوشش، برابر با مساحت فعلی قطر داخلی لوله است (d قطر لوله برابر با ۱۲۲ سانتی‌متر است):

$$A_{sF} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 122^2}{4} = 11690(12/9\text{ft}^2)$$

قطر داخلی لوله خارجی (G)، برابر با ۱۷۵ سانتی‌متر (۶۹ اینچ) است.

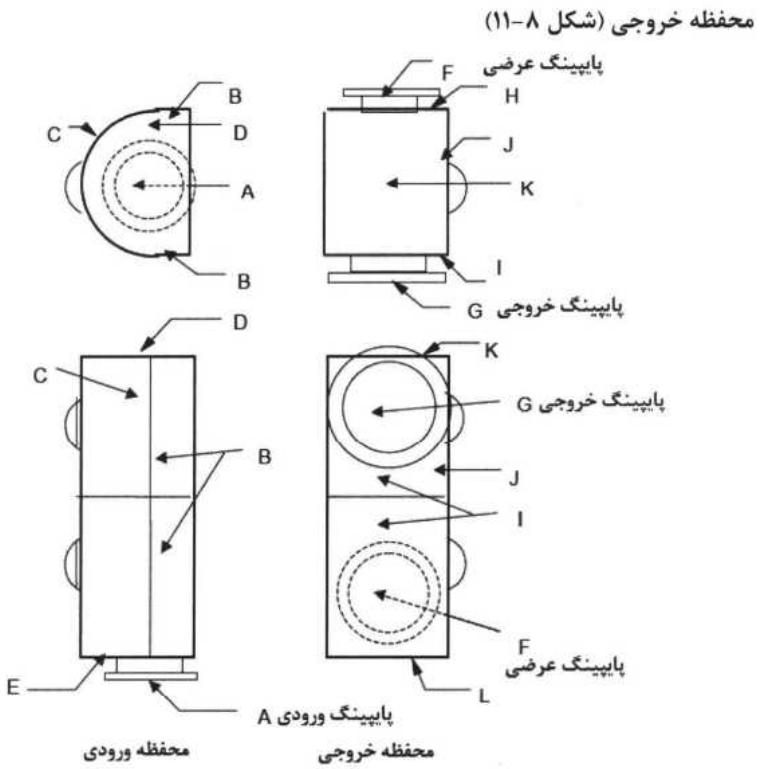
۵ برابر قطر لوله فولاد پوشش‌دار ($175 \times 5 = 875$ سانتی‌متر) فرض می‌شود:

$$A_{sG}=\pi dL$$

که d قطر لوله (۱۷۵ سانتی‌متر) و L طول مؤثر لوله (۸۷۵ سانتی‌متر) است، بنابراین:

$$A_{sG}=\pi \times 175 \times 875 = 481056\text{cm}^2(518\text{ft}^2)$$

محفظه خروجی (شکل ۹-۵۱)



شکل ۹-۵۱ سطوح فولادی

سطح جانبی محفظه (H)

$$A_{sH}=wL-\frac{\pi d^2}{4}$$

که W عمق محفظه (۱۷۵ سانتی‌متر)، L ارتفاع محفظه (۴۲۷ سانتی‌متر) و d قطر داخلی لوله عرضی (۱۲۲ سانتی متر) است، بنابراین:

$$A_{sH}=(175\times 427)-\left(\frac{\pi\times 122^2}{4}\right)=63035cm^2(67/9ft^2)$$

سطح جانبی محفظه (I)

$$A_{sI}=wL-\frac{\pi d^2}{4}$$

که w عمق محفظه (۱۷۵ سانتی‌متر)، L ارتفاع محفظه (۴۲۷ سانتی‌متر) و d قطر داخلی لوله خروجی (۱۷۵ سانتی‌متر) است، بنابراین:

$$A_{sI} = (175 \times 427) - \left(\frac{\pi \times 175^2}{4}\right) = 50672cm^2(54/5ft^2)$$

وجه (J)

$$A_{sJ}=wL$$

که w عرضه محفظه (۲۱۳ سانتی‌متر) و L ارتفاع محفظه (۴۲۷ سانتی‌متر) است، بنابراین:

$$A_{sJ} = 213 \times 427 = 90951cm^2(97/9ft^2)$$

بالای محفظه (K)

$$A_{sK}=wL$$

که w عرض محفظه (۲۱۳ سانتی‌متر) و L عمق محفظه (۱۷۵ سانتی‌متر) است، بنابراین:

$$A_{sK} = 213 \times 175 = 37275cm^2(40/1ft^2)$$

انتهای محفظه (L)

$$A_{sL}=A_{sK} = 37275cm^2$$

کل مساحت فولاد پوشش‌دار در لوله‌ها و محفظه خروجی

$$A_{sOB}=A_{sF} + A_{sG} + A_{sH} + A_{sI} + A_{sJ} = A_{sK} + A_{sL} = 771954cm^2(831ft^2)$$

مساحت ٪۱۰ فرض شده برای فولاد بدون پوشش = ۷۷۱۹۵ سانتی‌متر مربع

کل مساحت مؤثر از تمام فلزات (فولاد و تیتانیم) محفظه آب خروجی:

$$A_{sTOB} = 0/1A_{sOB} + A_{sT} = 77195 + 466427 = 543622cm^2(585ft^2)$$

خلاصه مساحت‌های قرار گرفته در معرض الکترولیت

محفظه آب ورودی

$$A_{sI}=wL - \frac{\pi d^2}{4}$$

محفظه آب خروجی

$$A_{sI} = 543622cm^2(585ft^2)$$

تخمین جریان مورد نیاز برای برآورده شدن معیار حفاظتی در نواحی بدون پوشش

چگالی جریان مورد نیاز برای پلاریزه شدن تیتانیم تا ۰/۶۵۰- ولت (نسبت به نقره/کلرید نقره) با توجه به بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده، ۷۵ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع است. فرض می‌شود که برای یکسان شدن پتانسیل تمام سطوح فولادی و تیتانیمی در محفظه‌های آب، به چگالی جریان یکسانی نیاز است.

محفظه آب ورود

$$I_{IB}=i.A_{sTIB} = 75 \times 10^{-6} \times 518986 = 38/9A$$

محفظه آب خروجی

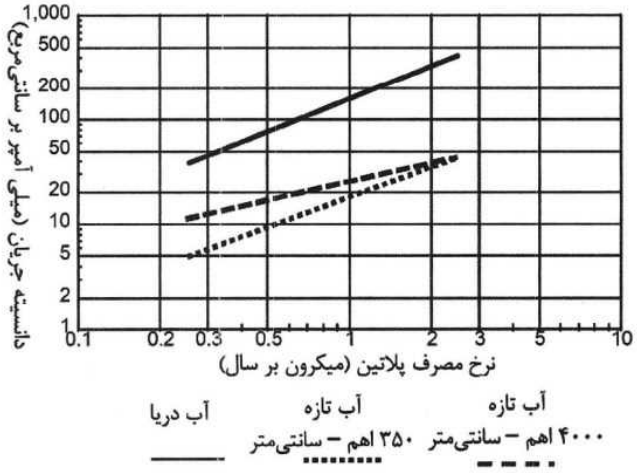
$$I_{OB}=i.A_{sTOB} = 75 \times 10^{-6} \times 543622 = 40/8A$$

انتخاب آند

در این مسئله نیاز به کنترل پتانسیل پلاریزه در سطوح تیتانیمی است. این امر بدین معنی است که سامانه حفاظت کاتدی باید یک سامانه اعمال جریان تحت کنترل پتانسیل باشد. برای کار در محفظه‌های آب از این نوع، آندهای میله‌ای مناسب هستند. این آندها (تیتانیم با پوشش پلاتین یا نیوبیم یا تیتانیم با پوشش اکسید فلزی مخلوط (MMO))، کارکرد خوبی در آب دریا با هدایت بالا دارند. اندازه آندها کوچک بوده و اثر آنها بر الگوی شار آب خنک‌کننده حداقل است.

حداقل مساحت فعال آند

در شکل ۹-۵۲، نمودار نرخ‌های مصرف آندهای دارای پوشش پلاتین در آب دریا و آب تازه آمده است.



شکل ۹-۵۲ نرخ مصرف پلاتین

برای طول عمر طراحی ۱۰ سال برای آندها، نرخ مصرف از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_r = \frac{\mathrm{tk}}{t}$$

که tk ضخامت پلاتین (میکرون) و t زمان (سال) است، بنابراین برای ضخامت۶/۳۵ میکرون و طول عمر ۱۰ سال داریم:

$$C_r = \frac{6/35}{10} = 0/635 \text{ microns/yr}$$

از شکل ۹-۵۲، این نرخ مصرف در آب دریا، مربوط به حداقل چگالی جریان در حدود ۱۰۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع (۰/۱ آمپر بر سانتی‌مترمربع) از سطح پلاتین است. با فرض جریان طراحی ۵۰ آمپر (۱۲۵٪ جریان مورد نیاز تخمین زده شده برای محفظه خروجی) برای هرکدام از محفظه‌های آب، کل سطح فعال آند مورد نیاز برابر خواهد بود با:

$$A_A = \frac{I}{i_a}$$

که I جریان مورد نیاز (۵۰ آمپر) و i_a چگالی جریان (۰/۱ آمپر بر سانتی‌مترمربع) است، بنابراین:

$$A_A = \frac{50}{0/1} = 500\text{cm}^2$$

میله‌های نیوبیم یا تیتانیمی با پوشش پلاتین، در قطرهای ۰/۶۳۵ سانتی‌متر (۰/۲۵ اینچ)، ۰/۹۵۳ سانتی‌متر (۰/۳۷۵ اینچ) و ۱/۲۷ سانتی‌متر (۰/۵۰۰ اینچ) موجود هستند. به دلایل مکانیکی (شار جریان در محفظه‌های آب)، از میله‌های ۱/۲۷ سانتی‌متری (۰/۵۰۰ اینچ) استفاده می‌شود. کل طول میله مورد نیاز در هر محفظه آب برابر خواهد بود با:

$$\text{L}=\frac{A_A}{\pi\text{d}}$$

که d قطر میله (۱/۲۷ سانتی‌متر) و A_A کل مساحت فعال (۵۰۰ سانتی‌متر مربع) است، بنابراین:

$$\text{L}=\frac{500}{\pi \times 1/27} = 125\text{cm}$$

سرعت

سرعت آب در تیوب‌های کندانسور، ۱/۸۳ متر بر ثانیه (۶ فوت بر ثانیه) است. نرخ شار مربوط به این سرعت برابر است با:

$$\text{F}=\text{V}.\text{A}_x$$

که V سرعت آب (۱/۸۳ متر بر ثانیه)، V_x کل مساحت مقطع عرضی تیوب‌های کندانسور (۱۹۸۹۶ سانتی‌مترمربع یا ۱/۹۹ مترمربع) و F نرخ شار (مترمکعب بر ثانیه) است، بنابراین:

$$\text{F}=1/83 \times 1/99 = 3/64m^2/s$$

سرعت آب در لوله ورودی محفظه آب ورودی به این صورت محاسبه می‌شود (d قطر لوله ورودی ۱/۳۳ متر).

$$\text{V}=\frac{F}{\left(\frac{\pi\text{d}^2}{4}\right)}=\frac{3/64}{\left(\frac{\pi \times 1/33^2}{4}\right)} = 2/62m/s$$

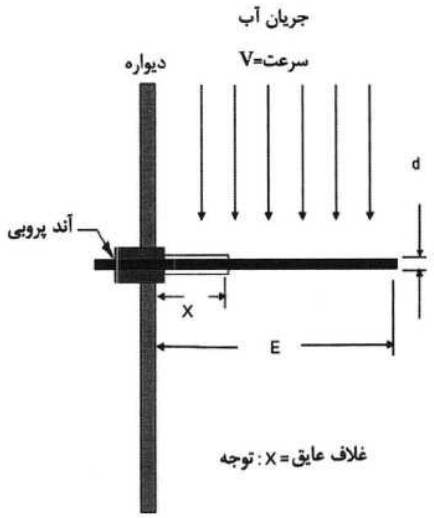
ازآنجاکه این لوله، کوچک‌ترین لوله ورودی یا خروجی از کندانسور است (به استثنای اتصال عرضی با قطر ۱۲۲ سانتی‌متر) بیشترین مقدار سرعت متوسط، ۲/۶۲ متر بر ثانیه است. در نرخ‌های شار بالا، حداکثر سرعت $(V_{max}())$ بین ۱/۲ و ۱/۴ برابر سرعت متوسط است. در این مورد فرض می‌شود که:

$$V\text{m/s}(12\text{ft/s})_{max}$$

محاسبه نیروهای وارد بر یک آند میله‌ای قرار گرفته در معرض کشش هیدرولیک

شکل ۹-۵۳ نمای کلی یک آند میله‌ای متصل شده به دیواره محفظه آب از طریق اتصالات عایقی را نشان می‌دهد. شکل ۹-۵۴ نمودار خلاصه اثر نیروهای مکانیکی بر آندهای تیتانیمی در سرعت، قطر و طول میله‌های مختلف را نشان می‌دهد. نکته

قابل توجه این است که شکل ۹-۵۴ شامل ضریب اطمینان ۳ است. برای اطمینان از پروب‌ها در مخازنی که لرزش‌های زیادی دارند، از ضریب اطمینان ۵ باید استفاده کرد.



شکل ۹-۵۳ نمایش کلی آند پروبی

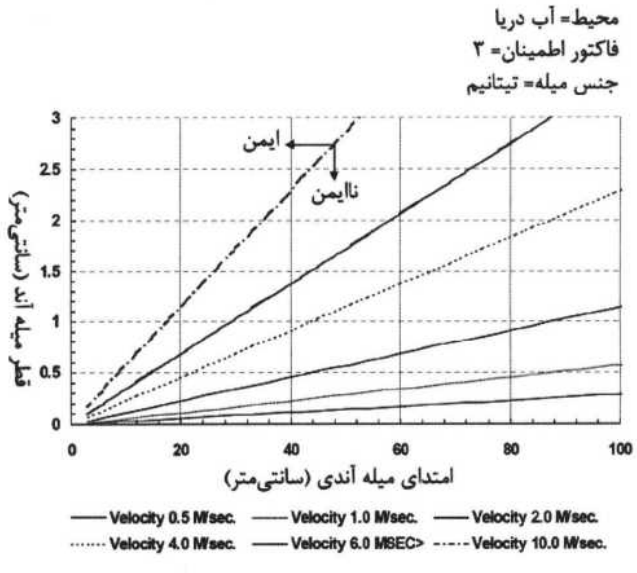
حداکثر سرعت در محفظه آب ورودی، ۳/۷ متر بر ثانیه (۱۲ فوت بر ثانیه) محاسبه شده است. با توجه به شکل ۹-۵۴ در سرعت آب دریا برابر با ۴ متر بر ثانیه، طول آند میله‌ای به قطر ۱/۲۷ سانتی‌متر (۰/۵ اینچ) نباید بزرگ‌تر از ۵۵ سانتی‌متر (۲۲ اینچ) باشد.

در اکثر موارد، یک پوشش عایق به طول X سانتی‌متر (شکل ۹-۵۳)، بر روی آند میله‌ای نصب می‌شوند تا آند را از دیواره مخزن مجزا کند. طول متداول برای X ، در حدود ۸ سانتی‌متر (۳ اینچ) است. اگر X برابر با ۸ سانتی‌متر انتخاب شود، حداقل تعداد آندهای ۵۵ سانتی‌متری (۲۲ اینچ) در هر محفظه آب را می‌توان از معادله زیر تعیین کرد (L_A کل طول آندهای فعال قرار گرفته در معرض الکترولیت (۱۲۵ سانتی‌متر) و L_{max} حداکثر طول آند از دیواره (۵۵ سانتی‌متر)):

$$N(L_{max}\text{-x}) = L_A \text{ Þ } N = \frac{L_A}{L_{max}\text{-x}} = \frac{125}{55-8} = 2/66$$

بنابراین ۳ آند مورد نیاز است. برای نصب سه آند در هر محفظه آب فقط می‌توان یک آند در هرکدام از نواحی تیوب‌دار و یکی در ناحیه میانی نصب کرد. برای پشتیبانی بهتری در صورت صدمه دیدن یک آند، باید حداقل دو آند در نواحی تیوب‌دار بالایی و پایینی قرار داده شود. با افزودن یک آند دیگر برای منطقه بین نواحی تیوب‌دار، در مجموع ۵ آند برای هر محفظه آب نیاز خواهد بود. ازآنجاکه تعداد آندهای نصب شده از تعداد مورد نیاز بیشتر خواهد شد، طول فعال آندها را می‌توان کاهش داد. با فرض اینکه N برابر با ۵ آند است. معادله بالا را می‌توان برای L_{max} حل کرد:

$$L_{max} = x + \frac{L_A}{N} = 8 + \frac{125}{5} = 33cm$$

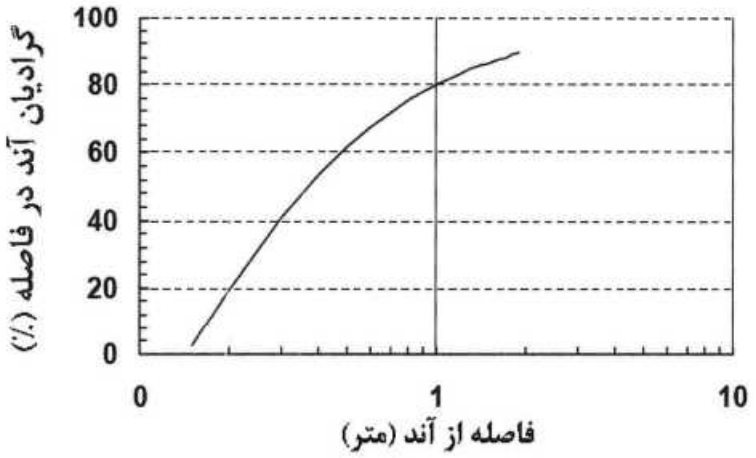


شکل ۹-۵۴ عوامل عملیاتی آند پروبی

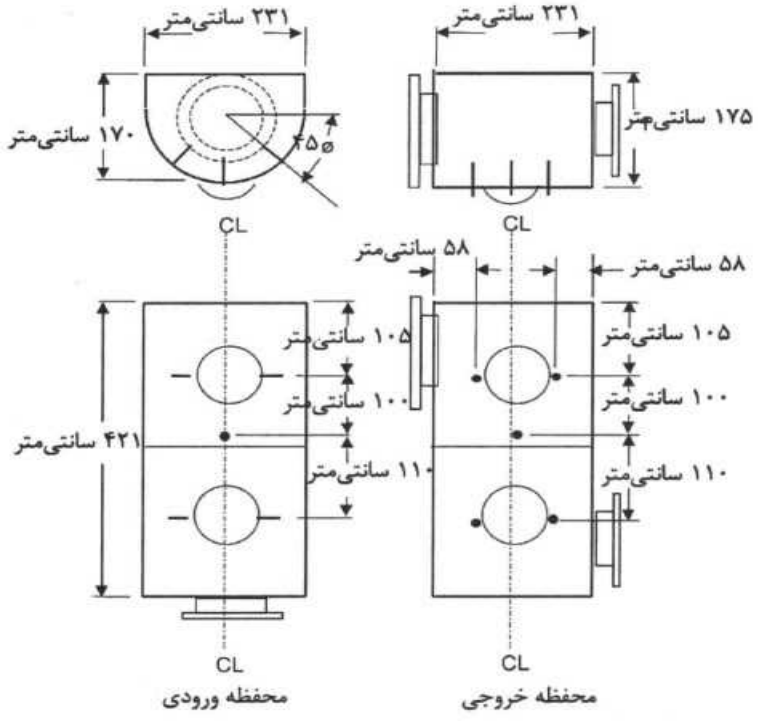
هر آند، طول کلی ۳۳ سانتی‌متر با ۲۵ سانتی‌متر طول فعال و ۸ سانتی‌متر پوشش عایق دارد. اگر ضریب اطمینان ٪۲۰ در نظر گرفته شد (در حالتی که یک آند صدمه ببیند)، طول فعال آند باید $25 \times 1/2 = 30$ سانتی‌متر و طول کلی هرکدام از آنها ۳۸ سانتی‌متر باشد.

بررسی دوری آندها

شکل ۹-۵۵ نمودار فاصله مؤثر آند برای آندهایی به طول ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۱/۲۷ سانتی‌متر قرار گرفته بر روی یک سطح غیر رسانا (پوشش‌دار) است. ابعاد محفظه‌های آب، فاصله آندها از تیوب - شیت‌های تیتانیمی را به‌شدت محدود می‌کند. در محفظه آب ورودی، حداکثر فاصله آندها از تیوب شیت، ۱۷۰ سانتی‌متر یا ۶۷ اینچ است. شکل ۹-۵۵ نشان می‌دهد که اگر آندها حداقل ۱ متر (۳۹ اینچ) از تیوب شیت فاصله داشته باشند، تیوب شیت در خارج ٪۸۰ گرادیان آندها قرار خواهد داشت. تغییرات چگالی جریان رسیده به تیوب شیت ناشی از اختلاف در گرادیان آندها، کمتر از ٪۱۰ خواهد بود (اختلاف بین گرادیان در ۱/۷ متر و ۱ متر). بنابراین، هدف قرار دادن آندهای پروبی بر روی دیواره‌های فولادی پوشش‌دار محفظه‌های آب به گونه‌ای است که نزدیک‌ترین آند از حدود ۱ متر به تیوب شیت نزدیک‌تر نباشد. شکل ۹-۵۶، یکی از چیدمان‌های ممکن که در آن آندها نسبتاً یکسان توزیع شده و معیار ۱ متر را برآورده می‌سازند را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۵۵ فاصله از آند (طول آند = ۳۰ سانتی‌متر، قطر آند = ۱/۲۷ سانتی‌متر)



شکل ۹-۵۶ چیدمان آند

مشخصات یک‌سوکننده و کنترل

مقاومت تقریبی یک آند با استفاده از رابط دوایت برای یک میله عمودی تخمین زده می‌شود:

$$R = \frac{0/005\rho}{\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{8\mathrm{L}}{d}\right) - 1\right) = \frac{0/005 \times 30}{\pi \times 30}\left(ln\left(\frac{8 \times 30}{12/7}\right) - 1\right) = 0/675\mathrm{ohm}$$

بنابراین مقاومت ۵ آند موازی برابر است با:

$$R = \frac{0/675}{5} = 0/135\text{ohm}$$

ولتاژ مورد نیاز برای فراهم کردن ۵۰ آمپر در هر محفظه آب برابر است با:

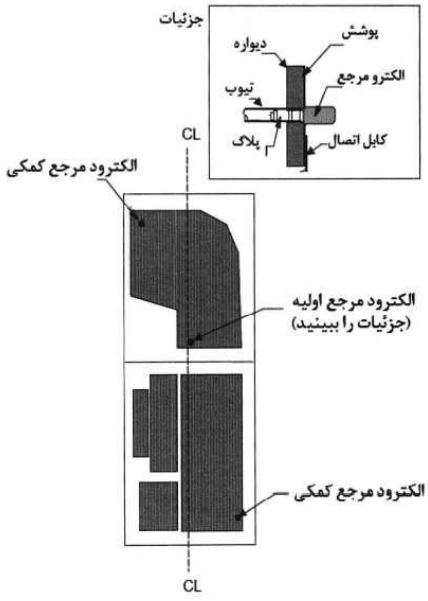
$$\text{E=I.R} = 50 \times 0/135 = 6/75V$$

با در نظر گرفتن ولتاژ برگشتی و پلاریزاسیون آندها و محفظه آب، یک‌سوکننده با قابلیت کنترل و پتانسیل دارای واحدهای مجزا برای هرکدام از محفظه‌های آب که ظرفیت ۵۰ آمپر (۱۰ آمپر برای هر آند) و حداکثر ۱۰ ولتی دارد، انتخاب می‌شود.

موقعیت و نوع الکترودهای مرجع

سامانه حفاظت کاتدی باید پتانسیل تیوب شیت تیتانیمی را در حدود ۶۵۰- میلی‌ولت نسبت به الکترود مرجع نقره/کلرید نقره نگه دارد. الکترود مرجع به کار رفته برای کنترل منبع تغذیه باید در تیوب شیت و در نزدیک‌ترین مکان به یک آند قرار داده شود. سایر الکترودهای مرجع در مکان‌های دیگری نصب می‌شوند تا مؤثر بودن حفاظت کاتدی را بررسی کنند.

الکترودهای مرجعی موجود است که می‌توان آنها را در ورودی تیوب قرار داد. در نتیجه تیوب‌های به کار رفته، قابلیت کاربرد برای فرایند خنک‌کنندگی را نخواهند داشت. اما با توجه به تعداد زیاد تیوپ‌ها (بیش از ۵۰۰۰ عدد) در این نوع کندانسور، خارج شدن چند تیوب از چرخه خنک‌کنندگی، بی‌اهمیت خواهد بود. شکل ۹-۵۷، یک تیوب که الکترود مرجع (نقره/کلرید نقره) در آن قرار داده شده و مکان‌های پیشنهاد برای نصب آنها را در محفظه آب را نشان می‌دهد.



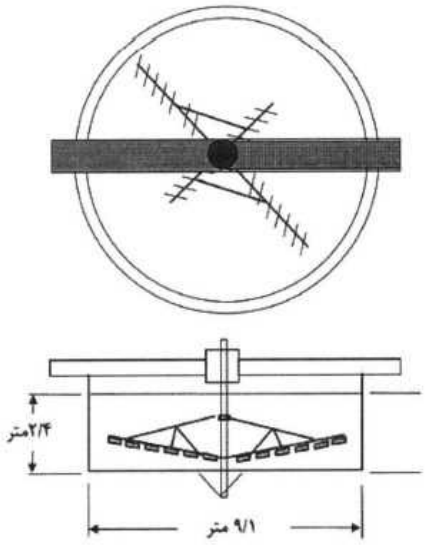
شکل ۹-۵۷ الکترود مرجع

غلیظ کننده کوچک/آندهای آلومینیم

سازه موجود - پوشش تا حدی محافظ

توصیف

شکل ۹-۵۸، یک غلیظ‌کننده کوچک را نشان می‌دهد که برای جدا کردن رسوب از جریان فرایند به کار می‌رود. این واحد شامل مخزن پلیمری با پوشش داخلی بتنی (قطر مخزن ۹/۱ متر (۳۰ فوت) و ارتفاع آن ۲/۴ متر (۸ فوت) است. غلیظ‌کننده، یک چنگک بلند و یک چنگک کوتاه از جنس فولاد کربنی با تیغه‌های چوبی دارد (شکل ۹-۵۹). بازوهای چنگک دارای پوشش هستند که در کنترل خوردگی کاملاً مؤثر نیست. مایع موجود در جریان فرایند شامل مقدار زیادی نمک با مقاومتی در حدود ۲۰ اهم سانتی‌متر است. هدف، طراحی یک سامانه حفاظت کاتدی با آند فداشونده برای کنترل خوردگی بازوهای چنگک است. طول عمر آندها باید در حدود ۳ سال باشد.



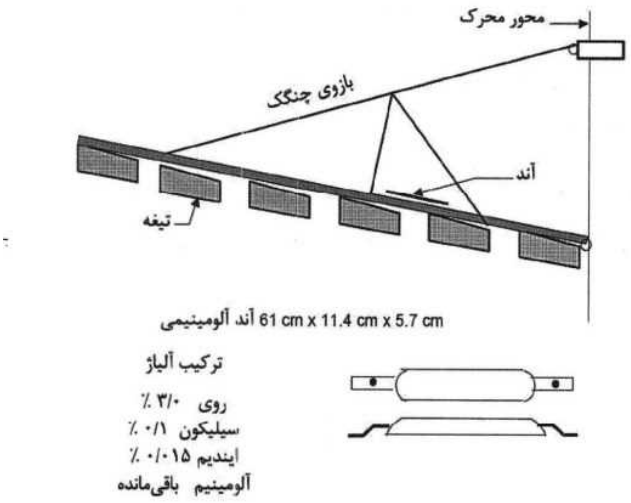
شکل ۹-۵۸ تغلیظ کننده

پارامترها

۱. کل مساحت قسمت‌های فولادی در بازوی چنگک بلند، بازوی چنگک کوتاه و بخش غوطه‌ور میل لنگ، ۹ مترمربع است.

۲. آزمون‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که برای حفاظت از فولاد تحت شرایط شار سیال در غلیظ‌کننده، نیاز به چنگال جریان ۲۵ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع است.

3 9 1



شکل ۹-۵۹ بازوی چنگک

آنالیز

از آنجایی که سطح داخلی مخزن با یک ماده دی‌الکتریک پوشش داده شده است، تنها اجزاء فلزی این واحد، بازوهای چنگک و میل‌لنگ است. با توجه به مقدار بالای نمک و مقاومت پایین محیط، پیشنهاد استفاده از آندهای آلومینیمی می‌شود. نسبت ظرفیت جریان (آمپر ساعت) به وزن آلیاژهای آلومینیم بالا بوده و به آسانی می‌توان آنها را بر روی بازوهای اصلی نصب کرد. اگر آندها دارای تسمه‌های فولادی برای پیچ و مهره کردن به بازوها باشند، می‌توان در طول عملیات تعمیر و نگهداری تغلیظ‌کننده، به سادگی آنها را تعویض کرد. آندهای نوع هال[۳] ۹/۳۴[۲] کیلوگرمی (۲۰ پوند) استاندارد باید کاملاً مناسب این تجهیز باشند. بازوی چنگک در نزدیکی آندها (± 1 متر) باید با یک اپوکسی مناسب یا ماده دی‌الکتریک دیگری پوشش داده شود تا پرتاب جریان آندها افزایش پیدا کند.

محاسبات

تخمین جریان مورد نیاز برای حفاظت

$$I_T = \mathrm{i}_c . \mathrm{A}_s$$

که i_c چگالی جریان تخمین زده شده (۲۵ × $۱۰^{-۶}$آمپر بر سانتی‌متر مربع) و $\mathrm{A_S}$ مساحت در معرض الکترولیت (۹ مترمربع (۹۰۰۰۰ سانتی‌مترمربع)) است، بنابراین:

$$I_T = 25 \times 10^{-6} \times 90000 = 2/25A$$

تخمین وزن آلومینیم مورد نیاز برای ۳ سال

$$\mathrm{W} = \frac{\mathrm{I.t}}{C_a . \mathrm{f}_u}$$

که I جریان مورد نیاز (۲/۲۵ آمپر)، t زمان سال یه ۲۶۲۸۰ ساعت، C_a ظرفیت جریان آلیاژ آلومینیم - ایندیم (۲۵۳۳ آمپر. ساعت/کیلوگرم) و f_u ضریب کاربری (۰/۸۵) است، بنابراین:

3 9 2

$$W = \frac{2/25 \times 26280}{2533 \times 0/85} = 27/5\text{kg}$$

تعداد آندهای ۹/۱ کیلوگرمی مورد نیاز برابر است با:

$$\text{N}=\frac{27/5}{9/1} = 3/02$$

برای ایجاد تقارن، از ۴ آند (یکی در هر بازو) استفاده می‌شود.

تخمین حداکثر جریان خروجی از آندها

مقاومت آندها نسبت به الکترولیت با توجه به رابطه دوایت برای یک آند افقی برابر است با:

$$R = \frac{0/005\rho}{\pi\text{L}}\left(ln\left(\frac{4L}{d}\right) + ln\left(\frac{L}{d}\right) - 2 + \frac{2h}{L}\right)$$

که ρ مقاومت الکترولیت (۲۰ اهم. سانتی‌متر)، L طول آند (۰/۶۱ متر)، d قطر تقریبی آند (۰/۸ متر) و h عمق تقریبی آند (۲ متر) است، بنابراین:

$$R = \frac{0/005 \times 20}{\pi \times 0/61}\left(ln\left(\frac{4 \times 0/61}{0/08}\right) + ln\left(\frac{0/61}{2}\right) - 2 + \frac{2 \times 2}{0/61}\right) = 0/35\text{ohm}$$

مقاومت کل این آندهای موازی (با نادیده گرفتن اثرات متقابل) برابر است با:

$$R_T = \frac{0/35}{4} = 0/089\text{ohm}$$

رابطه‌های دیگری نیز برای تخمین مقاومت آندهای کوچک در مخازن تولید وجود دارد؛ اما به دلیل هندسه محدود و توزیع عیوب پوشش، تمام آنها تقریبی از مقدار واقعی هستند.

تخمین کل جریان خروجی توسط قانون اهم

$$\text{I}=\frac{E}{R}$$

که E اختلاف پتانسیل گالوانیک اولیه بین آند و فولاد پلاریزه نشده (پتانسیل فولاد ۰/۵۵- ولت نسبت به الکترود مس/سولفات مس و پتانسیل آند ۱/۱۵- ولت نسبت به الکترود مس/سولفات مس فرض می‌شود، بنابراین E برابر با ۰/۶۰- ولت خواهد بود)، R مقاومت مدار (با نادیده گرفتن مقاومت بازوهای چنگک نسبت به الکترولیت، R برابر با ۰/۰۸۹ اهم) است، بنابراین I برابر با ۶/۷ آمپر خواهد بود. این جریان باعث پلاریزاسیون سریع فولاد خواهد شد. ازآنجاکه پتانسیل فولاد به پتانسیل آند نزدیک می‌شود (۱/۱۵- ولت)، جریان به میزان مورد نیاز برای حفظ پلاریزاسیون کاهش داده خواهد شد. در تجهیزات فرایندی، متغیرهای هندسی و عملیاتی بسیاری وجود دارد که می‌توانند بر عملکرد واقعی تأثیرگذار باشند. اکثر رابطه‌های کلی به کار رفته برای تخمین مقاومت‌ها، به دلیل هندسه تجهیز تا حدی خطا دارند. تمام سامانه‌ها باید پس از نصب، به طور کامل مورد ارزیابی قرار گیرند.

خلاصه

۱. مثالی از طراحی حفاظت کاتدی برای یک مخزن بزرگ ذخیره آب با مشخصه‌های زیر:

- پوشش محافظ با کارایی پایین
- آندهای اعمال جریان از جنس آهن سیلسیم‌دار
- سطوح بیضوی با لوله رایزر
- آرایه آندی اصلی، آرایه آندی stub و آند رایزر

۲. مثالی از طراحی حفاظت کاتدی برای مخزن‌های کوچک نگهداری آب دریا با آندهای جریان اعمالی از جنس نیوبیم پلاتینیزه شده.

۳. مثالی از طراحی حفاظت کاتدی برای محفظه‌های آب یک کندانسور بزرگ در یک واحد نیروگاهی. مشخصه‌های این طراحی در زیر آمده است:

- پوشش حفاظتی بر روی دیواره‌های محفظه آب فولادی.
- تیوب‌ها و تیوب شیت‌های تیتانیمی (در معرض تخریب توسط هیدروژن حاصل از حفاظت کاتدی)
- طراحی آندهای نوع میله‌ای برای ایجاد مقاومت در برابر تنش‌های مکانیکی ناشی از شار سیال
- منبع تغذیه با کنترل پتانسیل

۳. مثالی از طراحی حفاظت کاتدی برای یک غلیظ‌کننده با استفاده از آندهای فداشونده.

حفاظت کاتدی کشتی‌ها و شناورها

مبانی و الزامات حفاظت کاتدی شناورها

حفاظت کاتدی، یک روش الکتروشیمیایی است که برای واپایش خوردگی فلزات در محیط‌های آبی به کار برده می‌شود. در حقیقت، هدف از به کارگیری این روش از میان بردن نیروی محرکه خوردگی فلزات از طریق تأمین الکترون برای آنها و در نهایت کاهش پتانسیل‌شان تا حدود مشخص شده می‌باشد. حفاظت کاتدی اولین بار در سال ۱۸۲۴، توسط سر هامفری دیوی[۳۹۳] جهت واپایش خوردگی شناورهای نیروی دریایی سلطنتی بریتانیا به کار برده شد و امروزه نیز به‌صورت گسترده جهت جلوگیری از خوردگی بخش‌های مختلف شناورها استفاده می‌شود. ساده‌ترین روش اجرای حفاظت کاتدی از طریق اتصال الکتریکیِ بخشی که قرار است محافظت شود به یک تکه فلز فعال‌تر که با سهولت بیشتری در محیطی مشابه خورده می‌شود، حاصل می‌گردد. در این پیل الکتروشیمیایی، فلز فعال‌تر در نقش آند عمل می‌کند. پس از اتصال، فلز آندی به جای بخش مدنظر خورده شده و موجب حفاظت از آن می‌شود. اصطلاحاً، به این روش جلوگیری از خوردگی، «حفاظت کاتدی با آند فداشونده»[۳۹۴] گفته می‌شود. متداول‌ترین فلزات آندی، آلیاژهای پایه روی، پایه آلومینیم و پایه منیزیوم می‌باشد. البته، روش

3 9 3
3 9 4

دیگری نیز برای حفاظت کاتدی شناورها وجود دارد که به «حفاظت کاتدی با آند تزریق جریان»[۳۹۵] موسوم است. اصول این روش بر مبنای تشکیل یک پیل برق کافی استوار است. بدین معنی که جریان لازم برای حفاظت، به‌وسیله یک مولد جریان الکتریسیته مستقیم (DC) تولید شده و سپس توسط تعدادی آند غیرمصرفی به بخش مدنظر ارسال می‌گردد.
مطابق اهداف این کتاب، در این فصل به تشریح ماهیت الکتروشیمیاییِ حفاظت کاتدی با آند فداشونده پرداخته شده و سپس با ایجاد پیوندی میان مبانی نظری و عملی آن، چگونگی جلوگیری از خوردگی در شناورها بیان می‌شود.

تاریخچه حفاظت کاتدی شناورها

در سال ۱۸۲۴ میلادی، نیروی دریایی سلطنتی بریتانیا، «سر هامفری دیوی» را مسئول ارزیابی خوردگی روکش‌های مسی نصب شده روی بدنه‌های چوبی کشتی‌های متعلق به این نیرو نمود. نتایج اولیه بررسی‌ها نشان داد، خوردگی این روکش‌ها رابطه‌ای با ناخالص‌های موجود در آنها ندارد. در ادامه با ارزیابی محصولات خوردگی تشکیل شده رویِ سطح روکش‌های مسی مشخص شد، اکسیژن محلول در آب دریا عامل اصلی وقوع خوردگی می‌باشد. لذا، دیوی با تکیه بر تجربیات آزمایشگاهی پیشین خود در خصوص جلوگیری از اکسایش مس، پیشنهاد نمود با تشکیل یک پیل ولتایی[۳۹۶] از طریق اتصال روکش‌های مسی به فلزاتی چون قلع، روی یا آهن می‌توان از خوردگی این روکش‌ها به‌صورت مؤثری جلوگیری نمود. بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی رویِ فلزات روی و آهن درستی این پیشنهاد را به‌خوبی تأیید کرد و لذا در نهایت از آهن استفاده گردید. به این ترتیب می‌توان بیان نمود که اولین تجربه استفاده از سامانه حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده به سال ۱۸۲۴ میلادی برمی‌گردد. بااین‌حال، هرچند که فارادی در سال‌های ۱۸۳۳ و ۱۸۳۴ میلادی قوانین خود در برق‌کاف را معرفی کرد، پیشرفت چندانی در علم حفاظت کاتدی تا اواخر قرن ۱۹ میلادی حاصل نشد. از دلایل اصلی عدم این پیشرفت می‌توان به کاربرد محدود این روش حفاظتی و همچنین کیفیت نامناسب فلزات آندی در آن زمان اشاره داشت.

در اواخر قرن نوزدهم میلادی و با شروعِ عصر استفاده از آهن و فولاد در ساخت کشتی‌ها (به دلیل خواص مطلوب مکانیکی به اقتصادی بودن استفاده از آنها) خوردگی به‌عنوان عاملی مخرب برای آنها شناخته شد. تمرکز خوردگی‌ها بیشتر در پاشنه[۳۹۷] شناورها و در مجاورت پروانه‌ها بود. دلیل این امر تلاطم بالای آب دریا در این نواحی و همچنین وقوع خوردگی گالوانیک بین پروانه برنزی و بدنه فولادی تشخیص داده شد. جهت حل این مشکل آندهایی از جنس فلز روی در پاشنه شناورها و رویِ سکان‌های آنها نصب گردید. نتایج اولیه نصب آندها بسیار متناقض بود، زیرا در آن زمان درک درستی از نقش حیاتی درجه خلوص آندها بر کارایی آنها وجود نداشت. بنابراین، نیاز به استفاده از یک روش نوین حفاظتی احساس شد. در سال ۱۸۸۰ میلادی، ادیسون[۳۹۸] موفق به ابداع روش حفاظت کاتدی با آند تزریق جریان شد. وی برای حفاظت از بدنه فولادی یک کشتی، دو آند کربنی را رویِ بدنه آن نصب نمود و آنها را به‌وسیله دو سیم به ژنراتوری که در شناور تعبیه شده بود، متصل کرد.

