بنام خدا

جمهوری اسلامی ایران

وزارت نیرو

شرکت سهامی تولید و انتقال نیروی برق ایران

(توانیر)

معاونت تحقیقات و فن آوری

دفتر استانداردها

شماره : ۶۹/۱

استاندارد و آیین کار سیستم های حفاظت کاتدی

شناخت سیستم های حفاظت کاتدی

تدوین کننده : شرکت احداث کنترل

نگارش دوم : شهریور ماه ۱۳۷۹

فهرست مطالب

شماره بندها	عنوان	صفحه
۱	تاریخچه و تجارب بدست آمده در طول سالیان متمادی	۴
۱-۱	خوردگی	۴
۱-۲	حفاظت کاتدی	۸
۲	اصول و مبانی خوردگی و حفاظت کاتدی	۹
۲-۱	مقدمه	۹
۲-۲	جدول پتانسیل فلزات	۱۲
۲-۳	پیل خوردگی	۱۴
۲-۴	پتانسیل های پیل خوردگی	۱۷
۲-۵	جریان در یک پیل خوردگی	۱۸
۲-۶	پلاریزاسیون	۱۸
۲-۷	پیل ساده در حفاظت کاتدی	۲۱
۲-۸	پیل پلاریزه شده ساده در حفاظت کاتدی	۲۲
۲-۹	حفاظت کاتدی در عمل	۲۳
۲-۱۰	انواع خوردگی در سازه های مدفون یا غوطه ور	۲۴
۳	شناخت روشهای مرسوم حفاظت کاتدی	۲۸
۳-۱	مقدمه	۲۸
۳-۲	سیستم حفاظت کاتدی از نوع آندهای فدا شونده	۲۹
۳-۳	سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان	۳۲
۴	بررسی فنی و اقتصادی حفاظت کاتدی در نیروگاهها	۳۸
۴-۱	مقدمه	۳۸
۴-۲	حفاظت کاتدی سطح خارجی کف مخازن	۳۸
۴-۲-۱	معیارها و محدودیت های مونیتورینگ حفاظت کاتدی در کف مخازن	۴۲
۴-۳	مخازن ذخیره آب شیرین	۴۶
۴-۴	مخازن آب سرد	۴۸

فهرست مطالب

شماره بندها	عنوان	صفحه
۴-۵	مخازن آب داغ	۵۰
۴-۶	مخازن آب دریا	۵۵
۴-۶-۱	حفاظت کاتدی مخازن با استفاده از سیستم اعمال جریان	۵۵
۴-۷	کندانسور ها و کولر ها	۵۷
۴-۸	حفاظت کاتدی پمپها	۶۲
۴-۹	حفاظت کاتدی ورودیها و صافیهای کانال آب	۶۸
۴-۱۰	حفاظت کاتدی داخل لوله ها	۷۰
۵	نتایج تحقیقات و بررسیهای انجام گرفته	۷۵
۵-۱	مقدمه	۷۵
۵-۲	بررسی بازدیدهای بعمل آمده	۷۶
۵-۲-۱	نیروگاه شهید سلیمی نکا	۷۶
۵-۲-۲	نیروگاه حرارتی توس	۷۸
۵-۲-۳	نیروگاه حرارتی زرگان	۷۹
۵-۳	بحث و تحلیل نتایج بازدیدها	۸۰
۶	شناخت و بررسی آزمونهای مختلف	۸۴
۶-۱	آزمون جریانهای خط لوله	۸۴
۶-۲	آزمون پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت	۸۷
۶-۳	آزمون جریان مورد نیاز برای حفاظت	۹۲
۶-۴	آزمون مقاومت مؤثر پوشش	۹۶
۶-۵	معیارهای اطمینان از حفاظت کافی	۹۹
۷	شناخت و بررسی استانداردهای معتبر بین المللی	۱۰۱
۷-۱	بررسی استاندارد BS 7361, Part1(1991)	۱۰۱
۷-۱-۱	فهرست مطالب استاندارد BS 7361	۱۰۱
۷-۱-۲	کاربردهای حفاظت کاتدی برای سازه های مدفون	۱۰۷

فهرست مطالب

شماره بندها	عنوان	صفحه
۷-۱-۳	حفاظت کاتدی داخلی	۱۱۶
۷-۱-۴	مهمترین منابع و مراجع این استاندارد	۱۲۱
۷-۲	بررسی استاندارد DIN 30676 ، طراحی و کاربردهای حفاظت کاتدی برای سطوح خارجی	۱۲۴
۷-۲-۱	فهرست مطالب استاندارد	۱۲۴
۷-۲-۲	مهمترین منابع و مراجع برای تهیه این استاندارد	۱۲۵
۷-۳	بررسی استاندارد صنعت نفت ایران (IPS)	۱۲۵
۷-۳-۱	بررسی استاندارد مهندسی برای حفاظت الکتروشیمیایی (IPS-E-TP-820)	۱۲۶
۷-۳-۲	استاندارد IPS-I-TP-820 بازرسی برای مونیتورینگ سیستم های حفاظت کاتدی	۱۲۷
۸	فهرست منابع و مراجع	۱۲۸

تاریخچه و تجارب بدست آمده در طول سالیان متمادی

۱-۱- خوردگی

به زوال و انهدام یک فلز در اثر ترکیب شیمیایی یا الکترو شیمیائی آن با محیط اطرافش خوردگی گویند.

معمولاً این بدان معناست که فلز به حالت اولیه خود یعنی به حالت سنگ معدن بـر گشـته و خـواص فلـزی خـود را کاملاً از دست می دهد. سنگ معدنها در حالت طبیعی به صورت اکسیدها ، سولفیدها یا کربناتها هستند. برای تبدیل این سنگ معدنها به فلز پایه باید انرژی صرف کرد. خوردگی عکـس ایـن فرآینـد اسـت بطوریکـه در آن فلـزات بطـور طبیعی و یا حتی بطور خودبخودی به ترکیباتی چون سولفید، اکسید یا کربنات تبدیل می شوند.

فلزاتی که به آسانی و با صرف انرژی کم از سنگ معدن استخراج می گردند، کمتر نیز تحت تأثیر خوردگی هستند. در حالی که اگر تهیه فلز خالص از سنگ معدن با صرف انرژی زیاد همراه باشد فلز نیز پس از استخراج تمایل زیادی بـه خوردگی و یا برگشت به حالت اولیه و طبیعی خود دارد.

از آنجا که در گذشته عمدتاً فلزاتی استخراج می شده که یا به صـورت خـالص در طبیعـت موجـود بـوده و یـا بـرای استخراج آنها عمل ذوب ساده ای لازم بوده است. لذا خوردگی در گذشته کمتر از زمانهای اخیر مسئله ساز بوده است.

یکی از موارد استثنایی که در اوایل عصر برنز مورد استفاده قرار می گرفت. آهن خالص موسوم به آهن شـهاب سـنگی بود که در وسط شهاب سنگ های کوچک وجود داشت . این منبع آهن به سرعت تمام شد و فلز بـه دسـت آمـده بـه سرعت مصرف شد. (شاید بتوان گفت که دچار خوردگی شدید شد) و مجدداً برنز بـه عنـوان مـهمترین آلیـاژ مطـرح گردید.

طلا که در طبیعت به صورت فلز خالص یافت می شود، خورده نمی شود و نقره نیز که به راحتی قابل استخراج اسـت، به همان صورت از خوردگی مصون می باشد. مس نسبت به آهن آسان تر استخراج می گردد و مقاومت خـوردگـی آن نیز خیلی بیشتر از آهن است. همین امر سبب قدمت تاریخی این فلز نسبت به آهن شده است. خوردگـی در زمانـهای دور نیز شناخته شده بوده است. رومیها از این مسئله آگاه بوده اند بطوریکه **پلینی** (در حدود ۱۰۰ سال قبل از میـلاد) روشهای جلوگیری از خوردگی مس و آهن را بیان کرد. برای حفاظت مس آن را توسط روغن، قـیر و یـا قلـع پوشـش میدادند و برای حفاظت آهن نیز از پوشش سربی استفاده میشده است. رومیها از آهن در سـاخت کشـتی هـا و دیگـر سازه ها و همچنین ابزار آلات و وسایل جنگی استفاده می کردند. براساس قرائـن در آن زمـان بـاید خـوردگـی قـابل ملاحظه ای بر آهن اتفاق افتاده باشد زیرا این آهن را نامرغوب تر از آهن زمان الکساندر کبیر گزارش کرده اند. البتـه قابل ذکر است که مشکل نامرغوبی آهن در حال حاضر نیز وجود دارد و دلایل زیادی وجود دارد که حاکی از آن است

که مقاومت خوردگی آهن تولیدی در زمانهای اخیر کمتر از آهن تولیـــدی در زمانـهای گذشـته میباشـد. بـرای مثـال می توان به برج دهلی اشاره کرد که در هزار و پانصد سال پیش ساخته شده و تا به حال به خوبی در برابـر خـوردگـی مقاومت کرده است. وقتی قطعات باقیمانده از گذشته را مطالعه می کنیم، متوجه می شویم که تنها آنـهایی کـه دارای مقاومت خوردگی بهتری می باشند (شاید بطور کاملاً اتفاقی) توانسته اند به عنوان یک اثر خوب تاریخی باقی بمانند. دستیابی به روش جدید ذوب و استفاده از کک به جای زغال چوب، همچنین استفاده از زغال سنگ و نفت به عنـــوان اصلی ترین سوخت، سبب آلودگی اتمسفر محیط اطراف و همچنین خوردگی توسط گوگرد آهن شـده اسـت. گـوگـرد عامل مهمی در تشدید خوردگی سازه های آهنی است. برج دهلی و دیگر عتیقـه جـات آهنـی شـرقی کـه در فضـای خشک و عاری از آلودگی قرار داشته اند، در اثر خوردگی در زمانهای اولیـه بـر سطحشـان یـک لایـه بسـیار محـافظ تشکیل شده که تا به امروز مانع از انجام خوردگی بر سطح آنها شده است . نمونه های کوچکی از این عتیقه جات کـه در اتمسفر آلوده شهرهای صنعتی امروزی قرار داده شده اند، با سرعتی معادل قطعات آهنی تازه تولیـد شـده خـورده شده اند. چند پل آهنی بزرگ در ویلز جنوبی که در عهد آهن نصب شده اند، مقاومت بسیار خوبـی در اتمسـفر آلـوده کنونی از خود نشان می دهند. این امر بدین علت می باشد که خوردگی اولیه این پلها در زمانی اتفاق افتاده است کـه از زغال سنگ به طور وسیع استفاده نمی شده است در نتیجه یک لایه محافظ، احتمالاً از جنـس اکسـید خـالص بـر سطح آنها تشکیل شده است. در حقیقت به علت وجود این لایه محافظ این سازه ها مقاومت بسـیار خوبـی نسـبت بـه سازه های فولادی امروزی از خود نشان میدهند. خوردگی به هر دلیلی اعم از نامرغوبی فلز یا آلودگی محیط که باشد، امروزه به علت رشد روز افزون بهره برداری از فلزات، روز به روز بـه صـورت یـک مسـئله جـدی رو بـه افزایـش اسـت. خوردگی از نیمه های قرن ۱۸ به عنوان معضل قابل ملاحظه ای در آمده است امـا تـا اوایـل قـرن ۱۹ پیشـرفت قـابل ملاحظه ای جهت حل این معضل به صورت عملی انجام نشده است. در حدود سال ۱۸۱۵،خوردگی در اسیدها توسـط ولاستون به عنوان یک فرآیند الکتروشیمیایی بیان شد. چند سال بعد در سال ۱۸۱۹ نیز یکی از دانشمندان فرانسـوی، زنگ زدن را نیز یک فرآیند الکتروشیمیایی دانست. در سال ۱۸۲۴ دیوی نشان داد که وقتی بین دو فلز غـیرهمجنس و غوطه ور در آب اتصال الکتریکی برقرار شود سرعت خوردگی در یکـی از فلـزات افزایـش یافتـه و فلـز دیگـر نـیز تـا حدودی حفاظت می شود. با توجه به این پدیده او پیشنهاد کرد که می توان قطعات مسی ته کشتی را از طریق اتصال آنها با صفحاتی از جنس آهن یا روی حفاظت نمود و این در حقیقـت قدیمـی تریـن نمونـه عملـی حفـاظت کـاتدی می باشد.

در سال ۱۸۶۱ نیز خوردگی شدید مشابهی رخ داده بود و تصمیم گرفته شد تا صفحات سربی بدنه کشتی ها برداشته شود تا از خوردگی سریعی که بر سکان آهنی و پیچها بوجود می آمد جلوگیری کنند. **چارلز دوم و ساموئل پهیز** نیز به عنوان متخصصین این کار شناخته شدند. در سال ۱۸۳۰ مقاله ای از طرف **دلاریو** منتشر شد. در این مقاله خوردگی سریع روی ناخالص گزارش شده بود بدین ترتیب که در اثر وجود تعداد زیادی اتصالات دو فلزی که در روی ناخالص موجود بود، پیلهای خوردگی بین روی و ناخالصیها ایجاد شده بود.

فاراده این تحقیقات را ادامه داده و تأثیر هم زمان و مشترک دو عامل الکتریکی و شیمیایی را مد نظر قرار داد. **فاراده** آزمایشهای خوردگی زیادی انجام داد و بر اساس این آزمایشها او توانست قانون خود را برای عملکرد الکتروشیمیایی خوردگی ارائه دهد که بر اساس این قانون رابطه زیر بین جریان عبوری از فلز و مقدار فلز خورده شده برقرار می باشد:

$$\text{مقدار فلز خورده شده} = \frac{M}{n} \times \frac{It}{F}$$

در این فرمول :

تعداد الکترون ها n =	جرم اتمی فلز = M
عدد فاراده (۹۶۵۰۰ کولمب براکی والان شیمیائی) = F	جریان (آمپر) = I
	زمان (ثانیه) = t

دلاریو فلزات را بر حسب کاهش میزان فعالیت دسته بندی کرد و نشان داد که این دسته بندی به الکترولیت بستگی دارد. او همچنین عنوان نمود که یک واکنش الکتروشیمیایی نیاز به وجود دو فلز و یا یک فلز و یک اکسید فلز دارد. در حدود سال ۱۸۳۰ **استورژن** بیان کرد که سطح یک فلز می تواند از لحاظ الکتریکی نا همگن بوده و یا دارای قطبهای مثبت و منفی باشد و سپس **فاراده** نیز از طریق انجام آزمایشات بر روی سطح یک فلز، این مطلب را اثبات نمود. در این آزمایشها او توانست با تغییر غلظت و دمای الکترولیت باعث بوجود آمدن اختلاف پتانسیل بر سطح این فلز گردد.

در سال ۱۸۳۷ **را برت مالت** از طرف انجمن توسعه علوم انگلستان مأمور بررسی تأثیر آب دریا، آب رودخانه های معمولی و شور بر روی چدن و آهن تجاری گردید. او آزمایشهای زیادی بر روی نمونه های فلزی در آبهای مختلف در جزایر انگلیس انجام داد و اثر پیلهای اختلاف غلظت بر روی خوردگی سازه های فولادی در محلهایی از آب دریا یا رودخانه که آب بر سطح قطعات به صورت غیرهمگن و لایه لایه برخورد می کند را بررسی کرد.در همان زمان به

دنبال کارهای دیوی فعالیت های زیادی برای حفاظت آهن توسط آندهای روی انجام گردید که پس از آن نیز فرآیند گالوانیزاسیون در حمام مذاب مطرح گردید. مالت نشان داد که روی ممکن است مدتی پس از استفاده شدن در محیطهای خورنده از لایه نسبتاً ضخیمی از اکسید روی و کریستالهای کربنات آهن پوشیده شود، در این صورت خاصیت قربانی شوندگی خود را از دست داده و نمی تواند مانع از خوردگی آهن گردد. امکان وجود تغییرات در سرعت خوردگی آلیاژهای روی که توسط دلاریو گزارش شده بود، مالت را بر آن داشت تا آزمایشات خود را بر روی آندهایی از جنس آلیاژ روی انجام دهد. او نشان داد که فلزاتی که نسبت به روی کاتدی هستند، سبب کاهش راندمان آند روی می گردند. در حالیکه فلزاتی که نسبت به آن آندی هستند مانند سدیم و جیوه، این خاصیت را بهبود می بخشند.

تا پایان قرن نوزدهم توجه زیادی به خوردگی الکتروشیمیایی مبذول نشد و این اعتقاد که دو فلز برای به وجود آمدن این نوع خوردگی ضروری است، تقویت گردید. در سال ۱۹۱۰ مجدداً خوردگی دو فلز در تماس با یکدیگر توسط "هین" و "بایر" مورد بررسی قرار گرفت. آنها دریافتند که در این حالت سرعت خوردگی فلز نجیب تر (کاتد) کمتر و سرعت خوردگی فلز پایه (آند) بیشتر می شود. همچنین مشخص کردند که میزان خوردگی با افزایش فاصله دو فلز از یکدیگر در جدول پتانسیل الکتروشیمیایی افزایش مییابد. فاکتورهای دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که فاکتورهایی چون مساحت سطوح فلزی در حال تماس و سرعت رسیدن اکسیژن به کاتد نیز نقش مهمی را بر عهده دارند.

در مقاله ای که در سال ۱۹۲۴ توسط "ایوانس" و به نام دیدگاههای الکتروشیمیایی جدید بر خوردگی فلزات منتشر شد چند مکانیزم که باعث بوجود آمدن پیل های خوردگی در سطح یک فلز می شود، ارائه گردید. لازم به ذکر است که قبل از این برخی از این اصول توسط دانشمندان دیگر مورد بررسی قرار گرفته بود. به عنوان مثال در سال ۱۸۲۵ "واکر" پیل اختلاف دما، در سال ۱۸۲۶ ، "دیوی" پیل اختلاف تنش ، در سال ۱۸۲۷ "بکرل" پیل اختلاف غلظت و در سال ۱۸۳۰ "ماریانیتی" پیل اختلاف دما را بررسی کرده بودند در دانشگاه کمبرج نیز ایوانس و همکارانش؛ هوار، "تورون هیل" و آگار مطالعات قبلی در این زمینه را دنبال کردند و دلایل کمی مکانیزمهای خوردگی الکتروشیمیایی مزبور را مشخص نمودند. به دنبال آن در سال ۱۹۳۸ "هوار" مقدماتی از تئوری الکتروشیمیایی حفاظت کاتدی را به رشته تحریر در آورد. بعدها نیز تئوری مشابهی نیز توسط "براون" زیمنس" ارائه گردید. "ادیلیانو" نیز در سال ۱۹۵۵ در دانشگاه کمبریج حفاظت آندی فلزات روئین شونده را مورد بررسی و مطالعه قرار داد.

۱-۲- حفاظت کاتدی

نیروی دریایی انگلستان اولین سازمانی بود که از روش حفاظت کاتدی برای محافظت بدنه کشتی ها استفاده نمود. "سر هامفری دیوی" در سال ۱۸۲۳ از طرف این سازمان مأمور بررسی خوردگی صفحات مسی موجود بر بدنه کشتیهای چوبی شد. از آندهای قلع، آهن و روی جهت حفاظت مس استفاده کرد و نتایج مطلوبی بدست آورد. او بعدها (سال ۱۸۲۴) از چدن نیز به عنوان آند استفاده کرد. دریافت که چدن مناسب تر از قلع ، آهن و روی می باشد.چرا که پایداری خواص الکتریکی در چدن به مراتب بیشتر است. با این وجود استفاده از روی به عنوان آند حتی زمانیکه کشتیهای چوبی جای خود را به کشتیهای آهنی و فولادی دادند نیز ادامه داشت.