3 [illegible] 9 5
3 [illegible] 9 6
3 [illegible] 9 7
3 [illegible] 9 8

علی‌رغم کارکرد نسبی این سامانه، به دلیل در دسترس نبودن منبع جریان مناسب و همچنین آندهای با کیفیت استفاده از آن تا سال‌های دهه ۱۹۵۰ میلادی به تعویق افتاد.

درست پیش از آغاز جنگ جهانی دوم، نیروی دریایی کانادا آزمایش‌های موفقی را روی فلز منیزیوم جهت استفاده به‌عنوان آند برای حفاظت از ناوشکن‌هایش[۳۹۹] انجام رساند.

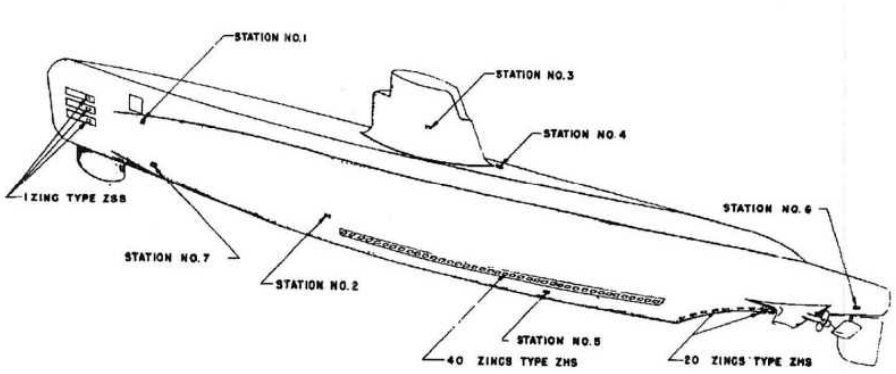
نتایج بررسی‌ها روی این آند نشان داد، به دلیل تولید بیش از حد گاز هیدروژن و هم‌چنین احتمال انفجار، امکان استفاده از آن در مخازن هم محموله و آب توازن شناورها وجود ندارد. لذا، تحقیقات بعدی بر تولید آندهای جدیدی از جنس فلزات روی و آلومینیم معطوف گردید. در حدود همین سال‌ها، تحقیقات مشابه در نیروی دریایی ایالات متحده منجر به تولید آندهای منیزیوم، آلومینیم و روی به ترتیب با کدهای استاندارد MIL - A - 21412، MIL - A - 24779 و MIL - A - 18001 گردید. امروزه از این آندها به‌صورت گسترده‌ای در حفاظت کاتدی شناورهای نظامی و غیرنظامی استفاده می‌شود.

به موازات توسعه آندهای فداشونده در دهه ۱۹۵۰ میلادی، جهت کاهش هزینه‌های مربوط به تعویض آندهای فداشونده، مجدداً موضوع حفاظت کاتدی بدنه بیرونی شناورها با استفاده از آندهای تزریق جریان در دستور کار قرار گرفت. در یکی از پروژه‌های اختصاص داده شده به این موضوع، آزمایش‌های مختلف، منتج به تولید آندی با زمینه نقره که دارای پوششی با ترکیب $\%10Pd + \%9Pt$ و با ضخامتی به اندازه ۰/۱۲۷ mm بود، گردید. با نصب این آند روی بدنه شناور و همچنین جایگذاری منبع تولید جریان درون شناور خوردگی به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. امروزه از سامانه حفاظت کاتدی با آند تزریق جریان به‌عنوان یک روش کارا در حفاظت از خوردگی بدنه بیرونی شناورهای نظامی و غیرنظامی استفاده می‌شود. باید توجه داشت که سابقه استفاده از سامانه‌های حفاظت کاتدی برای شناورهای نظامی به دلیل رعایت اصل حفاظت اطلاعات توسط کشورهای سازنده و به کار گیرنده به درستی مشخص نمی‌باشد. بااین‌حال، در مواردی محدود، اطلاعات مختصری در قالب گزارشات و مقالاتِ بدون طبقه‌بندی در دسترس می‌باشد. به‌عنوان نمونه در دو مقاله زیر به استفاده از سامانه حفاظت کاتدی در زیردریایی‌ها اشاره شده است:

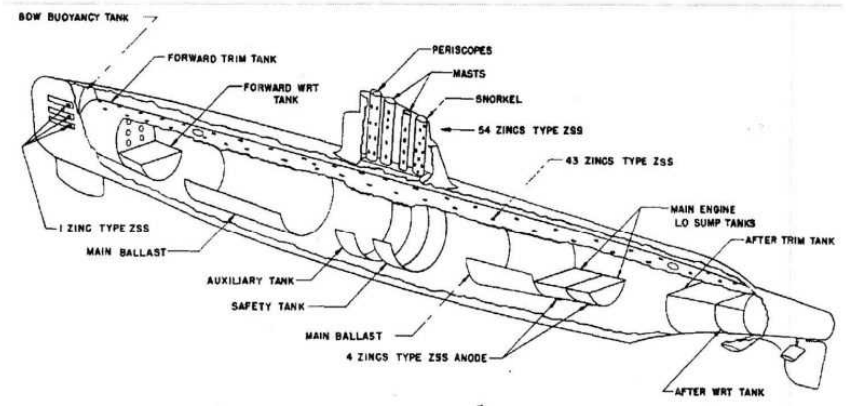
- Zinc Anode Cathodic Protection System on U.S. Submarine 'Wahoo'.

در این مقاله به بررسی وضعیت خوردگی بدنه بیرونی و سطوح درونی زیردریایی USS Wahoo (SS - 565) پس از ۲۷ ماه سرویس‌دهی و نقش آندهای فداشونده روی در اجتناب از خوردگی پرداخته شده است. نتایج نشان داد، آندهای روی نقش مؤثری در حفاظت از خوردگی داشته‌اند. همچنین در این مقاله به خوردگی شدید قسمت‌های مختلف زیردریاییِ USS Tang (SS-306) پس از ۱۳ ماه سرویس‌دهی که در آن از سامانه حفاظت کاتدی استفاده نشده بود، اشاره شده است. سال‌های به آب اندازی این دو شناور به ترتیب ۱۹۴۲ و ۱۹۴۳ می‌باشد. تاریخ انتشار این مقاله به سال ۱۹۶۰ برمی‌گردد. در شکل‌های ۹-۶۰ و ۹-۶۱ به ترتیب موقعیت نصب آندهای فداشونده روی بر سطوح بیرونی و داخلی زیردریایی USS Wahoo (SS - 565) نشان داده شده است.

3 9 9



شکل ۹-۶۰ موقعیت نصب آندها رویِ بدنه زیردریایی USS Wahoo (SS - 565)



شکل ۶۱-۹ موقعیت نصب آندهای فداشونده روی در سطوح درونی زیردریایی.(USS Wahoo (SS - 565

- An Impressed Current Cathodic Protection System Applied to a Submarine.

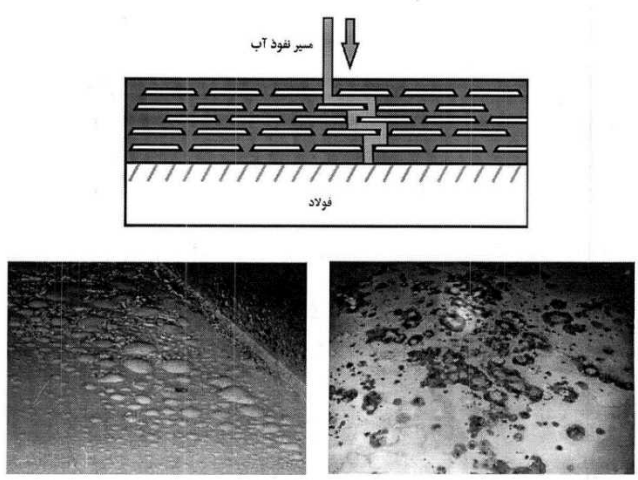
در این مقاله، به بررسی نتیجه نصبِ ۱۰ ماهه آندهای تزریق جریان بر خوردگی بدنه بیرونی یا یک زیردریایی پرداخته شده است. آندهای نصب شده دارای زمینه مسی با روکش پالادیوم و پلاتین بوده‌اند. پس از ورود شناور به حوضچه خشک مشاهده شد که بدنه شناور در وضعیت خوبی به سر می‌برد. تاریخ انتشار این مقاله به سال ۱۹۵۷ میلادی برمی‌گردد.

اهمیت استفاده از حفاظت کاتدی در شناورها

طرح موضوع

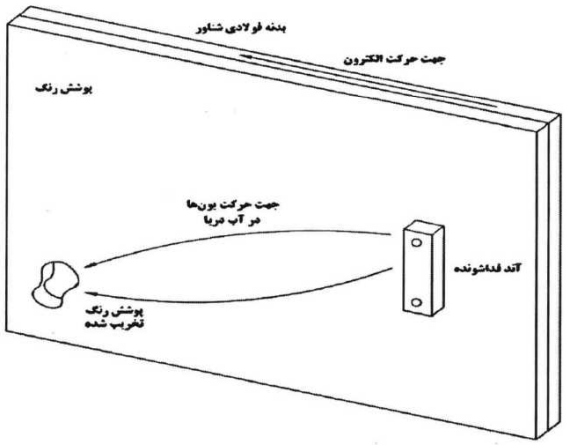
تمامی شناورها به دلیل سرویس‌دهی در یکی از خورنده‌ترین محیط‌های طبیعی یعنی آب دریا متحمل خسارت خوردگی شدیدی می‌شوند. شدت خوردگی از یک شناور تا شناور دیگر بسته به روش‌های اجتناب از خوردگی به کار رفته در آنها معتبر است. در هر صورت، این خسارات علاوه بر آنکه سبب افزایش قابل ملاحظه هزینه‌های مربوط به عملیات تعمیرات و نگهداری نگهداری شناورها می‌شود، افزایش خطرات ایمنی، افت کارایی شناورها و همچنین کاهش بازه زمانی تغییرات اساسی آنها را نیز به همراه دارد.

اساساً، اولین و کاربردی‌ترین روش اجتناب از خوردگی در شناورها، ایجاد یک حائل فیزیکی میان سطح فلز و برق کافه‌های خورنده نظیر آب دریا توسط عملیات رنگ‌آمیزی است. بااین‌حال، باید توجه داشت که جدای از خسارت مکانیکی وارد بر رنگ‌ها در حین شرایط کاری، خاصیت نفوذپذیری برق‌کاف‌ها به درون آنها سبب تماس مجدد سطح فلز با برق‌کاف‌های خورنده می‌شود. این بدین معنا است که حتی با وجود عملیات رنگ‌آمیزی، همچنان امکان وقوع خورندگی برای اجزا شناورها وجود دارد (شکل ۹-۶۲).



شکل ۹-۶۲ مراحل تخریب یک سالم. (بالا) نفوذ برق‌کاف از طریق ریز مسیرهای موجود در رنگ. (پایین - چپ) ایجاد تاول به دلیل تجمع برق‌کاف. (پایین - راست) تخریب تاول و ایجاد خوردگی برای فلز

با توجه به آنکه در حین شرایط کاری، امکان اصلاح و تعمیر رنگ‌های آسیب دیده وجود ندارد، لازم است جهت حفاظت در برابر خوردگی، تمهید حفاظتی دیگری نیز در نظر گرفته شود. بررسی‌های آزمایشگاهی و تجربیات میدانی نشان داده که کارآمدترین روش جهت رفع این نقیصه استفاده از سامانه حفاظت کاتدی می‌باشد. همچنان‌که در ادامه این بخش گفته خواهد شد، رنگ‌ها نیز متقابلاً سبب افزایش کارایی سامانه حفاظت کاتدی می‌شوند. بنابراین، می‌توان گفت که این دو روش حفاظتی مکمل یکدیگر هستند. با مشاهده شکل ۹-۶۳ می‌توان دید، به هنگام تخریب لایه رنگ موجود روی سطح فولاد، سامانه حفاظت کاتدی از طریق ارسال جریان الکتریکی به منطقه آسیب دیده وارد عمل شده و از خوردگی آن در برابر آب دریا جلوگیری می‌کند.



شکل ۹-۶۳ نحوه عملکرد سامانه حفاظت کاتدی رویِ سطح فولادی رنگ شده در منطقه آسیب دیده

ملاحظات اقتصادی

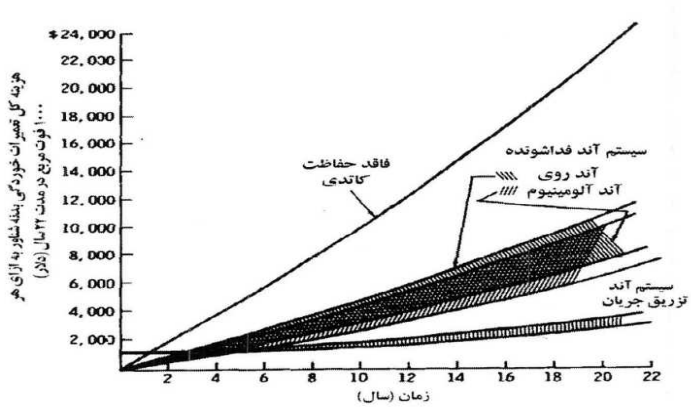
بدون شک، بخش اعظم خسارات وارد به شناورهای دریایی ناشی از پدیده خوردگی است که به موجب آن زیان‌های مالی مستقیم و غیرمستقیمِ قابل توجهی به مالکان شناورها تحمیل می‌گردد. به طور کلی، بررسی‌ها نشان می‌دهد در حدود ٪۹۰ خسارات وارد بر بدنه شناورها در اثر پدیده خوردگی ایجاد می‌شود. هزینه سالانه خوردگی در بخش حمل و نقل دریایی ایالت متحده، در حدودِ ۲/۷ میلیارد دلار تخمین زده شده که از این میان، ۱/۱۲ میلیارد دلار آن مربوط به تجهیز شناورهای نوساز به سامانه‌های ضدخوردگی، ۸۱۰ میلیون دلار آن مربوط به عملیات تعمیر و نگهداری و ۷۸۵ میلیون دلار آن مربوط به سایر موارد است.

در سال ۱۹۷۱ میلادی توسط «واحد مهندسی نیروی دریایی ایالات متحده»[۴] تحقیقی جامع درباره کاهش هزینه‌های خوردگی بدنه‌های بیرونی ناوشکن‌های[۱] این نیرو به انجام رسید. این تحقیق در سه مرحله زیر انجام شد:

۱. ارزیابی هزینه‌ها تنها به هنگام وجود پوشش رنگ رویِ بدنه‌ها.
۲. ارزیابی هزینه‌ها به هنگام نصب سامانه حفاظت کاتدی با آند فداشونده (روی، آلومینیم و منیزیوم) به همراه پوشش رنگ.
۳. ارزیابی هزینه‌ها به هنگام نصب سامانه حفاظت کاتدی با آند تزریق جریان به همراه پوشش رنگ.

نتایج مربوط به این تحقیق در شکل ۹-۶۴ آورده شده است. مطابق شکل دیده می‌شود، در میان مدت (۱۲ سال) در اثر استفاده از سامانه حفاظت کاتدی با آند فداشونده و آندهای تزریق جریان به ترتیب به طور متوسط از هزینه‌های خوردگی در حدود ٪۶۰ و ٪۸۰ کاسته شده است. این در حالی است که این کاهش هزینه در انتهای زمان مطالعه (۲۲ سال) برای سامانه آند فداشونده تقریباً همان ٪۶۰ و برای سامانه آند تزریق جریان در حدود ٪۹۰ می‌باشد.

4 0 0
4 0 1



شکل ۹-۶۴ کاهش هزینه تعمیرات خوردگی به هنگام کاربرد سامانه‌های حفاظت کاتدی

مناطق نیازمند حفاظت کاتدی

همان‌طور که می‌دانیم، هدف از حفاظت کاتدی شناورها، تأمین جریان حفاظت کافی برای مناطق مختلف آن می‌باشد که در تماس با برق‌کاف‌های خورنده هستند. از دیدگاه طراحی، حفاظت کاتدی هریک از این مناطق، وابسته به جنس فلز به کار رفته در ساخت آنها، وجود و یا عدم وجود پوشش رنگ، شرایط سرویس‌دهی و مواردی از این دست دارای الزامات مختص به خود هستند. بدین منظور شناسایی و تفکیک هریک از این مناطق نقش بسیار مهمی در طراحی صحیح و بهینه سامانه‌های حفاظت کاتدی شناورها را دارا می‌باشد. مستقل از نوع هر شناور، تشابه به نسبت زیادی میان مناطق نیازمند به حفاظت کاتدی آنها وجود دارد. به‌عنوان مثال، تمامی آنها دارای یک بدنه بیرونی[۲] هستند که فضای داخل شناور را از آب دریاها جدا می‌کند. البته، در برخی شناورها نظیر بعضی از انواع زیردریایی‌ها و قریب به اتفاق تانکرهای حمل نفت و حمل محموله‌بُنه[۳] اصلی شناور درون یک بدنه کاذب قرار می‌گیرد از فضای میان آنها توسط برق‌کاف‌هایی نظیر آب دریا و یا سوخت پر می‌شود. اصطلاحاً به این شناورها، شناورهای دو جداره یا دو پوسته[۴] گفته می‌شود.

در شناورهای سطحی، سیچست‌ها[۵] مدخل ورودی آب دریا به درون سامانه‌های تأسیساتی هستند. در زیردریایی‌ها، سطوح داخلی عرشه[۶] و برجک[۷] کلیه اقلام موجود در آنها و دکل‌های اسنورکل[۸] پریسکوپ[۹] و مخابراتی نیز شامل مناطق نیازمند حفاظت کاتدی می‌باشند. تمامی شناورها جهت حرکت در آب دریا نیازمند پروانه[۱۰] و سکان[۱۱] می‌باشند. علاوه بر آن در زیردریایی‌ها بالک‌ها[۱۲] و پایدارسازها[۱۳] نیز از اجزای سامانه‌های پیشران تلقی می‌شوند.

4	0	2
4	0	3
4	0	4
4	0	5
4	0	6
4	0	7
4	0	8
4	0	9
4	1	0
4	1	1
4	1	2
4	1	3

عامل اصلی ایجاد تعامل برای کلیه شناورها وجود مخازن آب توازن[۴۱۴] آنها است که معمولاً حاوی آب دریا می‌باشند. در زیردریایی‌ها مخازن آب توازن علاوه وظیفه ایجاد تعادل، ابزاری برای انجام عملیات‌های غوص و صعود می‌باشند. همچنین در زیردریایی‌ها جهت حفظ تعادل طولی، از مخازن تریم[۴۱۵] بهره گرفته می‌شود. در تمامی شناورها جهت مصارف خدمه، مخازن آب شیرین وجود دارد. خن‌ها[۴۱۶] جزء لاینفک تمامی شناورها هستند. در زیردریایی‌ها، لوله‌های اژدر[۴۱۷] و مخازن جبران آنها نیازمند حفاظت کاتدی می‌باشند. در کلیه شناورها، مخازن فاضلاب وجود دارد. سامانه‌های تأسیساتی به‌ویژه مبدل‌های حرارتی با توجه به شرایط کاری‌شان مستعد به خوردگی هستند. مخازن سوخت و حمل محموله جایگزین شونده با آب دریا باید در طراحی سامانه حفاظت کاتدی لحاظ شوند. به طور کلی، برخی از مهم‌ترین انواع شناورهای نیازمند حفاظت کاتدی عبارتند از:

۱. کشتی‌های مسافربری.[۴۱۸]
۲. شناورهای حمل بار.[۴۱۹]
۳. شناورهای صیادی.[۴۲۰]
۴. شناورهای خط ساحلی.[۴۲۱]
۵. قایق‌های تفریحی.[۴۲۲]
۶. نفتکش‌ها.[۴۲۳]
۷. بارج‌ها.[۴۲۴]
۸. یدک‌کش‌ها.[۴۲۵]
۹. شناورهای لای‌روب.[۴۲۶]
۱۰. شناورهای سطحی نظامی.[۴۲۷]
۱۱. شناورهای زیر سطحی نظامی (زیر دریایی‌ها).[۴۲۸]

در زیر برخی از مهم‌ترین مناطق نیازمند حفاظت کاتدی در شناورها به تفکیک بیان شده است:

4	[illegible]	1	4
4	[illegible]	1	5
4	[illegible]	1	6
4	[illegible]	1	7
4	[illegible]	1	8
4	[illegible]	1	9
4	[illegible]	2	0
4	[illegible]	2	1
4	[illegible]	2	2
4	[illegible]	2	3
4	[illegible]	2	4
4	[illegible]	2	5
4	[illegible]	2	6
4	[illegible]	2	7
4	[illegible]	2	8

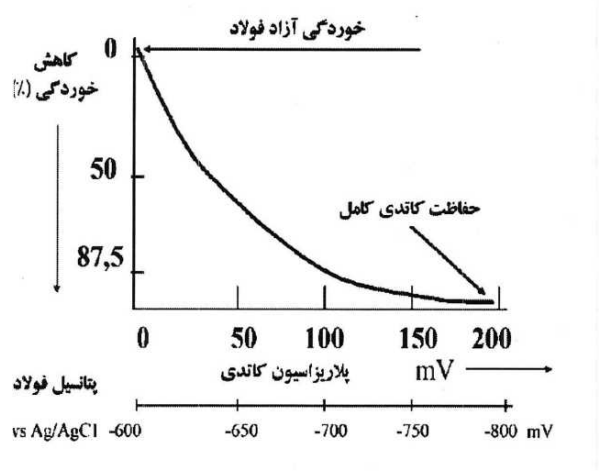
۱. بدنه شناورها در زیر خط آبخور[۴۲۹] و متعلقات آنها مانند پروانه‌ها[۴۳۰] و شافت‌ها[۴۳۱]، سطوح بیرونی سکان‌ها[۴۳۲] و بالک‌ها[۴۳۳]، سیچست‌ها[۴۳۴]، کانال تراستر[۴۳۵]، غلاف پروانه[۴۳۶] و غیره.
۲. سطوح داخلی عرشه[۴۳۷] و برجک[۴۳۸] و اقلام موجود در آنها (زیر دریایی‌ها).
۳. مخازن آب توازن تمیز.[۴۳۹]
۴. مخازن محموله[۴۴۰] و مخازن آب توازن کثیف.[۴۴۱]
۵. مخازن جانبی بالایی و پایینی.[۴۴۲]
۶. مخازن تریم.[۴۴۳]
۷. مخازن رأس جلویی و عقبی کشتی‌ها.[۴۴۴]
۸. مخازن سوخت[۴۴۵] جایگزین شونده با آب.
۹. چاهک‌های خن[۴۴۶] و مخازن جمع‌آوری خن.[۴۴۷]
۱۰. مخازن فاضلاب.[۴۴۸]
۱۱. مخازن آب شرب[۴۴۹] و مخازن آب بهداشتی.[۴۵۰]
۱۲. سطوح آبگیر آزاد.[۴۵۱]
۱۳. سامانه‌های تأسیساتی شامل مبدل‌های حرارتی.[۴۵۲]
۱۴. مخازن موجود بین فضایِ دوجداره شناورهای دو پوسته.[۴۵۳]

4	[illegible]	2	9
4	[illegible]	3	0
4	[illegible]	3	1
4	[illegible]	3	2
4	[illegible]	3	3
4	[illegible]	3	4
4	[illegible]	3	5
4	[illegible]	3	6
4	[illegible]	3	7
4	[illegible]	3	8
4	[illegible]	3	9
4	[illegible]	4	0
4	[illegible]	4	1
4	[illegible]	4	2
4	[illegible]	4	3
4	[illegible]	4	4
4	[illegible]	4	5
4	[illegible]	4	6
4	[illegible]	4	7
4	[illegible]	4	8
4	[illegible]	4	9
4	[illegible]	5	0
4	[illegible]	5	1
4	[illegible]	5	2
4	[illegible]	5	3

معیارهای حفاظت کاتدی

پتانسیل حفاظت

هدف از حفاظت کاتدی شناورها کاهش پتانسیل آنها از طریق تأمین جریان حفاظت می‌باشد. همان‌طور که بیان شد، با کاهش پتانسیل فلز از پتانسیل خوردگی(E_{corr}) ، سرعت خوردگی به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و به گونه‌ای که نهایتاً در یک پتانسیل مشخص صفر می‌شود. تجربه نشان داده برای کلیه فلزات در آب دریا، کاهش پتانسیل به اندازه ۲۰۰ mV نسبت به پتانسیل خوردگی شرایط حفاظتی مناسبی را فراهم می‌آورد. در شکل ۹-۶۵ این موضوع برای فولاد نشان داده شده است. تنها استثنا آلیاژهای آلومینیم هستند که ایجاد افت پتانسیلی به اندازه ۱۰۰ mV موجب حفاظت کاتدی بهینه آنها می‌شود.



شکل ۹-۶۵ درصد کاهش خوردگی فولاد در آب دریای جاری تحت تأثیر کاهش پتانسیل آن

اصولاً، پتانسیل خوردگی فلزات در آب دریا با تغییر ترکیب آن، دما، غلظت اکسیژن محلول، سرعت حرکت، فعالیت‌های زیستی و غیره دستخوش تغییر می‌شود و شاید این‌گونه به نظر برسد که نمی‌توان پتانسیل مشخصی را جهت حفاظت کاتدی مناسب آنها در نظر گرفت. خوشبختانه در مراجع مختلف، جداول راهنمایی با تکیه بر تجارب آزمایشگاهی و میدانی تدوین شده‌اند که به کمک آنها می‌توان پتانسیل‌هایی را برای حفاظت فلزات به کار رفته در ساخت شناورها استخراج نمود. در جدول ۹-۱۶ بازه‌های پتانسیل حفاظت برای فلزات به کار رفته در ساخت شناورها مطابق با استاندارد ISO 20313 آورده شده است. باید توجه داشت، پتانسیل‌های مورد اشاره در این جدول تنها به پتانسیل حاصل از قطبش فلز، بدون احتساب افت ولتاژ اهمی ناشی از مقاومت برق‌کاف، لایه‌های تشکیل شده رویِ سطح آن و غیره اشاره دارد. همچنین، این پتانسیل به «پتانسیل لحظه خاموش»[۴۵۴] نیز معروف می‌باشد. برای سامانه آند فداشونده، مقدار افت ولتاژ اهمی ناچیز است. البته، مقدار این افت ولتاژ در برق‌کاف‌های با مقاومت الکتریکی ویژه بالا نظیر آب‌های شیرین و همچنین برای سامانه آندهای سامانه تزریق جریان، قابل ملاحظه بوده و لازم است جهت تعیین مقدار واقعی قطبش فلز، تمهیدات خاصی نظیر استفاده از «کوپن پرتابل»[۴۵۵] در نظر گرفته شود. در هر صورت باید توجه داشت، حدود پتانسیل ارائه شده در جدول ۹-۱۶ یک نسخه قطعی و نهایی نیست. یک مثال

4 [illegible] 5 4
4 [illegible] 5 5

نقص در این مورد، مربوط به فولاد HSLA - 100 است که دارای استحکام تسلیم $690Mpa >$ می‌باشد. مطابق این جدول، حداکثر پتانسیل منفی برای حفاظت از این فولاد ۹۵۰ mV- نسبت به الکترود مرجع Ag/AgCL(seawater) است؛ اما، بررسی‌ها روی آن نشان می‌دهد که حتی تا پتانسیل ۱۵۰۰Ag/AgCL (seawater)- نیز دچار HIC نمی‌شود. این فولاد، به‌صورت گسترده توسط نیروی دریایی ایالات متحده در ساخت انواع شناورهای این نیرو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۹-۱۶ میزان پتانسیل حفاظت برای فلزات مختلف به کار رفته در ساخت شناورها

فلز		پتانسیل حفاظت [illegible]	
		[illegible]	[illegible]
فولادهای کربن- منگنز و فولادهای کم آلیاژ با استحکام تسلیم ($550Mpa <$)	محیط هوازی محیط بی‌هوازی و دمای ($60°C <$)	۸۰۰- ۹۰۰- [illegible]	۱۱۰۰- ۱۱۰۰- [illegible]
فولادهای کم‌آلیاژ پر استحکام[496] ($550Mpa <$)		۸۰۰-	۸۳۰- تا ۹۵۰- (نکته اول)
آلیاژهای آلومینیم [illegible] و [illegible]		۸۰۰- (تغییر پتانسیل منفی به اندازه [illegible] ۱۰۰)	۱۱۰۰-
فولادهای زنگ نزن آستنیتی یا آلیاژهای پایه نیکل حاوی کروم و یا مولیبدن	$PREN^2 \geq 40$ $PREN \geq 40$	۳۰۰- ۵۰۰- (نکته دوم)	برای ساختار آستنیتی کامل بدون محدودیت (برای سایر نکته سوم دیده شود)
فولادهای زنگ نزن دو فازی و مارتنزیتی		۵۰۰- (نکته دوم)	نکته سوم
آلیاژهای پایه مس	فاقد آلومینیم حاوی آلومینیم	۴۵۰- تا ۶۰۰- ۴۵۰- تا ۶۰۰-	محدودیت ندارد ۱۱۰۰-
نیکل- آلومینیم- برنز ([illegible])		۵۰۰-	نکته چهارم

نکته اول: برای فولادهای کم آلیاژ پر استحکام، حداقل پتانسیل منفی حفاظت باید توسط آزمون‌هایی نظیر آزمون نرخ کرنش آهسته[497] (SSRT) تعیین شود، زیرا تخطی از این پتانسیل با توجه به ساختار متالوژیکی و خواص مکانیکی آنها می‌تواند منجر به وقوع پدیده ترک خوردن ناشی از هیدروژن[498] (HIC) گردد.

---

496 [illegible]
497 [illegible]
498 [illegible]

نکته دوم: برای اغلب کاربردها این مقادیر پتانسیل می‌توانند از وقوع خوردگی شیاری جلوگیری به عمل آورند، هرچند در صورت در دسترس بودن اسناد معتبر می‌توان پتانسیل‌های مثبت‌تری را در نظر گرفت.

نکته سوم: وابسته به ساختار متالورژیک این آلیاژها می‌توانند به HIC حساس باشند، ازاین‌رو، باید از اعمال پتانسیل‌های منفی‌تر به آنها اجتناب نمود.

نکته چهارم: آلیاژهای پر استحکام نیکل - مس و نیکل - کروم - آهن می‌توانند مستعد به HIC باشند، ازاین‌رو، باید از پتانسیل‌هایی که موجب تشدید آزاد شدن گاز هیدروژن می‌شوند اجتناب نمود.

حفاظت بیش از حد

قطبش کاتدی بیش از اندازه فلزات در آب دریا می‌تواند عاملی برای وقوع پدیده «حفاظت بیش ازحد» باشد. اساساً، وقوع این پدیده به دلایل زیر مطلوب نیست:

۱. غیر اقتصادی بودن آن.
۲. وقوع پدیده «جدایش کاتدی»[۴۵۹] برای پوشش رنگ.
۳. وقوع پدیده HIC .

مطابق ترمودینامیک خوردگی، واکنش احیای آب که مسئول تولید و آزاد شدن گاز هیدروژن است در پتانسیل‌های < -900 mV vs Ag/AgCl (seawater) به‌شدت فعال شده و کاهش هرچه بیشتر پتانسیل منجر به تسریع در آزاد شدن این گاز می‌گردد. این کاهش پتانسیل به دلیل تخطی از مقادیر مجاز، نه تنها به لحاظ اقتصادی سودمند نیست (به دلیل سریع‌تر مصرف شدن آندهای فداشونده و استهلاک بیشتر آندهای تزریق جریان)، بلکه همچنین می‌تواند آثار مخربی را که در زیر به آنها اشاره می‌شود با خود به همراه داشته باشد.

با وجود آنکه کاربرد هم‌زمان پوشش رنگ و سامانه حفاظت کاتدی، ترکیبی ایدئال جهت اجتناب از خوردگی فلزات است، مشخص شده طراحی غیرصحیح این سامانه از طریق ایجاد پتانسیل‌های به‌شدت منفی می‌تواند به تخریب زودرس پوشش رنگ منجر گردد. اصطلاحاً، به این نوع تخریب، «جدایش کاتدی» گفته می‌شود. این تخریب در اثر تشکیل گاز هیدروژن و تولید یون‌های هیدروکسیل رویِ سطح فلز رنگ شده رخ می‌دهد. در حقیقت، گاز هیدروژن از طریق تجمع در فضاهای موجود در فصل مشترک فلز - رنگ، موجود موجب تاول زدگی و جدایش رنگ از روی سطح فلز می‌شود. از طرف دیگر، نرم شدن و صابونی شدن رنگ به دلیل وجود یون‌های هیدروکسیل بر شدت این تخریب می‌افزاید. باید توجه داشت، در حفاظت کاتدی با آند تزریق جریان و همچنین آند فداشونده منیزیوم، شرایط را برای وقوع پدیده جدایش کاتدی مساعدتر است. هرچند امروزه در رنگ‌آمیزی شناورها از رنگ‌هایی نوین و اغلب بر پایه رزین‌های اصلاح شده اپوکسی استفاده می‌شود که توانایی استقامت در برابر پتانسیل‌های کاتدی تا حدود ۱۵۰۰- mV vs Ag/AgCl (seawater) را دارا هستند، کماکان رعایت الزامات ویژه در خصوص اجتناب از آسیب‌دیدگی احتمالی این رنگ‌ها ضروری است. سه روش متداول جهت اجتناب از این پدیده مخرب عبارت است از:

4 [redacted] 5 9

۱. طراحی صحیح سامانه حفاظت کاتدی به منظور اجتناب از پدیده حفاظت بیش از حد.
۲. رعایت فاصله مناسب بین آند و از سازه حفاظت.
۳. استفاده از پوشش‌های عایق نظیر پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف شیشه،[۴۶۰]پلاستیک‌های پیش ساخته[۴۶۱]و یا ورق‌های الاستومری[۴۶۲] مجاورت آندهای نصب شده رویِ سازه تحت حفاظت.

اصولاً، شناورها علاوه بر دارا بودن تنش‌های باقیمانده[۴۶۳] ساختار خود به دلیل فرایند ساخت، در شرایط سرویس‌دهی نیز در معرض طیف گسترده‌ای از بارها و تنش‌های دینامیک مانند ضربات حاصل از امواج، لرزش، سایش، انبساط و انقباض حرارتی، بارگیری و تخلیه محموله، فرود و برخاستن هلیکوپتر و هواپیما و همچنین ضربات حاصل به هنگام شلیک سلاح قرار می‌گیرند که این امر استفاده از فلزات پر استحکام را در ساخت آنها اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. مهم‌ترینِ فلزات به کار رفته در ساخت شناورها شامل انواع فولادها، فولادهای زنگ نزن، آلیاژهای آلومینیم و آلیاژ نیکل - آلومینیم - برنز (NAB) هستند. در این میان، فولادها به‌عنوان پر مصرف‌ترین فلز مهندسی در ساخت انواع شناورهای دریایی محسوب می‌شوند. برخی از مهم‌ترین دلایل انتخاب فولادها در ساخت شناورها عبارتند از:

۱. استحکام تسلیم کافی.
۲. چقرمگی[۴۶۴] بالا.
۳. مقاومت در برابر تغییر شکل در نرخ‌های کرنش زیاد.[۴۶۵]
۴. مقاومت به خوردگی مناسب حساسیت اندک به خوردگی تنشی.
۵. استحکام خستگی[۴۶۶] مناسب.
۶. قابلیت شکل‌پذیری در فرایند ساخت و سرهم کردن کاری شناور.
۷. قابلیت جوش‌پذیری عالی.
۸. در دسترس بودن.
۹. مقرون‌به‌صرفه بودن.

انواع مختلفی از فولادها جهت ساخت شناورها در دسترس هستند. برخی از آنها عبارتند از:

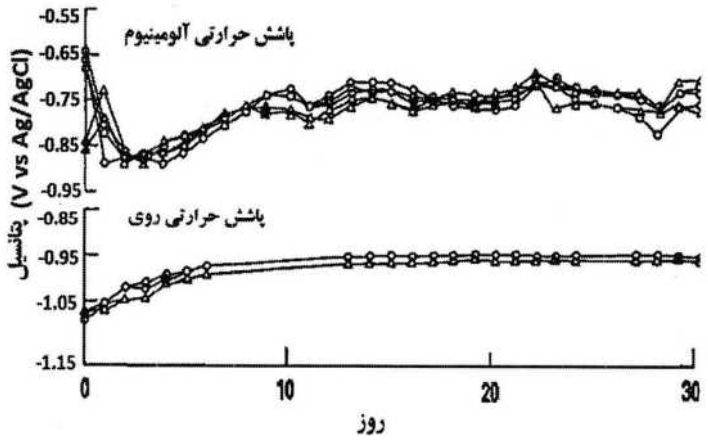
۱. فولادهای با استحکام متوسط (استحکام تسلیم $\geq 235Mpa$ و استحکام کششی[۴۶۷] ۴۰۰ – ۵۲۰ Mpa) مانند GL-A، GL-B، GL-D، GL-E.
۲. فولادهای با استحکام بالا (استحکام تسلیم ۳۱۵ – ۳۹۰ Mpa و استحکام کششی ۴۴۰ – ۶۶۰ Mpa) مانند GL-A32، GL-D32، GL-E32، GL-F32، GL-A36، GL-D36، GL-E36، GL-F36، GL-A40، GL-D40، GL-E40 و GL-F40.

4	[illegible]	6	0
4	[illegible]	6	1
4	[illegible]	6	2
4	[illegible]	6	3
4	. Toughness	6	4
4	[illegible]	6	5
4	[illegible]	6	6
4	[illegible]	6	7

۳. فولادهای با استحکام بسیار بالا که عمدتاً دارای کاربردهای نظامی هستند (استحکام تسلیم $\geq$ 550Mpa)مانند (GL-M550) HY-80، (GL-M700) HY-100، (GL-M900) HY-130، HSLA 80، HSLSA 100، Q1 (navy)، Q2 (navy)، ASTAM A517 و غیره.

همان‌طور که گفته شد، پدیده HIC ، مشکلی اساسی برای فولادهای با استحکام تسلیم $\geq$550Mpa می‌باشد. اساساً، برای فولادهای با استحکام تسلیم کمتر از این مقدار حساسیت به HIC وجود نداشته و با اطمینان می‌توان آنها را تا پتانسیل (seawatr) ۱۱۰۰ mv VS Ag/AgCl- به‌صورت کاتدی قطبی نمود. برای فولادهای با استحکام تسلیم بیشتر از ۵۵۰ Mpa جهت اجتناب از پدیده HIC می‌توان پتانسیل‌های نجیب‌تر از (seawater) ۸۵۰ mv VS Ag/AgCl- را در نظر گرفت که در این میان پتانسیل ۸۳۰ mV- انتخابی خوب و مناسب تلقی می‌شود. برای فولادهای با استحکام‌های تسلیم بیشتر از ۶۹۰ Mpa، پتانسیل‌های (seawater) ۸۳۰ mv VS Ag/AgCl- تا ۷۷۰- توصیه شده است و در نهایت برای فولادهای با استحکام تسلیم بیشتر از ۸۰۰ Mpa پتانسیل حفاظت در هر صورت نباید منفی‌تر از (seawater) ۸۰۰ mv VS Ag/AgCl- باشد.

علاوه بر سامانه‌های آند فداشونده و تزریق جریان از پوشش‌های فلزی نیز به‌صورت گسترده‌ای برای حفاظت از فولاد به کار رفته در ساخت شناورها استفاده می‌شود. در اکثر کاربردها، این پوشش‌ها از جنس فلزات آلومینیم و روی انتخاب می‌شوند. در شرایط کاری، پتانسیل این پوشش‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی تغییر می‌کند. به‌عنوان مثال، در شکل ۹-۶۶ نمونه‌ای از تغییرات پتانسیل خوردگی دو پوشش فلزی آلومینیم و روی که بر سطح یک فولاد لایه نشانی شده‌اند، نشان داده شده است.



شکل ۹-۶۶ تغییرات پتانسیل پوشش فلز آلومینیم و روی بر سطح فولاد در آب دریا

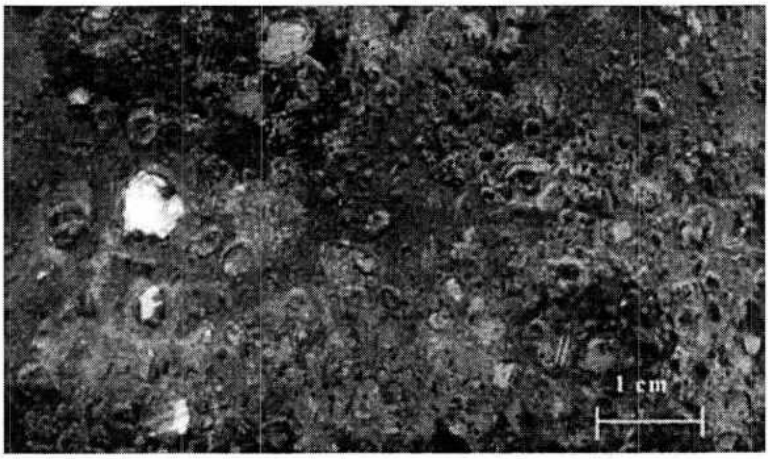
همان‌طور که دیده می‌شود، برای پوشش آلومینیم، پتانسیل خوردگی پس از گذشت ۱۰ روز تقریباً در مقدار (seawater) mv VS Ag/AgCl -750 ± 50 ثابت شده است. البته، کماکان پس از این زمان، نوساناتی در پتانسیل خوردگی این پوشش وجود دارد که آن را می‌توان به تشکیل و تخریب لایه‌های اکسیدی محافظ نسبت داد. در مورد پوشش فلز روی، پایدار شدن پتانسیل خوردگی درست پس از گذشت چند روز حاصل می‌شود. پتانسیل خوردگی این پوشش تقریباً دارای مقدار (seawater) mv VS Ag/AgCl -950 ± 50 می‌باشد. به طور کلی، نجیب‌تر بودن پتانسیل خوردگی پوشش فلز آلومینیم

در مقایسه با پوشش فلز روی را می‌توان به استعداد ذاتی آن به تشکیل و رشد لایه اکسیدی غیرفعال نسبت داد و این در حالی است که پوشش فلز روی فاقد چنین استعدادی ذاتی است.

در شکل ۹-۶۷ تصویری از یک ورق فولادی با کد ASTM A517 (با استحکام تسلیم حداقل از Mpa ۶۹۰) که یک طرف آن دارای پوشش فلز آلومینیم و طرف دیگر آن دارای پوشش رنگ بوده پس از شش ماه غوطه‌وری در آب خلیج فارس نشان داده شده است. پس از خروج این ورق از آب مشاهده گردید، پوشش رنگ در مقیاسی گسترده دچار تاول زدگی شده است. با بررسی‌های بعدی مشخص شد، آزاد شدن گاز هیدروژن ناشی از فعل و انفعالات فلز آلومینیم با آب دریا مسئول این تاول زدگی می‌باشد. در حقیقت، این موضوع نشان‌دهنده استعداد بالای این‌گونه از پوشش‌ها به تولید گاز هیدروژن است که می‌توانند شرایط را برای وقوع HIC فولادهای پر استحکام فراهم آورند.

به طور کلی، در کاربردهای مربوط به شناورهای دریایی (به‌ویژه شناورهای نظامی) ممنوعیت‌هایی جهت استفاده از پوشش‌های فلزی وجود دارد، که برخی از مهم‌ترین آنها عبارت است از:

۱. این پوشش‌ها نباید روی سطح فولاد با استحکام تسلیم $827/4Mpa <$ اجرا شوند.
۲. این پوشش‌ها نباید روی بدنه زیر خط آب شناورهای فولادی اجرا شوند.
۳. این پوشش‌ها نباید روی منطقه جوشکاری شده تا ۲۰ mm اطراف آن اجرا شوند.



شکل ۹-۶۷ تاول زدگی رنگ پشت یک نمونه فولادی در اثر خوردگی پوشش فلز آلومینیم پس از شش ماه غوطه‌وری در خلیج فارس

در هر صورت، چنانچه به هنگام طراحی سامانه حفاظت کاتدی نیاز به اطلاعات دقیق به میزان حساسیت یک فولاد مشخص به HIC وجود داشته باشد، از طریق انجام دو آزمون زیر می‌توان نسبت به تعیین این حساسیت اقدام کرد:

۱. آزمون نرخ کرنش آهسته (SSRT[۴۶۸]) مطابق با استانداردهای ISO 7539-7 و Def Stan 02-874 .
۲. آزمون تیر یک سر درگیر با بار ثابت[۴۶۹] مطابق با استانداردهای ISO 12108 و Def Stan 02-874 .

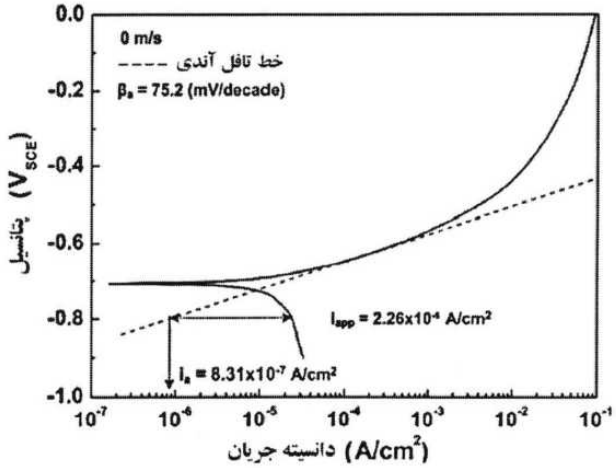
4 6 8
4 6 9

برای مطالعه بیشتر درباره حساسیت سایر فلزات و سایر آلیاژهای مهندسی به HIC می‌توان به دو استاندارد ISO 12473 و DNV - RP - B 401مراجعه کرد.

چگالی جریان حفاظت[۴۷۰]

پس از تعیین حدود پتانسیل حفاظت، مهم‌ترین مسئله تعیین مقدار جریان کاتدی لازم برای حفاظت از فلزات در شرایط سرویس‌دهی می‌باشد. به طور کلی، مقدار این پارامتر تابعی از سرعت خوردگی فلز و مساحت آن است، که افزایش هریک موجب افزایش میزان جریان حفاظت می‌گردد. در کاربردهای عملی، میزان جریان لازم برای حفاظت از هر فلز، نسبت به واحد سطح آن در نظر گرفته می‌شود که به آن «چگالی جریان حفاظت» اطلاق می‌گردد. از دیدگاه نظری، حداقل مقدار چگالی جریان کاتدی مورد نیاز برای حفاظت از هر فلز را می‌توان از منحنی قطبش آن استخراج نمود. جهت توضیح این مطلب، به منحنی قطبش شکل ۹–۶۸ توجه کنید. این منحنی قطبش، مربوط به یک فولاد کم آلیاژ (فولاد بدنه یک شناور) است که در آب دریای شبیه‌سازی شده ساکن با دمای $25°C$ به دست آمده است. مطابق نظریه پتانسیل مختلط، مقادیر پتانسیل خوردگی (E_{corr})و چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) این فولاد به ترتیب برابر با ۷۰۵ mV vs SCE– (۶۸۶ mV vs SCE–) و $1/79 \times 10^{-5}\mathrm{A/cm^2}$ می‌باشد. مطابق قانون فارادی، این چگالی جریان خوردگی، سببِ خوردگی فولاد با سرعت ۸/۲ mpy خواهد شد.

حال فرض می‌کنیم، این فولاد در شرایط مذکور به اندازه‌ای قطبی شود که پتانسیل آن به ۸۰۰ mV vs SCE– (۷۸۱ mV vs SCE–) کاهش بیابد. مطابق شکل، لازمه این کاهش پتانسیل، تزریق یک جریان کاتدی به بزرگی $2/26 \times 10^{-5}\mathrm{A/cm^2}$ به فولاد می‌باشد. در این شرایط و مطابق شیب تافل آندی منحنی، چگالی جریان آندی آهن برابر با $8/31 \times 10^{-7}\mathrm{A/cm^2}$ خواهد شد. مطابق قانون فارادی، این چگالی جریان خوردگی، موجب خوردگی فولاد با سرعت ۰/۳۵۴ mpy می‌شود. با مقایسه این حالت با حالت خوردگی آزاد فولاد مشاهده می‌شود که سرعت خوردگی در حدود ۲۳ برابر کاسته شده است.



4 7 0

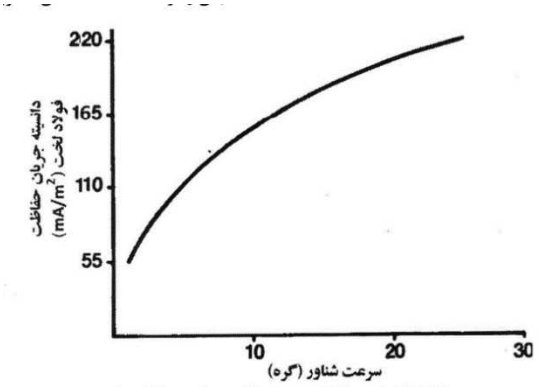
شکل ۹-۶۸ منحنی قطبش یک فولاد کم آلیاژ (فولاد بدنه یک شناور) در آب دریای شبیه‌سازی شده ساکن در دمای $25°C$

میزان چگالی جریان‌های لازم برای حفاظت از فلزات لخت در آب دریا و سایر برق‌کاف‌های خورنده، علاوه بر جنس آنها به عوامل دیگری نیز هم‌چون غلظت اکسیژن محلول، سرعت حرکت برق کاف، دما، وجود رسوب‌های سطحی، وجود یا عدم وجود رنگ و غیره بستگی دارد. در ادامه سعی شده است، اثر این عوامل، بر چگالی جریان لازم برای حفاظت تعدادی از فلزات و آلیاژهای مرسوم در ساخت شناورها معرفی شود.

چگالی جریان لازم برای حفاظت کاتدی فولاد

اثر غلظت اکسیژن محلول و سرعت حرکت آب دریا

میزان اکسیژن محلول در آب دریا تا شوری ۳۵۵۰۰ ppm تنها به مقدار دمای آب دریا وابسته است. در جدول ۹-۱۷ میزان حلالیت اکسیژن در آب دریا برحسب تغییرات دما و شوری دیده می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، رابطه‌ای مستقیم بین میزان غلظت اکسیژن محلول در آب دریا با سرعت خوردگی فولاد وجود دارد. این بدان معنی است که با افزایش غلظت اکسیژن محلول که عامل مهم کاهنده اثرات قطبش غلظتی است، سرعت خوردگی افزایش می‌یابد و برعکس. از طرف دیگر، افزایش سرعت حرکت آب دریا از طریق افزایش میزان دسترسی اکسیژن محلول به سطح فولاد موجب افزایش سرعت خوردگی می‌شود. بدیهی است، هرچه سرعت خوردگی فولاد بیشتر باشد جهت حفاظت کاتدی آن نیاز به چگالی جریان کاتدی بیشتر می‌باشد. تاکنون، بررسی‌های زیادی جهت تعیین ارتباط میان سرعت حرکت شناورهای فولادی با چگالی جریان‌های لازم برای حفاظت بدنه‌های آنها در آب دریا به انجام رسیده است. اما، معمولاً به دلیل وجود متغیرهای زیاد و بعضاً ناخواسته، نتایج حاصل از این بررسی‌ها کاملاً در توافق با هم نبوده‌اند. در شکل ۹-۶۹ نمونه‌ای از نتایج این بررسی‌ها در قالب یک نمودار آورده شده است. به طور کلی، برای کاربردهای عملی، می‌توان مقدار چگالی جریان لازم برای حفاظت از فولاد لخت در آب دریای ساکن در حدود 150A/cm^2 در نظر گرفت. با افزایش سرعت حرکت آب دریا، میزان این پارامتر حتی می‌تواند تا مقادیر $300 - 350\text{A/cm}^2$ و حتی بیشتر نیز افزایش یابد.



شکل ۹-۶۹ چگالی جریان لازم برای حفاظت از بدنه بیرونی شناورهای فولادی

اثر دما و تشکیل رسوب‌ها

دما یکی از پارامترهای بسیار مهم بر میزان چگالی جریان کاتدی مورد نیاز برای حفاظت از فولاد به حساب می‌آید. این پارامتر اثر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت الکتریکی ویژه آب دریا، میزان اکسیژن محلول در آن و همچنین تشکیل رسوب‌ها دارد. تأثیر دما بر میزان دانسیته جریان حدیِ واکنش کاتدی احیای اکسیژن پیچیده است، زیرا از یک‌سو با افزایش دما حلالیت اکسیژن کاهش یافته و از سوی دیگر ضریب نفوذ آن درون آب افزایش می‌یابد. اما در مجموع، می‌توان گفت با افزایش دما، مقدار چگالی جریان حفاظت به آرامی افزایش می‌یابد. گفته شده در آب دریاهای گرم به ازای هر یک درجه افزایش دما از $25°C$به چگالی جریان حفاظت باید $1A/cm^2$افزوده شود. به طور کلی، حفاظت کاتدی فولاد در آب دریا همراه با تولید گسترده یون‌های هیدروکسیل است که این موجب افزایش میزان pH آب دریا (قلیایی شدن) در مجاورت سطح فولاد می‌شود. در نتیجه این قلیایی شدن، شرایط برای رسوب‌گذاری یون‌های کلسیم، منیزیوم، آهن و غیره که در آب دریا به وفور وجود دارند. فراهم می‌آید. در جدول ۹–۱۸ درصد فراوانی هر یک از رسوب‌ها رویِ سطح فولاد پس از اعمال حفاظت کاتدی دیده می‌شود.

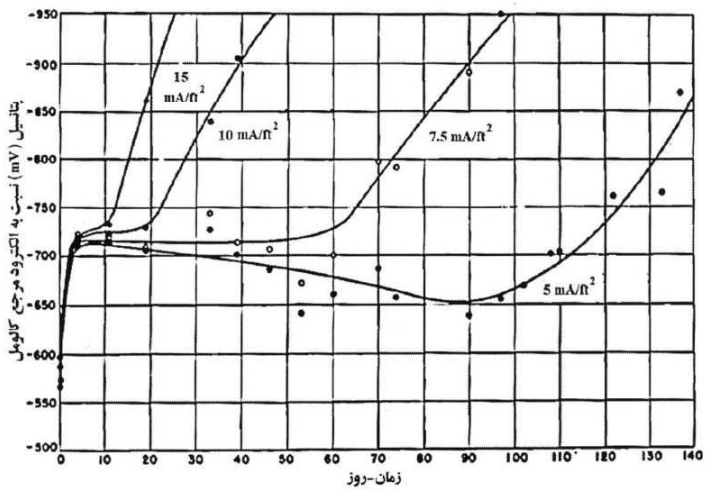
جدول ۹–۱۸ درصد فراوانی رسوب‌ها روی سطح فولاد پس از حفاظت کاتدی در آب دریا

جزء محلول	فراوانی (٪)
$CaCO_3$	۵۷
$CaCO_4$	۳
Fe_2O_3	۱۹
$MgCO_3$	۳
$NaHCO_3$	۵
مواد سیلیسی نامحلول	۸
آب	۵

اساساً، سهولت تشکیل رسوب‌ها به غلظت یون‌های رسوب‌گذار وابسته است. بدین معنی که هرچه غلظت این یون‌ها بیشتر باشد، فرایند رسوب‌گذاری نیز آسان‌تر خواهد بود. لذا، می‌توان انتظار داشت که رسوب‌گذاری در آب دریا در مقایسه با آب لب‌شور و آب رودخانه سریع‌تر رخ دهد. اهمیت تشکیل این رسوب‌ها در حفاظت کاتدی ناشی از مقاومت الکتریکی بسیار زیاد آنها است که مانع از انتقال جریان الکتریکی در مدار پیل خوردگی می‌شوند. همچنین، این رسوب‌ها با محدود کردن مسیرهای دسترسی اکسیژن به سطح فولاد، از طریق تشدید قطبش غلظتی موجب کاهش قابل ملاحظه پتانسیل آن با گذشت زمان می‌شوند. نتیجه طبیعی این فعل و انفعال، کاهش بسیار زیاد چگالی جریان کاتدی لازم برای حفاظت از فولاد است. شرایط موقعی پیچیده‌تر می‌شود که کاهش دما سبب افزایش حلالیت رسوب‌های تشکیل شده رویِ سطح فولاد می‌گردد. در حقیقت،

با حل شدن تدریجی رسوب‌ها ماهیت محافظ بودن آنها کاهش یافته و بنابراین، بر چگالی جریان مورد نیاز جهت حفاظت افزوده می‌شود.

یک عامل مؤثر دیگر که فرایند تشکیل رسوب‌ها را تسریع می‌کند، بزرگی چگالی جریان کاتدی تزریق شده به فولاد می‌باشد. در شکل ۹-۷۰ این موضوع به خوبی نشان داده شده است.



شکل ۹-۷۰ اثر بزرگی چگالی جریان کاتدی بر مدت زمان رسیدن به پتانسیل حفاظت

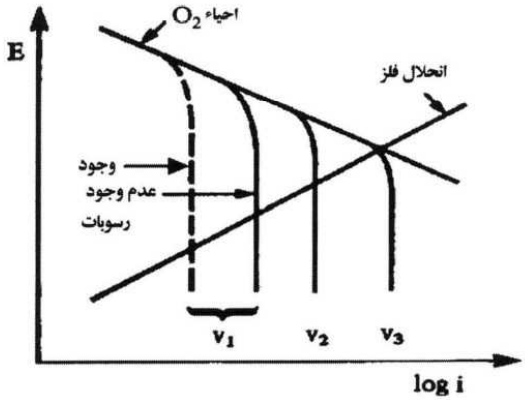
همان‌طور که مشاهده می‌شود، هرچه چگالی جریان تزریق شده بزرگ‌تر باشد، زمان رسیدن به محدوده پتانسیل حفاظت (به دلیل تشکیل زود هنگام رسوب‌ها) کوتاه‌تر خواهد بود. بر این مبنا، امروزه اصول طراحی سامانه حفاظت کاتدی فولاد در آب دریا بر پایه مفهوم «قطبش سریع»[۷۱] استوار شده است. این بدان معنی است که در گام نخست با تزریق یک چگالی جریان اولیه[۷۲] (i_{initial}) به نسبت زیاد، شرایط برای تشکیل زود هنگام رسوب‌های محافظ رویِ سطح آن مهیا می‌شود. مقدار این چگالی جریان تابعی از پارامترهای آب دریا به‌ویژه دمای آن می‌باشد. عملاً با تشکیل رسوب‌ها، چگالی جریان حفاظت به‌واسطه تشدید قطبش غلظتی کاهش یافته که به آن چگالی جریان نگهداشت[۷۳] (ثانویه یا میانگین) (i_{initial}) اطلاق می‌گردد. حال چنانچه در حین شرایط کاری رسوب‌ها دچار خسارت شوند، چگالی جریان حفاظت برای تشکیل دوباره رسوب‌ها مجدداً افزایش می‌یابد که به آن چگالی جریان نهایی[۷۴] (i_{final}) گفته می‌شود. در جدول ۹-۱۹ مطابق مفهوم قطبش سریع، مقادیر چگالی جریان‌های لازم برای حفاظت از فولاد لخت در آب دریای ساکن با دماهای مختلف آورده شده است.

1 7
2 7
3 7
4 7

جدول ۹-۱۹ چگالی جریان حفاظت (mA/m^2)از فولاد در آب دریای ساکن

$12-20°C$ شبه گرمسیری			$>20°C$ گرمسیری		
i_{mean}	i_{final}	$i_{initial}$	i_{mean}	i_{final}	$i_{initial}$
۸۲/۵	۱۱۵	۱۶۷/۵	۷۲/۵	۱۰۰	۱۴۷/۵
$7°C>$ شبه گرمسیری			$7<12°C$ گرمسیری		
i_{mean}	i_{final}	$i_{initial}$	i_{mean}	i_{final}	$i_{initial}$
۱۱۰	۱۶۰	۲۲۲/۵	۹۵	۱۳۷/۵	۱۹۵

یکی از عوامل آسیب زننده به رسوب‌ها در حین شرایط کاری، میزان سرعت حرکت آب دریا است که می‌تواند موجب کنده شدن آنها از روی سطح فولاد شود. در شکل ۹-۷۱ این مسئله نشان داده شده است. بخش خط‌چینِ منحنی قطبش، نشان‌دهنده چگالی جریان حدیِ واکنش کاتدی احیای اکسیژن در آبی است که سرعت حرکت آن صدمه‌ای به رسوب‌های موجود رویِ سطح وارد نکرده است. با افزایش سرعت حرکت آب به V_1و کنده شدن بخشی از رسوب‌ها، مقدار چگالی جریان افزایش می‌یابد. چنین شرایطی نیز برای سرعت‌های V_2و V_3وجود دارد. البته، مطابق شکل پس از عبور از سرعت V_3میزان چگالی جریان مستقل از سرعت حرکت آب می‌شود.



شکل ۹-۷۱ اثر سرعت حرکت آب بر تخریب رسوب‌های سطح فولاد

اثر شوری و مقاومت الکتریکی ویژه

اثر ویژه مهم شوری بر میزان چگالی جریان حفاظت، ناشی از تأثیر این پارامتر به مقاومت الکتریکی ویژه آب دریا و میزان اکسیژن محلول در آن می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم، کاهش مقاومت الکتریکی آب دریا موجب کاهش سرعت خوردگی فولاد می‌شود البته، از طرف دیگر این کاهش مقاومت الکتریکی، شرایط را برای عبور آسان جریان حفاظت از میان آب دریا

مهیا می‌سازد. بنابراین، می‌توان این‌گونه بیان کرد که در آب‌های با مقاومت الکتریکی پایین در مقایسه با آب‌های دارای مقاومت الکتریکی بیشتر (البته به شرط آنکه دماهای آنها یکسان باشد) نیاز به چگالی جریان حفاظت بالاتری می‌باشد.

اثر پوشش رنگ

پوشش رنگ به‌صورت بسیار مؤثری می‌تواند از خوردگی فولاد در آب دریا جلوگیری به عمل آورد. در حقیقت، رنگ‌ها از طریق کاهش سطح تماس فولاد با آب دریا و همچنین، تحمل مقاومت الکتریکی بسیار زیاد به مدار پیل خوردگی سبب توقف خوردگی می‌شوند. البته باید توجه داشت، هیچ پوشش رنگی کاملاً عاری از عیب نبوده و همواره منافذی در آنها وجود دارد. همان‌طور که می‌دانیم، مقدار جریان لازم برای حفاظت از فولاد به میزان سطح در تماس آن با آب دریا وابسته است. بنابراین، طبیعی است که برای یک ورق فولادی رنگ شده در مقایسه با ورق فولادی بدون رنگی که هر دو دارای سطح یکسانی هستند، مقدار چگالی جریان حفاظت کمتری نیاز باشد. به‌عنوان نمونه، بررسی‌ها نشان می‌دهد، چگالی جریان لازم برای حفاظت از بدنه یک شناور فولادی که دارای پوشش‌های رنگ با کیفیتی هستند، رقمی کمتر از $1\mathrm{mA/m^2}$ می‌باشد. البته، با تخریب تدریجی رنگ در شرایط سرویس‌دهی، مقدار چگالی جریان حفاظت به‌صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، زیرا، سطح بیشتری از بدنه شناور در تماس مستقیم با آب دریا قرار خواهد گرفت. به‌عنوان مثال، چنانچه مقدار تخریب پوشش رنگ بدنه یک شناور در حین شرایط کاری به ۱۰٪ برسد و مقدار چگالی جریان لازم برای حفاظت از فولاد لخت برابر با $150\mathrm{mA/m^2}$در نظر گرفته شود، میزان چگالی جریان لازم برای حفاظت از کل بدنه شناور، برابر با $15\mathrm{mA/m^2}$خواهد بود.

در حفظ کاتدی، میزان آسیب وارده به پوشش رنگ، توسط پارامتری تحت عنوان «ضریب تخریب پوشش[۴۵] (f_c)» بیان می‌شود. $f_c = 0$به معنی وجود یک پوشش رنگِ کامل و عاری از نقص می‌باشد که البته یک حالت ایدئال است. بنابراین، در این حالت، جهت حفاظت از فولاد نیاز به تزریق هیچ جریان کاتدی وجود ندارد. برعکس، $f_c = 1$بدان معنی است که پوشش رنگِ سطح فولاد کاملاً آسیب دیده، لذا چگالی جریان حفاظت از آن را دقیقاً می‌توان معادل با چگالی جریان حفاظت از فولاد لخت در نظر گرفت. مقدار ضریب تخریب پوشش‌های رنگ باید بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی و یا میدانی مشخص شود. در غیر این صورت می‌توان با مراجعه به منابع استانداردی متغیر نظیر ISO 20313 یا DNV - RP - B401 نسبت به تعیین مقادیر تجربی آن اقدام نمود.

چگالی جریان لازم برای حفاظت از سایر فلزات

از مهم‌ترین فلزات دیگر به کار گرفته شده در ساخت شناورها، آلیاژهای آلومینیم، فولادهای زنگ نزدن و آلیاژNAB می‌باشد. دو آلیاژ اول، هم به‌صورتی رنگ شده و هم به‌صورت رنگ نشده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

آلیاژهای آلومینیم و فولادهای زنگ نزن به واسطه دارا بودن لایه‌های اکسیدی غیرفعال دارای مقاومت مناسبی به خوردگی یکنواخت در آب دریا می‌باشند و بنابراین، در مقایسه با فولاد نیازمند چگالی جریان حفاظت کمتری می‌باشند. به‌عنوان نمونه

4 [illegible] 7 5

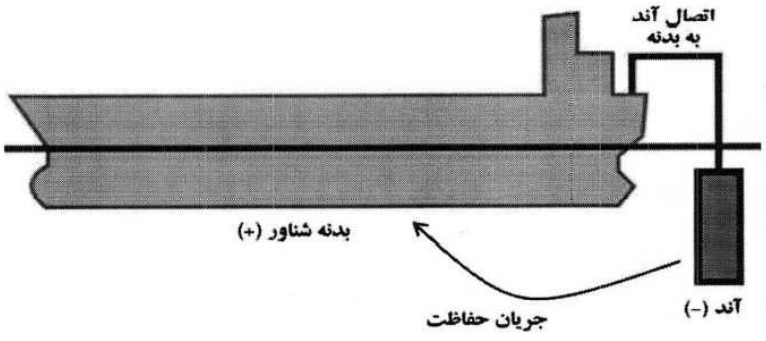
برای آلیاژهای آلومینیم در کلیه حالات، مقدار چگالی جریان لازم برای حفاظت از آنها را تقریباً می‌توان در حدود ۱۰٪ مقدار چگالی جریان لازم برای حفاظت از فولاد در نظر گرفت. البته، مقدار این پارامتر در منبع دیگری، در حدود یک - سوم چگالی جریان لازم برای حفاظت از فولادها در نظر گرفته شده است. بدیهی است، چنین مقادیری را نیز می‌توان برای حفاظت از فولادهای زنگ نزن متصور نمود.

به طور کلی، فلسفه به کارگیری حفاظت کاتدی برای آلیاژ NAB نسبت به سایر فلزات به کار رفته در ساخت شناورها متفاوت می‌باشد. اصولاً، این آلیاژ در مقایسه با سایر آلیاژها دارای مقاومت به خوردگی عالی بوده و به همین منظور نیازمند رنگ‌آمیزی نمی‌باشد. البته، موضوع زمان حائز اهمیت می‌شود که از این آلیاژ به‌صورت گسترده در ساخت پروانه‌های شناورها استفاده می‌شود. پروانه‌های شناورها به دلیل شرایط کاری ویژه خود، همواره مستعد به خسارت حبابی هستند. حفاظت کاتدی می‌تواند روشی مؤثر جهت جلوگیری از خسارت حبابی پروانه‌ها باشد. ظاهراً، این کار کاهش خسارت ناشی از تشکیل حباب‌های هیدروژن رویِ سطوح پروانه‌ها می‌باشد که همانند یک بالشتک هوا می‌توانند اثرات مخرب ضربات ناشی از پدیده کاواک‌زایی را خنثی نمایند. مطالعات و بررسی‌های میدانی نشان داده، برای کلیه شرایط کاری، چگالی جریان‌هایی در حدود $500\mathrm{mA/m^2}>$ می‌تواند شرایط را برای حفاظت از پروانه‌های شناورها فراهم آورد.

حفاظت کاتدی بدنه بیرونی شناور

در سامانه آند فداشونده، حفاظت کاتدی سطوح بیرون شناور از طریق زوج نمودن بدنه و متعلقات آن با یک تکه فلز فعال‌تر دیگر نظیر آلیاژهای روی، آلومینیوم، منیزیم و فولاد نرم میسر می‌شود. در شکل ۹-۷۲ تصویر سازِکار این روش حفاظت کاتدی نشان‌داده شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود، با نصب آند رویِ بدنه شناور، جریان حفاظت از طریق خورده شدن آند به درون برق‌کاف خورنده جاری شده و سپس به‌سمت نواحی نیازمند حفاظت کاتدی جاری می‌شود. در اثر این فعل و انفعال، پتانسیل بدنه شناور کاهش یافته و بنابراین از سرعت خوردگی آن تا حدود بسیار زیادی کاسته خواهد شد.



شکل ۹-۷۲ سازِکار سامانه حفاظت کاتدی آند فداشونده بدنه یک شناور

اجزای سامانه

ازآنجاکه، سامانه حفاظت کاتدی با آند فداشونده، مطابق یک پیل گالوانیک عمل می‌کند، به غیر از خود آند، نیازمند اجزای دیگری نیست. البته، وجود اتصال الکتریکی بین آند و ناحیه تحت حفاظت، شرط اساسی برقراری این سامانه می‌باشد که این اتصال از طریق در جایگذاری «مغزه آند»[۴۷۶]در درون آن میسر می‌شود. این اتصال می‌تواند توسط جوشکاری مغزه و یا پیچ و مهره کردن آن به بخش تحت حفاظت، ایجاد گردد. در برخی موارد، امکان اتصال مستقیم آند به برخی از متعلقات شناور ممکن نیست. از مهم‌ترین این اجزا می‌توان به سکان، بالک، پایدارساز و پروانه اشاره داشت. اصولاً، در این موارد آندهای لازم برای حفاظت از این اجزا رویِ بدنه شناور نصب شده و سپس یک اتصال الکتریکی مطمئن بین بدنه و این اجزا ایجاد می‌شود. به طور کلی، برای اتصال سه مورد اول به بدنه از کابل‌کشی استفاده شده، درحالی‌که، اتصال پروانه به بدنه به‌وسیله نصب «حلقه لغزشی»[۴۷۷]رویِ شافت آن به انجام می‌رسد. در ادامه در مورد این دو شیوه اتصال بحث خواهد شد.

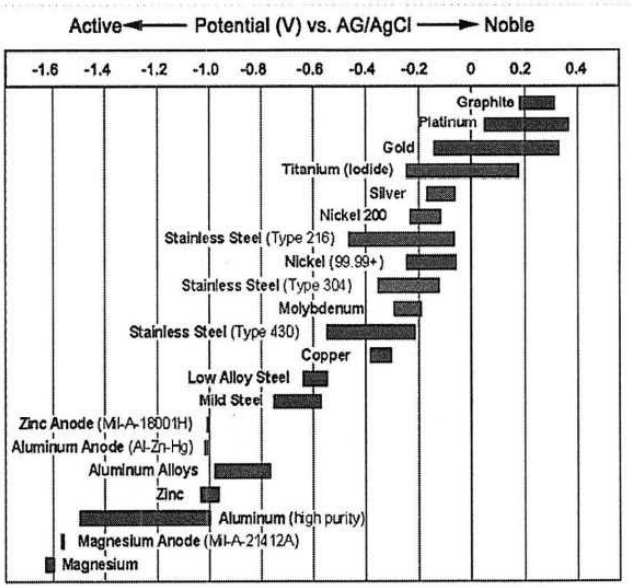
جنس آندها

متداول‌ترین مواد مورد استفاده به‌عنوان آند فداشونده در کاربردهای مربوط به حفاظت کاتدی سطوح بیرونی شناورها عبارتند از: آلیاژهای روی، آلیاژهای آلومینیم، آلیاژهای منیزیوم و فولادهای نرم. معمولاً، میزان بازدهی این آندها به عوامل زیر بستگی دارد:

۱. ترکیب شیمیایی آند و ویژگی‌های الکترولیت پیرامون.
۲. دمای کاری.
۳. مقدار جریان آندی خروجی از ماده آندی.

در شکل ۹-۷۳ سری گالوانیک حاوی تعدادی از آندهای فداشونده در آب دریا نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، پتانسیل الکتروشیمیایی آندهای آلومینیم و روی تقریباً دارای مقادیر برابری می‌باشند، درحالی‌که، پتانسیل الکتروشیمیایی آند منیزیوم نسبت به آنها بسیار منفی‌تر است. مطابق این سری، پتانسیل فولاد نرم در حدود mV Ag/AgCl ۷۰۰- است که از پتانسیل آندهای روی و آلومینیم، نجیب‌تر می‌باشد.

4 [illegible] 7 6
4 [illegible] 7 7



شکل ۹-۷۳ سری گالوانیک حاوی برخی از آندهای فداشونده در آب دریا

امروزه برای حفاظت کاتدی شناورهای در حالت خدمت از آندهای فداشونده پایه روی و پایه آلومینیوم استفاده می‌شود. مطابق الزامات انواع مؤسسات رده‌بندی، استفاده از آندهای پایه منیزیوم به دلیل پتانسیل بسیار منفی آنها، نرخ مصرف بالا در آب دریا، حساس نمودن فولادهای پر استحکام به کار رفته در ساخت شناورها به خسارات هیدروژنی و همچنین وقوع پدیده جدایش کاتدی پوشش‌های رنگ به جز در موارد خاص که به آنها اشاره خواهد شد، مجاز نمی‌باشد. به طور کلی، در حفاظت کاتدی سطوح بیرونی شناورها، آندهای روی نسبت به آندهای آلومینیم، به‌صورت گسترده‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، طبق یک گزارش تهیه شده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده[۴۷۸] تصریح شده که در حفاظت کاتدی سطوح بیرونی ۸۹ زیردریایی متعلق به نیروی این کشور، تنها در ۵ مورد از آندهای آلومینیم استفاده شده و مابقی توسط آندهای روی تحت حفاظت قرار گرفته‌اند. برخی از مهم‌ترین دلایل استفاده کمتر از آندهای آلومینیم عبارت است از:

۱. امکان غیرفعال شدن به واسطه وجود برخی ناخالصی‌ها در ساختار آنها.
۲. بازدهی ضعیف در آب‌های با دماهای کمتر از $5°C$
۳. افزایش نیروی مقاوم در برابر حرکت شناورها (نیروی دراگ[۴۷۹]) در اثر الگوی خاص خوردگی سطح آندهای آلومینیمی. این الگوهای خوردگی با شکل‌گیری شیارهای عمیقی همراه است که در امتداد حرکت جریان آب تشکیل می‌شوند.

معمولاً، از آندهای پایه آهن برای حفاظت از بخش‌هایی از شناورها نظیر شافت پروانه استفاده می‌گردد که اغلب از جنس فولادهای زنگ نزن هستند.

4 [illegible] 7 [illegible] 8
4 [illegible] 7 9

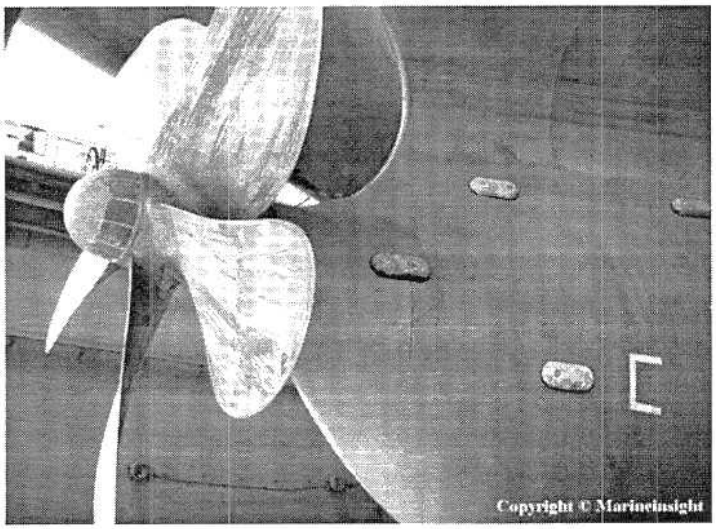
شکل هندسی آندها

همواره، انتخاب شکل هندسی آند فداشونده و مشخصات ابعادی آن یکی از مهم‌ترین چالش‌های طراحی صحیح سامانه حفاظت کاتدی با آند فداشونده می‌باشد. بدین منظور لازم است طرح در ملاحظات خود مواردی از قبیل مشخصات هندسی سطوح بیرون شناور و متعلقات آن، محدودیت‌های نصب آندها، وزن تحمل شده به شناورها به هنگام نصب آنها و هم‌چنین نیروی دراگ ایجاد شده توسط آندها را مدنظر داشته باشد. در ادامه، برخی از متداول‌ترین اشکال هندسی آندهای فداشونده معرفی شده است که به‌صورت گسترده‌ای در حفاظت کاتدی سطوح بیرونی شناورها استفاده می‌شوند.

آندهای تخت

منظور از آند تخت، آندی است که یک سطح آن کاملاً در تماس با فلز تحت حفاظت بوده و سایر سطوح آن در معرض برق‌کاف خورنده می‌باشند. معمولاً، این آندها به سه دسته اصلی زیر تقسیم می‌شوند:

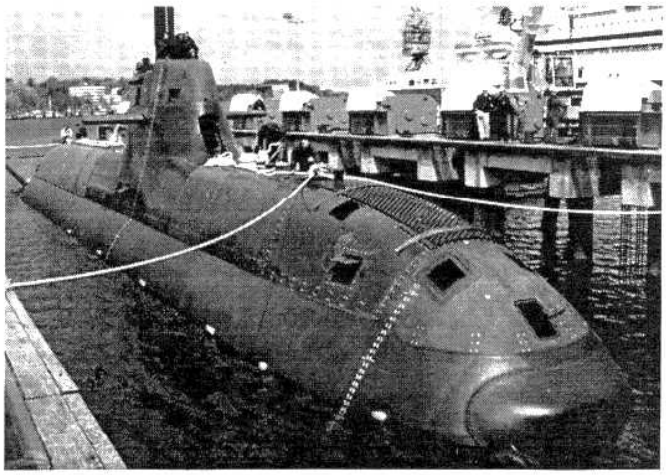
آندهای تخت مستطیلی شکل:[۴۸۰]این دسته از آندها با توجه به شکل هندسی‌شان موجب کاهش نیروی دراگ شناورها می‌شوند. این آندها دارای یک یا چند مغزه[۴۸۱]شمه‌ای شکل هستند که یا در امتداد طول این آندها یا عرضه آنها قرار می‌گیرند. در اغلب موارد، نسبت عرض به ارتفاع آنها در حدود ۵ – ۳ می‌باشد. البته، مواردی استثنا نیز وجود دارد. معمولاً، از این آندها جهت نصب روی بخش میانی بدنه شناور، پاشنه، سکان و بالک استفاده می‌شود.
در شکل ۹-۷۴ یک نمونه از نصب این نوع آند در پاشنه یک شناور دیده می‌شود.



شکل ۹-۷۴ آندهای تخت مستطیلی شکلِ نصب شده در پاشنه یک شناور

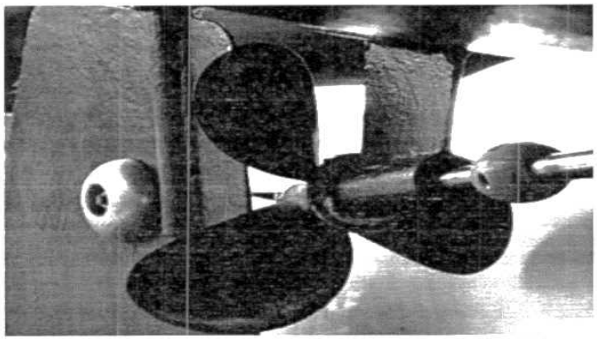
4 8 0
4 8 1

آندهای تخت اشکی شکل[۲](اُوکی شکل): از این دسته آندها در نواحی از شناورها استفاده می‌شود که در آنها خطر افزایش نیروی دراگ و هم‌چنین ایجاد نوفه‌های صوتی مسئله‌ساز نمی‌باشد. این آندها دارای یک مغزه تسمه‌ای شکل هستند که در امتداد طول این آنها قرار می‌گیرد. در شکل ۹-۷۵ نیز نمونه‌ای از نصب این نوع رویِ سینه زیردریایی کلاس U212 دیده می‌شود.



شکل ۹-۷۵ آندهای تخت اشکی شکلِ نصب شده بر روی سینه زیردریایی کلاس U212 .

آندهای قارچی شکل:[۴۸۳]مشابه با آندهای تخت اشکی شکل، از این آندها نیز جهت کاهش نیروی دراگ شناورها، به‌ویژه برای شناورهای کوچکِ تندرو استفاده می‌شود. مغزه این آندها به‌صورت ورق‌هایی مدور درون آنها تعبیه می‌شود. در غالب موارد، این نوع آندها رویِ سکان‌های شناورهای کوچک نصب می‌شوند. در شکل ۹-۷۶ نمونه‌ای از نصب آن رویِ سکان یک شناور کوچک قابل مشاهده است.