موقعیت نصب روی در کشتی در محلهای انتهایی کشتی و برای حفاظت قسمتهای برنجی نظیر پروانه و ورودی لوله های حاوی آب گردشی است که شدیداً مستعد به خوردگی می باشند. اگر چه در ابتدا حفاظت کنندگی روی مورد شک و تردید بود، ولی گزارشات بعدی همگی حاکی از رضایت بخش بودن حفاظت کنندگی آن بود.

ادیسون نیز سعی کرد که از آندهای اعمال جریان جهت حفاظت کاتدی کشتی استفاده کند ولی به دلیل عدم دسترسی به تکنیکها و امکانات لازم در آن زمان، این کار میسر نشد. اغلب استفاده کنندگان اولیه حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان در آب دریا توجه به پیشگیری از تشکیل لایه ها و رسوبات بر کشتی ها داشتند که در اثر تماس با آب دریا بر سطحشان تشکیل می شد. در آن زمان تصور پیشرفت در روند اعمال و روشهای حفاظت کاتدی بدین صورت که امروز میسر شده است، انتظار نمی رفت.

ار ابتدای قرن بیستم تا کنون انتقال سوختهای مایع و گازی از طریق خطوط لوله زیر زمینی، چدنی و فولادی صورت میگیرد. اما در سال ۱۹۲۰ با توسعه شبکه خطوط لوله نفت در آمریکا، مسئله خوردگی این لوله ها اهمیت خاص پیدا کرد. چرا که به وجود آمدن یک نشتی کوچک در این شبکه می توانست خسارت جبران نا پذیری چون به هدر رفتن نفت، آتش سوزی، هزینه های زیاد تعمیرات، به تعویق افتادن امور، آلودگی آبهای مصرفی و مرگ و میر حیوانات را به دنبال داشته باشد.

تا اوخر دهه سوم قرن بیستم تعداد نشتی ها کم و قابل تحمل بوده و منحنی فرکانس نشتی ها به طور خطرناکی شروع به افزایش نیافته بود. تا اینکه در دهه چهارم جهت جلوگیری از خوردگی داخل لوله ها از مواد ممانعت کننده و برای جلوگیری از خوردگی خارج لوله ها از فرآیندهای پوشش دادن و حفاظت کاتدی استفاده گردید. در ابتدا حفاظت کاتدی صرفاً به قسمتهایی از خط لوله که در خاکهای خیلی خورنده قرار داشته و شدیداً تحت تأثیر خوردگی بودند

اعمال می گردید. البته این روشها توأم با موفقیت نیز بود. همچنین از آندهای روی و یا از روش اعمال جریان به کمک ژنراتورهای بادی و یا مبدلها و یکسو کننده های اکسید مس استفاده می شد.

در سال ۱۹۳۶ در آمریکا انجمنی بنام انجمن حفاظت کاتدی تشکیل گردید که کار آن بحث و بررسی و تبادل اطلاعات در زمینه حفاظت کاتدی بود. با تشکیل این انجمن پایه های تشکیل انجمن ملی مهندسین خوردگی نیز بنا نهاده شد.

از جمله حوزه های دیگر نفتی که شبکه های وسیعی از خطوط لوله نفت را در خود جای داده بود، خاور میانه بود. در این منطقه بحرین نخستین کشوری بود که در سال ۱۹۳۹ از حفاظت کاتدی جهت حفاظت لوله های واقع در دریا استفاده کرد.

۷۰ سال پیش عامل عمده خوردگی فلزات مدفون، تأثیر الکترولیزی یا تأثیر تداخلی ناشی از جریانهای سرگردان قطارهای برقی بود. نخستین روش که برای جلوگیری از این نوع خوردگی مورد استفاده واقع گردید این بود که لوله ها را به قطب منفی ژنراتور وصل کنند. البته از این روش درحال حاضر نیز استفاده می شود در ضمن ادعا شده است که قرار دادن یک ژنراتور برق مستقیم دیگر بین کابل منفی قطار برقی و سازه باعث بهبود حفاظت می گردد.

در سال ۱۹۱۱ یک محقق آلمانی بنام **هرمن جیبرت** روشی برای حفاظت فلزات مدفون در مقابل خوردگیهای حاصل از جریان سرگردان ارائه نمود که در آن بیشتر از حفاظت کاتدی استفاده شده است.

امروزه اختراع مواد جدیدی چون آندهای فدا شونده و از نوع آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم و آندهای اعمال جریان به همراه توسعه مهندسی برق و الکترونیک موجب پیشرفتهای بزرگی در حفاظت کاتدی گردیده است. بطوریکه امروزه به حفاظت کاتدی به عنوان یک رشته مهندسی با ساختار علمی قوی نگریسته می شود.

۲- اصول و مبانی خوردگی و حفاظت کاتدی

۲-۱- مقدمه

خوردگی یک فلز به طور خلاصه بدینصورت آغاز می گردد که در آن فلز با از دست دادن یک یا چند الکترون به یون فلزی تبدیل می شود یعنی :

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

فلز — یون فلزی — الکترون

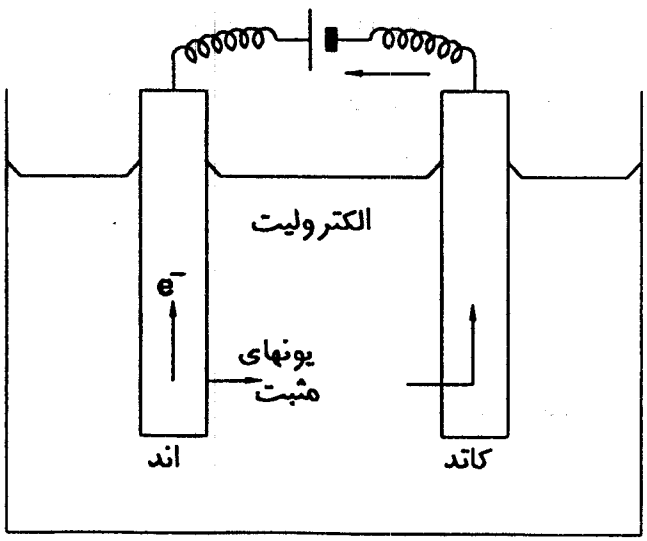
مثلاً آهن با از دست دادن ۲ الکترون به یون فرو تبدیل می گردد :

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

اگر یک قطعه آهنی درون آب قرار گیرد، آهن فلزی به صورت یونهای Fe^{+2} وارد محلول شده و فلز به دلیل باقی ماندن الکترونهای اضافی روی آن دارای بار منفی می گردد. انحلال اتمهای فلز به داخل محلول به صورت یون، باعث به وجود آمدن یک جریان الکتریکی می گردد که جهت آن از فلز به محلول می باشد.

فلز	سطح	محلول
$2e^-$ ←	$[Fe^{+2} + 2e^-]$	→ Fe^{+2}
الکترونها	شار جریان	یونها

فاراده نخستین کسی بود که در این زمینه تحقیقاتی را انجام داد ودریافت که سرعت حل شدن یک الکترود فلزی با جریان عبوری نسبت مستقیم داشته و مقدار فلز حل شده نیز به میزان الکتریسیته عبوری بستگی دارد. پس این امکان وجود دارد که در حالی که همان رابطه قبلی بین میزان الکتریسیته و وزن فلز رسوب یافته وجود دارد، با اعمال جریان در جهت عکس، فلزات را پوشش داد. الکترود فلزی که جریان از آن به طرف الکترولیت برقرار است، آند و الکترود فلزی که جریان از الکترولیت به سمت آن حرکت می کند، کاتد نامیده میشود وجود آند و کاتد در یک الکترولیت تشکیل یک پیل میدهد. شکل (۱) پیل ساده ای را نشان می دهد که در آن جریان از یک منبع DC به سمت آند وسپس از طریق الکترولیت به طرف کاتد حرکت کرده و از آنجا به قطب منفی بر می گردد.



شکل (۱) : پیل ساده با آند، کاتد و الکترولیت

در تبدیل غیر فلز به یون غیر فلزی همانند تبدیل فلز به یون فلزی، جریانی از بار الکتریکی برقرار می گردد که در حالت غیر فلزی، یون غیر فلز دارای بار منفی است و جهت جریان همان جهت واکنش تبدیل یون غیر فلزی به غیر فلز می باشد. برای نمونه می توان از تبدیل یون کلر به کلر یاد کرد که جهت جریان الکتریکی در آن، از آند به طرف الکترولیت می باشد.

در پیل مزبور واکنش آندی به صورت زیر می باشد :

الکترون + یون فلز ⟵ فلز

یا / و

الکترون + غیر فلز ⟵ یون غیر فلز

عامل تعیین کننده نوع واکنش و سرعت واکنش عبارت از شرایط مختلف موجود در آند و الکترولیت می باشد. ولی عمدتاً فلز آند خورده شده و به صورت یونهای فلزی مثبت وارد محلول می گردد. واکنش کاتدی پیل نیز متشابهاً به صورتهای زیر رخ می دهد :

فلز ⟶ الکترون + یون فلزی

یا / و

یون غیر فلزی ⟶ الکترون + غیر فلز

در محلولهای شامل غلظت بالایی از یونهای فلزی، واکنش کاتدی در واقع واکنش تشکیل خود فلز است که این پدیده اساس آبکاری الکتریکی را تشکیل میدهد. همینطور نیز در محلولهای اسیدی که غلظت یون ئیدروژن در آنها بالاست، تصاعد ئیدروژن در کاتد انجام پذیرفته در محلولهای با غلظت بالای اکسیژن یا دیگر عوامل اکسیدکننده، این عوامل به یون تبدیل شده و تشکیل ئیدروکسید (OH^-) می دهند.