شکل ۹-۷۶ آند قارچی شکلِ نصب شده رویِ یک سکان یک شناور کوچک

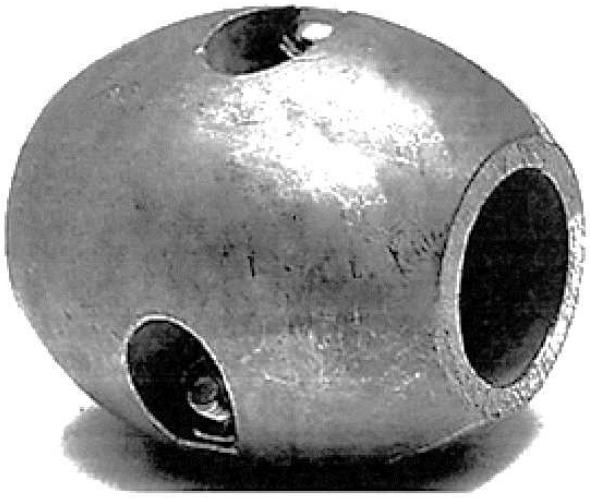
4 8 2
4 8 3

آندهای شافت پروانه

این آندها همچنین به آندهای دست‌بندی یا النگویی[۴۸۴]شکل معروف هستند. این آندها از دو بخش هم شکلِ مجزا از هم تشکیل می‌شوند. جهت نصب رویِ شافت پروانه، این دو بخش روی هم قرار می‌گیرند و سپس توسط چند پیچ به هم متصل می‌شوند. مغزه‌های آندها به شکل چند نیم حلقه می‌باشد. در شکل ۹-۷۷ نمونه‌ای از یک آند شافت پروانه و در شکل ۹-۷۸ تصویری از نصب این آند رویِ شافت پروانه یک شناور نشان داده شده است.

آندهای پروانه شناورها

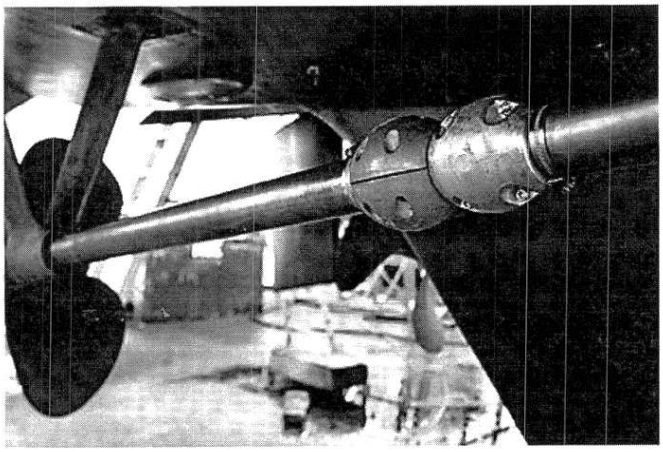
اغلب از این آندها جهت نصب رویِ توپی‌های پروانه‌های[۴۸۵]شناورهای کوچک تندرو استفاده می‌شود. در شکل ۹-۷۹ نمونه‌ای از این آند و در شکل ۹-۸۰ تصویری از نصب آن رویِ توپی پروانه یک شناور نشان داده شده است.



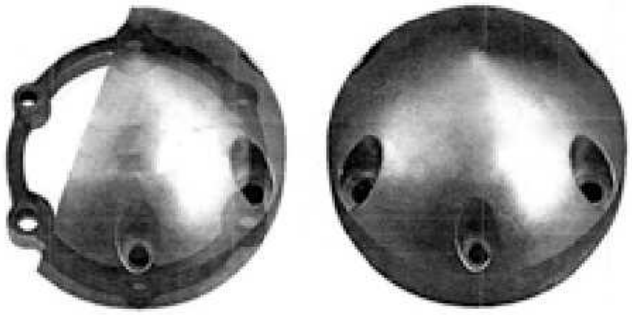
شکلی ۹-۷۷ نمونه‌ای از یک آند شافت پروانه

4 8 4

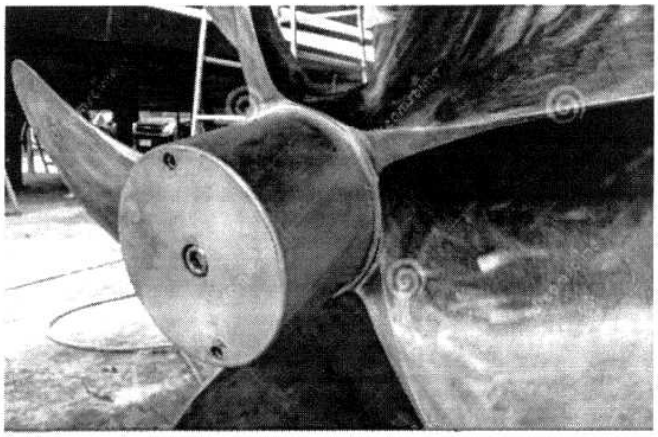
4 8 5



شکل ۹-۷۸ دو آند نصب شده رویِ شافت پروانه یک شناور



شکل ۹-۷۹ نمونه‌ای از یک آند پروانه شناور

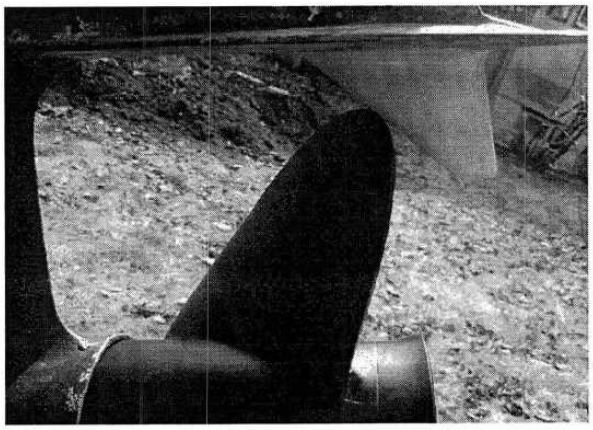


شکل ۹-۸۰ آند نصب شده رویِ توپی پروانه یک شناور

آندهای باله‌ای شکل

از این نوع آندها جهت حفاظتِ بخش‌هایی از پاشنه شناورها به ویژه در مجاورت پروانه آنها استفاده می‌شود. همانند آندهای پروانه‌های شناورها از این آندها نیز برای حفاظت از شناورهای کوچک تندرو استفاده می‌شود. در شکل ۹-۸۱ نمونه‌ای از این آند و در شکل ۹-۸۲ تصویری از یک نمونه نصب شده از آن نشان داده شده است.

شکل ۹-۸۱ نمونه‌ای از یک آند باله‌ای شکل



شکل ۹-۸۲ آند باله‌ای شکل نصب شده در مجاورت پروانه یک شناور

نکات ویژه

رنگ‌آمیزی

در شناورهای دریایی، پیش از نصب سامانه حفاظت کاتدی، همواره رنگ‌آمیزی بدنه و متعلقات آن، به‌عنوان اولین گزینه برای جلوگیری از خوردگی در دستور کار قرار می‌گیرد. با توجه به آنکه این دو روش حفاظت از خوردگی مکمل یکدیگر هستند، برای یک طرح سامانه حفاظت کاتدی، آگاهی از پارامترهای رنگ‌آمیزی شناورها شامل روش‌های آماده‌سازی سطوح، شناخت نوع رنگ‌ها، روش‌های رنگ‌آمیزی، عیوب رنگ‌ها، تاریخچه رنگ‌آمیزی و از همه مهم‌تر روش‌های بازرسی و آزمون‌های رنگ‌ها از درجه اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

رنگ‌ها مخلوطی از ترکیبات معدنی و آلی هستند که در حالت مایع رویِ سطوح فلزات اجرا شده و سپس پس از خشک شدن[۴۸۶] و عمل آمدن[۴۸۷] موجب تشکیل لایه‌های محافظ و پیوسته رویِ سطح فلزات می‌شوند. معمولاً، رنگ‌ها در ضخامت‌هایی در حدود $25 - 100\mu m$ رویِ سطح فلزات اجرا می‌شوند. در حالت ایدئال، رنگ پس از اجرا رویِ سطح فلز باید دارای مقاومت الکتریکی بالایی بوده و عاری از هر گونه عیب نظیر منافذ ریز و سوزنی[۴۸۸]، رنگ نقطه‌ای[۴۸۹]، ترک‌های عمیق[۴۹۰]، تاول[۴۹۱]، پوسته[۴۹۲]، شره[۴۹۳]، چین و چروک[۴۹۴] و غیره باشد.

اولین ویژگی رنگ‌های سازگار با سازمانه حفاظت کاتدی، مقاومت کلیه اجزای آنها به قلیایی شدن الکترولیز مجاور می‌باشد. بر این اساس گفته شده، رزین‌های رنگ‌ها برای باید در برابر پدیده صابونی شدن دارای مقاومت بالایی باشند و همچنین رنگ دانه‌ها و افزودنی‌های ویژه آنها تحت تأثیر قلیاییت بالای ناشی از فعل و انفعالاتی واکنش‌های حفاظت کاتدی قرار نگیرند.

با تخریب موضعی سامانه‌های رنگ، چگالی جریان حفاظت در نقاط معیوب آنها متمرکز شده که این از طریق افزایش شدید قلیاییت و آزاد شدن گاز هیدروژن سبب تخریب سامانه‌های رنگ می‌شود. بنابراین، لازم است سامانه‌های رنگ در برابر نفوذ برق‌کاف‌ها به درون ساختارشان مقاوم بوده و دارای چسبندگی مناسبی به سطح فلزات باشند.

رنگ‌های دارای رزین‌های با قابلیت صابونی شدن نظیر پایه روغنی‌ها[۴۹۵]، پایه آلکیدها[۴۹۶]، پایه اپوکسی استرها[۴۹۷] جهت کاربرد هم‌زمان با حفاظت کاتدی مناسب نیستند. رنگ‌های بیتومینی[۴۹۸] را می‌توان با اطمینان مناسب همراه با آندهای فداشونده روی و آلومینیم استفاده کرد، هرچند که معمولاً رنگ‌های ضد خزه متداولی که رویِ سطح آنها اجرا می‌شوند، دارای مقاومت کمتری به سامانه‌های حفاظت کاتدی هستند. از طرفی رنگ‌های با کارایی بالا[۴۹۹]، نظیر رنگ‌های بر پایه رزین‌های اپوکسی[۵۰۰]، رزین‌های ترکیبی اپوکسی - کولتار[۵۰۱]، رزین‌های پلی‌یورتان[۵۰۲]، رزین‌های ترکیبی اپوکسی - پلی‌یورتان[۵۰۳]، رزین‌های وینیلی[۵۰۴]، رزین‌های ترکیبی وینیلی - تار[۵۰۵]، رزین‌های کلرونی‌رابر[۵۰۶] جهت کاربرد هم‌زمان با سامانه حفاظت کاتدی بسیار مناسب می‌باشند هرچند رنگ‌های حاوی رنگ دانه‌های پودر روی و آلومینیم به‌خودی‌خود دارای خاصیت حفاظت کاتدی

4	8	6
4	8	7
4	8	8
4	8	9
4	9	0
4	9	1
4	9	2
4	9	3
4	9	4
4	9	5
4	9	6
4	9	7
4	9	8
4	9	9
5	0	0
5	0	1
5	0	2
5	0	3
5	0	4
5	0	5
5	0	6

هستند، اما به کارگیری هم‌زمان آنها با سامانه حفاظت کاتدی مناسب نیست، زیرا این رنگ دانه‌ها در محیط‌هایی با قلیاییت بالا و همچنین تحت شرایط حفاظت بیش از حد تخریب می‌شوند.

دومین ویژگی مهم رنگ‌های سازگار با سامانه حفاظت کاتدی، مربوط به مقاومت آنها در برابر پدیده جدایش کاتدی می‌باشد. بنابراین، ضروری است پیش از شروع به انجام عملیات رنگ‌آمیزی، رنگ‌های انتخاب شده مطابق با دستورالعمل‌هایی همانند آنچه که در استاندارد ISO 15711 وجود دارد، تحت آزمایش قرار بگیرند.

اتصال پروانه به بدنه شناور

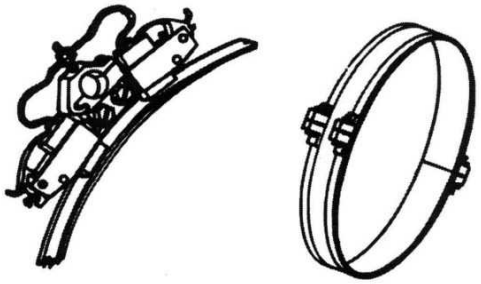
اتصال الکتریکی بین بدنه و پروانه را می‌توان توسط یکی از دو روش زیر انجام ایجاد کرد:

۱. اتصال غیرفعال به شافت[۷] (PSG).

۲. اتصال فعال به شافت[۸] (ASG).

«سامانه اتصال غیر فعال»، ساده‌ترین روش اتصال بین پروانه و بدنه شناور است. این سامانه، شامل یک «حلقه لغزشی» و تعدادی برس می‌باشد. حلقه لغزشی از دو نیم حلقه با جنس آلیاژ فسفر - برنز یا فلز مس ساخته می‌شود، که توسط بست‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن رویِ شافت پروانه ثابت می‌گردد. معمولاً جهت اتصال الکتریکی مطمئن، یک لایه پوشش نقره رویِ سطح حلقه لغزشی با ضخامتی در حدود ۱/۶ mm اعمال می‌شود. به منظور تکمیل مدار الکتریکی بین بدنه و شافت پروانه از دو برس با جنس گرافیت _ نقره استفاده می‌گردد. توصیه شده، در ترکیب این برس‌ها حداقل ٪۸۳ نقره وجود داشته باشد، زیرا اثرات نامطلوب جذب روغن و چربی توسط برس‌ها که در نهایت سبب افزایش مقاومت الکتریکی مدار می‌شود به حداقل می‌رسد. این برس‌ها از یک سو به بدنه شناور متصل شده و از سوی دیگر با حلقه در حال چرخش در تماس هستند. در شکل ۹-۸۳ تصویری از یک حلقه لغزشی و برس‌های آن و در شکل ۹-۸۴ نمونه واقعی نصب شده این سامانه نشان داده شده است.

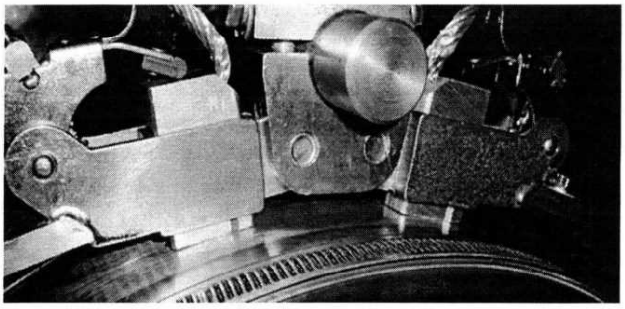
در شکل ۹-۸۵ سازِکار عمل یک سامانه اتصال غیرفعال و اثر مخرب نبودن آن بر پروانه شناور و شافت آن نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، عدم وجود اتصال می‌تواند شرایط را برای خوردگی پروانه و فرسایش حاصل از جرقه فراهم آورد.



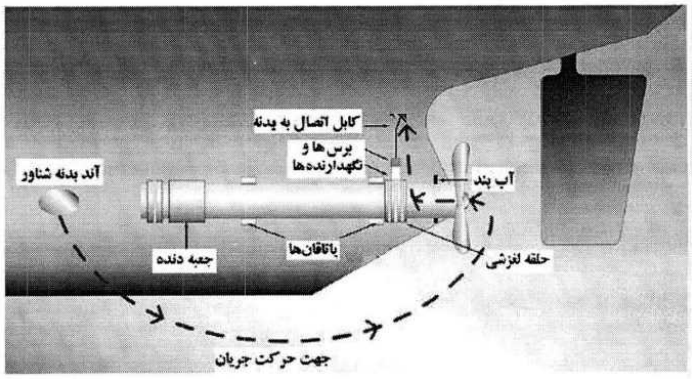
شکل ۹-۸۳ حلقه لغزشی و برس‌های آن

7

8

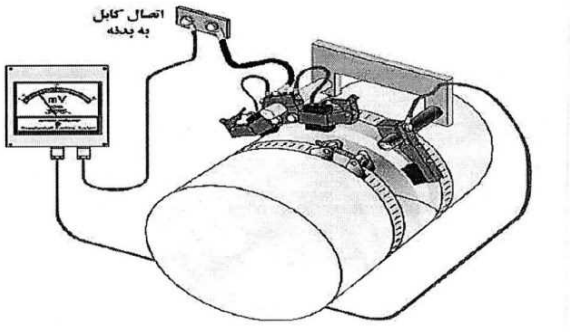


شکل ۹-۸۴ حلقه لغزشی نصب شده رویِ شافت پروانه یک شناور



شکل ۹-۸۵ اتصال غیرفعال

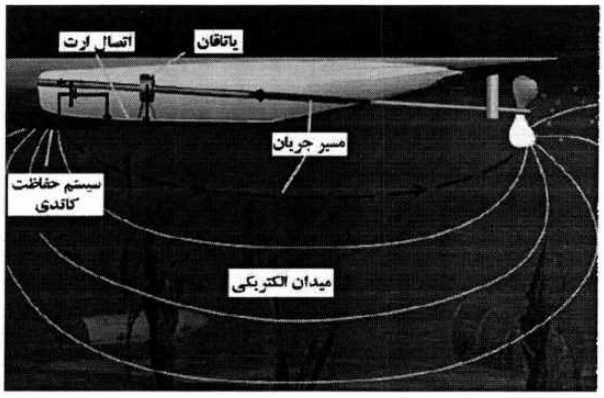
در برخی موارد، جهت پایش مداوم عملکرد این سامانه از یک ولت‌متر استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹-۸۶ دیده می‌شود، این پایش مداوم از طریق نصب یک برس دیگر است که به ولت‌متر متصل است، فراهم می‌گردد.



شکل ۹-۸۶ پایش مداوم یک سامانه غیرفعال توسط ولت‌متر

در مواردی که نیاز به اختلاف پتانسیل‌هایی به‌شدت پایین است، از «سامانه اتصال فعال» استفاده می‌شود. این سامانه بیشتر در شناورهای نظامی کاربرد دارد، زیرا توسط آن می‌توان اثرات نامطلوب «پیام‌های الکترومغناطیسی با فرکانس پایین»[۹۵] از میان برد که می‌توانند موجب از بین رفتن اختفاءپذیری شناور و همچنین فعال شدن مین‌های بستر دریا شوند.

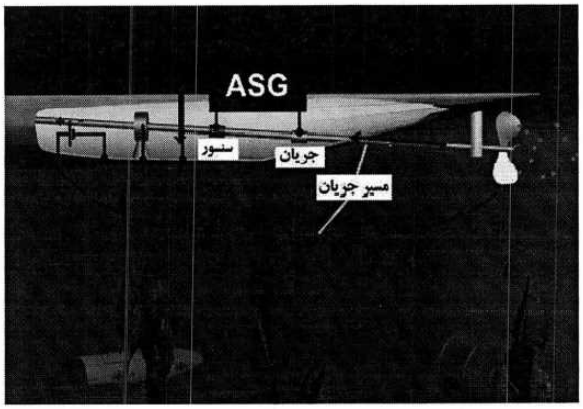
اختلاف پتانسیل میان آندها و سطوح زیر خط آبخور شناور به‌ویژه پروانه آن سبب ایجاد یک میدان الکتریکی استاتیک می‌شود. اصطلاحاً، به این میدان الکتریکی، پتانسیل الکتریکی زیر آب[۹۶] (UEP) نیز اطلاق می‌گردد. بزرگی این میدان با بزرگی جریان میان آند و کاتد و همچنین فاصله میان آنها متناسب است. همان‌طور که در شکل ۹-۸۷ نشان داده شده با فعل و انفعال سامانه حفاظت کاتدی، یک مسیر جریان از سمت آند به‌سمت پروانه شناور به وجود می‌آید، که در ادامه با عبور از شافت به سمت یاتاقان متصل به بدنه هدایت می‌شود. در اثر چرخش شافت، میزان مقاومت الکتریکی میان یاتاقان و بدنه تغییر می‌کند. یکی از مهم‌ترین دلایل این تغییر را می‌توان به چرب شدن سطح یاتاقان نسبت داد. در فرکانس مشخصی از چرخش شافت، جریان الکتریکی یاد شده مدوله[۹۷]شده و با ایجاد یک جریان الکتریکی متناوب، سبب ایجاد یک میدان مغناطیسی در اطراف شناور می‌گردد. همچنین، این میدان مغناطیسی با عنوان «پیام‌های الکترومغناطیسی با فرکانس پایین» نیز شناخته می‌شود.



شکل ۹-۸۷ ایجاد پیام‌های الکترومغناطیس با فرکانس پایین در اثر مدوله شدن جریان حفاظت کاتدی

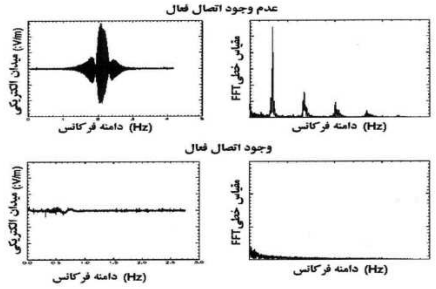
اثرات نامطلوب «پیام‌های الکترومغناطیسی با فرکانس پایین» با نصب سامانه اتصال فعال به شافت از میان برده می‌شود. اصول این سامانه در شکل ۹-۸۸ نشان داده شده است.

5 [illegible] 0 [illegible] 9
5 [illegible] 1 0
5 [illegible] 1 1



شکل ۹-۸۸ از بین رفتن پیام‌های الکترومغناطیس با فرکانس پایین در اثر نصب سامانه اتصال فعال شافت به بدنه

در این سامانه از دو حلقه لغزشی استفاده می‌شود. یک حلقه (sensor) مسئول اندازه‌گیری مداوم اختلاف پتانسیل میان بدنه شناور و شافت آن توسط یک ولت‌متر است. مقادیر اختلاف پتانسیل‌های ثبت شده به‌صورت مداوم در قالب پیام‌هایی به‌سمت یک منبع جریان الکتریکی مستقیم هدایت می‌شود. این منبع جریان به‌نحوی طراحی شده است که به ازای هر میزان اختلاف پتانسیل، مقدار جریان را به‌سمت بدنه شناور هدایت کند که میزان اختلاف پتانسیل بین بدنه و شافت پروانه صفر شود. این موضوع، با نصب حلقه لغزشی دوم (current) که خود نیز به یک ولت‌متر متصل است، میسر می‌شود. این حلقه نیز از یک‌سو به شافت پروانه و از سوی دیگر به منبع جریان متصل می‌گردد. همان‌طور که دیده می‌شود، این حلقه لغزشی مسئول هدایت جریان الکتریکی جاری در شافت پروانه به‌سمت منبع جریان است. منبع جریان با تجزیه‌وتحلیل پیام‌های دریافتی از حلقه‌های لغزشی اول و دوم، جریان دریافتی از حلقه دوم را به‌نحوی تصحیح می‌کند که با تزریق آن به بدنه شناور میزان اختلاف پتانسیل بین بدنه شناور و شافت پروانه صفر شود. به‌صورت‌کلی گفته شده، چنانچه مقدار جریان تزریق شده به بدنه شناور به اندازه‌ای باشد که مقدار اختلاف پتانسیل در ولت‌متر حلقه اول کمتر از ۲ mV باشد، می‌توان این‌گونه انگاشت که دیگر اختلاف پتانسیلی بین بدنه شناور و شافت پروانه آن وجود نخواهد داشت. قرائت اختلاف پتانسیل در حلقه لغزشی دوم موید این مطلب است. این وضعیت همان‌طور که در شکل ۹-۸۹ نشان داده شده سبب از بین رفتن کلیه «پیام‌های الکترومغناطیسی با فرکانس پایین» خواهد شد.

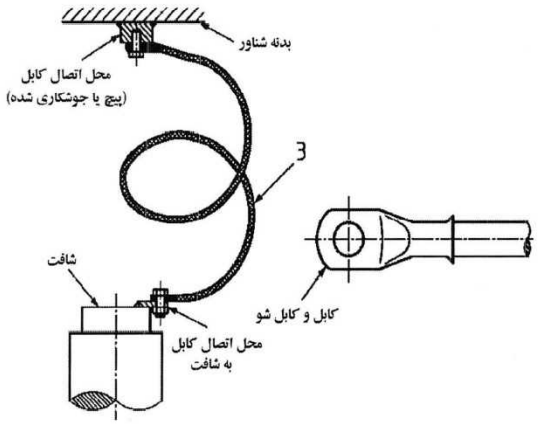


شکل ۹-۸۹ اثرات وجود و عدم وجود سامانه اتصال فعال بر منحنی‌های «میدان الکتریکی – زمان» و «میدان الکتریکی – فرکانس چرخش شافت».

اتصال سکان، بالک و استابیلایز به بدنه شناور

همانند پروانه شناور، جهت حفاظت کاتدی مؤثر سایر متعلقات بدنه نظیر بالک‌ها، سکانس‌ها و پایدار سازها، ایجاد یک اتصال الکتریکی مطمئن بین آنها و بدنه شناور ضروری است.

در حقیقت، ایجاد چنین اتصالی سبب توزیع یکنواخت پتانسیل حفاظت رویِ بدنه شناور به این متعلقات می‌شود. پذیرفته شده‌ترین روش چنین اتصالی، استفاده از کابل‌های منعطف است که توسط اتصالات پیچی از یک‌طرف به شافت سازِکار مدنظر و از طرف دیگر به بدنه شناور متصل می‌شوند. گفته شده سطح مقطع این کابل‌ها باید $35mm^2$ و طول آنها نباید از m ۳ بیشتر باشد. البته، در یک استاندارد متعلق به نیروی دریایی سلطنتی بریتانیا، مقادیر این دو پارامتر به ترتیب $70mm^2$ و m ۳/۸ نیز گزارش شده است. در هر صورت، با نصب این کابل‌ها می‌توان اختلاف پتانسیل میان اجزای مذکور و بدنه شناور را تا مقادیری کمتر از mV ۲۰ کاهش داد. در شکل ۹-۹۰ نحوه ایجاد چنین اتصالی بین بدنه شناور سکان آن نشان داده شده است.



شکل ۹-۹۰ نحوه اتصال بدنه شناور به سکان آن

سرعت حرکت شناور و اثرات نیروی دراگ

یکی از نتایج ناخواسته و نامطلوب به کارگیری سامانه حفاظت کاتدی با آند فداشونده، مربوط به ایجاد نیروی دراگ در اثر وجود تعداد زیاد آنها رویِ بدنه شناور و متعلقات آن می‌باشد. تجربه نشان می‌دهد، که از طریق طراحی صحیح و بهینه این سامانه می‌توان نیروی دراگ را تا حد زیادی کاهش داد. به طور کلی، انتخاب صحیح تعداد آندها و هندسه آنها به همراه جانمایی مناسب‌شان رویِ بدنه شناور و متعلقات آن، سه پارامتر اصلیِ کاهش میزان نیروی دراگ محسوب می‌شوند.

اصولاً، میزان نیروی دراگ وارد به شناور با افزایش سرعت حرکت آن افزایش می‌یابد. بدیهی است با افزایش این نیرو، مقدار نیروی لازم برای چرخش پروانه شناور نیز افزایش یابد، که این موضوع باعث مصرف بیشتر سوخت توسط شناور خواهد شد. به‌عنوان مثال، در یک آزمون میدانی رویِ یک نفتکشِ ۱۸۰۰۰ تنی که بدنه آن به طور کامل توسط آندهای فداشونده روی حفاظت شده بود، مشخص گردید، برای حفظ سرعت ۱۴/۵ گره نسبت به حالتی که بدنه آن فاقد آند است، تقریباً باید نیروی بیشتری به اندازی ٪۱ به پروانه اعمال گردد.

یکی دیگر از مشکلات ناشی از نصب آندهای فداشونده مربوط به ایجاد نوفه‌های صوتی حاصل از برخورد آب دریا با آنها می‌باشد. در حقیقت، این نوفه‌ها می‌توانند بر سامانه سونار شناور تأثیر منفی گذاشته و آن را دچار اختلال نمایند. طبق این قاعده، توصیه می‌شود که حداقل فاصله بین محل نصب اولین آند تا سونار شناور، ۱۰ m – ۹ باشد.

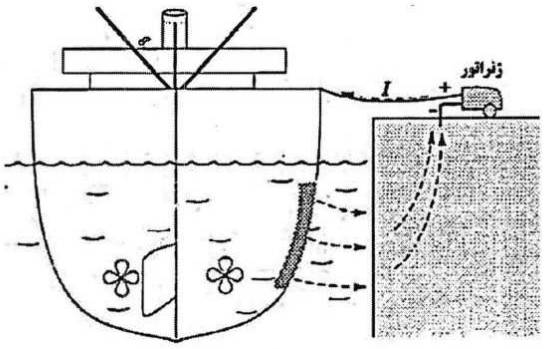
جریان‌های سرگردان

خوردگی ناشی از جریان‌های سرگردان یکی از مهم‌ترین دلایل وارد آمدن خسارات شدید به سطوح بیرونی شناورهای پهلو گرفته در اسکله‌ها می‌باشد. اندازه‌گیری‌های واقعی نشان می‌دهد. بزرگی چگالی جریان موضعی در مناطق در حال خوردگی رقمی در حدود $5A/m^2$ است. برای شناورهای فولادی، این چگالی جریان می‌تواند موجب سرعت خوردگی به اندازه ۶ mm/year شود، که در حقیقت، ۴۰ تا ۵۰ برابر سرعت خوردگی طبیعی فولاد در آب دریا می‌باشد.

به طور کلی، از مهم‌ترین منابع تولید جریان‌های سرگردان برای یک شناور لنگر انداخته در اسکله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. جریان‌های سرگردان ناشی از عملیات جوشکاری در اسکله یا خود شناور.
۲. جریان‌های سرگردان ناشی از سامانه حفاظت کاتدی (به ویژه سامانه تزریق جریان) خود اسکله یا سایر شناورهای لنگ انداخته.

در شکل ۹-۹۱ مثالی از ایجاد جریان‌های سرگردان به هنگام پهلوگیری یک شناور در اسکله در اثر انجام عملیات جوشکاری نشان داده شده است.



شکل ۹-۹۱ تولید جریان‌های سرگردان توسط منبع جریان DC دستگاه جوشکاری واقع در اسکله

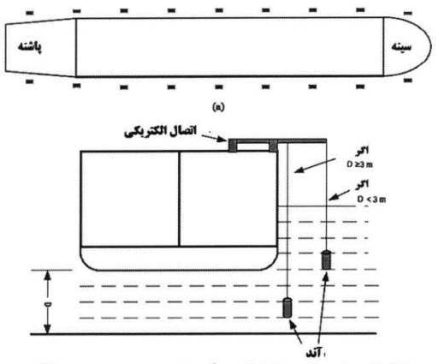
حفاظت کاتدی شناور پهلو گرفته در اسکله

پهلوگیری طولانی مدت شناور در اسکله‌ها می‌تواند سبب خسارات شدید خوردگی شود. در این شرایط به کارگیری سامانه‌های حفاظت از خوردگی به‌ویژه سامانه حفاظت کاتدی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش خسارات خوردگی داشته باشد.

حفاظت کاتدی در دوره آماده‌سازی و نصب تجهیزات شناور[۵۱۲]

چنانچه، سامانه حفاظت کاتدی اصلی یک شناور از نوع آند فداشونده باشد، ضروری است پیش از به آب اندازی، مطابق با اسناد طراحی، آندها مستقیماً روی بدنه و متعلقات آن نصب شوند. درصورتی‌که سامانه حفاظت کاتدی اصلی از نوع آند تزریق جریان باشد، می‌توان از هر دو روش آند فداشونده و تزریق جریان استفاده کرد.

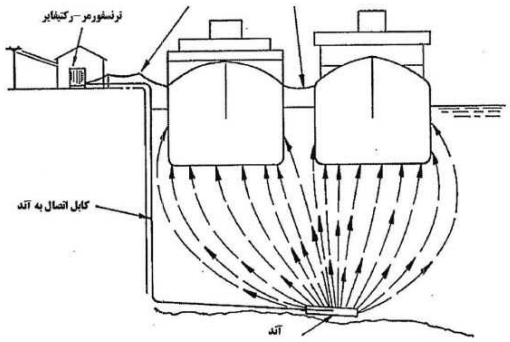
در روش آند فداشونده، آندهایی به‌صورت معلق در اطراف شناور آویزان می‌شوند. جنس و تعداد آندهای معلق باید به نحوی تعیین شود که از قطبیدگی بدنه شناور و متعلقات آن تا حدود تعیین شده اطمینان حاصل گردد. معمولاً، وابسته به مقاومت الکتریکی آب لنگرگاه، آندها یا از جنس آلیاژهای روی، آلومینیم و یا آلیاژهای منیزیوم انتخاب می‌شوند، که البته با توجه به نیروی محرکه بالاتر، آندهای منیزیوم مناسب‌ترین گزینه هستند. به هنگام استفاده از آند منیزیوم رعایت جوانب احتیاطی خاص، مانند حفظ حداقل فاصله ۳ m بین این آندها و بدنه شناور الزامی می‌باشد. در شکل ۹-۹۲ نحوه نصب تعدادی آند معلق در اطراف یک شناور نشان داده شده است.



شکل ۹-۹۲ موقعیت قرارگیری آندهای منیزیوم جهت حفاظت از بدنه شناور پهلو گرفته در اسکله

در روش آند تزریق جریان، همان طور که در شکل ۹-۹۳ دیده می‌شود، یک آند در بستر آب اسکله خوابانده می‌شود. در غالب موارد جنس آند از نوع آهن قراضه است که از طریق یک کابل به یک منبع تولید جریان DC که در اسکله جانمایی شده، متصل می‌گردد. در مواردی که امکان جابه‌جایی شناور وجود دارد، تعدادی آند تزریق جریان استوانه‌ای شکل، به‌صورت معلق در اطراف شناور آویزان می‌شوند. معمولاً، این آندها از جنس تیتانیوم پلاتینیزه شده انتخاب می‌گردند که از طریق یک کابل اتصال به یک کابل مبدل - یک‌سوساز غیرخودکار متصل می‌شوند که روی عرشه وجود دارد. در خصوص استفاده از این روش، رعایت الزامات مربوط به جلوگیری از وقوع خوردگی جریان‌های سرگردان دارای اهمیت ویژه‌ای است.

5 . Fitting Out Period



شکل ۹-۹۳ حفاظت از بدنه شناور با استفاده از سامانه آند تزریق جریان

حفاظت کاتدی در دوره خواب شناور[۵۱۳]

چنانچه زمان دقیق دوره خواب یک شناور و ماندگاری آن در اسکله مشخص نباشد، معمولاً، استفاده از سامانه آند فداشونده خودشناور گزینه مناسبی محسوب نمی‌شود، زیرا برای تعویض آندها نیاز به ورود شناور به حوضچه خشک می‌باشد. برای چنین وضعیتی، می‌توان از هر دو سامانه حفاظت کاتدی مطابق روش پیشین استفاده کرد.

باید در نظر داشت، شناور با دوره خواب بسیار طولانی (سال) ممکن است در اثر تجمع و رشد موجودات دریایی رویِ سطح بدنه بیرون آن متحمل خسارات خوردگی شدید به‌ویژه از نوع خوردگی میکروبی شود. لذا، در چنین مواردی رعایت انتخاب صحیح و الزامات مربوط به پتانسیل حفاظت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بااین‌حال، انتخاب میان دو سامانه آند فداشونده معلق و تزریق جریان به دو عامل زیر بستگی دارد:

۱. دسترسی به منبع تولید جریان.
۲. زمان مجاز اختصاص یک اسکله به شناور.

مزایا و معایب سامانه حفاظت کاتدی

عموماً، سامانه حفاظت کاتدی با آند فداشونده در مواردی به کار گرفته می‌شود که به مقادیر جریان حفاظت کمی نیاز بوده و یا مقاومت ویژه برق‌کاف به اندازه کافی اندک باشد. در هر صورت، این سامانه دارای مزایا و محدودیت‌هایی مختص به خود می‌باشد که در زیر به برخی از آنها اشاره می‌شود.

مزایا

۱. نیازمند منبع تولید جریان الکتریسیته نمی‌باشد.
۲. طراحی آن به نسبت آسان است.
۳. نصب اولیه این سامانه آسان و ارزان است.
۴. معمولاً، با چیدمان صحیح آندها می‌توان به توزیع رضایت‌بخش جریان حفاظت دست یافت.
۵. معمولاً، سبب تولید جریان‌های سرگردان نمی‌شود.

5 1 3

۶. نیازمند بررسی و پایش مداوم در حین شرایط کاری نمی‌باشد.
۷. تنها سامانه حفاظت کاتدی مورد قبول برای سطوح درونی شناورها می‌باشد.
۸. عملیات تغییرات و جایگزینی آندها آسان است.
۹. معمولاً، امکان ایجاد پدیده «حفاظت بیش از حد» وجود ندارد.

معایب

۱. در صورت وجود منبع تولید جریان الکتریسیته، استفاده از آن در طولانی مدت، گران و هزینه‌بر است.
۲. امکان واپایش و تنظیم جریان حفاظت در حین شرایط کاری شناور وجود ندارد.
۳. مصرف آندها موجب کاهش جریان حفاظت خروجی از آنها می‌شود.
۴. سرعت‌های بالای حرکت آب دریا رویِ بدنه بیرونی شناورها با وجود آندهای فداشونده می‌تواند سبب ایجاد نیروی دراگ، تلاطم و نوفه‌های صوتی به‌ویژه در پاشنه‌های آنها شود.
۵. دوره زمانی کارایی این سامانه محدود بوده و در غالب موارد به فاصله زمانی ورود شناور به دو حوضچه خشک متوالی محدود می‌شود. معمولاً، این دوره زمانی ۲ تا ۴ ساله است.
۶. تعداد زیاد آندها سبب افزایش قابل توجه وزن شناور می‌گردد.

حفاظت کاتدی سطوح داخلی شناور

ملاحظات کاربرد حفاظت کاتدی و جنس آندها

اصول حفاظت کاتدی سطوح داخلی یک شناور نظیر مخازن آب توازن، چاهک‌های خن، مخازن سوخت جایگزین شونده با آب، مخازن حمل محموله، مخازن آب شرب، سامانه‌های تأسیساتی و غیره دقیقاً شبیه حفاظت کاتدی سطوح بیرونی آن است، هرچند که دارای پیچیدگی‌های مختص به خود می‌باشد. به طور کلی، مطابق با الزامات کلیه «مؤسسات رده‌بندی»، حفاظت کاتدی سطوح داخلی شناور، منحصراً باید توسط سامانه آند فداشونده به انجام برسد. نصب سامانه آینده تزریق جریان به دلایل زیر اکیداً ممنوع است:

۱. انفجار گازهای قابل اشتعال تجمع یافته در مخازن در اثر نشت جریان الکتریسیته.
۲. آزاد شدن گازهای کلر، اکسیژن و هیدروژن تحت تأثیر فرایند برق‌کاف آب دریا.

همانند سطوح بیرونی شناورها، متداول‌ترین مواد آندی مورد استفاده جهت حفاظت کاتدی سطوح داخلی آنها شامل آلیاژهای پایه آلومینیم و پایه روی می‌باشد، هرچند که در مواردی از آندهای آهنی استفاده می‌شود. این آندها جهت حفاظت کاتدی مبدل‌هایی با جنس آلیاژهای کوپرونیکل کاربرد دارند. متداول‌ترین آند آهنی، از نوع فولاد کربنی AISI grade 1020 می‌باشد. به طور کلی، امروزه استفاده از آندهای پایه منیزیوم جهت حفاظت کاتدی سطوح داخلی شناورها ممنوع می‌باشد. زیرا، پتانسیل مدار بسته بسیار منفی این آند از یک‌سو می‌تواند موجب آسیب شدید به سامانه‌های رنگ موجود و از سوی دیگر این باعث آزاد شدن سریع گاز هیدروژن در فضاهای بسته به‌ویژه مخازن آب توازن شود. اساساً، با تولید این گاز، احتمال وقوع انفجار

درون شناور و همچنین، خسارات هیدروژنی به اجزای فولادی آن دور از انتظار نخواهد بود. البته، استفاده از آندهای پایه روی و پایه آلومینیم بدون محدودیت نیست. برخی از این محدودیت‌ها عبارتند از:

۱. استفاده از آندهای روی در مجاورت مخازن فولادیِ حاویِ برق‌کاف‌هایی با دمای اشتعال $60\,°C >$ و یا نصب آنها رویِ بالکدهای[۴] مخازنِ مجاور به مخازن حاوی برق‌کاف‌های داغ، به دلیل عکس شدن قطبیت در پیل خوردگی می‌تواند سبب تشدید خوردگی مخازن شود.
۲. نصب آندهای پایه آلومینیم در مخازن حاوی گازهای قابل انفجار باید با رعایت جوانب احتیاطی خاصی به انجام برسد، زیرا در اثر جدا شدن این آندها از محل نصب خود و سقوط به کف مخزن امکان ایجاد جرقه وجود خواهد داشت. مطابق بررسی‌ها مشخص شده نصب آندهای آلومینیم در موقعیت‌هایی که انرژی سینتیکی حاصل از سقوط آنها به کف مخزن $275J >$ باشد، بدون مشکل خواهد بود.

ضریب توازن[۵]

با توجه به شرایط کاری هر شناور، مخازن آب توازن آن در فواصل زمانی مختلفی از کل زمان دریانوردی، از آب دریا پر و خالی می‌گردند که اصطلاحاً به این نسب زمانی، «ضریب توازن» گفته می‌شود. بر این اساس، ضریب توازن هر مخزنی که در کل دوره دریانوردی شناور پر از آب دریا است. برابر با واحد در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم، یک فلز زمانی به‌صورت کاتدی حفاظت می‌شود که پتانسیل آن تا حدودِ پتانسیل‌هایِ حفاظت از پیش تعیین شده، کاهش یابد که این فرایند خود تابعی از گذشت زمان می‌باشد. اصولاً، برای مخازنی که دوره توازن کوتاهی دارند، کمبود زمان مانع از قطبش کاتدی مناسب آنها شده، لذا، احتمال عدم حفاظت کافی وجود خواهد داشت. به طور کلی، جهت فائق آمدن بر این مشکل، در طراحی سامانه حفاظت کاتدی مخازن توازن از روش «قطبش سریع» استفاده می‌شود. در این روش، کمبود زمانِ لازم برای قطبش، از طریقِ تامین چگالی جریان‌های حفاظت بیشتر میسر می‌گردد. به‌عنوان نمونه، گفته شده برای مخازنی با زمان توازن کوتاه‌تر از ۵ روز، چگالی جریان حفاظت باید به میزان ٪۲۵ بیشتر از چگالی جریان حفاظت در شرایط کاری عادی باشد.

رسوب‌زدایی[۶] و زنگ‌زدایی

در اثر خوردگی سطوح داخلی شناورهای فولادی و همچنین رسوب‌گذاری مواد موجود در مایعات خورنده، لایه‌های زنگ و رسوب تشکیل می‌شود. پیش از این گفته شد، وجود چنین شرایطی می‌تواند باعث وقوع خوردگی موضعی شدید گردد. لذا، انجام عملیات زنگ‌زدایی و رسوب‌زدایی سطوح داخلی شناورها، به‌ویژه مخازن آب توازن آنها از اهمیت زیادی برخوردار است. به طور کلی، از اصول حفاظت کاتدی می‌توان جهت تمیزکاری سطوح داخلی شناورها استفاده کرد. سازِکار عمل این روش تمیزکاری بر پایه ایجاد یک دوره زمانی کوتاه و کنترل شده از پدیده حفاظت بیش از حد برای تولید گازهای حاصل از واکنش‌های کاتدی می‌باشد. در حقیقت، آزاد شدن این گازها باعث جدایش زنگ و رسوب از روی سطح می‌شود.

4 1 [illegible]
5 1 [illegible]
6 1 [illegible]

سطح فولاد زنگ زده در آب دریا را می‌توان با اعمال مقادیر بسیار زیاد چگالی جریان‌های آندی به‌خوبی تمیز کرد. تجربه نشان داده، تزریق چگالی جریانی به میزان $3230\mathrm{mA/m^2}$ در مدت زمانی ۲۴-۳۶ hr $(92-140A.\mathrm{hr/m^2})$ می‌تواند موجب زدوده شدن سخت‌ترین رسوب‌ها و زنگ‌ها گردد. برای مخازن آب توازن، تمیزکاری را می‌توان به‌وسیله چگالی جریان‌هایی به بزرگی $46-58A.\mathrm{hr/m^2}$به انجام رساند. مطابق معیاری سر راست‌تر، مقدار چگالی جریان لازم برای تمیزکاری مخازن توازن در حدود $1000\mathrm{mA/m^2}$گزارش شده است.

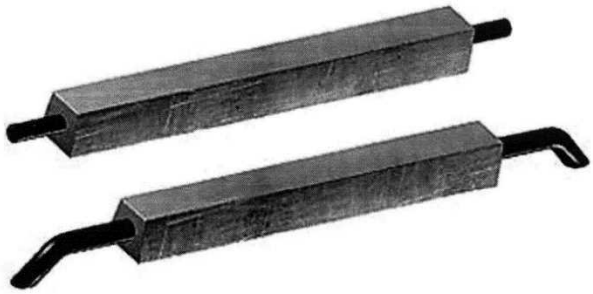
در غالب موارد، عملیات تمیزکاری سطوح داخلی شناورها، توسط «آندهای نواری»[۵۱۷] با جنس منیزیوم به انجام می‌رسد. میزان متوسط جریان آندی خروجی از آندهای نواری منیزیومی رقمی در حدود $11\mathrm{A/m}$می‌باشد.

شکل هندسی آندها

آندهای مناسب جهت نصب در سطوح داخلی شناورها دارای انواع گوناگونی است که در زیر به تعدادی از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود.

آندهای مخازن[۵۱۸] یا آندهای پایه‌دار[۵۱۹]

همان‌طور که در شکل ۹-۹۴ دیده می‌شود، این آندها دارای شکلی کشیده هستند که در میان آنها یک مغزه فلزی قرار داده شده است. معمولاً، سطح مقطع این آندها به‌صورت مدور، مربع و یا ذوزنقه‌ای می‌باشد. این آندها با توجه به شکل هندسی‌شان پس از نصب نسبت به ناحیه تحت حفاظت دارای فاصله‌ای مشخص بوده، به گونه‌ای که تمام سطح آنها در تماس با برق کاف خورنده قرار می‌گیرد. در شکل ۹-۹۵ نمونه‌ای از نصب این آند در مخزن توازن یک شناور نشان داده شده است.



شکل ۹-۹۴ دو آند پایه‌دار

5	[illegible]	1	7
5	[illegible]	1	8
5	[illegible]	1	9
5	[illegible]	2	0

آندهای تخت

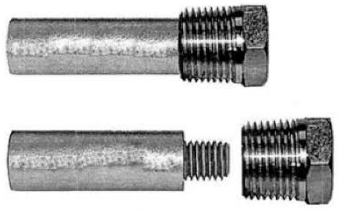
این آندها پیش از این معرفی شد. معمولاً، به دلیل کارایی پایین، به ندرت از آنها جهت حفاظت کاتدی سطوح داخلی شناورها استفاده می‌شود. بااین‌حال، در مواردی که میزان به برق‌کاف تجمع یافته به اندازه‌ای نیست که استفاده از آندهای پایه‌دار جوابگوی نیازمندی‌های حفاظت کاتدی باشد، می‌توان نصب این آندها را در دستور کار قرار داد.

شکل ۹-۹۵ آند پایه‌دار نصب شده در مخزن آب توازن یک شناور

آندهای مبدل‌های حرارتی

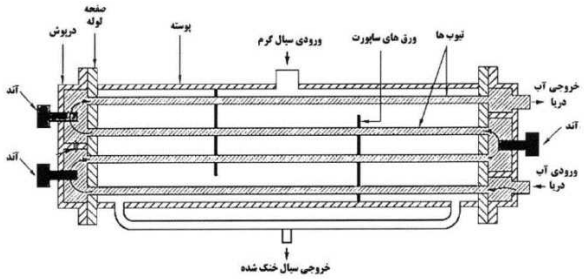
از این آندها جهت حفاظت کاتدی سطوح داخلی جعبه آب‌های[۵۲۱]مبدل‌های حرارتی شناورها که شامل لوله‌ها[۵۲۲]صفحه لوله‌ها[۵۲۳]و درپوش‌ها[۵۲۴]است، استفاده می‌شود. در ادامه تعدادی از انواع متداول این نوع از آندها معرفی شده است.

آندهای قلمی[۵۲۵]در شکل ۹-۹۶ یک نمونه از این آند و در شکل ۹-۹۷ نحوه عملکرد آن به هنگام نصب در جعبه آبِ مبدل حرارتی یک شناور نشان داده شده است. در شکل ۹-۹۸ نمونه‌ای دیگر از نصب آندهای قلمی درون جعبه آب مبدل حرارتی یک شناور دیده می‌شود.

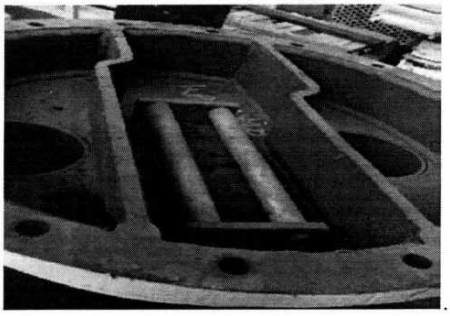


شکل ۹-۹۶ یک آند قلمی

1	2	5 [illegible]
2	2	5 [illegible]
3	2	5 [illegible]
4	2	5 [illegible]
5	2	5 [illegible]



شکل ۹-۹۷ نحوه عملکرد آندها قلمی به هنگام نصب در جعبه آب مبدل حرارتی



شکل ۹-۹۸ دو آند قلمی نصب شده درون جعبه آب مبدل حرارتی یک شناور

آندهای تخت دیسکی[۵۲۶] و نیمه دیسکی[۵۲۷]: این نوع آندها برای حفاظت کاتدی سطوح داخلی جعبه‌های آب مبدل‌هایی استفاده می‌شود که فضای کافی جهت نصب آنها را دارا هستند. در صورت وجود فضای کافی، این آندها باید روی تیغه فلزی جدا کننده موجود در جعبه آب نصب گردند. در شکل ۹-۹۹ نمونه‌هایی از این دو نوع آند نشان داده شده است.

شکل ۹-۹۹ آندهای تخت دیسکی

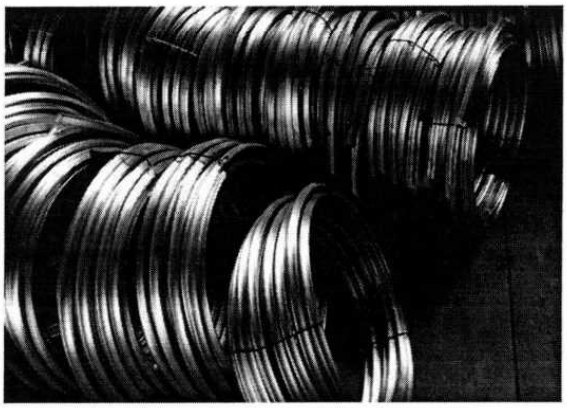
آندهای تخت مربع شکل[۵۲۸]: موارد کاربرد و روش نصب این نوع آندها همانند آندها تخت دیسکی و نیمه دیسکی است. در شکل ۹-۱۰۰ تصویری از این نوع آند دیده می‌شود.

5 2 6
5 2 7
5 2 8

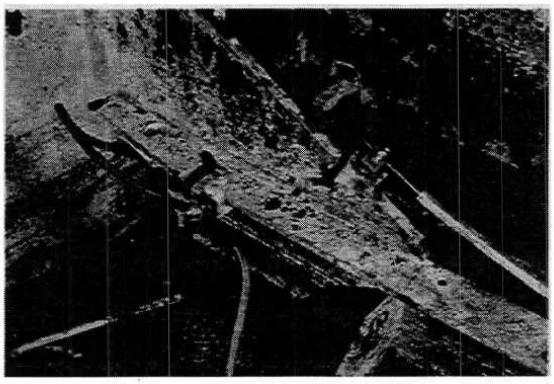
شکل ۹-۱۰۰ یک آند تخته مربع شکل

آندهای نواری

آندهایی هستند نازک و به شکل یک نوار که در میان آنها یک مغزه فولادی وجود دارد. معمولاً، مقطع این آندها مربعی یا مثلثی شکل و با قطرهایی به اندازه mm ۱۰ – ۶ می‌باشد. جنس آنها می‌تواند از منیزیوم، آلومینیوم و روی باشد. از این آندها به هنگامی که پیچیدگی‌های ساختاری امکان حفاظت مناسب بخش‌های مختلف مخازن را توسط آندهای مرسوم با مشکل مواجه می‌سازند، استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، جهت حفاظت از خن‌ها که در غالب موارد از برق‌کاف خورنده پر نمی‌شوند، استفاده از آندهای نواری آلومینیمی توصیه شده است. در موارد خاص، از آندهای نواری با جنس منیزیوم می‌توان جهت زنگ‌زدایی و پوسته‌زدایی سطوح داخلی شناورها استفاده کرد. در شکل ۹-۱۰۰ تصویری از چند کلاف آند نواری منیزیوم دیده می‌شود. همچنین، در شکل ۹-۱۰۱ تصویری از آندهای نواری منیزیومی نصب شده درون مخزن توازن یک شناور نشان داده شده است.



شکل ۹-۱۰۰ تصویری از چند کلاف آندهای نواری



شکل ۹-۱۰۱ آندهای نواری نصب شده در مخزن توازن یک شناور

پوشش پاشش حرارتی[۵۲۹]

مطابق دلایل مطرح شده، معمولاً، از این پوشش‌ها می‌توان جهت حفاظت از سطوح چاهک‌های خن شناورها استفاده کرد. در اغلب موارد، جنس این پوشش از آلیاژهای روی می‌باشد. به منظور افزایش عمر و بهره‌وری این پوشش‌های فلزی، همواره اجرای یک لایه رنگ رویِ سطح آنها ضروری است.

پودرهای فلزی[۵۳۰]

مثل آندهای نواری از این پودرها نیز برای حفاظتِ نواحی از شناورها استفاده می‌شود که پیچیدگی‌های ساختاری و کم بودن الکترولیت خورنده مانع از حفاظت مناسب می‌شود. بیشترین کاربرد پودرهای فلزی برای حفاظت از چاهک‌های خن شناورها می‌باشد. در غالب موارد، جنس این پودرها از فلز روی بوده که دارای ابعاد $10 - 100\mu m$هستند.

الکترودهای مرجع[۵۳۱]

الکترودهای مرجع ابزارهایی برای سنجش پتانسیل فلزات نسبت به برق‌کاف‌ها هستند. در عمل، اندازه‌گیری پتانسیل یک فلز غوطه‌ور در یک برق‌کاف، اندازه‌گیری پتانسیل یک پیل گالوانیک می‌باشد. این پیل، شامل فلز و برق‌کاف به‌عنوان یک نیم پیل و الکترود مرجع (با یک پتانسیل مشخص) در نقش نیم پیل دیگر است که به‌وسیله یک پل برق‌کافی[۵۳۲] هم متصل می‌شوند. معمولاً در الکتروشیمی نظری، الکترود استاندارد هیدروژن به‌عنوان الکترود مرجع اصلی مدنظر است. همان‌طور که در فصل اول گفته شد، این الکترود مرجع با توجه به ویژگی‌هایش ابزار مناسبی جهت استفاده در کاربردهای میدانی نیست و به همین الکترودهایی مقاوم‌تر و سازگارتر با محیط تولید شده‌اند. دو ویژگی اصلی هر الکترود مرجع عبارت است از:

۱. در حین اندازه‌گیری‌ها دچار قطبش شدید نشده و پتانسیل آن با گذشت زمان ثابت باقی بماند.
۲. با محیط سازگار بوده و توسط آن آلوده نشود.

5	[illegible]	2	9
5	[illegible]	3	0
5	[illegible]	3	1
5	[illegible]	3	2

مطابق استانداردهای ISO 20313 و BS 16222 الکترودهای مرجع مناسب جهت پتانسیل سنجی شناورها شامل Ag / AgCI / seawater و Ag / AgCI /0.5 M KCI می‌باشد. در ادامه این دو الکترود مرجع معرفی می‌شوند.

الکترود مرجع Ag / AgCI / seawater

معمولاً، الکترود مرجع Ag / AgCI / seawater دارای یک بافت توری مفتولی از جنس نقره است که سطح آن با یک لایه ضخیمِ کلرید نقره توسط روش‌های حرارتی یا برق‌کافی پوشانده می‌شود. برای کاربردهای دریایی، بخش فلزی این الکترود درون محفظه پلاستیکی منفذدار قرار داده می‌شود، تا علاوه بر امکان تماس مستقیم و مناسب با آب دریا از سایش، جرم گرفتی یا آلوده شدن آن جلوگیری به عمل آورده شود. پتانسیل این الکترود مرجع در دمای $25\,^{\circ}C$ تقریباً ۲۵۰ mV v.s HSE می‌باشد. در شکل ۹-۱۰۲ نمونه‌ای از این الکترود نشان داده شده است.

شکل ۹-۱۰۲ الکترود مرجعِ Ag / AgCI / seawater

الکترود مرجع Ag / AgCI / 0.5 M KCI

اصولاً، تغییر در میزان شوری آب دریا بر میزان پتانسیل الکترود مرجع Ag / AgCI اثرگذار است. این تغییر در آب‌های لب شور، آب‌های مدخل ورودی رودخانه‌ها به دریا، آب‌های لنگرگاه‌ها و غیره به وضوح دیده می‌شود. به طور کلی، رقیق شدن آب دریا موجبِ مثبت‌تر شدن پتانسیل این نوع الکترود و بروز اشتباه در قرائت پتانسیل صحیح فلز می‌گردد. بدین منظور، نوع دیگری از این الکترود ساخته شده که بخش فلزی آن درون یک محفظه پلاستیکی بدون منفذ که از محلول ۰/۵ M KCI پر شده قرار داده می‌شود. البته، جهت تبادل یون‌های کلر میان محیط درونی و بیرونی آن از یک درپوش با منافذ بسیار ریز استفاده می‌گردد. پتانسیل این الکترود مرجع در دمای $25\,^{\circ}C$ تقریباً ۲۴۲ mV v.s HSE می‌باشد. در شکل ۹-۱۰۳ نمونه‌ای از این الکترود نشان داده شده است.

شکل ۹-۱۰۳ الکترودهای مرجعِ Ag / AgCI / 0.5 M KCI

حفاظت کاتدی با آند فداشونده

آندهای فداشونده فلزات فعالی از نظر خواص الکتروشیمیایی هستند که جهت ممانعت از خوردگی فلزات دیگری که در محیطی مشابه تمایل کمتری به خوردگی دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حقیقت، آندهای فداشونده قطب منفی پیل‌های گالوانیک هستند و جنس و ابعاد آنها به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که دارای ولتاژ محرک کافی جهت حفاظت از ساره فلزی مد نظر باشند. معمولاً، در کاربردهای دریایی آندهای فداشونده از میان آلیاژهای روی، آلومینیوم، منیزیوم و فولاد انتخاب می‌شوند. با نصب و اتصال این آندها به بخش‌های مختلف شناورها، پتانسیل‌های آنها به نحوی کاهش می‌یابد که نیروی محرکه انجام خوردگی از میان می‌رود. در شرایط کاری، آندهای فداشونده به‌صورت مداوم خورده و مصرف می‌شوند، به گونه‌ای که لازم است پس از مدت زمان مشخصی تعویض گردند.

اولین استفاده عملی از این روش حفاظت کاتدی در سال ۱۸۲۴ میلادی، توسط «سر هامفری دیوی»، جهت حفاظت از ورق‌های مسی به کار برده شده در بدنه شناورهای نیروی دریایی سلطنتی بریتانیا بوده است. کارایی مناسب این سامانه باعث شده که امروزه نیز از این روش به‌صورت گسترده جهت حفاظت از سطوح بیرونی و درونی شناورها استفاده شود.

در این قسمت، انواع مختلف آندهای فداشونده و الزامات آنها نظیر ترکیب شیمیایی، خواص الکتروشیمیایی، ویژگی‌های الکتریکی و اشکال هندسی که بر طراحی سامانه‌های حفاظت کاتدی شناورها مؤثر هستند، معرفی شده است. در ادامه با تکیه بر اصول خوردگی الکتروشیمیایی، مبانی طراحی سامانه حفاظت کاتدی در قالب یک دستورالعمل بیان شده و در نهایت الزامات و روش‌های نصب آندها جهت دستیابی به حفاظت بهینه ارائه گردیده است.

انواع و ترکیب آندهای فداشونده

آندهای روی

آلیاژهای متنوعی از فلز روی در حفاظت کاتدی شناورهای دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در جدول ۹-۲۰ ترکیب شیمیایی تعدادی از این آندها مطابق چند استاندارد معتبر آورده شده است.

فصل نهم : طراحی عملی سیستم حفاظت کاتدی با ذکر مثال | 731

جدول ۹–۲۰ ترکیب شیمیایی تعدادی از آندهای متداول روی (درصد وزنی)

عنصر	EN 12496				MIL-A 18001 K	ASTM B418	
	Alloy Z1	Alloy Z2	Alloy Z3	Alloy Z4		Type I	Type II
Al	۰/۵– ۰/۱	$\le 0/005$	۰/۲– ۰/۱	۰/۲۵– ۰/۱	۰/۵– ۰/۱	۰/۵– ۰/۱	$\le 0/005$
Cd	۰/۰۷– ۰/۰۲۵	$\le 0/003$	۰/۰۶– ۰/۰۴	$\le 0/001$	۰/۰۷– ۰/۰۲۵	۰/۰۷– ۰/۰۲۵	$\le 0/003$
Fe	$\le 0/005$	$\le 0/0014$	$\le 0/0014$	$\le 0/002$	$\le 0/005$	$\le 0/005$	$\le 0/0014$
Cu	$\le 0/005$	$\le 0/002$	$\le 0/005$	$\le 0/001$	$\le 0/005$	$\le 0/005$	$\le 0/002$
Pb	$\le 0/006$	$\le 0/003$	$\le 0/006$	$\le 0/006$	$\le 0/006$	$\le 0/006$	$\le 0/003$
Mg	–	–	$\le 0/5$	۰/۱۵– ۰/۰۵	–	–	–
Sn	–	–	$\le 0/01$	–	–	–	–
سایر (مجموع)	$\le 0/1$	$\le 0/005$	$\le 0/1$	$\le 0/1$	$\le 0/1$	$\le 0/1$	–
Zn	$\le 99/314$	$\le 99/99$	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده

اصولاً، فلزِ رویِ کاملاً خالص (روی تجاری) به دلیل قطبش شدید ناشی از تشکیل محصولاتِ خوردگیِ بسیار سخت و چسبنده، گزینه مناسبی جهت استفاده به‌عنوان یک آند فداشونده نیست، زیرا به مرور زمان جریان خروج از آن به‌شدت کاهش می‌یابد. برای رفع این نقیصه و جهت افزایش کیفیت آندهای فداشونده روی، افزودن بسیار اندک برخی از عناصر آلیاژی نظیر آلومینیم و کادمیوم بسیار مؤثر است. البته، تشخیص تشکیل ناخالصی‌های ناشی از تعدادی از فلزات سنگین نظیر آهن، مس و سرب بسیار مضر می‌باشد. مشخص شده آندهایی که حاوی عنصر آهن با درصد وزنی $0/0014 \le$هستند، نسبت به سایر آندهای روی دارای کاربرد مطلوبی‌تری می‌باشند. افزایش مقدار آهن از این حد، موجب تشکیل ترکیب $Zn(OH)_2$در اطراف رسوب‌های بین فلزی $FeZn_{13}$ شده که این سبب کاهش جریان خروجی از آند می‌گردد. البته، آندهایی نیز ساخته شده‌اند که در آنها اثر مخرب افزایش مقدار آهن از طریق افزایش میزان عنصر آلومینیم جبران می‌شود. در حقیقت، در اثر افزایش میزان عنصر آلومینیم، آهن موجود به‌صورت یک ترکیب بین فلزی خنثی در می‌آید. یک روش دیگر برای کاهش میزان آهن، افزودن سیلیسیوم است. این عنصر به هنگام ریخته‌گری آندهای روی سبب خروج آهن به‌صورت سرباره می‌شود. در ضمن، افزودن کادمیوم به تشکیل محصولات خوردگی نرم و غیرچسبنده در سطح آند کمک می‌نماید.

متداول‌ترین آند روی که به‌صورت گسترده برای حفاظت کاتدی شناورهای دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد بر اساس استاندارد MIL - A - 18001K یا معادل‌های آن در استانداردهای دیگر (جدول ۹–۲۰) تولید می‌شود. این آند اولین بار توسط نیروی دریایی ایالات متحده برای سرویس‌دهی در آب‌های لب شور و آب دریاها تا دماهای کمتر از $50°C$ تولید شد. در

۷۳۲ | اطلس حفاظت کاتدی

عمل، افزایش دما از این حد سبب خوردگی بین دانه‌ای و در نهایت کاهش ظرفیت الکتروشیمیایی این آند می‌شود. امروزه، جهت رفع این نقیصه آندهای دیگری مانند Alloy Z4 تولید شده است که می‌توانند تا دماهای $60-80°C$ دارای کارکرد مطلوبی باشند. از محدودیت‌های دیگر آند MIL - A - 18001K می‌توان به افت کارایی آن در آب‌های شیرین اشاره داشت. این محدودیت سبب توسعه آندهای دیگری نظیر Alloy Z2 شده که علاوه بر آب‌های شور از آنها می‌توان در کاربردهای مشتمل بر آب‌های شیرین نیز استفاده کرد. به این آند، «آند روی خالص»[۵۳] نیز گفته می‌شود. در هر صورت، به دلیل نیروی محرکه پایین آندهای روی، مقاومت ویژه آب نباید از $2000\ \Omega.\mathrm{cm}$ بیشتر باشد.

آندهای آلومینیم

ترکیب شیمیایی برخی از متداول‌ترین آندهای آلومینیم در جدول ۹-۲۱ آورده شده است. درست شبیه فلز روی تجاری، با خورده شدن آلومینیم خالص یک لایه اکسیدی به شدت چسبنده رویِ سطح آن ایجاد می‌شود که سبب قطبش سریع آلومینیم می‌گردد. بدین ترتیب، آلومینیم خالص نیز یک ماده آندی مناسب و مؤثر به حساب نمی‌آید، زیرا تشکیل لایه‌های اکسیدی عایق (لایه غیر فعال) مانع از خروج مؤثر جریان آندی از آن می‌شود. در برق‌کاف‌های حاوی یون‌های کلر مانند آب دریا، این لایه به‌صورت موضعی تخریب شده و آلومینیم حفره‌دار می‌شود که البته مطلوب نیست.

جهت تولید یک آند آلومینیم با کیفیت، افزودن برخی عناصر آلیاژی به آن ضروری است. در حقیقت، این عناصر آلیاژی سبب حذف کامل لایه اکسیدی از روی سطح آلومینیم و ممانعت در برابر تشکیل مجدد آن می‌شوند که این موجب فعال ماندن سطح آند آلومینیم می‌گردد. از مهم‌ترین عناصر آلیاژی فعال‌سازِ آندهای آلومینیم می‌توان به روی، قلع، جیوه و ایندیوم اشاره داشت. بررسی‌های نشان داده با افزودن جیوه به میزان ۰/۰۵ – ۰/۰۳ درصد، ایندیوم به میزان ۰/۰۳ – ۰/۰۱ درصد و قلع در مقادیر بسیار ناچیز می‌توان آندهایی با کیفیت مناسب تولید کرد. البته با توجه به سمی بودن دو عنصر جیوه و قلع، آندهای آلومینیم آلیاژ شده با ایندیوم دارای کاربرد بیشتری هستند. از منظر الکتروشیمیایی، عنصر نسبت به آلومینیم نجیب‌تر بوده و بر طبق واکنش زیر سبب فعال شدن آندهای پایی آلومینیم می‌شود.

$$\mathrm{Al} + \mathrm{In}^{3+} \rightarrow \mathrm{Al}^{3+} + \mathrm{In}$$

جدول ۹-۲۱ ترکیب شیمیایی تعدادی از آندهای متداول آلومینیم (درصد وزنی)

عنصر	EN 12496				MIL-DTL-24779B	
	Alloy A1	Alloy A2	Alloy A3	Alloy A4	متداول	ولتاژ پایین
Zn	۲ –۶	۳ –۵/۵	۴/۷۵ –۵/۷۵	$\leq 0/15$	۴ –۶/۵	$\leq 0/015$
In	۰/۰۱ –۰/۰۳	–۰/۰۴ ۰/۰۱۶	–۰/۰۲ ۰/۰۱۶	$\leq 0/005$	۰/۱۴ –۰/۰۲	$\leq 0/005$
Ga	–	–	–	۰/۰۹۲ –۰/۱۱	–	۰/۰۹۲ –۰/۱۱
Fe	$\leq 0/12$	$\leq 0/09$	$\leq 0/06$	$\leq 0/08$	$\leq 0/09$	$\leq 0/08$

---

5 . Pure Zine Anode 3 3

□□	≤ 0/006	≤ 0/005	≤ 0/003	≤ 0/005	≤ 0/004	≤ 0/005
□□□	≤ 0/12	≤ 0/01	۰/۰۸–۰/۱۲	≤ 0/1	۰/۰۸–۰/۲	≤ 0/1
□□	≤ 0/002	≤ 0/002	≤ 0/02	–	–	–
□□□	–	–	–	–	≤ 0/001	≤ 0/005
□□□	–	–	–	–	≤ 0/001	≤ 0/001
□□□	–	–	–	–	–	≤ 0/005
□□ □	–	–	–	–	–	≤ 0/01
□□ □	–	–	–	–	–	≤ 0/01
سایر (هر یک)□	≤ 0/02	≤ 0/02	≤ 0/02	≤ 0/02	≤ 0/02	–
سایر (مجموع)	≤ 0/1	≤ 0/1	≤ 0/05	≤ 0/05	≤ 0/05	–
□□□	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده

از آندهای آلومینیم می‌توان برای حفاظت کاتدی بخش‌های مختلف شناورها در آب دریا و آب‌های شور به شرطی که شوری آنها کمتر از ppm ۵۰۰۰ نباشد، استفاده کرد. همچنین، تغییرات دمایی می‌تواند دارای اثرات نامطلوبی بر رفتار آندهای آلومینیم باشد. به‌عنوان نمونه گفته شده آب‌هایی با دماهای $5°C >$سبب خوردگی مرز دانه‌ای آندهای آلومینیم و افت عملکرد آنها می‌شود.

یکی از مسائل مهم مربوط به آندهای فداشونده آلومینیم، توجه به پدیده «خسارات هیدروژنی» است. این موضوع به‌ویژه برای شناورهای نظامی که اغلب از فولادهای کم آلیاژ پر استحکام ساخته می‌شوند، اهمیت ویژه‌ای دارد. امروزه برای حل این مشکل، آندهایی با ولتاژهای پایین تولید شده‌اند. نمونه‌ای از این آند، Alloy A4 می‌باشد، که دقیقاً معادل آند معرفی شده در استاندارد MIL - DTL - 24779D است. لازم به یادآوری است، استاندارد اخیر متعلق به نیروی دریایی ایالت متحده می‌باشد.

آندهای منیزیم

امروزه استفاده از آندهای منیزیم جهت حفاظت کاتدی سطوح درونی و بیرونی شناورها اکیداً ممنوع می‌باشد. البته، یک استثنا مربوط به پهلوگیری طولانی مدت شناورها در اسکله‌ها است که در بخش قبل به آنها اشاره شد. در گذشته به دلیل سمی نبودن محصولات حاصل از خوردگی آندهای منیزیم از آنها جهت حفاظت کاتدی مخازن آب شیرین شناورها استفاده می‌گردید که امروزه به دلیل خطرات ناشی از تصاعد گاز هیدروژن از دستور کار خارج شده‌اند.

در جدول ۹–۲۲ ترکیب شیمیایی متداول‌ترین انواع آندهای منیزیم آورده شده است. به طور کلی، حداکثر کارایی آندهای منیزیم در آب‌هایی با مقاومت ویژه الکتریکی کمتر $5000\ \Omega.\text{cm}$ از حاصل می‌شود.

۷۳٤ | اطلس حفاظت کاتدی

آندهای فولادی

مطابق سری گالوانیک فلزات و آلیاژها در آب دریا، فولادها در مقایسه با آلیاژهایی نظیر فولادهای زنگ نزن و آلیاژهای کوپرونیکل[۳۴]که به‌صورت گسترده در بخش‌های مختلفی از شناورها استفاده می‌شوند، فعال‌تر می‌باشد. بنابراین، از فولادها می‌توان به‌عنوان یک ماده آندی مؤثر جهت حفاظت کاتدی آلیاژهای مذکور استفاده کرد. در استاندارد MIL - A - 19521B از فولاد AISI 1020 به‌عنوان یک آند فداشونده نام برده شده است. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۹-۲۳ دیده می‌شود.

جدول ۹-۲۲ ترکیب شیمیایی تعدادی از آندهای متداول منیزیوم (درصد وزنی)

عنصر	12496 EN		□ MIL-A-21412
	□Alloy M1 (ASTM B843)	□Alloy □□ 2	
Mn	۰/۱۵ –۰/۷	۰/۵ –۱/۵	$\geq 0/15$
□Al	۵ –۷	$\leq 0/05$	۵ –۷
□Zn	۲ –۴	$\leq 0/03$	۲ –۴
□Fe	$\leq 0/005$	$\leq 0/03$	$\leq 0/003$
□Cu	$\leq 0/08$	$\leq 0/02$	$\leq 0/1$
□Si	$\leq 0/3$	$\leq 0/05$	$\leq 0/3$
□Pb	$\leq 0/03$	$\leq 0/01$	–
□Ni	$\leq 0/003$	$\leq 0/002$	$\leq 0/003$
□	$\leq 0/3$	$\leq 0/05$	$\leq 0/3$
سایر	(مجموع)	(هر یک)	(مجموع)
□Mg	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده

جدول ۹-۲۳ ترکیب شیمیایی فولاد کربنی AISI grade 1020 (درصد وزنی)

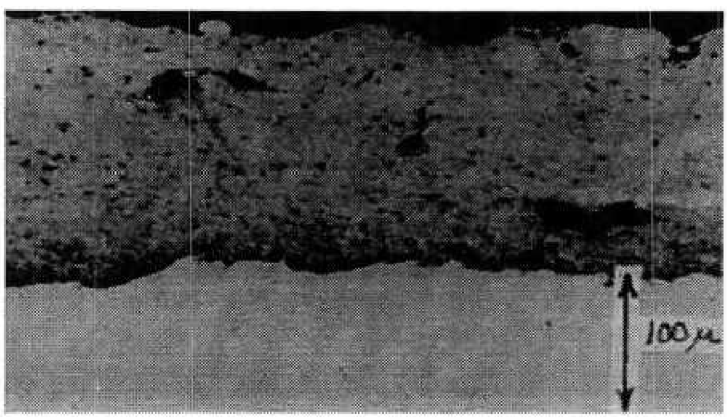
Fe	Mn	□C	□S	□P
باقیمانده	۰/۰ –۳/۶	۰/۰ –۱۸/۲۳	$< 0/05$	$< 0/04$

پوشش فداشونده

اصولاً، از این پوشش‌ها در مناطقی از سطوح داخلی شناورها که امکان استفاده از آندهای فداشونده میسر نیست (به دلیل کم بودن فضا و همچنین کاملاً پر نبودن آنها از برق‌کاف خورنده)، استفاده می‌شود. چاهک‌های خن نمونه‌ای بارز از این مناطق هستند. در استاندارد NES 704 part 3 متعلق به نیروی دریایی سلطنتی بریتانیا، استفاده از پوشش‌های فلزی پایه روی به‌عنوان

---

5 □□Cupronickel □ 3 4



فصل نهم : طراحی عملی سیستم حفاظت کاتدی با ذکر مثال | 735

گزینه‌ای مناسب جهت حفاظت از خوردگی سطوح چاهک‌های خن معرفی شده است. امروزه، پوشش‌های فلزی پایه روی در ترکیب‌های مختلفی در دسترس هستند که در جدول زیر ترکیب پرکاربردترین آنها آورده شده است.

جدول ۹-۲۴ ترکیب شیمیایی پوشش فلزی پایه روی (درصد وزنی)

نام تجاری	ترکیب شیمیایی		
	Zn	Al	سایر
Metco Zinc	باقیمانده	–	$< 0/1$
Metco Zn/15Al	باقیمانده	۱۵	–

معمولاً، این پوشش‌ها مطابق روش ارائه شده در استاندارد DOD - STD - 2138 (متعلق به نیروی دریایی ایالات متحده) و در ضخامت‌هایی به اندازه $175 - 250\mu m$ اجرا می‌شوند. ماده اولیه این نوع پوشش‌ها یا به‌صورت پودر و یا مفتول بوده که توسط روش‌هایی همچون پاشش حرارتی رویِ سطح فلز زیرلایه اعمال می‌گردد. البته، با توجه به وجود تخلخل‌های غیرقابل اجتناب در ساختار این نوع پوشش‌ها، اجرای یک لایه رنگ پایه اپوکسی به منظور آب‌بندی آنها ضروری است. در شکل ۹-۱۰۴ نمونه‌ای از یک پوشش فلزی پایه روی نشان داده شده است.

100μ

شکل ۹-۱۰۴ سطح مقطع پوشش پاشش حرارتی Metco Zn / 15Al رویِ سطح فولاد

خواص الکتروشیمیایی آندهای فداشونده

پتانسیل مدار باز و مدار بسته

منظور از پتانسیل مدار باز (OCP)[۳۵] یک آند فداشونده، پتانسیل آن نسبت به یک برق‌کاف در شرایط عدم اتصال الکتریکی به فلزی دیگر می‌باشد. به بیان دیگر، این پتانسیل، همان «پتانسیل خوردگی» است. مقدار این پارامتر را به‌راحتی می‌توان از طریق چیدمان نشان داده شده در شکل ۹-۱۰۵ محاسبه کرد. حال چنانچه هر یک از آنهای معرفی شده به فلز دیگری با پتانسیل مدار

---

[5] . Open Circuit Potential 3 5

باز نجیب‌تر از خود متصل شوند، پتانسیل آنها به دلیل عبور جریان الکتریکی در پیل خوردگی موجود، تغییر خواهد کرد. این تغییر پتانسیل، ناشی از قطبیدگی این مواد آندی می‌باشد. مطابق تعریف، به این پتانسیل، «پتانسیل مدار بسته (CCP)» یا «پتانسیل کاری»[۵۳۶] آندهای فداشونده گفته می‌شود. اصولاً، آندهای فداشونده به گونه‌ای فرموله می‌شوند که پتانسیل مدار بسته آنها با گذشت زمان دستخوش تغییرات قابل ملاحظه‌ای نشود، زیرا، قطبش بیش از اندازه عامل ناکارآمدی این آندها خواهد بود. در جدول ۹–۲۵ مقادیر پتانسیل مدار بسته آندهای معرفی شده در این بخش آورده شده است.

البته باید توجه داشت، مقادیر پتانسیل‌های مدار باز و مدار بسته آندهای فداشونده تابعی از نوع برق‌کاف، دما، شوری، غلظت اکسیژن محلول و غیره می‌باشد. لذا، توجه به این موارد و استخراج مقادیر صحیح آنها کمک شایان توجهی به طراحی صحیح سامانه‌های حفاظت کاتدی شناورها خواهد کرد.

ولتاژ محرکه[۵۳۷]

در حفاظت کاتدی، ولتاژ محرکه به معنی قدر مطلق تفاضل میان پتانسیل حاصل از قطبش کاتدی فلز تحت حفاظت (پتانسیل حفاظت) و پتانسیل مدار بسته آند فداشونده متصل به آن می‌باشد. هم‌چنین این پارامتر تحت عنوان «نیروی محرکه»[۵۳۸] سامانه حفاظت کاتدی نیز شناخته می‌شود. چون، اختلاف ولتاژ موجود، نیروی محرکه‌ای را جهت برقراری و پایداری حفاظت کاتدی فراهم می‌آورد.

جدول ۹–۲۵ مقادیر پتانسیل مدار بسته آندهای معرفی شده در آب دریا

آند	[illegible]	توضیحات
[illegible]	-۱۰۳۰	$5-25^{\circ}C$ (دمای کاری)
[illegible]	-۱۰۰۰	$5-25^{\circ}C$ (دمای کاری)
[illegible]	-۱۰۳۰	$5-25^{\circ}C$ (دمای کاری)
[illegible]	-۱۰۳۰	$5-25^{\circ}C$ (دمای کاری)
	-۹۷۰	$60-80^{\circ}C$ (دمای کاری)
[illegible]	-۱۰۹۰	–
[illegible]	-۱۰۹۰	–
[illegible]	-۱۰۹۰	–
[illegible]	-۸۳۰	–
[illegible] (متداول)	-۱۰۵۰ تا -۱۱۵۰	بلندمدت
	-۱۰۵۰ تا -۱۱۵۰	کوتاه‌مدت

536 [illegible]
537 [illegible]
538 [illegible]

فصل نهم : طراحی عملی سیستم حفاظت کاتدی با ذکر مثال | 737

MIL-DTL-24779B (ولتاژ پایین)	-۸۰۰ تا -۹۰۰	بلندمدت
	-۷۸۰ تا -۸۳۰	کوتاه‌مدت
Alloy M1 (ASTM B843)	-۱۵۰۰	–
Alloy M2	-۱۵۰۰	–
MIL-A-21412	-۱۵۰۰	–
AISI grade 1020	-۵۰۰ تا -۶۰۰	–
Zn	-۹۵۰	پس از حدود ۱۵ روز
Zn/15Al	-۹۵۰	پس از حدود ۱۵ روز

به‌عنوان مثال، ولتاژ محرک میان یک شناور با جنس فولاد و آند فداشونده نوع Alloy ZI در آب دریا با توجه به آنکه پتانسیل حفاظت فولاد -۸۰۰ mV Ag/AgCl/seawater و پتانسیل مدار بسته آند مذکور -۱۰۳۰ mV Ag/AgCl/seawater است، ۲۳۰ mV می‌باشد.