در پیلی که الکترودهای آن از آهن و الکترولیت آن نیزمحلول رقیقی ازنمک آهن است، واکنشها عبارت خواهندبود از :

۱- آهن در آند خورده میشود :

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

۲- در کاتد نیز: (a) ئیدروژن آزاد می گردد :

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow 2H \longrightarrow H_2$$

و یا

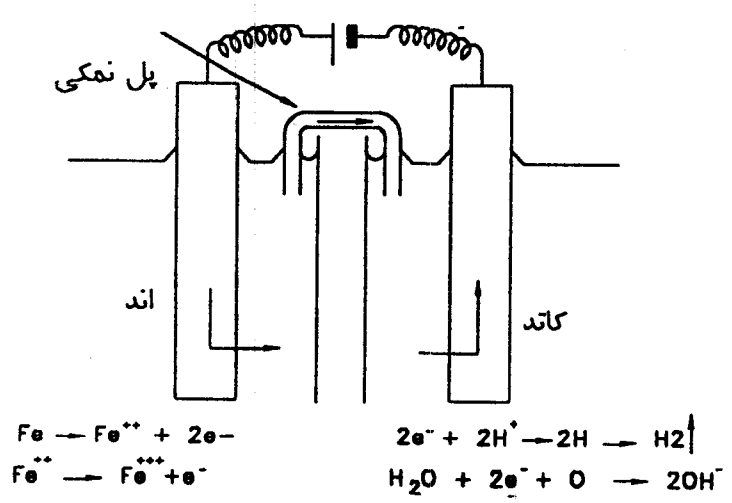
(b) اکسیژن موجود به یون تبدیل می گردد :

$$H_2O + 2e^- + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow 2(OH)^-$$

۲-۲- جدول پتانسیل فلزات

اگر دو فلز از دو جنس متفاوت مانند آهن و مس را در یک محلول نمکی که یونهای هر دو فلز را در خود دارد، فرو برده شود در این صورت یک اختلاف پتانسیل بین آنها برقرار می شود. حال اگر این دو فلز بیکدیگر متصل شوند بین آنها جریان الکتریکی عبور خواهد کرد.

هر قطعه فلزی که در یک الکترولیت قرار گیرد، سطح آن خورده شده و فلز به صورت یونهای با بار مثبت وارد محلول می گردد و باقیمانده فلز به دلیل وجود الکترونهای اضافی روی آن، دارای بار منفی می شود. از طرف دیگر فلز دارای بار منفی یونهای مثبت را جذب کرده که این تمایل برای خورده شدن بیشتر فلز را کاهش می دهد. در این شرایط هنگامی که فلز باندازه کافی بار منفی داشته باشد که بتواند به مقداری که یون مثبت در اثر خوردگی از دست داده است یون مثبت جذب نماید می توان گفت که تعادل الکتریکی برقرار شده است. البته نیاز نیست که این یونهای مثبت جذب شده یونهای حاصل از خوردگی خود فلز باشند. دو فلز که در یک محلول نمکی قرار دارند، در پتانسیلهای متفاوتی به تعادل می رسند که با یک ولتمتر ساده می توان اختلاف این پتانسیلها را بدست آورد. اگر هر جفت فلزی را در محلولی از نمکهای آنها قرار دهیم اختلاف پتانسیل بین آنها را می توان اندازه گیری کرد. حال اگر پتانسیل هر یک از فلزات را نسبت به یک فلز خاص اندازه گیری کنیم در این صورت اختلاف پتانسیل بین جفت فلز عبارت از اختلاف جبری بین پتانسیل آنها نسبت به آن فلز مرجع می باشد. با استفاده از این خاصیت می توان جدولی ترتیب داد که در آن فلزات بالای جدول نسبت به فلزات پایین جدول دارای پتانسیل منفی باشند و اختلاف پتانسیل بین دو فلز با افزایش فاصله آنها از یکدیگر، افزایش یابد چنین جدولی در سال ۱۸۳۰ توسط دلاریو تهیه گردید حال برای اینکه جدول مزبور به جدولی استاندارد تبدیل گردد، می توان مطابق شکل (۲) هر فلز را در محلول نمک خود قرار داده و سپس دو محلول را توسط یک پل نمکی به یکدیگر ارتباط داد. لازم به ذکر است که این محلولهای نمکی از نظر غلظت و اکتیویته دارای شرایط خاص و مشخص می باشند.



شکل (۲) : پیل با آند و کاتد فلزی در محلولی از نمکهایشان

با قرار گرفتن یک الکترود فلزی در محلولی از نمک خود، یک نیم پیل تشکیل می گردد و با ارتباط دو نیم پیل که از طریق یک الکترولیت صورت گیرد، یک پیل کامل بوجود می آید. به نیم پیلی که از غوطه وری الکترود فلزی در محلولی از نمکهای خود با اکتیویته یک نرمال بوجود آید نیم پیل استاندارد گویند که به عنوان نمونه می توان به الکترود استاندارد ئیدروژن اشاره کرد که با ایجاد یک لایه ئیدروژن روی یک فلز هادی که در یک الکترولیت حاوی یونهای ئیدروژن با اکتیویته نرمال قرار دارد، ایجاد می شود. حال بعد از آشنایی با نیم پیل استاندارد ئیدروژن، می توان پتانسیل هر نیم پیل دیگر را نسبت به آن بدست آورد.پتانسیل فلزات در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) : جدول پتانسیل فلزات

واکنش الکترود	پتانسیل های احیاء استاندارد، ولت
$K^+ + e^- = K$	-۲/۹۲
$Ca^{++} + 2e^- = Ca$	-۲/۸۷
$Na^{++} + e^- = Na$	-۲/۷۱
$Mg^+ + 2e^- = Mg$	-۲/۳۴
$Be^{++} + 2e^- = Be$	-۱/۷۰
$Al^{+++} + 3e^- = Al$	-۱/۶۷
$Mn^{++} + 2e^- = Mn$	-۱/۰۵
$Zn^{++} + 2e^- = Zn$	-۰/۷۶
$Cr^{+++} + 3e^- = Cr$	-۰/۷۱
$Ga^{+++} + 3e^- = Ga$	۰/۵۲
$Fe^{++} + 2e^- = Fe$	-۰/۴۴
$Cd^{++} + 2e^- = Cd$	-/۴۰
$In^{+++} + 3e^- = In$	۰/۳۴
$Ti^+ + e^- = Ti$	-۰/۳۴
$Co^{++} + 2e^- = Co$	-۰/۲۸
$Ni^{++} + 2e^- = Ni$	-۰/۲۵
$Sn^{++} + 2e^- = Sn$	-۰/۱۴
$Pb^{++} + 2e^- = Pb$	-۰/۱۳
$2H^+ + 2e^- = H2$	۰
$Cu^{++} + 2e^- = Cu$	۰/۳۴
$Ag^+ + e^- = Ag$	۰/۸۰
$Pd^{++} + 2e^- = Pd$	۰/۸۳
$Hg^{++} + 2e^- = Hg$	۰/۸۵
$Pt^{++} + 2e^- = Pt$	۱/۲۰
$Au^+ + e^- = Au$	۱/۶۸

با تغییر غلظت الکترولیت، دمای الکترولیت، گازهای محلول (مخصوصاً اکسیژن) و شرایط فیزیکی فلز می توان پتانسیل یک نیم پیل را تغییر داد. بنابراین حتی زمانیکه دو فلز کاملاً مشابه در یک الکترولیت قرار دارند، با تغییر عوامل فوق می توان بین آنها اختلاف پتانسیل ایجاد کرد.

اگر بین دو فلز که دارای پتانسیلهای متفاوتی می باشند ارتباط الکتریکی برقرار گردد جریان از طریق رابط و از پیل عبور خواهد کرد. در الکترود منفی در فصل مشترک الکترود/الکترولیت واکنش آندی تبدیل فلز به یون فلزی رخ میدهد که به دنبال آن الکترونهای اضافی روی قطعه باقی خواهند ماند. در الکترودمثبت نیز الکترونها یا جذب یونهای مثبت شده و یا باعث احیاء اکسیژن به یونهای منفی می گردند که در هر دو حالت از تعداد الکترونها کاسته می شود. در رابط الکتریکی جریان الکترون از آند به طرف کاتد است. در حالیکه بطور قراردادی جریان در رابط الکتریکی، از کاتد به طرف آند و در الکترولیت از آند به طرف کاتد میباشد. واکنش فلزی حاکم در آند عبارت از تشکیل یونهای فلزی و انجام فرآیند خوردگی در آن می باشد. این در واقع مکانیزم خوردگی الکتروشیمیایی بوده و در هر حالت که در آن یک پیل مانند آنچه که توضیح داده شد تشکیل گردد رخ میدهد.

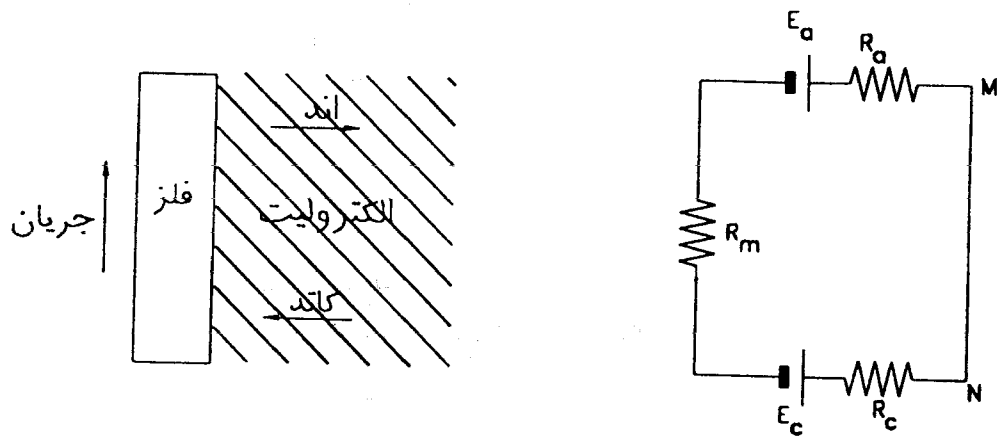
۲-۳- پیل خوردگی

قبلاً نیز اشاره گردید که وقتی یک قطعه فلزی در داخل یک محلول الکترولیت قرار گیرد، متعاقب آن یک پیل ساده تشکیل می گردد حال در اثر هرگونه تغییرات هر چند اندک در شرایط فیزیکی فلز یا در الکترولیت موجب بروز تغییرات در پتانسیل پیل می شود. از عوامل تغییر دهنده شرایط فلز می توان به اعمال پوشش های سطحی غیریکنواخت برسطح فلز، تفاوت در عملیات پرداختکاری سطح فلز، تفاوت در عملیات حرارتی نقاط مختلف فلز و وجود تنش های باقیمانده در فلز اشاره کرد. در الکترولیت نیز تغییرات غلظت یک نمک یا یون بخصوص یا یک گاز فعال حل شده نیز موجب ایجاد تغییرات پتانسیل شده که باعث بوجود آمدن نواحی آندی و کاتدی در سطح فلز می گردد. تغییرات پتانسیل همچنین می تواند در اثر تغییرات دما و یا عوامل دیگر در یک پیل بوجود آید.