ظرفیت جریان نظری[۵۳۹]

اصطلاحاً، ظرفیت جریان نظری $\left(Q'_{\mathrm{Zn}}\right)$ یک آند فداشونده به میزان جریان الکتریکی تولید شده در اثر مصرف یک کیلوگرم از آن در مدت یک ساعت گفته می‌شود. مقدار این پارامتر را برای هر عنصر می‌توان بر اساس قانون فارادی محاسبه کرد.

به‌عنوان مثال، مقدار ظرفیت جریان نظری عنصر روی به شرط آنکه با دو الکترون در واکنش شرکت کند عبارت است از:

$$\mathrm{leg(Zn)} = 32.69\mathrm{gr} \sim 26.8\mathrm{A.hr}$$

$$Q'_{\mathrm{Zn}} = (26.8\mathrm{A.hr} \times 1000\mathrm{gr})/(32.69\mathrm{gr} \times 1\mathrm{kg})$$

$$= 819.8\mathrm{A.hr/kg} \sim 820\mathrm{A.hr/kg}$$

در جدول ۲۶-۹ مقدار این پارامتر برای سایر عناصر اصلی موجود در آندهای فداشونده ارائه شده است.

جدول ۹-۲۶ ظرفیت جریان نظری عناصر مهم آندهای فداشونده

ظرفیت جریان نظریه (A.hr/kg)	تعداد الکترون‌های ظرفیت	عنصر
۲۹۸۱	۳	Al
۴۷۷	۲	Cd
۹۶۰	۲	Fe
۲۲۰۴	۲	Mg

---

[539] Theoretical Current Capacity

۹۷۶	۲	□□ □
۸۲۰	۲	□□□

برای آندهای فداشونده که مرکب از عناصر آلیاژ هستند، ظرفیت جریان نظری از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_a' = \frac{\sum_i X_i \times Q_e'}{100}$$

که در آن:

Q_e': ظرفیت جریان نظری آند (A.hr/kg)

X_i: درصد وزنی عنصر آلیاژی.

Q_a': ظرفیت جریان نظری عنصر موجود در آند (A.hr/kg)

باید توجه کرد، ازآنجاکه، آندهای فداشونده به غیر از عناصر پایه خود حاوی درصد اندکی از سایر عناصر آلیاژی هستند، میزان ظرفیت جریان نظری آنها تقریباً برابر با ظرفیت جریان نظری عناصر پایه خود می‌باشد.

ضریب تصحیح ؤ°ظرفیت جریان واقعی[۵۴۱]

در عمل، دستیابی به حداکثر ظرفیت جریان آندهای فداشونده (ظرفیت جریان نظری) ممکن نیست. زیرا، در حین شرایط کاری، بخشی از جرم آنها توسط واکنش‌هایی غیر از واکنش‌های حفاظت کاتدی خورده می‌شود. معمولاً، این خوردگی توسط اکسیژن و یا سایر گونه‌های اکسنده رخ می‌دهد. اصطلاحاً، به این خوردگی، «خود خوری»[۵۴۲]آندها گفته می‌شود. هرچه میزان خودخوری یک آند بیشتر باشد، ظرفیت جریان در دسترس (ظرفیت جریان واقعی) آنها کمتر خواهد بود. در ظرفیت کاتدی، اثر پدیده خودخوری توسط یک ضریب، تحت عنوان «ضریب تصحیح» لحاظ می‌شود. مقدار ضریب تصحیح برای هر آند فداشونده از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\alpha = \frac{I_{ca}}{I_{sc} + I_{ca}}$$

که در آن:

α: ضریب تصحیح آند.

I_{ca}: جریان خروجی از آند به واسطه فرایند حفاظت کاتدی (A) .

I_{sc}: جریان خروجی از آند به واسطه پدیده خودخوری (A) .

اساساً، ضریب تصحیح هر آند تابعی از جنس، زیر ساختار، شکل هندسی، ماهیت برق کاف مجاور و چگالی جریان خروجی از آن می‌باشد. در جدول ۹-۲۷ ضریب تصحیح آندهای معرفی شده ارائه شده است.

جدول ۹-۲۷ ضریب تصحیح آندهای فداشونده

540 □□□□□□□□□□□□□□

541 □□□□□□□□□ □□□□□□□ □□□□□□□

542 □□□□□□□ □□□□□□□

آند	ضریب تصحیح (α)
[illegible]	$> 0/95$
[illegible]	$> 0/95$
[illegible]	$> 0/95$
[illegible]	$> 0/95$
[illegible]	$> 0/80$
[illegible]	$> 0/80$
[illegible]	$> 0/80$
[illegible]	$> 0/80$
[illegible] (متداول)	$> 0/80$
[illegible] (ولتاژ پایین)	$> 0/80$
[illegible]	$\approx 0/50$
[illegible]	$\approx 0/50$
[illegible]	$\approx 0/50$
[illegible]	۰/۹

مطابق با مطالب بالا، ظرفیت جریان واقعی آندهای فداشونده توسط رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$Q_a = \alpha \times Q'_a$$

در جدول ۹-۲۸ مقادیر ظرفیت‌های واقعی آندهای فداشونده ارائه شده است.

جدول ۲۸-۹ ظرفیت جریان واقعی آندهای فداشونده.

آند	ضریب جریان واقعی $Q_a(\text{A.hr/kg})$
[illegible]	۷۸۰
[illegible]	۷۶۰
[illegible]	۷۸۰
[illegible]	۷۸۰
[illegible]	۲۵۰۰
[illegible]	۲۵۰۰
[illegible]	۲۵۰۰
[illegible]	۱۵۰۰
[illegible] (متداول)	۲۵۳۵ (بلندمدت) ۲۵۳۵ (کوتاه‌مدت)
[illegible] (ولتاژ پایین)	۱۶۵۶ (بلندمدت) ۱۸۰۰ (کوتاه‌مدت)

[illegible]	۱۲۰۰
[illegible]	۱۲۰۰
[illegible]	۱۲۰۰
[illegible]	۸۶۴

اصولاً، در میان فاکتورهای محیطی، دما بیشترین اثر را بر ظرفیت جریان آندهای فداشونده دارا می‌باشد. این موضوع بیشتر برای آندهای نصب شده رویِ بالکدهای عرضی[۵۴۳]مخازن شناورها دیده می‌شود. در خصوص آندهای مرسوم روی، دماهای بیشتر از $50°C$ سبب افت شدید ولتاژ محرک و ظرفیت جریان آنها می‌گردد. به طور کلی، آندهای پایه آلومینیم در مقایسه با آندهای پایه روی دارای حساسیت بیشتری به تغییرات دما هستند. بررسی‌ها نشان داده با افزایش دمای سطح آندهای آلومینیم از دمای $20°C$ ، کاهش قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت جریان این آندها رخ می‌دهد. برای آندهای آلومینیم رابطه میان ظرفیت جریان قابل استحصال و دما به‌صورت زیر می‌باشد:

$$Q_a^{T(°C)} = Q_a^{20°C} - 27(T - 20°C)$$

نرخ مصرف[۵۴۴]

به جرم سالیانه مصرف شده از یک آند به ازای یک آمپر جریان خروجی از آن «نرخ مصرف» گفته می‌شود. درست شبیه ظرفیت جریان، آندهای فداشونده دارای نرخ مصرف نظری و واقعی می‌باشند. بین ظرفیت جریان یک آند و نرخ مصرف آن رابطه زیر وجود دارد.

$$E_a = \frac{8760}{Q_a}$$

که در آن:

E_a: نرخ مصرف واقعی آند (kg/A.year)

Q_a: ظرفیت جریان واقعی آند (A.hr/kg)

۸۷۶۰ :تعداد ساعات یک سال (hr) .

در جدول ۹-۲۹ نرخ مصرف واقعی آندهای معرفی شده در این بخش آورده شده است.

جدول ۹-۲۹ نرخ مصرف واقعی آندهای فداشونده

آند	نرخ مصرف $E_a = (\text{kg/A.year})$
[illegible]	۱۱/۲۳
[illegible]	۱۱/۵۲
[illegible]	۱۱/۲۳
[illegible]	۱۱/۲۳
[illegible]	۳/۵۰
[illegible]	۳/۵۰

3 4

4 4

5 [illegible] 4

5 [illegible] 4

[illegible]	۳/۵۰
[illegible]	۵/۸۴
[illegible] (متداول)	۳/۴۵ (بلندمدت)
	۳/۴۵ (کوتاه‌مدت)
[illegible] (ولتاژ پایین)	۵/۲۹ (بلندمدت)
	۴/۸۷ (کوتاه‌مدت)
[illegible]	۷/۳۰
[illegible]	۷/۳۰
[illegible]	۷/۳۰
[illegible]	۱۰/۱۴

پارامترهای الکتریکی آندهای فداشونده

تعریف مقاومت الکتریکی آندها

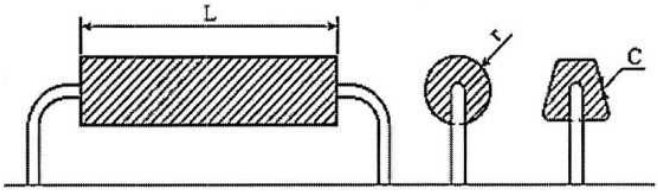
یکی از مهم‌ترین پارامترهای حفاظت کاتدی، مقاومت الکتریکی فصل مشترک آند و برق‌کاف مجاورش می‌باشد که از آن به اختصار به‌عنوان «مقاومت الکتریکی آند» یاد می‌شود. این پارامتر عاملی محدودکننده برای خروج جریان حفاظت از سطح آند است، لذا تعیین مقدار دقیق آن در طراحی بهینه سامانه‌های حفاظت کاتدی شناورها از اهمیت اساسی برخوردار می‌باشد.

اصولاً، مقاومت الکتریکی یک آند فداشونده تابعی از ابعاد، شکل و مقاومت ویژه الکتریکیِ برق‌کاف بوده و هیچ‌گونه وابستگی به جنس آن ندارد. همان‌طور که پیش از این گفته شد (در شکل ۹-۱۰۶ دیده شود)، مقاومت ویژه الکتریکی آب دریا، تابعی از دما و چگالی آن است. در جدول ۹-۳۰ جهت تسهیل در امر طراحی، مقادیر این پارامتر به ازای مقادیر مختلف دما، شوری و چگالی آب دریا ارائه شده است.

جهت تعیین مقدار مقاومت الکتریکی یک آند فداشونده روش‌های مختلفی از جمله اندازه‌گیری‌های میدانی، مدل‌سازی‌های ریاضی و محاسبات رایانه‌ای وجود دارد. در ادامه برخی از روابط پرکاربردی که برای محاسبه این پارامتر استفاده می‌شوند، آورده شده است.

آندهای پایه‌دار

در شکل ۹-۱۰۶ تصویر دو آند پایه‌دار نشان داده شده است. اصولاً، این گروه از آندها در قالب یکی از دو شکل هندسی نشان داده شده تولید می‌شوند.



شکل ۹-۱۰۶ اشکال هندسی مرسوم آندهای پایه‌دار

مقاومت الکتریکی آندهای پایه‌دار از دو رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi \mathrm{L}}\left(ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1\right) \qquad \mathrm{L} \geq 4r$$

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi \mathrm{L}}\left[ln\left\{\frac{2L}{r}\left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right)\right\} + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right] \quad \mathrm{L} < 4r$$

جدول ۹-۳۰ مقدار مقاومت الکتریکی ویژه آب دریا در دما، چگالی و شوری‌های مختلف

مقاومت الکتریکی $(\Omega.m)$	چگالی $(\mathrm{kg/m^3})$	شوری (□□□)	دما$(^{\circ}C)$
۰/۴۷	۱۰۲۴	۳۰۰۰۰	-۵
۰/۴۰	۱۰۲۸	۳۵۰۰۰	-۵
۰/۳۴	۱۰۳۲	۴۰۰۰۰	-۵
۰/۴۱	۱۰۲۴	۳۰۰۰۰	۰
۰/۳۵	۱۰۲۸	۳۵۰۰۰	۰
۰/۲۹	۱۰۳۲	۴۰۰۰۰	۰
۰/۳۵	۱۰۲۴	۳۰۰۰۰	۱۰
۰/۳۰	۱۰۲۸	۳۵۰۰۰	۱۰
۰/۲۴	۱۰۳۲	۴۰۰۰۰	۱۰
۰/۳۰	۱۰۲۴	۳۰۰۰۰	۱۵
۰/۲۶	۱۰۲۸	۳۵۰۰۰	۱۵
۰/۲۱	۱۰۳۲	۴۰۰۰۰	۱۵
۰/۲۷	۱۰۲۴	۳۰۰۰۰	۲۰
۰/۲۳	۱۰۲۸	۳۵۰۰۰	۲۰
۰/۱۸	۱۰۳۲	۴۰۰۰۰	۲۰
۰/۲۴	۱۰۲۴	۳۰۰۰۰	۲۵
۰/۲۱	۱۰۲۸	۳۵۰۰۰	۲۵
۰/۱۷	۱۰۳۲	۴۰۰۰۰	۲۵
۰/۲۲	۱۰۲۴	۳۰۰۰۰	۳۰
۰/۱۹	۱۰۲۸	۳۵۰۰۰	۳۰
۰/۱۶	۱۰۳۲	۴۰۰۰۰	۳۰

نکته: برای آندهایی که فاصله سطح زیرین آنها تا سطح مخزن $0/3m >$ و $0/15m <$می‌باشد، مقدار مقاومت واقعی از حاصل ضرب مقدار به دست آمده از فرمول‌های بالا در ضریب ۱/۳ حاصل می‌شود.

نکته: برای آندهایی با مقاطع غیر مدور، $r = C/2\pi$است که در آن C به معنی محیط این مقاطع است.

که در آن:

R_a: مقاومت الکتریکی آند (Ω)

ρ: مقاومت ویژه الکتریکی برق‌کاف $(\Omega.m)$

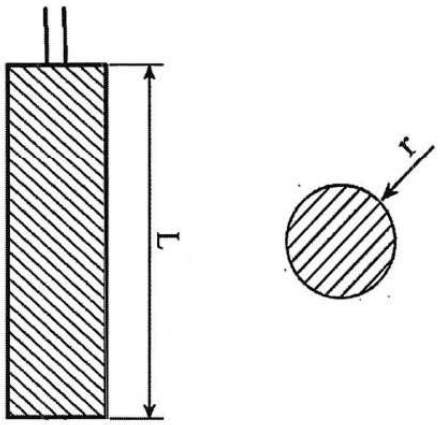
L: طول آند (m).

r: شعاع سطح مقطع آند (m) .

C: محیط سطح مقطع آند (m) .

آندهای معلق

در شکل ۹-۱۰۷ متداول‌ترین شکل هندسی یک آند معلق نشان داده شده است.

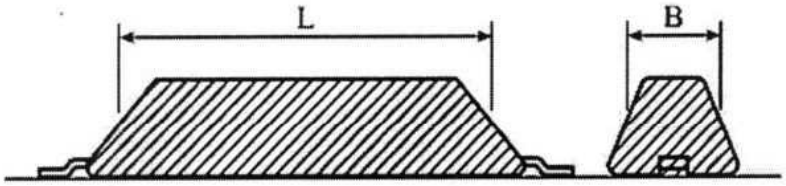


شکل ۹-۱۰۷ آند معلق

مقاومت الکتریکی آندهای معلق را می‌توان با رعایت دو شرط بیان شده توسط روابط مربوط به آندهای پایه‌دار محاسبه کرد.

آندهای تخت کشیده

در شکل ۹-۱۰۸ نمونه‌ای متداول از یک آند تخت کشیده نشان داده شده است.



شکل ۹-۱۰۸ آند تخت کشیده

مقاومت الکتریکی آندهای تخت کشیده را می‌توان بر طبق رابطه زیر محاسبه کرد:

$$R_a = \frac{\rho}{2S} \qquad \mathrm{L} \geq 4B$$

که در آن:

R_a: مقاومت الکتریکی آند (Ω)

ρ: مقاومت ویژه الکتریکی برق کاف $(\Omega.m)$

L: طول آند (m) .

B: عرض آند (m) .

S: میانگین حسابی طول و عرض آند (m) .

آندهای تخت کوتاه و سایر اشکال

مقاومت الکتریکی این آندها از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_a = \frac{0/315 \times \rho}{\sqrt{A}}$$

که در آن:

R_a: مقاومت الکتریکی آند (Ω)

ρ: مقاومت ویژه الکتریکی برق‌کاف $(\Omega.m)$

A: سطح در تماس آند با برق‌کاف (m^2).

مقاومت الکتریکی اولیه آندها

منظور از مقاومت الکتریکی اولیه آندها، مقاومت الکتریکی آنها در زمان‌های ابتدایی غوطه‌وری در برخی کاف‌های خورنده است. مقدار این پارامتر بر اساس روابط ارائه شده در بند قبلی محاسبه می‌شود. در محاسبه مربوط به طراحی سامانه‌های حفاظت کاتدی، این پارامتر به‌صورت R_a^i نشان داده می‌شود.

ضریب مصرف[٥٤٥]

مطابق تعریف، ضریب مصرف یک آند به حداکثر جرمی از آنکه می‌تواند به‌صورت مؤثر مصرف شود، بخش بر جرم کل آند اطلاق می‌گردد. باید توجه داشت، «ضریب مصرف» یک آند با «ضریب تصحیح» آن متفاوت بوده و تنها تابعی از شکل هندسی آند می‌باشد. در محاسبات مربوط به حفاظت کاتدی، این پارامتر به‌صورت U نشان داده می‌شود. در جدول ۹-۳۱ مقدار این پارامتر به ازای اشکال هندسی مختلف آندهای آورده شده است.

جدول ۹-۳۱ مقادیر ضرایب مصرف آندهای مختلف

شکل هندسی آند	□□
آندهای پایه‌دار و معلق کشیده	۰/۹۰

5 □□□ □□□□□□□□□□□□□□□□ 4 5

آندهای پایه‌دار و معلق کوتاه	۰/۸۵
آندهای تخت کشیده	۰/۸۵
کوتاه و سایر اشکال آندهای تخت	۰/۸۰

مقاومت الکتریکی نهایی آندها

با مصرف آنهای فداشونده، جرم و ابعاد آنها کاهش می‌یابد. این موضوع سبب افزایش مقاومت الکتریکی آنها نسبت به حالت ابتدایی می‌شود. روابط متفاوتی جهت محاسبه مقاومت آندها با گذشت زمان وجود دارد که در ذیل به آنها اشاره شده است.

محاسبه جرم آندها در انتهای عمر کاری (مستقل از هندسه)

مقدار جرم یک آند فداشونده در انتهای عمر کاری آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$m_a^f = m_a^i \times (1 - U)$$

که در آن:

m_a^f: جرم خالص (جرم آند به استثنای مغزه) نهایی آند (kg).

m_a^i: جرم خالص (جرم آند به استثنای مغزه) اولیه آند (kg).

U: ضریب مصرف.

مقاومت الکتریکی نهایی آندهای پایه‌دار و معلق

مقدار این پارامتر از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$L_a^f = L_a^i - (0/1 - U \times L_a^i)$$

$$W_a^f = \frac{m_a^f}{d_a \times \mathrm{L}_a^i} \times \mathrm{X}_c$$

$$r_a^f = \sqrt{\frac{X_a^f}{\pi}}$$

که در آن:

L_a^f: طول نهایی آند (m).

L_a^i: طول ابتدایی آند (m).

U: ضریب مصرف.

X_a^f: مساحت نهایی سطح مقطع آند (m^2)

m_a^f: جرم خالص نهایی آند (kg).

d_a: چگالی آند $(\mathrm{kg/m^3})$

X_c: مساحت سطح مقطع مغزه آند (m^2)

r_a^f: شعاع نهایی سطح مقطع آند (m).

مقدار R_a^f توسط روابط ذیل و با جایگذاری مقادیر به دست آمده در آنها محاسبه می‌شود:

$$R_a^f = \frac{\rho}{2\pi \mathrm{L}_a^f}\left(ln\left(\frac{4L_a^f}{r_a^f}\right) - 1\right) \qquad \mathrm{L} \geq 4r$$

$$R_a^f = \frac{\rho}{2\pi \mathrm{L}_a^f}\left[ln\left\{\frac{2L_a^f}{r_a^f}\left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r_a^f}{2L_a^f}\right)^2}\right)\right\} + \frac{r_a^f}{2L_a^f} - \sqrt{1 + \left(\frac{r_a^f}{2L_a^f}\right)^2}\right] \quad \mathrm{L} < 4r$$

نکته: برای آندهایی که فاصله کف آنها تا سطح مخازن $0/3m <$ و $> 0/15m$ می‌باشد، مقدار مقاومت واقع آند از حاصل ضرب مقدار به دست آمده از فرمول‌های بالا در ضریب ۱/۳حاصل می‌شود.

مقاومت الکتریکی نهایی آندهای تخت کشیده

مقدار این پارامتر از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$L_a^f = \mathrm{L}_a^i - (0/1 \times \mathrm{U} \times \mathrm{L}_a^i)$$

$$X_a^f = \frac{m_a^f}{d_a \times \mathrm{L}_a^f} + \mathrm{X}_c$$

$$B_a^f = \sqrt{\frac{8 \times X_a^f}{\pi}}$$

که در آن:

L_a^f: طول نهایی آند (m).

L_a^i: طول ابتدایی آند (m).

U: ضریب مصرف.

X_a^f: مساحت نهایی سطح مقطع آند به استثنای مساحت سطح مقطع مغزه آن (m^2)

m_a^f: جرم خالص نهایی آند (kg).

d_a: چگالی آند $(\mathrm{kg/m^3})$.

X_c: مساحت سطح مقطع مغزه آند (m^2)

B_a^f: عرض نهایی آند (m).

با جایگذاری مقادیر به دست آمده در رابطه زیر مقدار R_a^f به دست می‌آید:

$$R_a^f = \frac{\rho}{2S_f}$$

نکته: S_f میانگین حسابی طول و عرض نهایی آند است.

آندهای تخت کوتاه و سایر اشکال

فرض می‌شود مقاومت الکتریکی نهایی آنها با مقاومت الکتریکی اولیه آنها برابر است. یعنی داریم:

$$R_a^i = \mathrm{R}_a^f$$

جریان خروجی از آندها

میزان جریان خروجی از هر آند فداشونده را به‌راحتی می‌توان توسط قانون و اهم محاسبه کرد. در حفاظت کاتدی، این رابطه به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$I_a = \frac{\Delta \mathrm{V}}{R_a}$$

که در آن:

I_a: جریان خروجی از آند (A).

$\Delta \mathrm{V}$: ولتاژ محرکه سامانه حفاظت کاتدی (V).

R_a: مقاومت الکتریکی آند (Ω).

همان‌طور که پیش از این گفته شد، ولتاژ محرکه یک سامانه حفاظت کاتدی با آند فداشونده به معنی تفاضل میان پتانسیل حاصل از قطبش فلز تحت حفاظت (پتانسیل حفاظت) و پتانسیل مدار بسته آند متصل به آن می‌باشد. باید توجه داشت، مقدار ولتاژ محرکه در کل دوره زمانی به کارگیری آند فداشونده عددی ثابت بوده و تنها مقاومت الکتریکی آن به دلیل کاهش جرم و ابعاد دچار تغییر می‌شود. بر این اساس و مطابق قانون اهم، برای هر آند فداشونده سه جریان خروجی به شرح ذیل قابل محاسبه است:

۱. جریان خروج اولیه از آند (I_a^i).
۲. جریان خروجی نهایی از آند $\left(I_a^f\right)$.
۳. جریان خروجی متوسط از هر آند (I_a^m).

اثر فاصله آندها بر جریان خروجی از آنها

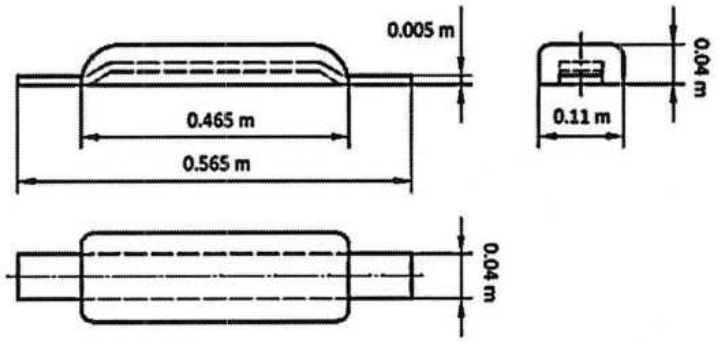
چنانچه فاصله یک آند فداشونده تا آند بعدی، نزدیک‌تر از دو برابر طول آن یا ۵۰ cm (هرکدام بزرگ‌تر باشد) باشد، از میزان جریان خروجی آنها به میزان قابل توجهی کاسته خواهد شد. بررسی‌ها نشان داده در این حالت، جریان خروجی از این آندها اندکی بیشتر از نصف جریان خروجی از آنها در شرایط معمول خواهد بود.

جریان خروجی از آندهای نواری

به طور کلی، میزان جریان خروجی از آندهای نواری باید توسط مطالعات آزمایشگاهی مشخص گردد. بااین‌حال، تجربه نشان داده برای آندهای نواری با ابعاد مرسوم، متوسط جریان خروجی از آندهای نواری منیزیم، آلومینیوم و روی در آب دریا به ازای واحد طول آنها به ترتیب ارقامی در حدود $3/28A/m$ ، $1/1A/m$ و $0/82A/m$ می‌باشد.

مثال اول

مقادیر جریان‌های خروجی از آند Alloy Al با مشخصات ابعادی زیر و با جرم خالص ۵ kg را که روی بدنه فولادی یک کشتی نصب شده، محاسبه کنید. مقاومت الکتریکی ویژه آب دریا را $0/3\Omega.m$ و چگالی آند را $2700kg/m^3$ در نظر بگیرید.



حل:

ازآنجاکه، برای این آند مذکور شرط $L \geq 4B$ برقرار است، بنابراین این آند از نوع تخت کشیده محسوب شده و بنابراین $U = 0/85$ است.

$$R_a^i = \frac{\rho}{2S} = \frac{0/3\Omega.\mathrm{m}}{2\left(\frac{0/465m + 0/11m}{2}\right)} = 0/522\Omega$$

$$I_a^i = \frac{\Delta V}{R_a^i} = \frac{1/090V - 0/800V}{0/522\Omega} = 0/566A$$

$$m_a^f = \mathrm{m}_a^i \times (1 - U) = 5\mathrm{kg} \times (1 - 0/85) = 0/75\mathrm{kg}$$

$$L_a^f = \mathrm{L}_a^i \times (0/1 - U \times L_a^i) = 0/465m - (0/1 \times 0/85 \times 0/465m) = 0/425m$$

$$X_a^f = \frac{m_a^f}{d_a \times \mathrm{L}_a^f} + \mathrm{X}_c = \frac{0/75\mathrm{kg}}{2700\mathrm{kg/m^3} \times 0/425m} + (0/04 \times 0/005m) = 8/5 \times 10^{-4}m^2$$

$$B_a^f = \sqrt{\frac{8 \times \mathrm{X}_a^f}{\pi}} = \sqrt{\frac{8 \times 8/5 \times 10^{-4}m^2}{\pi}} = 0/047m$$

$$R_a^f = \frac{\rho}{2S} = \frac{0/3\Omega.\text{m}}{2\left(\frac{0/047m + 0/425m}{2}\right)} = 0/625\Omega$$

$$I_a^f = \frac{\Delta \text{V}}{R_a^f} = \frac{1/090V - 0/800V}{0/635\Omega} = 0/457A$$

$$I_a^m = \frac{I_a^i + I_a^f}{R_a^i} = \frac{0/556V + 0/457V}{0/522\Omega} = 0/507A$$

طراحی سامانه حفاظت کاتدی سطوح بیرونی شناورها

کلیات

همان‌طور که می‌دانیم، هدف از طراحی و نصب سامانه حفاظت کاتدی سطوح بیرونی شناورها، تأمین جریان حفاظت کافی و همچنین توزیع مناسب آن رویِ این نواحی می‌باشد، تا آنکه پتانسیل‌شان در حدود پتانسیل‌های حفاظت مجاب تعیین شده قرار بگیرد. البته، برای برخی نواحی نظیر سیچست‌ها[546]، تراسترها[547] و ورودی‌های آب به درون شناورها[548] دستیابی به توزیع مناسب جریان حفاظت با مشکل همراه می‌باشد و بنابراین لازم است برای آنها تمهیدات ویژه‌ای در نظر گرفته شود.

در واقعیت، حفاظت کاتدی مؤثر سطوح بیرونی شناورها بدون وجود پوشش‌های رنگ امکان‌پذیر نیست، زیرا، پوشش‌های رنگ از یک‌سو سبب کاهش میزان جریان لازم برای حفاظت شده و از سوی دیگر، شرایط را برای توزیع مناسب جریان حفاظت مهیا می‌سازند. همچنین وجود پوشش‌های رنگ از طریق کاهش میزان جریان لازم برای حفاظت کاتدی، سبب افزایش کاهش قابل ملاحظه میزان جرم آند لازم شده که این از منظر اقتصادی بسیار مطلوب است. البته، در این میان برخی از متعلقات شناورها مانند پروانه‌ها و شافت‌های آنها از این قاعده مستثنی هستند. در هر صورت، حفاظت کاتدی نباید سبب پوشش‌های رنگ یا کاهش کارایی آنها شود. بااین‌حال، در طول شرایط کاری امکان تخریب سامانه‌های رنگ محتمل بوده و لازم است طراح بر اساس بررسی‌های میدانی یا داده‌های موجود در مراجع استاندارد نسبت به تعیین ضرایب تخریب آنها اقدام نماید.

توصیه‌شده است، عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی بر مبنای فواصل زمانی برنامه‌ریزی شده ورود شناورها به حوضچه خشک[549] منظور انجام عملیات تعمیرات و نگهداری در نظر گرفته شود. معمولاً، عمر طراحی ۴ - ۲ سال در نظر گرفته می‌شود، ولی در هر صورت، مقدار آن نباید از ۲ سال کمتر و از ۵ سال بیشتر باشد.

وابسته به الزامات مؤسسه رده‌بندی ساخت شناور و یا درخواست مالک آن، حفاظت کاتدی سطوح بیرونی می‌تواند به‌صورت کامل و یا به‌صورت غیرکامل انجام شود. در حفاظت غیرکامل، تنها قسمت پاشنه[550] شناور تحت حفاظت قرار می‌گیرد، زیرا

5	4	6
5	4	7
5	4	8
5	4	9
5	5	0

در این ناحیه به دلیل وجود تلاطم زیاد آب و همچنین وجود زوج‌های گالوانیک، خطر وقوع خوردگی بیشتر است. البته، در مواردی نیز علاوه بر پاشنه شناور، به دلیل وجود سرعت بالای آب، سینه[۱] آن حفاظت کاتدی می‌شود. در هر صورت، روش حفاظت کاتدی کامل نیست به روش حفاظت کاتدی غیرکامل دارای ارجحیت بیشتری است، زیرا در حین شرایط سرویس‌دهی، امکان تخریب پوشش رنگ موجود رویِ سینه و بدنه میانی شناور امری محتمل می‌باشد.

مراحل طراحی

طراحی سامانه حفاظت کاتدی سطوح بیرون شناورها نیازمند یک رویکرد همه جانبه و نظام‌مند است. بر این مبنا، عملیات طراحی را می‌توان به مراحل زیر تفکیک کرد:

۱. تعیین نواحی نیازمند حفاظت کاتدی.
۲. محاسبه مساحت هر ناحیه.
۳. تعیین مشخصات کاری شناور.
۴. تعیین عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی.
۵. تعیین ضریب تخریب سامانه رنگ.
۶. تعیین مقدار چگالی جریان لازم برای حفاظت از هر ناحیه.
۷. تعیین مقدار جریان لازم برای حفاظت از هر ناحیه.
۸. انتخاب جنس و هندسه آند.
۹. تعیین عمر آند.
۱۰. محاسبه جرم و تعداد آند لازم.
۱۱. بررسی صحت طراحی.
۱۲. تعیین فاصله مجاز بین آندها.

تعیین نواحی نیازمند حفاظت

مهم‌ترین نواحی نیازمند حفاظت کاتدی سطوح زیر خط آبخور یک شناور شامل موارد زیر است:

۱. بدنه.
۲. پروانه (ها).
۳. شافت (ها).
۴. تراستر (ها).
۵. سکان (ها).
۶. پایدارساز (ها).

5 □□□□ 5 1

۷. سیچست‌ها.

۸. ورودی‌های آب.

محاسبه مساحت نواحی زیر خط آبخور

بدنه بیرونی

چنانچه در اسناد مربوط به یک شناور به مقدار مساحت سطوح بدنه زیر خط آبخور آن اشاره نشده باشد، بر اساس رابطه زیر می‌توان این مساحت را با تقریب خوبی محاسبه کرد:

$$AU = (1/8 \times LBP \times D) + (BC \times LBP \times B)$$

که در آن:

AU: مساحت بدنه شناور در زیر خط آبخور (m^2).

L_{BP}: طول خط آب میان دو ستون شناور (m).

D: ارتفاع آبخور شناور در حداکثر مقدار بارگیری (m)

B_C: ضریب گنجایش شناور[۵۲]ضریب چاقی شناور).

B: عرض شناور در محل تقاطع با خط آبخور آن (m).

نکته: ضریب گنجایش یک شناور به نسبت حجم آب جابه‌جا شده توسط آن بخش بر حاصل ضرب سه پارامترِ L_{BP}، D و B گفته می‌شود. در برخی منابع، جهت تسهیل در انجام محاسبات، مقادیر تقریبیِ ضرایب گنجایش برخی از شناورها از قبل محاسبه شده است. نمونه‌ای از این ضرایب در جدول ۹-۳۲ آورده شده است.

جدول ۹-۳۲ ضرایب گنجایش برخی از شناورها

نوع شناور	ضریب گنجایش	نوع شناور	ضریب گنجایش
کشتی‌های مسافربری	۰/۶	شناورهای نظامی سطحی	۰/۵۵
کشتی‌های حمل بار	۰/۷۵	شناورهای ویژه ساحلی	۰/۷۵
نفتکش‌ها	۰/۹ – ۰/۸	شناورهای لایروبی	۰/۸
یدک‌کش‌ها	۰/۶	شناورهای تفریحی	۰/۵ – ۰/۴
کشتی‌های ماهیگیری	۰/۵۵	قایق‌های ورزشی و صیادی	۰/۴

5 [illegible] 5 2

پروانه (ها)

چنانچه در اسناد یک شناور، مساحت مربوط به پروانه (ها) وجود نداشته باشد، مقدار آن (ها) را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد. اصولاً، برای شناورهای با تناژ بیشتر از ۵۰۰۰ ton، میزان مساحت توپی (های) پروانه (ها) قابل چشم‌پوشی نبوده و مساحت آن (ها) باید به مساحت پروانه (ها) افزوده شود.

$$A_P = \left(\frac{\pi \times \eta \times n \times d}{2}\right)$$

$$A_P = \left(\frac{\pi \times \eta \times n \times d_1^2}{2}\right) + (n \times \pi \times d_2 \times L)$$

که در آنها:

A_P: مساحت پروانه (ها) (m^2).

n: تعداد پروانه

d_1: قطر پروانه (ها) (m).

η: فاکتور هندسی پروانه (ها) (نسبت سطح تصویر شده پروانه به مساحت دایره آن).

d_2: قطر توپی پروانه (m).

L: طول توپی پروانه (m).

نکته: چنانچه فاکتور هندسی پروانه (ها) مشخص نباشد، مقدار آن را می‌توان یک در نظر گرفت.

محاسبه مساحت سایر متعلقات

به دلیل ساده بودن شکل هندسی سایر متعلقات، میزان مساحت هر ناحیه را می‌توان به‌راحتی از روی نقشه‌های مرتبط و یا توسط اندازه‌گیری‌های میدانی محاسبه کرد.

تعیین مشخصات کاری شناور

طراحی سامانه حفاظت کاتدی هر شناور باید بر اساس مشخصات کاری آن صورت پذیرد. از مهم‌ترین مواردی که باید در محاسبات طراحی لحاظ شوند، عبارتند از:

عمر طراحی: معمولاً، ۵ - ۲ سال در نظر گرفته می‌شود.

ویژگی محیط: از مهم‌ترین موارد می‌توان به درصد شوری، مقاومت الکتریکی، دما، فعالیت‌های زیستی و غیره اشاره داشت.

جنس بدنه شناورها و متعلقات آنها: معمولاً، شناورها از فولاد ساخته می‌شوند، هرچند که شناورهایی با جنس آلومینیم و فولاد زنگ نزن نیز وجود دارند. مهم‌ترین متعلقات شناورها، پروانه و شافت آن می‌باشد که معمولاً به ترتیب از جنس آلیاژ NAB و فولاد زنگ نزن هستند.

کیفیت سامانه رنگ اجرا شده: کیفیت سامانه رنگ ارتباط تنگاتنگی به کیفیت آماده‌سازی سطح و عملیات رنگ آمیزی دارد. البته، تخریب سامانه رنگ در حین دوره کاری امری محتمل است، بنابراین، طراح باید الزامات مرتبط با آن را در محاسبات خود لحاظ کند.

مشخصات عملیاتی: از مهم‌ترین مشخصات عملیاتی شناورها می‌توان به حداکثر سرعت، سرعت اقتصادی، دوره‌های زمانی ماموریت تعریف شده، زمان توقف در لنگرگاه‌ها، برد عملیاتی و غیره اشاره داشت.

تعیین عمر طراحی

همان‌طور که پیش از این گفته شد، عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی بدنه بیرونی شناورها و متعلقات آنها باید ۲ تا ۵ سال در نظر گرفته شود.

تعیین ضریب تخریب پوشش رنگ

مطابق الزامات دو استاندارد BS 16222 و ISO 20313 میزان ضرایب تخریب پوشش‌های رنگ را می‌توان بر اساس دوام آنها (استاندارد ISO 12944 - 1 دیده شود) به‌صورت زیر محاسبه کرد:

۱. ضریب تخریب پوشش رنگ در ابتدای شرایط سرویس‌دهی: ۲ – ٪۱.

۲. ضریب تخریب سالیانه:

الف. ٪۳ در سال برای رنگ‌های کم دوام.

ب. ۱/۵ ٪ در سال برای پوشش‌های بادوام متوسط.

ج. ۱ – ۰/۵ ٪ در سال برای پوشش‌های با دوام بالا.

لازم به ذکر است، نرخ تخریب سالیانه پوشش‌های رنگ برای شناورهایی با سرعت‌های $25\ knot <$ و همچنین، شناورهای در حال کار در آب‌های یخ زده و یا نواحی از شناورها با شرایط کاری سخت نظیر سکان‌ها بیشتر از ارقام فوق خواهد بود. برای تعیین مواردی، میزان ضرایب تخریب پوشش‌های رنگ را می‌توان از جدول ۹-۳۳ استخراج کرد.

جدول ۹-۳۳ ضرایب تخریب پوشش‌های رنگ در شرایط سخت کاری(٪)

نوع رنگ	دوره زمان کاری شناور			
	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم
پایه اپوکسی	۵	۱۰	۲۰	۳۰
پایه وینیلی	۱۰	۱۵	۲۵	۴۰
بیتومینی	۲۰	۴۰	–	–

تعیین چگالی جریان حفاظت

مقدار چگالی جریان لازم برای حفاظت از هر ناحیه شناورها به پارامترهای مختلفی از جمله جنس آن، کیفیت پوشش رنگ، سرعت حرکت آب، دما، شوری و غیره بستگی دارد. جهت انجام طراحی بهینه ضروری است که مقادیر این پارامترها بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی تعیین شود. در صورت عدم انجام این بررسی‌ها، مقادیر چگالی جریان حفاظت را می‌توان براساس یکی از دو رویکرد زیر تعیین کرد:

رویکرد اول: بر اساس تجربیات و مشاهدات قبلی.

رویکرد دوم: بر اساس چگالی جریان‌های پیشنهاد شده برای حفاظت از فلزات لخت و ضرایب تخریب پوشش‌های رنگ.