در هر زمان که فلز درتماس با رطوبت حتی بصورت قطرات ریز باشد، برخی از عوامل فوق یا حتی تمام آنها ممکن است بوجود آید ولی اغلب وجود یک یا دو عامل متغیر، تعیین کننده نوع و شکل خوردگی می باشند. سطح فلز ممکن است متشکل از نواحی بزرگ آندی و کاتدی بوده و یا شامل مجموعه ای از پیلهای کوچک باشد که اندازه آند و کاتد آن به کوچکی دانه های کریستال باشند.

هر پیل را می توان معادل مدار الکتریکی شکل (۳) دانست که در آن Ea و Ec عبارت از پتانسیلهای آندی و کاتدیRm مقاومت فلز، Ra مقاومت کل آند و الکترولیت مجاورش و Rc مقاومت کاتد میباشد. با توجه به این مدار و بر اساس قانون اهم جریان عبوری از پیل برابر خواهد بود با :

$$I = \frac{E_a - E_c}{R_m + R_c + R_a}$$

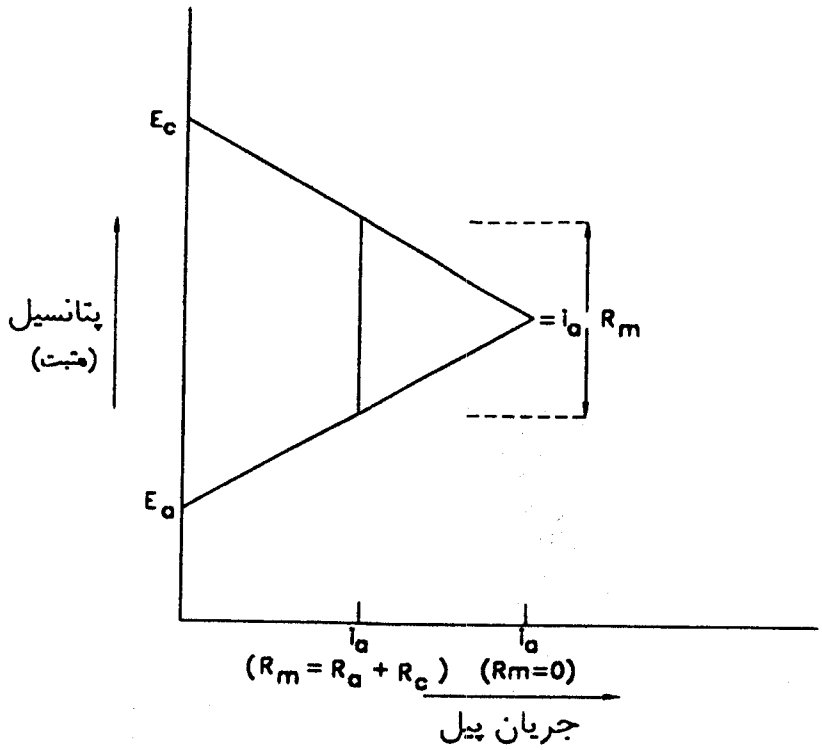


شکل (۳) : مدار معادل الکتریکی یک پیل ساده

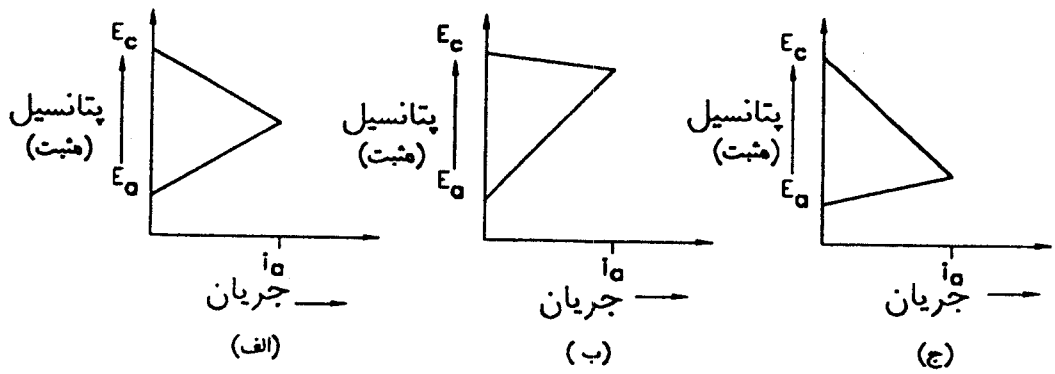
این مقدار جریان سبب خوردگی آند شده و سرعت این خوردگی نیز متناسب با مقدار جریان است.

پتانسیل مدار را می توان بر اساس پتانسیل آند و کاتد یعنی به صورت (E_a-iR_a) و (E_c-iR_c) بیان کرد. اینها در واقع همان پتانسیلهایی هستند که در عمل اندازه گیری می گردند، حال اگر این پتانسیل ها را نسبت به نیم پیل استاندارد در یک منحنی بر حسب جریان رسم کنیم، نتیجه مانند منحنی شکل (۴) خواهد بود.

هنگامی که Raو Rc برابر باشند، منحنی به صورت شکل (۵ الف) در آمده و گفته می شود فرآیند خوردگی تحت شرایط کنترل مختلط است. یعنی تأثیر مقاومت آند و کاتد یکسان است. جایی که مقاومت آند بیشتر از مقاومت کاتد باشد، آند کنترل کننده سیستم خواهد بود که منحنی آن در شکل(۵ ب) آمده است. و در جایی که مقاومت کاتد بیشتر باشد کاتد کنترل کننده سیستم خواهد بود و منحنی پتانسیل بر حسب جریان بصورت شکل (۵ ج) خواهد بود.



شکل (۴) : پتانسیل آند و کاتد نسبت به جریان خوردگی پیل



شکل (۵): پتانسیلهای آندی و کاتدی در پیلهای تحت (الف)کنترل مخلوط - (ب)کنترل آندی - (ج)کنترل کاتدی

چندین عامل مختلف هستند که بر مقاومت کاتد یا آند تأثیر می گذارند.بطور کلی مقاومت بـا انـدازه الکـترود نسـبت عکس داشته و با تغییرات خطی ابعاد الکترود تغییر می نماید. مقاومت الکترود توسط تشکیل فیلمهای اکسیدی و لایه های عایق مانند رنگ، یا توسط مقاومت مخصوص آنولیت (الکترولیت مجاور آند) ویا کـاتولیت تحـت تـأثیر میباشـند. وقتیکه سرعت خوردگی (سرعت اتلاف فلز) به میزان جریان عبوری از پیل بستگی داشته باشد، پوششهای مختلـف یـا اندازه آند تعیین کننده سرعت اتلاف فلز در واحد سطح می باشند.

هنگامی که اتلاف وزن در واحد سطح زیاد باشد، خوردگی ورق نازک فلزی ممکن است با نفوذ سریع و بصورت سـوراخ شدن انجام شود (خوردگی حفره ای)، در حالیکه شاید میزان اتلاف فلز و بار عبوری کلی (سـاعت/ آمپـر) نسـبتاً کـم باشد. این بدان معناست که نوع کنترل آندی مهمتر از میزان کنترلی است که آند اعمال می کند. اگر پوششی از رنـگ روی آند، با ایجاد کنترل آندی میزان جریان پیل را به ۱۰درصد مقدار اولیه آن تقلیل دهد، در ایـن صـورت از طریـق کنترل آندی میزان اتلاف فلز اگر چه ۱۰ برابر کاهش یافته است ولی از آنجا که در سطحی معادل با ۱٪ سـطح اولیـه آند انجام پذیرفته است بنابراین می توان نتیجه گرفت که سرعت نفوذ خوردگی ده برابر افزایش یافته است .

حال اگر با تغییر مقاومت مخصوص آنولیت نیز همان مقدار کاهش جریان پیل را داشته باشیم. در این صورت خوردگی همچنان به صورت یکنواخت روی سطح آند صورت خواهد گرفت و میزان آن نیز ۱۰درصد مقدار اولیه در پیـل خواهـد بود. در نتیجه سرعت نفوذ ۱۰ برابر کاهش خواهد یافت.

با افزایش مقاومت کاتد نیز می توان بهمان میزان کاهش جریان پیل نایل آمد، مثلاً از طریق رنگ کردن، اما ایـن بـار چون کاتد خورده نمی شود بنابراین هر میزان افزایش دانسیته جریان در هر نقطه از کاتد هیچگونـه عواقبـی نخواهـد داشت. در حالیکه سرعت خوردگی در آند کاهش می یابد. همچنین هیچ تغییری در توزیع جریـان در آنـد نـیز اتفـاق نمی افتد. بنابراین حملات ناشی از خوردگی به تأخیر خواهد افتاد.

۲-۴- پتانسیل های پیل خوردگی

برای بدست آوردن پتانسیل بین فلز و الکترولیت، می توان الکترولیت را توسط پل نمکی با یک نیم پیل مرجع مرتبـط نموده و ولتاژ بین فلز و نیم پیل را اندازه گیری کرد. استفاده از این روش ضـروری بـوده و چندیـن نیـم پیـل مرجـع مناسب بهمراه پل های نمکی برای استفاده در اختیار می باشد.

پل نمکی مقاومت قابل توجهی را به مدار اعمال می کند. بنابراین اندازه گیری ها باید توسط ولتمتر یا پتانسـیومتر بـا امپدانس داخلی زیاد انجام گیرد. همانطور که از نمودار مدار الکتریکی دیده می شود، با تغییر نقطـه اتصـال بـه فلزیـا نقطه تماس پل نمکی به الکترولیت، ولتاژهایی با مقادیر مختلف اندازه گیری می گردد. لازم به ذکر است که پتانسـیل

آند نسبت به الکترولیت مجاور آند منفی تر از پتانسیل کاتد نسبت به الکترولیت مجاور کاتد می باشد. مقدار دقیق پتانسیل به موقعیت پل نمکی در الکترولیت که معادل الکتریکی نقطه اتصال به مقاومت های R_cو R_a می باشد، بستگی دارد.

در مواردی که فاصله پل نمکی از آند و کاتد زیاد است، پتانسیل پیل (با فرض ناچیز بودن R_m) عبارت از پتانسیلی خواهد بود که در محل اتصال مقاومتهای R_c و R_a نشان داده میشود. در مواردی نیز که کنترل هم آندی و هم کاتدی می باشد، پتانسیل مزبور میانگین E_a و E_c است یعنی :

$$E = \frac{E_a + E_c}{۲}$$

پتانسیل پیلهای تحت کنترل آندی تقریبا" برابر با پتانسیل کاتد و بالعکس پتانسیل پیلهای تحت کنترل کاتدی تقریبا" برابر با پتانسیل آند خواهد بود.

۲-۵- جریان در یک پیل خوردگی

از قانون اهم چنین بر می آید که با افزایش مقاومت کل پیل، جریان در پیل کاهش خواهد یافت. در حالیکه کاهش مقاومت کل پیل نتیجهٔ عکس خواهد داشت.مقاومت پیل عموما" در الکترولیتهای با مقاومت مخصوص بالا افزایش و در الکترولیتهای با مقاومت مخصوص پایین همچون آب دریا کاهش می یابد. این اصل، یکی از عمده دلایل رخداد خوردگی شدید فلزات در الکترولیتهای با مقاومت کم می باشد اما تنها مقاومت مدار نیست که جریان پیل را تغییر می دهد. بلکه اختلاف پتانسیل یعنی (E_a-E_c) نیز موجب تغییر جریان پیل می گردد. مقدار(E_a-E_c) نیز به شرایط پیل چون فاصله بین الکترودهای فلزی در جدول پتانسیل فلزات (جدول ۱) یا وجود تغییرات در فصل مشترک الکترولیت و فلز بستگی دارد. هر عامل که این اختلاف پتانسیل را کاهش دهد، موجب کاهش جریان پیل و نهایتا" کاهش خوردگی در پیل می گردد.

۲-۶- پلاریزاسیون

اگر دو الکترود فلزی را در محلولی از یک نمک قرار داده و بخواهیم جریانی را از یکی بدیگری از داخل الکترولیت عبور دهیم در این صورت به یک ولتاژ محرکه نیاز خواهد بود. این ولتاژ که به دانسیته جریان بستگی دارد، به دو جزء عمده تقسیم می گردد. یکی ولتاژی است که برای غلبه شدن بر مقاومت اهمی لازم است که به اندازه و شکل الکترود و همچنین مقاومت ویژه الکترولیت بستگی دارد؛ و دیگری ولتاژی است که جهت غلبه بر مقاومت غیر اهمی لازم بوده که در نزدیکی فصل مشترک الکترود / الکترولیت در سطوح آند و کاتد موجود می باشد که به مورد اخیر اصطلاحا" پلاریزاسیون اطلاق میگردد.

پلاریزاسیون خود به ۴ نوع بنامهای اکتیواسیون، غلظتی، اهمی و شبه اهمی تقسیم می شود پلاریزاسیون اکتیواسیون عبارت از پولاریزاسیونی می باشد که باعث وقوع واکنشهای آندی و کاتدی خاص شده و به دانسیته جریان بستگی دارد. رابطه[۴] بین پولاریزاسیون و دانسیته جریان توسط معادله ای بنام معادله **تافل** بیان می گردد که در آن η مقدار پلاریزاسیون ، i دانسیته جریان و β و i_o مقادیر ثابت می باشند.

$$\eta = \beta \log \frac{i}{i_o}$$

β و i_o در این معادله برای هر واکنش الکترودی مقادیر مشخصی می باشند.

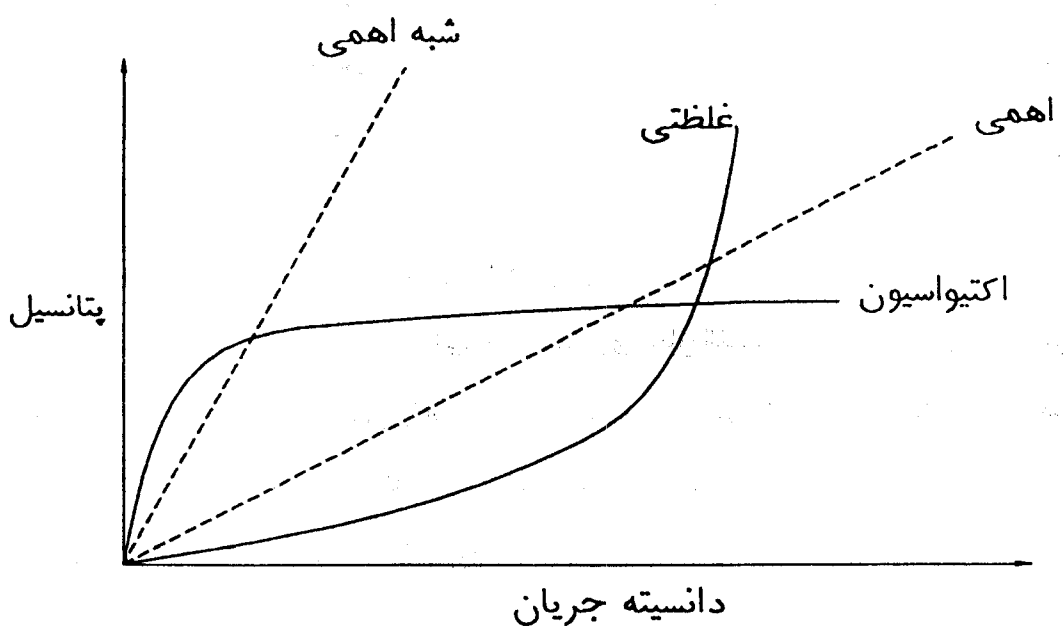
پلاریزاسیون اکتیواسیون با خواص فیزیکی نیم پیل تغییر می کند. زبری سطح الکترود نیز بر دانسیته جریان واقعی تأثیر می گذارد. معمولا[۳] پلاریزاسیون اکتیواسیون با افزایش دما به میزان چند میلی ولت بر درجه سانتی گرادکاهش می یابد. اضافه کردن عوامل شیمیایی دپلاریزه کننده نیز در تغییر مقدار پلاریزاسیون اکتیواسیون مؤثر خواهد بود. مثلا[۳] اگر پلاریزاسیون ناشی از هیدروژن باشد، در اثر ورود اکسیژن که عاملی دپلاریزه کننده است، پلاریزاسیون کاهش می یابد.

پلاریزاسیون غلظتی در جایی اتفاق می افتد که محصولات ناشی از واکنش آندی و کاتدی، محیط الکترولیت مجاور فلز را تغییر می دهند. جریان سریع الکترولیت یا حرکت الکترودها و همچنین وجود محلول نمکی غلیظ، پلاریزاسیون مزبور را در حداقل مقدار نگه می دارد. این نوع پلاریزاسیون را می توان از طریق پا بر جا بودن آن حتی مدتی بعد از قطع جریان پیل تشخیص داد.

پلاریزاسیون اهمی و شبه اهمی در فصل مشترک الکترود و الکترولیت بوجود آمده و تماما[۳] مقاومتی می باشد. این جزء اهمی مربوط به تغییر مقاومت مخصوص در فصل مشترک بوده که یا به علت از دست رفتن یونهای هادی یا خشک شدن سطحی توسط پدیده الکترو اسمزی و یا به علت تغییر دمای ناشی از کاهش سطح انرژی الکترود میباشد.

پلاریزاسیون شبه اهمی ناشی از لایه های اکسیدی و غیره می باشد که روی الکترود به وجود می آیند. این فیلمها که فورا[۳] تشکیل نمی شوند و بتدرج و با مرور زمان تشکیل می شوند، نقش به سزایی در مقاومت خوردگی و حفاظت کاتدی دارند.

در شکل ۶ منحنی پلاریزاسیونهای اکتیواسیون، غلظتی و اهمی برحسب جریان رسم شده است.



شکل (۶) : پتانسیل در مقابل دانسیته جریان برای انواع پولاریزاسیون

تمام پلاریزاسیونهایی که در بالا به آنها پرداخته شد، در یک پیل ساده وجود دارند و در مدار معادل به صورت مقاومتهای R_aو R_c نشان داده می شوند. شاید بتوان به طور دقیقتر آنها را در ولتاژهای پیل یعنی E_a و E_c ملحوظ نمود. در این صورت این عوامل تابع درجه حرارت و زمان خواهند شد. با نگرش مجدد به اشکال ۵الف ، ۵ب و ۵ج که عوامل فوق را شامل می شوند، می توان اثر پیل را روی خوردگی مورد بررسی قرار داد. اثر عمده تشکیل لایه های سطحی کاهش شدید سرعت خوردگی برحسب زمان است. فیلم های آندی و کاتدی هر دو سرعت خوردگی را کاهش می دهند.

برای کاهش سرعت خوردگی یا کاهش جریان در پیل می توان از دو روش که هر دو مبتنی بر افزایش پلاریزاسیون می باشند، استفاده کرد. روش اول استفاده از ممانعت کننده هاست که موجب پلاریزه شدن یک یا دو الکترود میشود و دیگری خارج نمودن عوامل دپلاریزه کننده از الکترولیت می باشد.