جداول ۹-۳۴ چگالی جریان‌های حفاظت بر اساس تجربیات قبلی (رویکرد اول)

ناحیه	جنس	چگالی جریان (mA/m^2)	شرایط کاری
بدنه شناورها	فولار رنگ شده	۳۰ – ۱۰	دریانورد در تمام حالات
		> 60	آب‌های یخ زده
بدنه شناورها	آلیاژهای آلومینیم رنگ شده	≥ 4 (معمولاً، ۱۰٪ فولاد است)	دریانوردی در تمام حالات
بدنه شناورها	فولادهای زنگ نزن رنگ شده	> 2	
سیچست‌ها		۴۰	
تراسترها		۱۵۰	
غلاف‌های پروانه-ها		۱۵۰	
سکان‌ها	فولاد رنگ شده	۱۰۰ – ۵۰	دریانوردی در تمام حالات (تا سال چهارم)
تیغه‌های کمکی سکان‌ها		۱۵۰	
ورودی‌های مکنده‌ها		۱۰۰	
پروانه‌ها	آلیاژهای پایه مس لخت	> 500	

جدول ۹-۳۵ چگالی جریان‌های حفاظت برای فلزات لخت (رویکرد دوم)

جنس	چگالی جریان $(\mathrm{mA/m^2})$	شرایط کاری
فولادهای لخت	۱۰۰ – ۲۰۰	در حالت سکون و بدون وجود اثرات جذر و مد.
	۱۵۰ – ۲۵۰	در حالت سکون و با وجود اثرات جذر و مد.
	۲۲۰ – ۳۵۰	در سرعت‌های < 20 knot
	۳۵۰ – ۵۰۰	در سرعت‌های > 20 knot
	۵۰۰ – ۷۵۰	در آب‌های یخ زده و شرایط کاری سخت
آلیاژهای پایه مس لخت	> 500	در تمام حالات
سایر آلیاژهای غیر آهنی	> 250	در تمام حالات
آلیاژهای آلومینیوم لخت	> 20	در تمام حالات
فولادهای زنگ نزن لخت	> 20	در تمام حالات

اصولاً، در محاسبات مربوط به تعیین چگالی جریان حفاظت نواحی رنگ شده، اثر چگالی جریان اولیه (i_{initial}) در مقایسه با اثر چگالی جریان میانگین (i_{mean}) از اهمیت بسیار اندکی برخوردار است. زیرا، پوشش رنگ، فرصت کافی را جهت قطبش فلز تا حدود پتانسیل حفاظت، حتی با وجود اعمال چگالی جریان‌هایی به اندازه i_{mean} فراهم می‌سازد. بدیهی است، تخریب تدریجی سامانه رنگ موجب افزایش میزان چگالی جریان‌های کاتدی از مقدار i_{mean} خواهد شد. این موضوع به ویژه در انتهای عمر کاری آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد، چون تحت هر شرایطی سامانه حفاظت کاتدی باید توانایی «قطبش سریع» سطح فلز را داشته باشد. بنابراین، منطقی است (البته با نظر طراح) که در محاسبات مربوط به طراحی، یک ضریب اطمینان به میزان ۳۰- ٪۲۰ به حداکثر چگالی جریان حفاظت افزوده گردد.

اساساً، از رویکرد دوم زمانی استفاده می‌شود که از شرایط کاری شناور اطلاعات کاملی در دست باشد. مطابق این رویکرد، جهت انجام محاسبات طراحی لازم است دو چگالی جریان زیر برای هر ناحیه از شناور محاسبه شود:

$$i_z^{\max} = \sum_{1}^{i} f_c^{\max} \times \mathrm{i}_{\mathrm{bd}}^{i} \times \mathrm{t}_{\mathrm{bd}}^{i}$$

$$i_z^{\mathrm{mean}} = \left(\sum_{1}^{i} f_c^{\mathrm{mean}} \times \mathrm{i}_{\mathrm{bd}}^{i} \times \mathrm{t}_{\mathrm{bd}}^{i} \right) + \left(\sum_{1}^{j} f_c^{\mathrm{mean}} \times \mathrm{i}_{\mathrm{bs}}^{j} \times \mathrm{t}_{\mathrm{bs}}^{j} \right)$$

که در آنها:

$i_z^{\max}$: حداکثر چگالی جریان لازم برای حفاظت از هر ناحیه $(\mathrm{mA/m^2})$.

i_z^{mean}: میانگین چگالی جریان لازم برای حفاظت از هر ناحیه (mA/m^2).

$f_c^{\max}$: حداکثر ضریب تخریب پوشش رنگ در کل زمان سرویس‌دهی (٪).

f_c^{mean}: میانگین ضریب تخریب پوشش رنگ در کل زمان سرویس‌دهی (٪).

i_{bd}^i: چگالی جریان حفاظت در حین حرکت شناور (mA/m^2).

i_{bs}^j: چگالی جریان حفاظت در حین سکون شناور (mA/m^2).

t_{bd}^i: کسر زمانی حرکت شناور نسبت به زمان کل سرویس‌دهی (٪).

t_{bs}^j: کسر زمانی سکون شناور نسبت به زمان سرویس‌دهی (٪).

مثال دوم

فرض کنید یک شناور فولادی به‌مدت ۲ سال مطابق مشخصات کاری زیر در حال دریانوردی است. میزان چگالی جریان‌های حفاظت از بدنه آن را محاسبه کنید.

۱. سامانه رنگ بدنه شناور از نوع پایه اپوکسی با دوام متوسط است.
۲. به مدت ۵ ماه در یک اسکله لنگر انداخته است.
۳. به مدت ۴ ماه با سرعت‌هایی $20\ \text{knote} <$ به دریانوردی پرداخته است.
۴. به مدت ۱۵ ماه با سرعت‌هایی $20\ \text{knote} >$ به دریانوردی پرداخته است.

حل:

۱. با فرض $f_c^i = \%1$ و ضریب تخریب سالیانه به میزان ۱/۵٪ داریم:

$$f_c^{max} \qquad f_c^{\text{mean}}$$

۲. مطابق جدول ۹-۳۵ میزان چگالی جریان لازم به هنگام پهلوگیری شناور در اسکله را 150mA/m^2 در نظر می‌گیریم (i_{bs}^1).

۳. مطابق جدول ۹-۳۵ میزان چگالی جریان حفاظت به هنگام دریانوردی با سرعت‌های $20\ \text{knote} >$ را 300mA/m^2 در نظر می‌گیریم (i_{bs}^2).

۴. مطابق جدول ۹-۳۵ میزان چگالی جریان حفاظت به هنگام دریانوردی با سرعت‌های $20\ \text{knote} <$ را 400mA/m^2 در نظر می‌گیریم (i_{bs}^3).

بر اساس فرضیات بالا داریم:

$$i_z^{\max} = \left(\%4 \times 300 \times \frac{15}{24}\right) + \left(\%4 \times 400 \times \frac{4}{24}\right) = 10/1\text{mA/m}^2$$

$$i_z^{\text{mean}} = \left(\%2/5 \times 300 \times \frac{15}{24}\right) + \left(\%2/5 \times 400 \times \frac{4}{24}\right) + \left(\%2/5 \times 150 \times \frac{5}{24}\right)$$
$$= 7/14\text{mA/m}^2$$

محاسبه جریان حفاظت

میزان جریان حفاظت از هر ناحیه از شناور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_z = \text{A}_z \times \text{i}_z$$

که در آن:

I_z: جریان حفاظت از هر ناحیه (mA).

A_z: مساحت هر ناحیه (m^2).

i_z: چگالی جریان حفاظت از هر ناحیه (mA/m^2).

مطابق رابطه بالا و بر مبنای اینکه کدام یک از رویکردها قرار است در طراحی سامانه حفاظت کاتدی لحاظ شود، سه جریان حفاظت زیر قابل تعریف می‌باشد:

رویکرد اول	$I_z = \text{A}_z \times \text{i}_z$
رویکرد دوم	$I_z^{max} = \text{A}_z \times \text{i}_c^{\max}$
رویکرد دوم	$I_z^{\text{mean}} = \text{A}_z \times \text{i}_c^{\text{mean}}$

انتخاب جنس و هندسه آند

همان‌طور که در فصل قبل گفته شد، برای حفاظت از بدنه شناورها و متعلقات آنها در حین شرایط کاری از آندهای پایه روی و پایه آلومینیم استفاده می‌شود. از آندهای پایه منیزیوم نیز جهت حفاظت از شناورهای پهلو گرفته در اسکله‌ها به منظور عملیات نصب تجهیزات و تغییرات آنها استفاده می‌شود. در هر صورت، جهت انتخاب صحیح جنس آند می‌توان مطابق الزامات جدول ۹-۳۶ به کار برد.

جدول ۹-۳۶ راهنمای انتخاب جنس آند فداشونده جهت حفاظت از سطوح بیرونی شناورها

توضیحات	موارد کاربرد	جنس آند
	آب‌های لب شور، آب دریاها و اقیانوس‌ها	□□□□□□□□□
بند ۴- ۱- ۱ دیده شود.	آب‌های شیرین،آب‌های لب شور، آب دریاها و اقیانوس‌ها	□□□□□□□□□
بند ۴- ۱- ۲ دیده شود.	آب‌های لب شور، آب دریاها و اقیانوس‌ها	□□□□□□□□□
	آب‌های لب شور، آب دریاها و اقیانوس‌ها	□□□□□□□□□
بند ۴- ۱- ۳ دیده شود.	برای کلیه آب‌ها	□□□□□□□□□
-	برای کلیه آب‌ها	□□□□□□□□□

آندهای مناسب جهت نصب رویِ سطوح بیرونی شناورها در ابعاد و هندسه‌های مختلف تولید و در اختیار مصرف کنندگان قرار می‌گیرند. البته، برخی از مؤسسات و سازمان‌ها، بر اساس نیازهای خود استانداردهایی را در این زمینه با ذکر جزئیات ساخت تدوین نموده‌اند. در غیر این صورت، هندسه آند لازم را می‌توان از میان محصولات یک شرکت معتبر ساخت آندهای فداشونده انتخاب کرد. به طور کلی، در جدول ۹-۳۷ یک دستورالعمل جهت انتخاب صحیح هندسه آندهای فداشونده جهت نصب رویِ بدنه شناورها و متعلقات آنها آورده شده است.

جدول ۹-۳۷ راهنمای انتخاب هندسه آند جهت حفاظت از سطوح بیرونی شناورها

هندسه آند	موارد کاربرد
تخت مستطیلی شکل	قابل نصب رویِ بدنه شناور و متعلقات آن‌ها به استثنای پروانه و شافت آن.
تخت اشکی شکل	قابل نصب رویِ بدنه شناورها در بخش سینه جهت کاهش نیروی داراگ.
قارچی شکل	قابل نصب رویِ سکان شناورهای کوچک و تندرو جهت کاهش نیروی داراگ.
دستبندی	قابل نصب رویِ شافت پروانه شناورها.
قابل نصب رویِ توپی پروانه	قابل نصب رویِ توپی‌های پروانه‌های شناورهای کوچک و تندرو.
باله‌ای شکل	قابل نصب رویِ بدنه شناورها در مجاورت پروانه‌های شناورهای کوچک و تندرو

تعیین عمر آند

عمر آند فداشونده مدنظر برای طراحی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\square_{\square} = \frac{\square_{\square}\square\square}{\square_{\square}\square\square}$$

که در آن:

$\square_{\square}$: عمر آند (year).

$\square_{\square}$: جرم خالص آند فداشونده (kg).

U: ضریب مصرف آند فداشونده (year).

$\square_{\square}$: نرخ مصرف $(kg/A.year)$.

$\square$: متوسط جریان خروجی از آند (A)

نکته: باید توجه داشت، عمر آند انتخاب شده باید بزرگ‌تر یا مساوی عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی باشد؛ یعنی $\square_{\square} \geq \square_{\square}$.

محاسبه جرم و تعداد آندهای لازم برای حفاظت از هر ناحیه

بر اساس رویکرد اول

در این رویکرد، میزان جرم و تعداد آندهای لازم برای حفاظت کاتدی هر ناحیه از بدنه و متعلقات زیر خط آبخور شناورها از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\square_{\square} = \frac{\square\square\square \times ۸۷۶۰}{\square\square\square_{\square}}$$

$$N_g = \frac{M_g}{M_a}$$

$$N_I = \frac{I_z}{I_a^m}$$

$$N_z = \max(N_g \& N_I)$$

که در آن:

$\square_{\square}$: حداقل جرم خالص آند مورد نیاز (kg).

I_z: جرم حفاظت (A).

t: عمر طراحی سامانه آند فداشونده (year).

U: ضریب مصرف آند فداشونده (year).

Q_a: ظرفیت جریان واقعی آند فداشونده $(A.hr/kg)$.

N_g: تعداد آند بر اساس محاسبات جرمی.

M_a: جرم خالص آند فداشونده (kg).

N_I: تعداد آند بر اساس محاسبات جریان.

I_a^m: متوسط جریان خروجی از آند (A).

N_z: تعداد آند لازم سامانه حفاظت کاتدی.

نکته: چنانچه مقدار N_zفرد باشد، تعداد آندها را $N_z + 1$ در نظر می‌گیریم.

مثال سوم

فرض کنید شناوری با شرایط مثال دوم در حال دریانوردی است. چنانچه مساحت بدنه زیر خط آبخور شناور و متعلقات آن به شرح زیر باشد، تعداد آندهای لازم برای حفاظت کاتدی این شناور را مشخص کنید.

۱. بدنه: $6039m^2$

۲. سکان: $110m^2$

۳. پروانه: $63m^2$

حل:

مطابق جدول ۹-۳۴ چگالی جریان‌های حفاظت از بدنه، سکان و پروانه را به ترتیب $0/015\ mA/m^2$، $0/05\ mA/m^2$ و $0/5\ mA/m^2$ در نظر می‌گیریم. همچنین، مطابق الزامات جداول ۹-۳۶ و ۹-۳۷ جنس آند را از نوع Alloy Al و به شکل تخت مستطیلی انتخاب می‌کنیم. ابعاد این آند را مطابق ابعاد آند مثال اول در نظر می‌گیریم، چون $T_a \geq t$ پارامترهای لازم برای انجام محاسبات عبارت است از:

U = 0.85 Q_a=2500 A.hr/kg I_a^m=0.507 A M_a=5 kg □

ناحیه	$i_z(A/m^2)$	$A_z(m^2)$	$I_z(A)$
بدنه	۰/۰۱۵	۶۰۳۹	۹۰/۵۸۵
سکان	۰/۰۵	۱۱۰	۵/۵
پروانه	۰/۵	۶۳	۳۱/۵
ناحیه	$M_g(kg)$	$M_a(kg)$	N_g
بدنه	۷۴۶/۸۴	۵	۱۵۰
سکان	۴۵/۳۴	۵	۱۰
پروانه	۲۶۰	۵	۵۲
ناحیه	$I_z(A)$	$I_a^m(A)$	N_I
بدنه	۹۰/۵۸۵	۰/۵۰۷	۱۸۰
سکان	۵/۵	۰/۵۰۷	۱۲
پروانه	۳۱/۵	۰/۵۰۷	۶۲
ناحیه	N_g	N_I	$N_z=\max(N_g\&N_I)$
بدنه	۱۵۰	۱۸۰	۱۸۰
سکان	۱۰	۱۲	۱۲
پروانه	۵۲	۶۲	۶۲

بر اساس رویکرد دوم

در این رویکرد، میزان جرم و تعداد آندهای لازم برای حفاظت کاتدی هر ناحیه از بدنه و متعلقات زیر خط آبخور شناورها از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$□_{□} = \frac{□^{□□□}□□ \times ۸۷۶۰}{□□□_{□}}$$

$$N_g = \frac{M_g}{M_a}$$

$$N_I = \frac{I_z^{\max}}{I_a^m}$$

$$N_z = \max(N_g \& N_I)$$

که در آن:

$□_{□}$: حداقل جرم خالص آند مورد نیاز (kg).

I_z^{mean}: میانگین جریان لازم برای حفاظت از هر ناحیه (A).

t: عمر طراحی سامانه آند فداشونده (year).

U: ضریب مصرف آند فداشونده (year).

Q_a: ظرفیت جریان واقعی آند فداشونده (A.hr/kg).

N_g: تعداد آند بر اساس محاسبات جرمی.

M_a: جرم خالص آند فداشونده (kg).

N_I: تعداد آند بر اساس محاسبات جریان.

$I_z^{\max}$: حداکثر جریان لازم برای حفاظت از هر ناحیه (A).

I_a^m: متوسط جریان خروجی از آند (A).

N_z: تعداد آند لازم سامانه حفاظت کاتدی.

نکته: چنانچه مقدار N_z فرد باشد، تعداد آندها را $N_z + 1$ در نظر می‌گیریم.

مثال چهارم

فرض کنید شناوری با شرایط مثال دوم در حال دریانوردی است. چنانچه مساحت بدنه زیر خط آبخور شناور و متعلقات آن به شرح زیر باشد، تعداد آندهای لازم برای حفاظت کاتدی این شناور را مشخص کنید.

۱. بدنه: $6039m^2$

۲. سکان: $110m^2$

۳. پروانه: $63m^2$

حل:

مطابق جدول ۹-۳۵ و الزامات، چگالی جریان‌های لازم برای هر یک از نواحی شناور عبارت است از:

ناحیه	$f_c^{\text{meam}}(\%)$	$f_c^{\max}(\%)$	$i_z^{\text{meam}}(\text{A/m}^2)$	$i_z^{\max}(\text{A/m}^2)$
بدنه	۲/۵	۴	۰/۰۰۷۱۳	۰/۰۱
سکان	۲/۵	۴	۰/۰۰۷۱۳	۰/۰۱
پروانه	۱	۱	۰/۵	۰/۵

نکته: جهت تعیین ضریب تخریب پوشش رنگ بدنه و سکان، دوام آن متوسط در نظر گرفته شده است.

به ترتیب مطابق الزامات جداول ۹-۳۶ و ۹-۳۷ آند را با جنس Alloy Al و با شکل تخت مستطیلی شکل انتخاب می‌کنیم. ابعاد این آند را مطابق ابعاد آند مثال اول در نظر می‌گیریم، چون $T_a \geq t$

پارامترهای لازم برای انجام محاسبات عبارت است از:

$U = 0.85$ Q_a=2500 A.hr/kg I_a^m=0.507 A M_a=5 kg

ناحیه	$\square^{\square\square}\left(\square\square^{۲}\right)$	$\square_{\square}\left(\square^{۲}\right)$	$I_z^{\mathrm{mean}}(A)$
بدنه	۰/۰۰۷۱۳	۶۰۳۹	۴۳/۰۶
سکان	۰/۰۰۷۱۳	۱۱۰	۰/۷۸
پروانه	۰/۵	۶۳	۳۱/۵
ناحیه	$M_g(\mathrm{kg})$	$M_a(\mathrm{kg})$	N_g
بدنه	۳۵۵	۵	۷۲
سکان	۶/۴	۵	۲
پروانه	۲۵۹/۷	۵	۵۲
ناحیه	$\square^{\square\square}\left(\square\square^{۲}\right)$	$\square_{\square}\left(\square^{۲}\right)$	$I_z^{\mathrm{max}}(A)$
بدنه	۰/۰۱	۶۰۳۹	۶۰/۳۹
سکان	۰/۰۱	۱۱۰	۱/۱
پروانه	۰/۵	۶۳	۳۱/۵
ناحیه	$I_z^{\mathrm{max}}(A)$	$I_a^m(A)$	N_I
بدنه	۶۰/۳۹	۰/۵۰۷	۱۲۰
سکان	۱/۱	۰/۵۰۷	۲
پروانه	۳۱/۵	۰/۵۰۷	۶۲
ناحیه	N_g	N_I	$N_z=\max(N_g\&\mathrm{N}_I)$
بدنه	۷۲	۱۲۰	۱۲۰
سکان	۲	۲	۲
پروانه	۵۲	۶۲	۶۲

تأیید صحت طراحی

در صورت طراحی صحیح سامانه حفاظت کاتدی، رابطه زیر برقرار می‌باشد:

$$\frac{N_z\times \mathrm{M}_a\times \mathrm{U}}{E_a\times \mathrm{I}_a}\geq t$$

که در آن:

N_z: تعداد آند لازم سامانه حفاظت کاتدی.

M_a: جرم خالص آند فداشونده (kg).

U: ضریب مصرف آند فداشونده (٪).

M_g: حداقل جرم خالص آند مورد نیاز (kg).

E_a: نرخ مصرف آند فداشونده (kg/A.year).

I_a: میانگین جریان لازم برای حفاظت (A).

t: عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی (year).

نکته: در حقیقت، عبارت سمت چپ، عمر واقعی سامانه آند فداشونده (year) است.

مثال پنجم

بررسی کنید که طراحی‌های انجام شده در مثال‌های چهارم و پنجم صحیح‌اند یا نه؟

حل:

مثال	N_z(total)	M_a(kg)	U(%)	E_a(kg/A.year)	$I_z(A)$(total)	t(year)	عبارت سمت چپ	صحت
سوم	۲۵٤	۵	۰/۸۵	۳/۵	۱۲۷/۵۸۵	۲	۲/٤	✓
چهارم	۱۸٤	۵	۰/۸۵	۳/۵	۷۵/۳٤	۲	۲/۹	✓

تعیین فواصل مجاز بین آندها

یکی از نکات مهم در طراحی سامانه حفاظت کاتدی با آند فداشونده، تعیین فواصل مجاز بین آندها می‌باشد. همان‌طور که گفته شد، کاهش فاصله بیش از اندازه دو آند می‌تواند منجر به کاهش راندمان آنها شود. از سوی دیگر، افزایش بیش از اندازه فاصله میان دو آند نیز می‌تواند منجر به عدم حفاظت کافی سطوح قرار نگرفته در حوزه اثر هر یک از آندها گردد. به طور کلی، حداقل و حداکثر فاصله بین دو آند را می‌توان به‌صورت زیر مشخص کرد:

حداقل فاصله: حداقل فاصله یک آند فداشونده تا آند بعدی نباید کمتر از دو برابر طول آنها یا ۵۰ cm (هرکدام بزرگ‌تر باشد) باشد.

حداکثر فاصله: حداکثر فاصله مجاز بین دو آند، برابر با مجموع شعاع دو دایره فرضی می‌باشد که سطوح محصور درون آنها توسط جریان خروجی هر یک از آندها به‌صورت بهینه حفاظت می‌گردد. مقدار این پارامتر را می‌توان توسط رابطه زیر محاسبه کرد:

$$L_{\max} = \sqrt{\frac{M_a^1 \times \mathrm{U}_a^1}{E_a^1 \times t \times i_z^1 \times \pi}} + \sqrt{\frac{M_a^2 \times \mathrm{U}_a^2}{E_a^2 \times t \times i_z^2 \times \pi}}$$

که در آن:

$L_{\max}$: حداکثر فاصله مجاز بین دو آند (m)

M_a^1: جرم خالص آند اول (kg).

M_a^2: جرم خالص آند دوم (kg).

U_a^1: ضریب مصرف واقعی آند اول (٪).

U_a^2: ضریب مصرف واقعی آند دوم (٪).

E_a^1: نرخ مصرف واقعی آند اول (kg/A.year).

E_a^2: نرخ مصرف واقعی آند دوم (kg/A.year).

t: عمر طراحی سامانه آند فداشونده (year).

i_z^1: چگالی جریان حفاظت مربوط به حوزه اثر آند اول $(\mathrm{A/m^2})$.

i_z^2: چگالی جریان حفاظت مربوط به حوزه اثر آند دوم (A/m^2) .

بااین‌حال، بررسی‌ها و مشاهدات میدانی نشان داده با رعایت حداکثر فاصله‌ای در حدود ۵ m – ۶/۷ می‌توان توزیع رضایت‌بخشی از جریان حفاظت را به دست آورد.

مثال ششم

فرض کنید مطابق مثال سوم جهت حفاظت از بدنه یک شناور به مدت دو سال به چگالی جریانی به مقدار $0/015A/m^2$ نیاز باشد. چنانچه آند مورد استفاده دارای مشخصات مثال اول باشد. حداقل و حداکثر فاصله مجاز بین دو آند عبارت است از:

حل:

حداقل فاصله:

$$L_{\min} = max\{(2 \times L_a)\&0/5\} = max\{(2 \times 0/465)\&0/5\} = 0/93m$$

حداکثر فاصله: مقدار این پارامتر عبارت است از:

$$L_{\max} = 2 \times \sqrt{\frac{M_a^1 \times U_a^1}{E_a^1 \times t \times i_z^1 \times \pi}} = 2 \times \sqrt{\frac{5kg \times 0/85}{3/5kg/A.year \times 2year \times 0/015A/m^2 \times 3/14}} = 7/2m$$

طراحی حفاظت کاتدی سطوح داخلی شناورها

کلیات

حفاظت کاتدی سطوح داخلی شناورها در مقایسه با سطوح بیرونی آنها با پیچیدگی‌های بسیار بیشتری همراه است. این پیچیدگی‌ها ناشی از ویژگی‌های ساختاری، وجود گسترده زوج‌های گالوانیک، وجود نقاط کور، مساحت متغیر سطح در تماس با برق‌کاف خورنده و زمان در معرض قرارگیری آن، تنوع محیط‌های خورنده، وجود آلودگی‌ها، کیفیت سامانه‌های رنگ و غیره می‌باشد.

مراحل طراحی

همانند سطوح بیرونی شناورها، عملیات طراحی سطوح داخلی را نیز می‌توان به مراحل زیر تفکیک کرد:

۱. تعیین نواحی نیازمند حفاظت کاتدی.
۲. محاسبه مساحت هر ناحیه.
۳. تعیین مشخصات کاری شناور.
۴. تعیین عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی.
۵. تعیین مقدار چگالی جریان لازم برای حفاظت از هر ناحیه.
۶. تعیین مقدار جریان لازم برای حفاظت از هر ناحیه.
۷. انتخاب جنس و هندسه آند.

۸. تعیین عمر آند.
۹. محاسبه جرم و تعداد آند لازم.
۱۰. تأیید صحت طراحی.
۱۱. تعیین فاصله مجاز بین آندها.

تعیین نواحی نیازمند حفاظت کاتدی

طبق یک اصل کلی، حفاظت کاتدی سطوح داخلی شناورها به نواحی تعلق می‌گیرد که حداقل در ٪۵۰ زمان کاری خود در تماس با برق کاف خورنده قرار داشته باشند. در قسمت‌های قبل به تعدادی از نواحی اصلی که نیازمند حفاظت کاتدی هستند اشاره شده است. البته، لازم به ذکر است که در میان آنها، مخازن آب توازن، مخازن حمل محموله و خن‌ها از مهم‌ترین نواحی محسوب می‌شوند.

محاسبه مساحت

جهت طراحی بهینه سامانه حفاظت کاتدی، محاسبه مقدار دقیق مساحت هر یک از نواحی سطوح داخلی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. مقدار این پارامتر باید از نقشه‌های ساخت شناور استخراج گردد.

مخازن آب توازن و مخازن مشابه

چنانچه در نقشه‌ها اطلاعات کافی درباره مساحت این مخازن وجود نداشته باشد، از رابطه زیر می‌توان مقدار آن را محاسبه کرد:

$$A_{\mathrm{OP}}=\mathrm{A}_{\max}\times\mathrm{U}_f\times\mathrm{k}$$

که در آن:

A_{OP}: مساحت واقعی سطح در تماس با برق کاف خورنده (m^2).

$A_{\max}$: مساحت مخزن در حالت کاملاً پر شده (m^2).

$\mathrm{U_f}$: ضریب پر بودن[۳] (٪۹۵).

k: ضریب توازن[۴] (٪۵۴).

نکته: $A_{\max}$ به مساحت کل مخزن با در نظرگیری کلیه سطوح صاف، فریم‌های تقویت کننده، لوله‌ها و غیره، گفته می‌شود.

نکته: به نسبت حداکثر مساحتی از مخزن بر مساحت کل مخزن که در حین شرایط کاری پر می‌شود، «ضریب پر بودن» گفته می‌شود.

نکته: به نسبتِ زمان پر بودن مخزن بر کل زمان کاری، «ضریب توازن» گفته می‌شود.باید توجه داشت، همواره درون مخازن خطوط لوله یا تجهیزات جانبی قرار دارد. بنابراین، ضروری است در محاسبه مساحت کل، مساحت این اقلام نیز لحاظ گردد.

3 5
4 5
5 5
5 5

سایر نواحی

معمولاً، مساحت سایر نواحی را می‌توان به راحتی توسط اندازه‌گیری‌های میدانی محاسبه کرد. در نواحی مانند خن‌ها که به دلیل وجود فریم‌های پر تعداد امکان پیچیدگی ساختار محتمل است، تعیین میزان دقیق مساحت چالش برانگیز است. به‌عنوان یک راهنما گفته شده، مساحت این نواحی از حاصل جمع مساحت ورق ساده به علاوه یک ضریب اطمینان به میزان ٪۷۵ حاصل می‌گردد.

تعیین مشخصات کاری

همان‌طور که گفته شد، لازمه طراحی صحیح سامانه حفاظت کاتدی تعیین مشخصات کاری ناحیه‌ای است که قرار است، حفاظت شود. از مهم‌ترین مواردی که باید در محاسبات طراحی لحاظ شوند، عبارتند از:

عمر طراحی: معمولاً، عمر طراحی به میزان فاصله زمانی ورود شناور به دو حوضچه خشک متوالی در نظر گرفته می‌شود، ولی معمولاً نباید از ۳ سال کمتر باشد.

ویژگی محیط: مقدار مقاومت الکتریکی ویژه برق‌کاف درون مخازن، بر میزان جریان خروجی از آندها بسیار تأثیرگذار است. لذا، آگاهی از مقدار این پارامتر نقش تعیین کننده‌ای در طراحی مناسبِ سامانه حفاظت کاتدی مخازن خواهد داشت. مقدار این پارامتر برای مخازن حاوی آب دریا به‌صورت متوسط $0/25\ \Omega.m$ در نظر گرفته می‌شود. البته، همچنین باید تأثیر وجود آلودگی‌ها در مخازن نظیر باقیمانده محموله هیدروکربنی و اختلاط سایر آب‌ها نیز مدنظر قرار بگیرد. به منظور اهداف طراحی، مقدار متوسط مقاومت الکتریکی ویژه آب لب‌شور و آب رودخانه در محدود $1-2\ \Omega.m$ در نظر گرفته می‌شود.

پیچیدگی‌های ساختاری: مخازن درون شناورها به دلیل وجود فریم‌ها و فرورفتگی‌های زیاد دارای نقاط کور بسیاری هستند. لذا، چیدمان مناسب آندها جهت توزیع یکنواخت جریان حفاظت امر بسیار مهمی تلقی می‌شود. همچنین، وجود زوج‌های گالوانیک در اثر عبور لوله‌ها و وجود سایر تجهیزات بر این پیچیدگی‌های ساختار می‌افزایند.

مشخصات کاری مخازن مجاور: برخی از مخازن آب توازن در مجاورت مخازن حاوی مواد هیدروکربنی گرم هستند. لذا، بالکدهای این مخازن و برق‌کاف درون آنها تحت تأثیر این حرارت توانند گرم شوند. همچنان که گفته شد، وجود گرما بر میزان کارایی آندها اثرگذار است و این مورد باید در طراحی لحاظ شود. به طور کلی، از دیدگاه جنس آند نصب شده مجاورت مخازن آب توازن با مخازن حاوی مایعات هیدروکربنی با نقطه اشتغال $60\,°C$ می‌تواند همراه با خطرات ایمنی باشد.

کیفیت سامانه رنگ اجرا شده: سامانه رنگ با گذشت زمان دچار تخریب و زوال می‌شود. بنابراین، ضروری است طراح الزامات مرتبط با این مورد را در محاسبات خود لحاظ کند. در خصوص رنگ‌آمیزی سطوح داخلی شناورها در نظرگیری دو مورد زیر ضروری است:

۱. برخی از نواحی، نظیر کلیه مخازن آب توازن اختصاصی، مخازن توازن جایگزین شونده با محموله تمیز، خن‌ها و غیره به‌صورت کامل رنگ‌آمیزی می‌شوند.

۲. برخی از نواحی، نظیر مخازن حمل محموله‌های هیدروکربنی به‌صورت جزئی رنگ‌آمیزی می‌شوند. در این مخازن، کف و سقف آنها به‌صورت کامل و دیواره‌های جانبی به ترتیب حداقل تا ارتفاع ۰/۳ m و ۱/۲ m رنگ‌آمیزی می‌شوند. این موضوع در شکل ۹-۱۰۹ نشان داده شده است.

مشخصات عملیاتی: از مهم‌ترین مشخصات عملیاتی مخازن می‌توان به مساحت سطح در تماس آنها با برق‌کاف خورنده، ضریب داخلی خالی بودن و ضریب توازن اشاره داشت. معمولاً، برای مخازن آب توازن مقدار ضریب توازن ۶۰ - ٪۵۰ در نظر گرفته می‌شود.

تعیین عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی

معمولاً، حداقل ۳ سال در نظر گرفته می‌شود.

تعیین مقدار چگالی جریان حفاظت

برای حفاظت از مخازن فولادی رنگ نشده که در تماس با آب دریایی ساکن قرار دارند، چگالی جریانی در حدود $30 - 40\mathrm{mA}/m^2$ شرایط حافظتی مناسبی را پدید می‌آورد. البته، در واقعیت چنین شرایطی حاکم نیست، زیرا عمل توازن به‌صورت متناوب و در بازه‌های زمانی ۴۰ - ۳۰ ساعت و یا هرچند روز یک بار تکرار می‌شود. در این شرایط، استفاده از مفهوم «قطبش سریع» بسیار کمک کننده است. زیرا، از طریق ایجاد یک میزان واپایش شده ولتاژ اضافی، علاوه بر از بین بردن اثرات توازن مکرر، شرایط برای زنگ‌زدگی و رسوب‌زدایی سطوح مخازن نیز فراهم می‌شود. بر این اساس، میزان چگالی جریان‌های باقی لازم برای حفاظت مخازن بیشتر از اعداد مذکور در نظر گرفته می‌شود. همچنین، باید اثرات ناشی از وجود مواد هیدروکربنی نظیر نفت را بر چگالی جریان‌های حفاظت لحاظ کرد. در حقیقت، این مواد از طریق رسوب رویِ سطوح مخازن سبب کاهش مقدار چگالی جریان مورد نیاز حفاظت می‌شوند.

برای مخازن آب توازن اختصاصی و مخازن آب توازن جایگزینی شونده با محموله تمیز، مقدار چگالی جریان حفاظت در حدود $100\mathrm{mA}/m^2$ می‌باشد. مقدار این پارامتر برای مخازن آب توازن کثیف، در حدود $80\mathrm{mA}/m^2$است. لازم به ذکر است که این مقادیر با در نظرگیری دوره توازن ۵ روزه یا بیشتر به دست آمده‌اند. برای دوره‌های توازن کوتاه‌تر از ۵ روز، لحاظ نمودن یک ضریب اطمینان به اندازه ۲۵ - ٪۱۰ ضرورت دارد. همچنین، تجربه نشان داده، جهت حفاظت از سطوح رنگ شده چگالی جریان‌هایی به اندازه $5 - 15\mathrm{mA}/m^2$ کفایت می‌کند.

به‌عنوان راهنما در جدول ۳۸-۹ چگالی جریان‌های لازم برای حفاظت از سطوح داخلی شناورها آورده شده است.

تعیین مقدار جریان لازم برای حفاظت از هر ناحیه

میزان جریان حفاظت از هر ناحیه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_z = \mathrm{A}_z \times \mathrm{i}_z$$

که در آن:

I_z: جریان حفاظت از هر ناحیه (mA).

A_z: مساحت هر ناحیه (m^2).

i_z: چگالی جریان حفاظت از هر ناحیه (mA/m^2).

جدول ۹-۳۸ چگالی جریان‌های حفاظت بر اساس تجربیات قبلی (i_z)

ناحیه	جنس	دانسیته جریان مورد نیاز (mA/m^2)
مخازن تریم، چاهک‌های خن، مخازن		
جمع‌آوری خن، مخازن فاضلاب، سطوح آبگیر آزاد		۱۲۰
مخازن آب توازن تمیز	فولاد لخت	۱۱۰ – ۱۰۰
مخازن سوخت بال بالایی[555]		۱۲۰
مخازن رأس جلو و رأس عقب[556]		۱۱۰ – ۱۰۰
مخازن بال پایینی و مخازن با کف دو لایه[557]		۹۰ – ۸۰
مخازن محموله و آب توازن کثیف[558]		۶۰ – ۴۰
سطوح رنگ شده (رنگ‌های مرسوم)	فولاد	۱۵ – ۵
سطوح رنگ شده (رنگ‌های نرم)		۴۰ – ۲۰
کویل‌های حرارتی	کوپرونیکل	
تجهیزات	فلزات مقاوم به خوردگی	> 500
	لخت نظیر فولادهای زنگ نزن	
تجهیزات	آلیاژهای مس	مشابه با فولاد
کلیه مخازن	فولاد (جهت زنگ زدایی و رسوب زدایی)	۱۰۰۰

نکته: وابسته به نظر طراح، می‌توان ضرایب اطمینان به میزان ۳۰ - ۲۰٪ را برای تعیین مقدار چگالی جریان حفاظت لحاظ کرد.
نکته: برای مخازن توازنی که مجاور به مخازن سوخت گرم هستند، چگالی جریان حفاظت باید $> 130\mathrm{mA}/m^2$ در نظر گرفته می‌شود.

انتخاب جنس و هندسه آند

در جدول ۹-۳۹ راهنمایی جهت انتخاب صحیح جنس آندهای فداشونده برای نصب رویِ سطوح داخلی شناورها آورده شده است. همچنین، در جدول ۹-۴۰ هندسه آندهای مناسب جهت حفاظت کاتدی این نواحی معرفی شده است.

جدول ۹-۳۹ راهنمای انتخاب آندهای فداشونده جهت نصب در سطوح درونی شناورها

توضیحات	موارد کاربرد	جنس آند
بند ۴-۱-۱ دیده	کلیه سطوح داخلی	[illegible]
شود.	کلیه سطوح داخلی	
بند ۴-۱-۲ دیده	کلیه سطوح داخلی	[illegible]
شود.	کلیه سطوح داخلی	
بند ۴-۱-۳ دیده	تنها برای فرایند رسوب زدایی و زنگ زدایی	[illegible]

555 [illegible]
556 [illegible]
557 [illegible]
558 [illegible]

شود.

جدول ۹-۴۰ راهنمای انتخاب هندسه آند جهت نصب در سطوح درونی شناورها

هندسه آند	موارد کاربرد
تحت مستطیل شکل	نصب در مخازن
پایه دار	نصب در مخازن
نواری	نصب در چاهک‌های خن و مخازن جهت رسوب زدایی و زنگ زدایی
پودر فلزی روی	چاهک‌های خن و نقاط غیر قابل دسترس
پوشش فلزی	چاهک‌های خن و نقاط غیر قابل دسترس

تعیین عمر طراحی آند

آندهای پایه‌دار و تخت

عمر آند فداشونده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_a = \frac{M_a \times \mathrm{U}}{E_a \times \mathrm{I}_a^m \times \mathrm{k}}$$

که در آن:

T_a: عمر آند (year).

M_a: جرم خالص آند فداشونده (kg).

U: ضریب مصرف آند فداشونده (year)

E_a: عمر طراحی سامانه آند فداشونده (year).

I_a^m: متوسط جریان خروجی از آند (A).

k: ضریب توازن[۵۹](%).

نکته: عمر آند انتخاب شده برای بزرگ‌تر یا مساوی عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی باشد. یعنی $T_a \geq t$ باشد.

آندهای نواری

به‌عنوان یک معیار، گفته شده عمر آندهای نواری با جنس آلومینیم و روی که دارای قطر آنها تقریباً ۱۰ mm – ۶ هستند، کمتر از دو سال می‌باشد.

5 [illegible] 5 9

محاسبه جرم و تعداد آندهای لازم

آندهای تخت و پایه‌دار

میزان جرم و تعداد آندهای لازم برای حفاظت کاتدی از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$N_g = \frac{M_g}{M_a}$$

$$N_I = \frac{I_z}{I_a^m}$$

$$N_z = \max(N_g \& N_I)$$

که در آن:

: حداقل جرم خالص آند مورد نیاز (kg).

I_z: جریان حفاظت (A).

t: عمر طراحی زمان آند فداشونده (year).

U: ضریب مصرف آند فداشونده (٪).

Q_a: ضریب جریان واقعی آند فداشونده (A.hr/kg).

N_g: تعداد آند براساس محاسبات جرمی.

M_a: جرم خالص آند فداشونده (kg).

N_I: تعداد آند براساس محاسبات جریان.

I_a^m: متوسط جریان خروجی از آند (A).

N_z: تعداد آند لازم سامانه حفاظت کاتدی.

مثال هفتم

یک مخزن آب توازن اختصاصی رنگ شده را که حاوی آب دریای تمیز است، در نظر بگیرید. با توجه به شرایط کاری زیر، یک آند با جنس و ابعاد مناسب پیشنهاد نموده و در نهایت تعداد آند مورد نیاز برای حفاظت از آن را محاسبه کنید.

$$A_{\max} = 3803m^2 \qquad U_f = \%90 \qquad K = \%60 \qquad \rho = 0/25\Omega.m \qquad t = 3year$$

حل:

با توجه به رابطه زیر میزان مساحت واقعی در تماس مخزن با آب دریا عبارت است از:

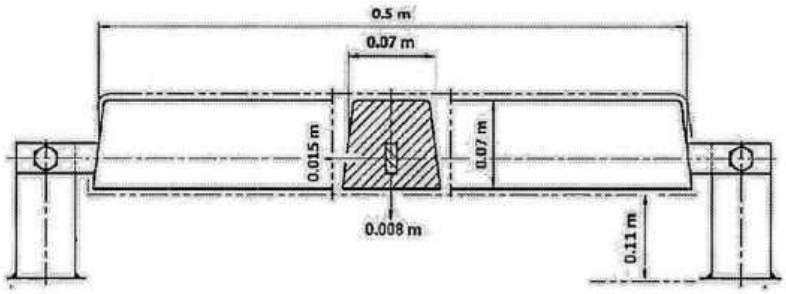
$$A_{OP} = A_{\max} \times U_f \times k = 3803m^2 \times \%90 \times \%50 = 1711m^2$$

هم‌چنین، مطابق جدول ۹-۳۸ میزان چگالی جریان حفاظت را $10\mathrm{mA}/m^2$ در نظر می‌گیریم.