روشهای جلوگیری از خوردگی که تا کنون بررسی شده اند، مبتنی بر کاهش جریان پیل با افزایش مقاومت الکتریکی یا کاهش نیرو محرکه پیل می باشد. حال اگر در این راستا دو واقعیت را بپذیریم که اولاً فرآیند خوردگی قابل تشبیه به یک مدار الکتریکی معادل بوده و ثانیاً خوردگی فقط در آند اتفاق می افتد. سپس می توان نتیجه گیری کرد که با اعمال یک جریان خارجی امکان جلوگیری از خوردگی وجود دارد.

۲-۷- پیل ساده در حفاظت کاتدی

در شکل (۷) مدار الکتریکی معادل یک پیل ساده با $R_m=0$ به اضافه یک مدار الکتریکی خارجی نشان داده شده است. این مدار خارجی شامل یک منبع جریان مستقیم با پتانسیل E_x و مقاومت R_x می باشد.حال اگر جریان آندی I_a و جریان کاتدی I_c و جریان در مدار خارجی I_x باشد با استفاده از قانون **کیرشوف** خواهیم داشت :

$$i_x + i_a = i_c \qquad (۱)$$

$$E_a = R_a i_a + E_c + R_c i_c \qquad (۲)$$

با جایگذاری داریم :

$$E_a = R_a i_a + E_c + R_c (i_x + i_a) \qquad (۳)$$

برای جلوگیری از خوردگی باید در واقع از انجام واکنش آندی جلوگیری شود یعنی i_a باید یا صفر و یا منفی.باشد.

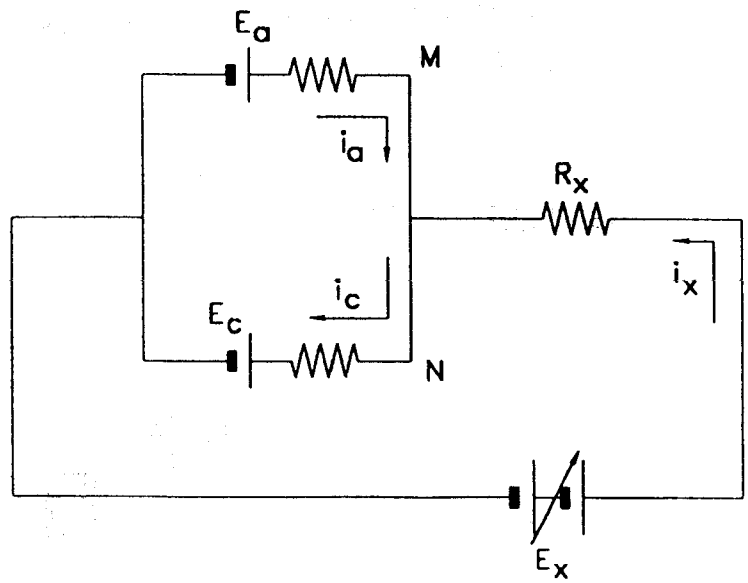
اگر $i_a = 0$:

$$E_a = E_c + R_c i_x \qquad (۴)$$

مفهوم دیگر معادله فوق می تواند این باشد که پتانسیل نقطه M برابر با پتانسیل آند است.

پس این امکان در یک پیل ساده وجود دارد که با اعمال یک جریان خارجی از خوردگی آند ممانعت بعمل آورد در این حالت کاتد پیل همچنان نقش کاتد را ایفاء می کند گر چه سرعت انجام واکنشها در آن افزایش می یابد. جریان اعمالی ممکن است بیشتر از مقدار لازم برای کاهش i_a به صفر باشد. گفته می شود که با این کار جریان آندی عکس شده و در حقیقت ناحیه آندی نیز مشابه کاتد عمل کرده و خوردگی متوقف خواهد شد.

پس چنین نتیجه گرفته میشود که با اعمال یک جریان خارجی در یک پیل ساده می توان از خوردگی جلوگیری بعمل آورد. این روش کنترل خوردگی به روش حفاظت کاتدی موسوم می باشد.



شکل (۷) : مدار الکتریکی پیل ساده بانضمام یک مدار خارجی

۲-۸- پیل پلاریزه شده ساده در حفاظت کاتدی

اگر شرایط در پیل ساده به گونه ای باشد که در آن پلاریزاسیون رخ دهد، در آن صورت E_a و E_c نیز تابع دانسیته جریان در آند و کاتد خواهند بود. E_a که پتانسیل اند در حالت مدار باز است، برابر خواهد بود با $E_a=E_a-\varnothing_a\ (i_a/A_a)$ که در اینجا $\varnothing_a$ تابع پلاریزاسیون آند و A_a سطح آند است.مشابه با آن E_c نیز برابر خواهد بود با $E_c=E_c-\varnothing_c\ (I_c/A_c)$. از آنجا که جهت i_c مخالف i_a است، در اثر پلاریزاسیون اختلاف پتانسیل E_a- E_c کاهش می یابد. بنابر این رابطه (۳) به صورت زیر در خواهد آمد.

$$E_a - \varnothing_a (i_a /A_a) = R_a i_a + E_c - \varnothing_c (i_E /A_c) + R_c (i_x+ i_c) \qquad (۵)$$

و رابطه (۳) در زمانیکه خوردگی وجود ندارد، یعنی $i_a = 0$ و $i_c = i_x$ بصورت زیر خواهد شد :

$$E_a = E_c - \varnothing_c (i_x/ A_c) + R_c i_x \qquad (۶)$$

یعنی پتانسیل نقطه M برابر با پتانسیل مدار باز E_a شده و مجموع پلاریزاسیون کاتدی و ولتاژ بوجود آمده در مقاومت کاتد برابر با مقدار فوق الذکر میگردد. لازم به ذکر است که این مستقل از شکل منحنی پلاریزاسیون بوده و برای هر حالتی مطرح است. بنابراین حفاظت کاتدی برای هر پیل ساده با پولاریزاسیون مؤثر خواهد بود.

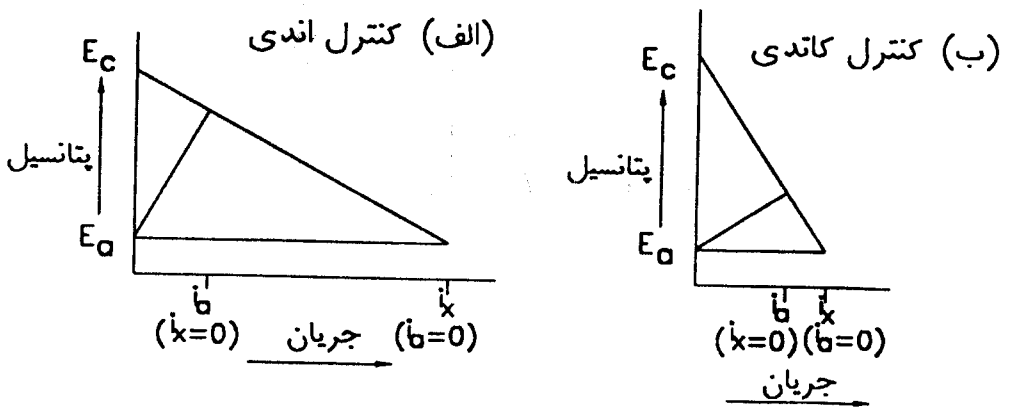
در هر دو حالت فوق با در دست داشتن عوامل ثابت معادلات (۴) و (۶) می توان شدت جریان لازم جهت حفاظت را بدست آورد. یعنی می توان نوشت :

$$E_a - E_c = R_c i_x - \varnothing_c (i_x /A_c) \qquad (۷)$$

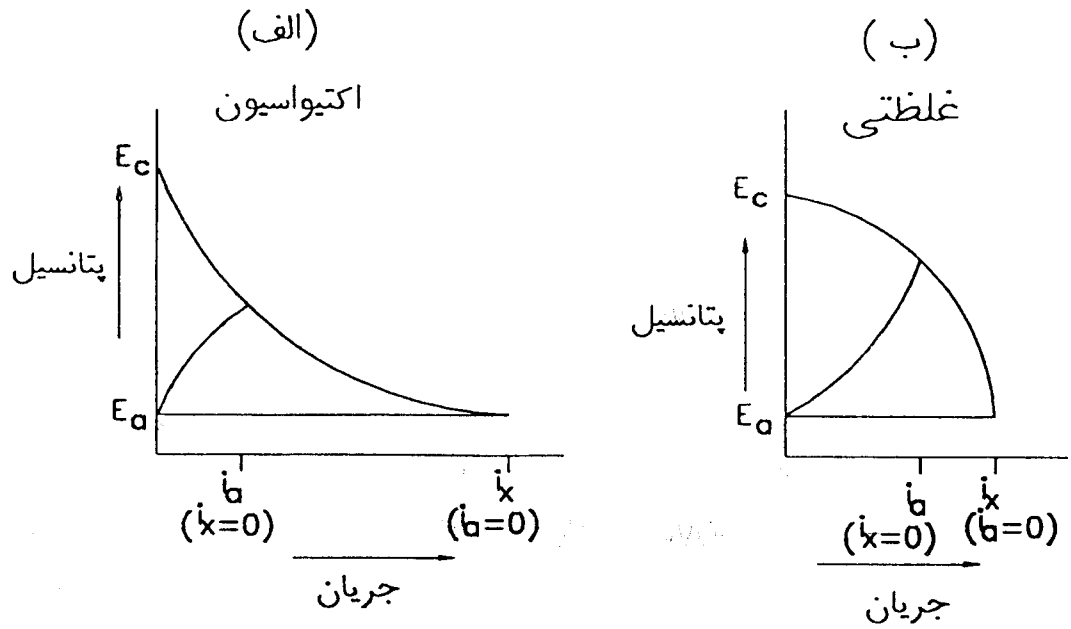
$$E_a - E_c = R_c i_x$$

معادلات به شکل فوق حاکی از این هستند که جریان باید به اندازه کافی باشد تا بتواند افت ولتاژ ناشی از پلاریزاسیون در کاتد و مقاومت کاتولیت را با ولتاژ مدار باز پیل برابر کند. سپس وقتی مقاومت کاتد R_c زیاد باشد، یا وقتی کاتد پلاریزه گردد، مقدار i_x (جریان لازم جهت حفاظت)، کاهش خواهد یافت. این موضوع را می توان با بسط شکلهای ۵ج و ۵ب به طوریکه i_x را نیز شامل گردد. به صورت اشکال (۸) و (۹) نشان داد.