بنابراین داریم:

$$I_z=\mathrm{A}_z\times\mathrm{i}_z = 1711m^2 \times 10\mathrm{mA}/m^2 = 17110\mathrm{mA} = 17/11A$$

جهت انجام محاسبات، یک آند پایه‌دار با جنس Alloy Z1 با مشخصات ابعادی زیر در نظر می‌گیریم. این آند دارای وزن خالص ۱۶/۷ kg می‌باشد.



مقدار r برای این آند عبارت است از:

$$r = \frac{C}{2\pi} = \frac{4 \times 0/07m}{2\pi} = 0/044m$$

با توجه به آنکه شرط $0/5 \geq 4 \times 0/44$ برقرار است، این آند از نوع پایه‌دار کشیده می‌باشد.

پس داریم:

$$R_a^i = \frac{\rho}{2\pi\mathrm{L}} = \left(\mathrm{In}\left(\frac{4L}{r}\right) - 1\right) = \frac{0/25\Omega.\mathrm{m}}{2 \times 3/14 \times 0/5m}\left(\mathrm{In}\left(\frac{4 \times 0/5m}{0/044}\right) - 1\right) = 0/224\Omega$$

$$I_a^i = \frac{\Delta V}{R_a^i} = \frac{(1/03 - 0/8)V}{0/224\Omega} = 1/03A$$

$$m_a^f=\mathrm{m}_a^i \times (1 - U) = 16/7\mathrm{kg} \times (1 - 0/9) = 1/67\mathrm{kg}$$

$$L_a^f=\mathrm{L}_a^i - (0/1 \times U \times L_a^i) = 0/5m - (0/1 \times 0/9 \times 0/5m) = 0/455m$$

$$X_a^f = \frac{m_a^f}{d_a\times\mathrm{L}_a^f}+\mathrm{X}_c = \frac{1/67\mathrm{kg}}{7100\mathrm{kg/m^3} \times 0/455m} + 0/00012m^2 = 0/00062m^2$$

$$r_a^f = \sqrt{\frac{X_a^f}{\pi}} = \sqrt{\frac{0/00062m^2}{3/14}} = 0/014m$$

$$R_a^i = \frac{\rho}{2\pi L_a^f} = \left(\ln\left(\frac{4L_a^f}{r_a^f}\right) - 1\right) = \frac{0/25\Omega.\text{m}}{2 \times 3/14 \times 0/455m}\left(\ln\left(\frac{4 \times 0/455m}{0/014}\right) - 1\right)$$
$$= 0/338\Omega$$

$$I_a^f = \frac{\Delta V}{R_a^i} = \frac{1(1/03 - 0/8)V}{0/338\Omega} = 0/68A$$

$$I_a^m = \frac{I_a^i + I_a^f}{2} = \frac{(1/03 + 0/68)V}{2} = 0/855A$$

$$T_a = \frac{M_a \times U}{E_a \times I_a^m \times k} = \frac{16/7\text{kg} \times 0/9}{11/23\text{kg/A.year} \times 0/855A \times 0/5} = 3/1\text{year}$$

$$T_a \geq t \rightarrow 3/1 \geq 3$$

$$M_g = \frac{I_z \times t \times 8760}{U \times Q_a} = \frac{17/11A \times 5\text{year} \times 8760\text{hr}}{0/9 \times 780\text{A.hr/kg}} = 1068\text{kg}$$

$$N_g = \frac{M_g}{M_a} = \frac{1068\text{kg}}{16/7\text{kg}} = 64$$

$$N_I = \frac{I_g}{I_a^m} = \frac{20/54A}{0/855A} = 20$$

$$N_z = \max(N_g \& N_I) = max(64\&20) = 64$$

آندهای نواری

میزان جرم و متراژ لازم آند نواری برای حفاظت کاتدی ناحیه مدنظر از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$M_g = \frac{I_z \times t \times 8760}{U \times Q_a}$$

$$L_r = \frac{M_g}{M_r}$$

M_g: حداقل جرم خالص آند مورد نیاز (kg).

I_z: جریان حفاظت (A).

t: عمر طراحی سامانه آند فداشونده (year).

Q_a: ظرفیت جریان واقعی آند نواری $(A.hr/kg)$.

U: ضریب مصرف آند نواری (٪).

L_r: طول آند مورد نیاز (m)

M_r: جرم خالص آند نواری با ازای واحد طول (kg/m).

مثال هشتم

یک چاهک خن با مساحت ۳۰ m را در نظر بگیرید. چنانچه بخواهیم این چاهک را به مدت ۲ سال توسط آند نواری با جنس روی حفاظت کاتدی کنیم، میزان جرم و متراژ آند مورد نیاز را محاسبه کنید.

حل:

برای حفاظت کاتدی، آند نواری با جنس Alloy Z1 را که ضریب مصرف آن ٪۹۵ است، انتخاب می‌کنیم. با توجه به قاعده‌های فوق آندی با مشخصات زیر انتخاب می‌کنیم که عمر آن حدود ۲ سال باشد.

[illegible] (kg/m)	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	♦

حل:

مطابق جدول ۹-۳۸ میزان چگالی جریان حفاظت را 120mA/m^2 در نظر می‌گیریم. بنابراین داریم:

$$I_z = A_z \times i_z = 30m^2 \times 120\text{mA/m}^2 = 3600\text{mA} = 3/6A$$

$$M_g = \frac{I_g \times t \times 8760}{Q_a \times U} = \frac{3/6A \times 2\text{year} \times 8760\text{hr}}{780\text{A.hr/kg} \times 0/95} = 85\text{kg}$$

$$L_r = \frac{M_g}{M_r} = \frac{85\text{kg}}{3/57\text{kg/m}} = 624m$$

تأیید صحت طراحی

در صورت طراحی صحیح سامانه حفاظت کاتدی، رابطه زیر برقرار می‌باشد:

$$\frac{N_z \times M_a \times U}{E_a \times I_z} \geq t$$

که در آن:

N_z: تعداد آند لازم سامانه حفاظت کاتدی.

M_a: جرم خالص آند فداشونده (kg).

U: ضریب مصرف آند فداشونده (٪).

E_a: ضریب مصرف آند فداشونده (kg/A.year).

I_z: میانگین جریان لازم برای حفاظت (A).

t: عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی (year).

نکته: در حقیقت، عبارت سمت چپ، عمر واقعی سامانه فداشونده (year) است.

مثال نهم

بررسی کنید که طراحی مثال هفتم صحیح است یا نه؟

حل:

N_z(total)	M_a(kg)	[illegible] (٪)	E_a(kg/A.year)	I_z(A)(total)	[illegible]	عبارت سمت چپ	صحت
۶۴	۱۶/۷	۰/۹	۱۱/۲۳	۱۷/۱۱	۳	۵	✓

تعیین نمود فاصله مجاز بین آندها

اصولاً، با توجه به ساختار پیچیده سطوح درونی شناورها، امکان ارائه رابطه‌ای قطعی و مبتنی بر محاسبات ریاضی جهت تعیین مقادیر دقیق فواصل مجاز میان آندها وجود ندارد. بااین‌حال، نتایج مبتنی بر تجربه در این زمینه وجود دارد. به‌عنوان مثال گفته شده برای یک آند پایه‌دار روی به طول ۱/۲ m که درون یک مخزن آب توازن بدون پوشش نصب شده، حداقل فاصله طولی و عرضی مجاز تا آند بعدی به ترتیب m ۱ و m ۳/۵ می‌باشد.

طراحی سامانه حفاظت کاتدی و مبدل‌های حرارتی

در غالب موارد، مبدل‌های حرارتی مورد استفاده در شناورها از نوع پوسته و لوله[560] هستند که معمولاً، از آب دریا به‌عنوان خنک کننده استفاده می‌کنند. در این تجهیزات، به دلیل استفاده گسترده از اجزای فلزی غیرهم‌جنس، خطر وقوع خوردگی گالوانیک بسیار محتمل است. همچنین، سرعت بالای حرکت آب دریا بر شدت این مشکل می‌افزاید. متداول‌ترین مواد فلزی مورد استفاده در ساخت آنها شامل، فولاد، چدن، فولاد زنگ نزن، کوپرونیکل و مس می‌باشد که این تفاوت جنس در «جعبه‌های آب»[561] آنها متمرکز است. تجربه‌های میدانی نشان داده به دلیل شرایط کاری ویژه این تجهیزات، استفاده از پوشش‌ها جوابگوی حفاظت از آنها در برابر خوردگی نبوده و تنها سامانه حفاظت کاتدی می‌تواند از آنها در برابر خوردگی محفاظت کند. معمولاً، مبدل‌هایی با قطر کمتر از mm ۵۰۰ نیاز به حفاظت کاتدی ندارد. برای تجهیزات بزرگ‌تر، حفاظت کاتدی را می‌توان از طریق آندگذاری در فضای جعبه آب آنها به انجام رساند.

جنس آندها و شکل هندسی آنها

آندهای روی و فولاد، متداول‌ترین آندهای مورد استفاده در حفاظت کاتدی مبدل‌های حرارتی شناورها هستند. یک موضوع مهم در انتخاب جنس آندهای روی، مربوط به افت عملکرد آنها در اثر افزایش دمای آب خنک کننده است. لذا، در صورت انتخاب این آند، توصیه به استفاده از آند Alloy Z4 می‌باشد. جهت دستیابی به بالاترین کیفیت حفاظت کاتدی، میزان مقاومت الکتریکی ویژه آب خنک‌کننده باید $1000\ \Omega.\mathrm{cm} \leq$ باشد. به طور کلی، انتخاب شکل آند مورد نیاز به شرایط کاری و

---

560 [illegible]

561 [illegible]

همچنین به میزان فضای جعبه آب وابسته می‌باشد. به‌عنوان راهنما، جهت انتخاب صحیح شکل هندسی آندها می‌توان سه مورد زیر را مدنظر قرار داد:

۱. برای مبدل‌هایی با ابعاد کوچک (مساحت دسته لوله[۲] $50ft^2$) باید از آندهای قلمی استفاده کرد.

۲. برای مبدل‌هایی با ابعاد متوسط (مساحت دسته لوله $< 50ft^2$) می‌توان از آندهای علمی و تخت استفاده کرد.

۳. برای مبدل‌های با ابعاد بزرگ که فضای کافی دارند باید از آندهای تخت استفاده کرد.

چگالی جریان حفاظت

تجربیات نشان می‌دهد، حفاظت کاتدی مؤثر مبدل‌های حرارتی را می‌توان با لحاظ نمودن چگالی جریان‌هایی در حدود $2500mA/m^2$ به دست آورد.

عمر طراحی

معمولاً، عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی در حدود ۳ - ۲ سال در نظر گرفته می‌شود، ولی در عمل به دلیل شرایط ویژه کاری، عمر آندها کوتاه‌تر از این ارقام است. لذا، پایش مداوم آندها جهت تعیین مقدار مصرف شده ضروری است.

محاسبه تعداد آند

تعداد آندهای مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی را با لحاظ نمودن میزان چگالی جریان کاتدی و همچنین محاسبه سطح نیازمند حفاظت می‌توان مطابق با روابط قبلی محاسبه کرد. البته، روابط زیر نیز توسط نیروی دریایی ایالات متحده به‌صورت موفقیت‌آمیز جهت تعیین تعداد آندها توسعه داده شده است:

$$Z = 0/078(0/75D^2 + 6nd^2)$$

$$M=0/046Z$$

$$N=M/M_a$$

که در آنها:

Z: مساحت آند مورد نیاز (in^2).

D: قطر دایره معادل با سطح در تماس با آبِ صفحه لوله[۳] احتساب سطوح مربوط به لوله‌های تعبیه شده (in).

n: تعداد لوله‌های صفحه لوله.

d: قطر درونی لوله‌ها (in).

M: جرم خالص آند مورد نیاز (Ib).

N: تعداد آند.

M_a: جرم خالص آند (Ib).

نکته: در محاسبات آندهای تخت، مساحت محاسبه شده شامل مساحت سطح پشتیِ آنها نمی‌باشد.

---

2 [illegible] 6 [illegible] 5

3 [illegible] 6 [illegible] 5

محاسبه عمر تقریبی آندهای محاسبه شده

در صورت طراحی صحیح سامانه حفاظت کاتدی، رابطه زیر برقرار می‌باشد:

$$\frac{N \times M_a \times \mathrm{U}}{E_a \times I_z} \geq t$$

که در آن:

N: تعداد آند لازم سامانه حفاظت کاتدی.

M_a: جرم خالص آند فداشونده (kg).

U: ضریب مصرف آند فداشونده (٪).

E_a: ضریب مصرف آند فداشونده $(\mathrm{kg/A.year})$.

I_z: میانگین جریان لازم برای حفاظت (A).

t: عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی (year).

نکته: در حقیقت، عبارت سمت چپ، عمر واقعی سامانه فداشونده است.

محاسبات مربوط به زنگ‌زدایی و رسوب‌زدایی مخازن

جهت زنگ‌زدایی و رسوب‌زدایی مخازن باید از آندهای نواری منیزیمی اکسترود شده استفاده کرد که دارای مغزه‌های فولادی هستند. بررسی‌ها نشان داده میزان جریان خروجی از این آندها، ۷ – ۳ برابر بیشتر از آندهای ریختگری شده با وزن یکسان است. همان‌طور که گفته شد، میزان چگالی جریان لازم برای زنگ‌زدایی و رسوب‌زدایی مخازن شناورها در حدود $1000\mathrm{mA/m^2}$ می‌باشد. این میزان جریان را می‌توان به‌وسیله ۱ m از آند منیزیومی به ازای هر $3m^2$ از سطح مخزن ایجاد کرد. در خصوص مخازن محموله‌های هیدروکربنی، سطوح آنها باید پیش از آندگذاری به‌وسیله آب پرفشار شسته شوند. پس از آندگذاری، مخازن باید از آب دریای تمیز پر شده و سپس به مدت ۶ – ۴ ساعت (تا ۱۰ ساعت نیز گفته شده) در همین حالت نگهداری شوند. در نهایت، نخاله‌های تولید شده توسط عملیات شست‌وشو با آب پرفشار از مخازن خارج می‌شوند.

نصب و چیدمان آندهای رویِ سطوح بیرونی

کلیات

آندهای فداشونده باید به گونه‌ای طراحی شوند که در حین مراحل ساخت، حمل و نقل، نصب و بهره‌برداری در برابر نیروهای مکانیکی وجود مقاوم بوده و الزامات عملکردی خود را حفظ کنند. در غالب موارد، آنها به‌وسیله عملیات ریخته‌گری تولید می‌شوند. مغزه‌ها باید از فلزاتی با فعالیت الکتروشیمیایی کمتر (معمولاً، فولاد یا برنج) نسبت به ماده آندی انتخاب گردند. استفاده از «فولادهای ناآرام»[۵][۶] برای ساخت مغزه‌ها ممنوع است. در اکثر موارد، مغزه‌ها از جنس فولاد معرفی شده در استاندارد EN 10025[۴] یا معادل‌های آن انتخاب می‌شوند. شکل هندسی مغزه‌ها تابعی از شکل هندسی آندها است و معمولاً به‌صورت تسمه یا میله توپر می‌باشد. مغزه‌ها از طریق جوشکاری، پیچ و مهره و یا کابل به سازه تحت حفاظت متصل می‌شوند. مغزه‌ها

5 [illegible] 6 4

باید دارای جوش‌پذیری مناسبی به بدنه شناور و متعلقات آن باشند. بدین منظور، مقدار «کربنِ معادل(C_{ev}[5]) » فولاد مغز نباید از کربنِ معادل فولاد بدنه و متعلقات آن بیشتر باشد. در صورت در دسترس بودن ترکیب شیمیایی کامل فولاد، مقدار کربن معادل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{\mathrm{ev}} = \%C + \frac{\mathrm{Mn}\%}{6} + \frac{\mathrm{Cr}\%+\mathrm{Mo}\%+\mathrm{V}\%}{5} + \frac{\mathrm{Ni}\%\mathrm{Cu}}{15}$$

بااین‌حال، چنانچه ترکیب شیمیایی کامل در دسترس نباشد، کربن معادل را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$C_{\mathrm{ev}} = \%C + \frac{\mathrm{Mn}\%}{6} + 0/04$$

در هر صورت، مقدار کربن معادل مغزه فولادی نباید از ٪۴۵ بیشتر باشد.

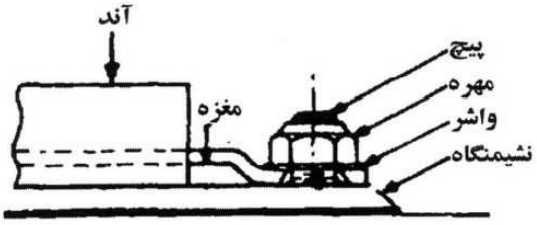
وجود اتصال الکتریکی مناسب بین مغزه و ماده آندی بر کیفیت عملکرد آند بسیار اثرگذار است. بدین منظور، پیش از تولید آندها ضروری است، تمیزکاری سطوح مغزه‌ها در دستور کار قرار بگیرد. به طور کلی، عملیات تمیزکاری شامل چربی‌زدایی با یک محلول قلیایی گرم و سپس زیره‌پاشی سطح تا درجه تمیزی حداقل Sa2.5 مطابق استاندارد ISO 8501 - 1 است. پیش از انجام هر عملیات بعدی، بازرسی چشمی کامل مغزه‌ها جهت تشخیص وجود آلودگی‌های سطحی و تغییر رنگ حاصل از ایجاد زنگ ضروری است. برای آندهای منیزیوم و روی، بهترین کیفیت اتصال از طریق گالوانیزه کردن مغزه‌ها حاصل می‌شود. عملیات گالوانیزه کردن باید توسط غوطه‌وری در حمام گرم روی و مطابق الزامات استاندارد ISO 1461 به انجام برسد. بررسی‌ها درباره آندهای روی نشان می‌دهد، ضخامت لایه گالوانیزه نباید کمتر از $12/7\mu m$ باشد. همچنین لایه روی را می‌توان توسط عملیات آبه کاری و مطابق الزامات استاندارد ISO 2081 رویِ سطوح مغزه‌ها ایجاد کرد. البته، تجربه نشان می‌دهد، کیفیت اتصال الکتریکی در این روش در مقایسه با روش قبلی کمتر است. برای آندهای آلومینیم، تنها تمیز کاری سطوح مغزه‌ها پیش از ریخته‌گری کفایت نموده و گالوانیزه کردن سطوح مغزه‌ها مجاز نیست. در هر صورت، کیفیت اتصال الکتریکی میان مغزه و آند را می‌توان به‌وسیله آزمون معرفی شده در استاندارد AS 2239 بررسی کرد.

همان‌طور که گفته شد، اتصال میان آند و ناحیه حفاظت را می‌توان به‌وسیله روش‌های جوشکاری، پیچ و مهره و کابل‌کشی برقرار کرد. در دو روش اول، چنانچه ورق ناحیه تحت حفاظت نازک و یا جنس فلز آن حساس باشد، لازم است پیش از نصب، نشیمنگاهی از جنس خود فلز ناحیه تحت حفاظت توسط جوشکاری (جوش گوشه[6]) ایجاد شده و سپس آند رویِ آن نصب شود. از مناطق مهم نیازمند نصب نشیمنگاه می‌توان به بخش‌هایی از بدنه بیرونی شناور که ورق آن جزیی از مخازن حاوی مواد قابل اشتعال نظیر مخازن سوخت و مخازن محموله‌های است، اشاره داشت. ضخامت ورق نشیمنگاه می‌بایست در حدود mm ۱۰باشد. طول و عرض آن باید به اندازه‌ای باشد که حداقل وجود یک فاصله به میزان mm ۲۰ میان محل اتصال مغزه و لبه نشیمنگاه تضمین گردد. در خصوص اتصال پیچی، جنس پیچ، مهره و واشر به کار رفته حتماً باید از جنس فلز تحت حفاظت انتخاب شوند. در شکل ۹-۱۱۰ نمونه‌ای از نصب یک ورق نشیمنگاه و اتصالی پیچی آند به آن نشان داده شده است.

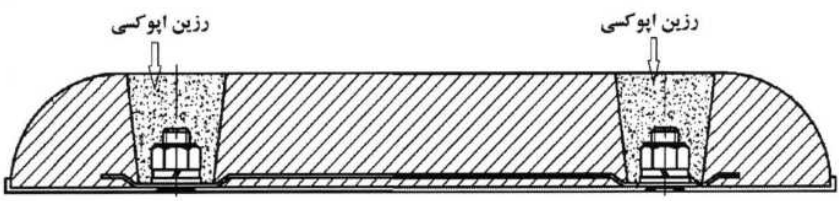
5 [illegible] 6 5

5 [illegible] 6 6

همچنین، برای آندهایی که محل پیچ و مهره در میان بدنه اصلی آند تعبیه شده، لازم است حفرات موجود توسط رزین اپوکسی پر شود (شکل ۹-۱۱۱).



شکل ۹-۱۱۰ نمونه‌ای از یک نشیمنگاه



شکل ۹-۱۱۱ پر کردن حفرات موجود در بدنه آندها توسط رزین اپوکسی

در هر صورت، جهت اجتناب از تجمع محصولات خوردگی لازم است سطح زیرین آندها پیش از نصب کاملاً رنگ شده (رنگ اپوکسی با ضخامت حداقل $150\mu m$) یا لاستیک‌گذاری شود.

در روش اتصال توسط کابل، کابل باید از نوع چند رشته انتخاب شده و علاوه بر انعطاف‌پذیری دارای استحکام کافی در برابر آسیب دیدگی‌های احتمالی در حین شرایط کاری باشد. همچنین، سازگاری با محیط آب دریا، روغن و چربی تغییرات قابل ملاحظه در میزان pH و غلظت یون کلر و غیره از ویژگی‌های مهم این کابل‌ها است. سطح مقطع کابل‌ها باید حداقل $10mm^2$ باشد. کابل‌ها می‌توانند از طریق پیچ و مهره و یا جوشکاری به آندها متصل شوند. در هر صورت، محل اتصال آنها باید توسط یک پوشش مناسب (اپوکسی و یا پوشش‌های معادل) حفاظت شوند. همچنین، محل اتصال کابل به ناحیه تحت حفاظت باید دارای استحکام کافی بوده و مقاومت الکتریکی اندکی داشته باشد. این اتصال می‌تواند توسط لحیم کاری، جوشکاری و یا پیچ و مهره ایجاد شود.

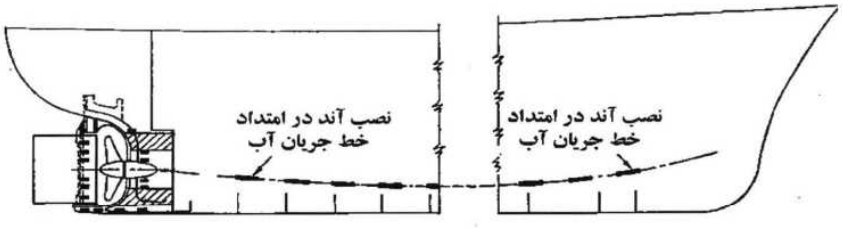
بدنه شناور

آندها باید به نحوی روی بدنه شناورها نصب شوند که از به تله افتادن هوا، ایجاد تلاطم، اختلال در الگوی جریان آب و افزایش نیروی درگ جلوگیری شود. در خصوص شناورهای نظامی به‌ویژه زیردریایی‌ها، ایجاد نوفه‌های صوتی حاصل از برخورد آب با آندها امری بسیار مهم تلقی می‌شود، زیرا علاوه بر کاهش اختفاپذیری شناور سبب بروز اختلال در سامانه سونار آنها نیز می‌شود. گفته شده، رعایت فاصله‌ای به میزان حداقل ۹ m میان اولین آند تا سونار می‌تواند این اثر نامطلوب را بر طرف کند.

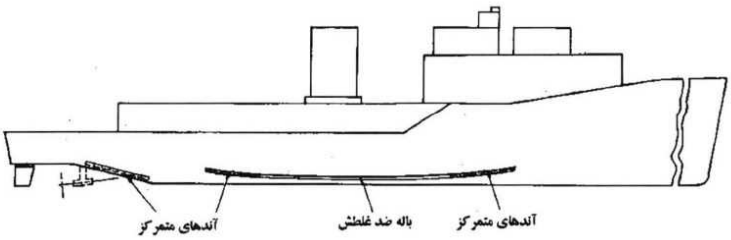
به طور کلی، نصب تعداد بیشتری آند کوچک در مقایسه با نصب تعداد کوچک کمتری آند بزرگ‌تر توزیع جریان بهتری را فراهم می‌کند.

بهترین شرایط حفاظت کاتدی، از طریق توزیع یکنواخت آندها رویِ بدنه شناور حاصل می‌شود. البته، بهره‌گیری از روش‌های مدل‌سازی رایانه‌ای نظیر آلمان محدود[۶۷](FEM) و المان مرزی[۶۸](BEM) و همچنین اندازه‌گیری‌های میدانی جهت تعیین موقعیت دقیق آندها می‌تواند سبب بسیار کمک کننده باشد.

همان طور که در شکل ۹-۱۱۲ دیده می‌شود، بهترین الگو جهت چیدمان آندها توزیع یکنواخت آنها در امتداد خط جریان آبِ بدنه و حداقل ۱ m زیرا خط آبخور می‌باشد. این الگو باید برای هر دو سمت شناور رعایت گردد. مواردی نیز وجود دارد که علاوه بر موضوع حفاظت در برابر خوردگی، رعایت الزامات مربوط به کاهش نیروی دراگ و از همه مهم‌تر کاهش نوفه‌های صوتی حاصل از برخورد آب با آندها دارای اهمیت ویژه‌ای است. برای این موارد، آندها باید به‌صورت متمرکز و متقارن در دو سو، مطابق آنچه که در شکل ۹-۱۱۳ نشان داده شده، توزیع شوند. برای این الگوی چیدمان، رعایت الزامات مربوط به کاهش جریان خروجی از آندها باید مدنظر باشد.



شکل ۹-۱۱۲ نصب آندها در امتداد خط جریان آب شناور



شکل ۱۱۳-۹ نصب آندها در امتداد خط جریان آب شناور

نصب آندها در نواحی بحرانی نظیر سطوح زیرین لنگرها که امکان وارد آمدن مکرر خسارت مکانیکی به آنها وجود دارد، ممنوع است. همچنین، رعایت جوانب احتیاطی در خصوص چیدمان آندها رویِ بالچه تعادل و یا هر سطحی که به هنگام پهلوگیری شناور امکان خسارت به آنها وجود دارد، ضروری است. در صورت نصب آندها رویِ بالچه تعادل، آندها باید به ترتیب به‌صورت ویژه در میان رویِ سطح بالایی و پایینی آن نصب شوند. درصورتی‌که امکان نصب آندها رویِ این ناحیه

5 6 7
5 6 8

وجود نداشته باشد، آندها باید مطابق همان الگو ولی روی بدنه شناور توزیع شوند. در چیدمان آندها، رعایت الزامات فاصله مجاز میان آنها ضروری است. معمولاً، در آب‌های مناطق گرمسیری حداقل فاصله میان آندها ۶ m – ۸ می‌باشد، درصورتی‌که مقدار این پارامتر برای مناطق سردسیر در حدود ۵ m گزارش شده است. در نواحی نیازمند جریان حفاظت بیشتر از بدنه شناور مانند به پروانه نیاز است آندها به‌صورت مجتمع در کنار هم نصب شود.

حفاظت کامل

در این روش، برای شناورهای دارای یک پروانه، در حدود ٪۲۵ از تعداد کل آندها به پاشنه اختصاص داده می‌شود. مقدار این پارامتر برای شناورهای دارای چند پروانه در حدود ٪۳۰ است. مابقی آندها باید مطابق الزاماتی که پیش از این گفته شد، روی بدنه میانی شناور و سینه آن توزیع گردد.

حفاظت جزئی (حفاظت از پاشنه)

در حفاظت جزیی، تنها حفاظت کاتدی پاشنه شناور مدنظر می‌باشد، چون اغلب آسیب‌های خوردگی در این ناحیه دیده می‌شود. در این روش در حدود ۳۰ – ٪۲۰ از تعداد کل آندها به پاشنه اختصاص می‌یابد. علاوه بر این، باید حداقل ۲ آند هم شکل دیگر یا ٪۱۰ از تعداد آندهای پاشنه (وابسته به نظر طراح) به آندهای قبلی اضافه شود. این آندها باید ۸ m – ۳ جلوتر از آندهای پاشنه نصب شوند.

سینه شناور

همان‌طور که در شکل ۹-۱۱۲ دیده می‌شود، جهت کاهش نیروی دراگ و نوفه‌های صوتی، آندها باید در امتداد خط جریان آب نصب شوند. بدین منظور، بهترین مکان نصب آندها روی بالچه تعادل و سطوح تخت مجاور به «شاه تیر اصلی»[۵۶۹] شناور می‌باشد. همچنین باید به موضوع تخریب آندها توسط لنگر شناور نیز توجه ویژه‌ای معطوف گردد.

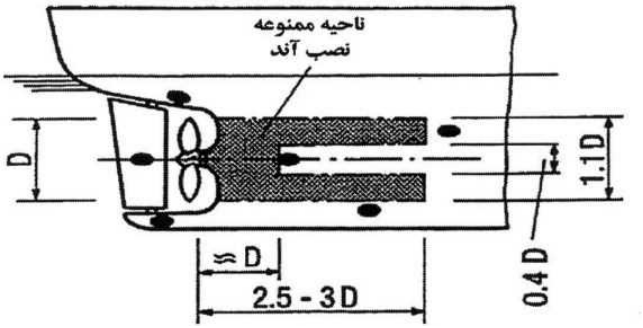
پاشنه شناور

به هنگام توزیع آندها در پاشنه یک شناور باید به موضوع حفظ و الگوی صحیح جریان آب ورودی به پروانه آن توجه ویژه‌ای شود. زیرا بر هم خوردن این الگو می‌تواند بر بازده پروانه اثرگذار باشد. بدین منظور، بررسی‌های گسترده‌ای روی دستیابی به مدل‌های صحیح چیدمان آندها به انجام رسیده است. در شکل ۹-۱۱۴ تصویری از یکی از این مدل‌های موفق که به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، نشان داده شده است.

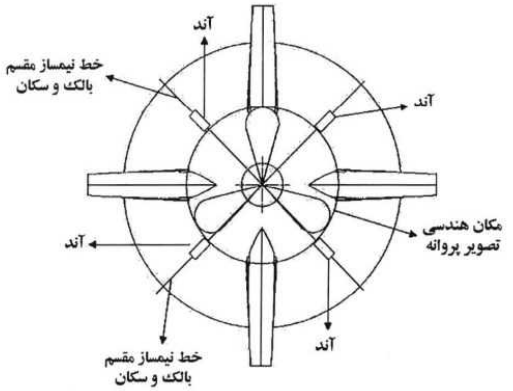
همان‌طور که دیده می‌شود، در برخی مناطق مجاور به پروانه شناور نصب آندها ممنوع می‌باشد. در حقیقت، این همان مناطقی هستند که آندگذاری در آنها موجب اختلال در الگوی جریان آب ورودی به پروانه می‌گردد. همین الگو را می‌توان برای چیدمان آندها در پاشنه زیردریایی‌ها مورد استفاده قرار داد. بر این اساس، اولین آندها باید در نقاط برخورد مکان هندسی تصویر پروانه روی پاشنه یک زیردریایی و چهار خط نیمساز گذرنده از نوک پروانه که فاصله میان بالک‌ها و سکان‌ها را به

5 6 9
5 7 0

دو قسمت مساوی تقسیم می‌کنند، نصب شوند (در شکل ۹-۱۱۵ دیده می‌شود). در صورت نیاز به نصب آندهای دیگر، محل نصب آنها باید در امتداد اولین آندها و رویِ خطوط نیمساز نشان داده شده در شکل ۹-۱۱۵ قرار داشته باشد. در این شرایط، لحاظ نمودن جوانب احتیاطی در خصوص رعایت حداقل فاصله میان آندها ضروری است.



شکل ۹-۱۱۴ الگوی چیدمان آندها در مجاورت پروانه



شکل ۹-۱۱۵ چیدمان آندها رویِ بدنه عقب یک زیردریایی

علاوه بر این، رعایت نکات زیر نیز می‌تواند سبب بهینه‌تر شدن مدل چیدمان آندها گردد:

۱. برای سطوح بالاتر از پروانه، حداقل برای هر طرفِ شناور باید یک آند در نظر گرفته شود. باید توجه داشت، در صورت نصب این آندها در مناطق غیر صحیح، امکان عدم غوطه‌وری آنها در شرایط توازن سبک شناور وجود دارد. لذا، توصیه می‌شود آندها رویِ پروفایل موری پاشنه نصب شوند.

۲. مشروط به رعایت الزامات نصب آندها در مجاورت پروانه، حفاظت از «بوش شافت پروانه»[۵۷۱] باید با نصب حداقل یک آند برای هر طرف آن به انجام برسد.

۳. وابسته به جنس و اندازه «لچکی شافت»[۵۷۲] باید تعدادی آند رویِ سطوح مجاور (هر دو سمت) به محل اتصال آن به بدنه نصب شوند.

5 7 1
5 7 2

۴. برای شناورهایی که دارای چند پروانه هستند، «لچکی‌های پروانه‌ها»[۵۷۳] باید تحت حفاظت قرار بگیرند. برای شناورهای کوچک، آندها باید رویِ دو سمت لچکی و رویِ پایه آن نصب شوند. برای شناورهای بزرگ، این آندها رویِ خود لچکی نصب می‌شوند.

پروانه و شافت آن

مطابق یک اصل کلی، بدنه بیرونی یک شناور و متعلقات آن نظیر پروانه و شافت پروانه جزء یک سامانه یکپارچه حفاظت کاتدی هستند. بدین منظور باید اتصال الکتریکی مناسبی میان آنها وجود داشته باشد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، این اتصال الکتریکی را می‌توان توسط یک حلقه لغزشی برقرار کرد.

همچنین، با توجه به نوع شناور و ابعاد آن حفاظت کاتدی پروانه و شافت را می‌توان به تنهایی به ترتیب با نصب آند رویِ توپی پروانه و بدنه اصلی شافت ایجاد کرد. بدیهی است، برای اجتناب از تأثیر نامطلوب وزن آند بر نیروی گشتاور شافت پروانه، محل نصب آند تا حد امکان باید به لچکی آن نزدیک شود. معمولاً، برای شناورهای کوچک یک فاصله اندازه ۱۰ mm – ۴ قابل قبول است. برای شناورهایی که دارای «غلاف پروانه»[۵۷۴] هستند، آندها باید رویِ سطح بیرونی غلاف و با فاصله‌هایی به اندازه r ۱/۲۵ – ۰/۰ (r، شعاع بزرگ‌ترین قطر غلاف است) نسبت به هم توزیع شوند. برای حفاظت سطوح درونی، آندها باید رویِ «محور تقویت»[۵۷۵] نصب شوند. برای شناورهایی با پروانه تیغی شکل،[۵۷۶] آندها باید رویِ لبه‌های پای پروانه‌ها نصب شده و به‌صورت متوازن توزیع شوند.

سکان

برای حفاظت کاتدی سکان، آندها باید به‌صورت متوازن رویِ دو سمت جانبی تیغه (بخش متحرک سکان) آن نصب شوند. به‌عنوان یک الگوی مناسب، اولین آند باید در امتداد محور توپی پروانه نصب شده و سپس مابقی آندها با فاصله مناسب رویِ تیغه سکان توزیع شوند.

برای شناورهای تندرو که می‌توانند با سرعت‌هایی بیشتر از ۳۰ گره دریانوردی کنند، آندها باید رویِ سطح «پروفایل سکان»[۵۷۷] نصب شوند. درصورتی‌که این امکان فراهم نباشد، ضروری است در ابتدا از طریق یک اتصال الکتریکی میان سکان و بدنه شناور یک سامانه یکپارچه حفاظت کاتدی ایجاد شده و سپس آندهای مربوطه رویِ بدنه شناور نصب شوند.

سیچست، تراستر و سایر مجراهای بدنه

در حفاظت کاتدی این مناطق باید توجه ویژه‌ای به عدم نصب آندها در نقاط کور شود. لازم به ذکر است، در بهترین حالت آندها نصب شده رویِ بدنه یک شناور تنها قادر به حفاظت از سطوح داخلی این مناطق، حداکثر تا یک تا دو ماه برابر قطر آنها هستند. برای تراسترهای سینه شناورها، آندها باید تا حد امکان در نزدیک‌ترین فاصله به نقاط آسیب‌پذیر نصب شود. در این مورد، رعایت ملاحظات مربوط به عدم اثرگذاری آندها بر الگوی جریان آب ضروری است. آندهای نصب شده درون

3	7
4	7
5	7
6	7
7	7

سیچست‌ها می‌توانند سبب ایجاد جریان سرگردان شده که این می‌تواند برای سایر تجهیزات قرار گرفته در آنها نظیر کویل‌های حرارتی مضر باشد. لذا، برای این مورد نیز توجه به ملاحظات مرتبط ضروری می‌باشد.

نصب و چیدمان آندهای سطوح داخلی

اصول نصب

آندهای مخازن

آندهای مخازن باید روی تسمه‌ها[۵۷۸]، تبشی‌ها[۵۷۹]، سپری‌ها[۵۸۰] و HP های (در امتداد آنها) بالکدها نصب گردند که به اختصار از آنها به‌عنوان «تقویت کننده»[۵۸۱] یاد می‌شود. همچنین، این آندها را می‌توان روی «شاه تیرهای طولی»[۵۸۲] درون مخازن شناور نیز نصب کرد. نصب آندها روی یک عضو ساختمانی یا دو عضو ساختمانی به شرط آنکه نسبت به هم دارای حرکت نباشند، مجاز است. در هر صورت، آندها نباید به‌صورت مستقیم روی ورق بدنه شناور نصب شوند.

همان‌طور که می‌دانیم، کیفیت نصب آندها بر میزان کارایی آنها بسیار مؤثر است. لذا، بهره‌گیری از روش‌های مناسب اتصال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای سطوح درونی شناورها، آندها یا باید به‌وسیله جوشکاری مغزه یا پیچ و مهره نمودن آنها به سطح تحت حفاظت متصل شوند که البته، روش جوشکاری دارای ارجحیت بیشتری است. برای اجزای تقویت کننده اصلی و غیراصلی، جوشکاری مغزه‌ها و نگهدارنده‌های آنها نباید در نواحی انتهایی این اجزای، محل اتصال لچکی‌ها به آنها و همچنین مناطق تحت تنش صورت بپذیرد. برای اجزای تک بال (L شکل)، محل جوشکاری باید حداقل ۲۵ mm از لبه این اجزای فاصله داشته باشد. برای اجزای تقویت کننده و همچنین شاه تیرهای دارای دو بال (T شکل)، مغزه‌ها یا نگهدارنده‌ها باید به‌وسیله جوشکاری روی خط مرکزی سطح رویه این اجزای و یا روی «جان»[۹۸۳] آنها نصب شوند.

5	[illegible]	7	8
5	[illegible]	7	9
5	[illegible]	8	0
5	[illegible]	8	1
5	[illegible]	8	2
5	[illegible]	8	3

منابع

کتاب مهندسی خوردگی فونتانا- ترجمه دکتر احمد ساعتچی

کتاب حفاظت کاتدی و دستورالعمل‌های ارزیابی آن – دکتر محمود علی اف خضرایی و مهندس علی حیدری قبادی

کتاب اصول طراحی حفاظت کاتدی- مهندس مسعود روشنی و دکتر محمود علی اف خضرایی

کتاب حفاظت کاتدی کاربردی خطوط لوله و مخازن- مترجمان دکتر تقی شهرابی فرهانی – دکتر محمود علی اف خضرایی – مهندس طاهر شهرابی

کتاب حفاظت کاتدی ولکان چیچک – ترجمه دکتر اسفندیار نظرنیا

کتاب حفاظت کاتدی فولاد در بتن – مترجمان مژگان بهرامی و رضاایمانیان نجف آبادی

کتاب خوردگی و حفاظت کاتدی خطوط لوله- تالیف مارشال‌ای پارکر و ادوارد جی پیاتی – ترجمه دکتر سعید رضا اله کرم

کتاب حفاظت کاتدی شناورها – ناشر انجمن خوردگی ایران و مؤلفین اردشیر یارک زاده و حسین سرلک