پس اگر کاتد در دانسیته جریانهای کم پلاریزه گردد و یا مقاومت اهمی آن بالا باشد، جهت حفاظت جریان اعمال کمی نیاز است. اما اگر کاتد پلاریزه نگردد یا اینکه مقاومت کاتولیت کم باشد. برای حفاظت جریان خارجی زیادی باید اعمال نمود.



شکل (۸) : پتانسیل های آند و کاتد نسبت به جریان پیل تحت (الف) کنترل آندی - (ب) کنترل کاتدی

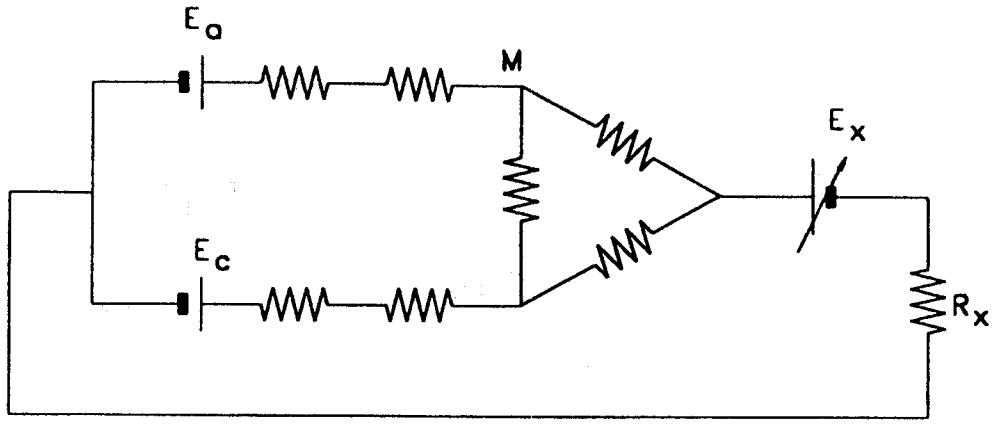


شکل (۹) : منحنی های پولاریزاسیون آندی و کاتدی (الف) پولاریزاسیون اکتیواسیون - (ب) پولاریزاسیون غلظتی

۲-۹- حفاظت کاتدی در عمل

آنچه تا به حال بیان گردید، صرفاً برای یک پیل ساده بود. اما آنچه در عمل مشاهده می گردد، یک پیل خوردگی است که توسط یک الکترولیت با مقاومت ویژه بالا محصور گشته و مدار الکتریک معادل آن مانند شکل (۱۰) میباشد. بنظر میرسد برای آنکه حفاظت حاصل گردد باید پتانسیل نقطه M برابر با پتانسیل مدار باز آند یا بالاتر از آن شود بطوریکه i_a برابر یا صفر شده یا جهت عبور جریان عکس شود.

بر سطح یک صفحه فلزی مدفون تعداد بسیار زیادی آند و کاتد وجود دارد که از طریق فلز به همدیگر متصل هستند. حال اگر در هر آند، نقطه متناظر با M دارای پتانسیلی حداقل برابر با پتانسیل مدار باز آند داشته باشد. حفاظت کاتدی می تواند صورت گیرد. بررسی ها نشان داده است که چنین شرایطی به راحتی حاصل می گردند و حفاظت کاتدی نیز روش مناسبی جهت جلوگیری از خوردگی سازه در تماس با الکترولیت می باشد. اگر در محیطی رطوبت کمی وجود داشته باشد مثلاً در حالتیکه قطرات آب در تماس با سطح فلز باشند روشهایی مانند گالوانیزه کردن و پوشش فلز پایه روش مناسبی جهت حفاظت خواهند بود حفاظت کاتدی فقط در محیطهایی چون آب دریا، در مخازن حاوی الکترولیت، در خاک اطراف لوله های زیرزمینی و یا خاک رس در تماس با کف مخازن که در آنها فلز در تماس مستقیم با مقدار زیادی الکترولیت قرار گرفته است ضرورت می یابد.



شکل (۱۰) : مدار معادل الکتریکی از حفاظت کاتدی عملی

۲-۱۰- انواع خوردگی در سازه های مدفون یا غوطه ور

خوردگی توسط یک فرآیند الکتروشیمیایی رخ می دهد. بدین منظور، یک آند (الکترود منفی) ، یک کاتد (الکترود مثبت) و یک الکترولیت (محیط خورنده، مثل آبها و خاکهای معین) و یک رابط فلزی که آند و کاتد را به هم وصل کند، لازم می باشند. همواره انحلال فلز، در آند رخ می دهد، جائیکه جریان بداخل الکترولیت وارد شده و به سمت کاتد جریان می یابد.

سه نوع اصلی خوردگی که عمدتا" در لوله های زیر زمینی فولادی رخ می دهند عبارتند از :

۱) خوردگی عمومی (یکنواخت)

۲) خوردگی گالوانیک (خوردگی در اثر اتصال دو فلز غیر متشابه)

۳) خوردگی پیل غلظتی

همچنین گزارش شده است که خوردگی تنشی نیز، در خطوط لوله فولادی زیر زمینی تحت شرایط خاص رخ داده است .

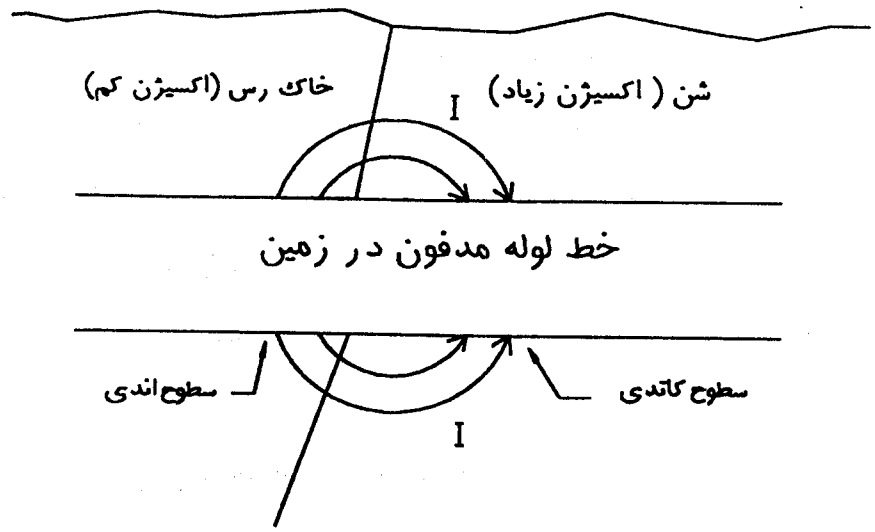
به همراه این اشکال طبیعی خوردگی ، انواع دیگر خوردگی نظیر خوردگی ناشی ازجریان سرگردان (که گاهی اوقات به آن خوردگی الکترولیتی اطلاق می شود) نیز می تواند بر یک سازه فولادی زیر زمینی رخ دهد. این نوع خوردگی، در ارتباط با عبور جریانهای مستقیم غیر قابل کنترل در زمین بوجود می آیند. عبور این جریانها در سازه فولادی زیر

زمینی، در بعضی نقاط معین ، سبب هیچ اثر مضری نمی شود. متشابها" مادامیکه جریانها در طـول سـازه، جریـان دارد هیچ آسیبی ایجاد نمی کنند. اما در نهایت این جریانها باید سازه راترک کرده و از طریق زمین و به سوی منبـع تولیـد جریان اصلی جریان یابند. در این صورت در محلی که جریان ها خط لوله را ترک می کنند، خوردگی شدید بوجود مـی آید. تشابه فعالیت خوردگی ناشی از جریان سرگردان و خوردگی طبیعی در این است که خـوردگـی، همیشـه در نقـاط آندی روی می دهد.تفاوت اساسی این دو در این است که خوردگی جریان سرگردان، از یک جریان خارجی ناشـی مـی شود در صورتیکه در خوردگی طبیعی جریان توسط یک پیل خوردگی حاصل می گردد. یک تفاوت دیگر هم در قطبـی شدن (پلاریته) وجود دارد، آند در مورد خوردگی ناشی از جریان های سرگردان الکترود مثبت است. خوردگـی عمومـی عبارت از انحلال آنـدی یکنواخـت فلـز در تمـام سـطوح قطعـه فلـزی مـی باشـد. در ایـن حـالت کاتدهـا و آندهـای میکروسکوپی بطور مداوم در حال تغییر رفتار الکتروشیمیایی از آند به کـاتد و از کـاتد بـه آنـد هسـتند. آنـها در واقـع پیلهای خوردگی را برای حمله یکنواخت فراهم می آورند. اگر خطوط لوله فولادی زیرزمینی در خاکـهای خورنـده و بـا مقاومت ویژه پایین (کمتر از ۱۰۰۰ اهم - سانتیمتر) قرار گرفته باشند، می توان انتظار خوردگی یکنواخـت بـا سـرعت زیاد را داشت .

خوردگی گالوانیک، عموما" در صورتی رخ خواهد داد که دو فلز و یا آلیاژ غیرمتشابه از نظر الکتروشـیمیایی (جـدول ۲) بصورت فلزی متصل شده و در محیط خورنده قرار گیرند. در این حالت فلز فعالتر(آند) دچار حمله شدید شده و فلز یـا آلیاژ نجیب تر، توسط جریان گالوانیک، بصورت کاتدی محافظت میشوند. برنج در خاکهای نوعا" خنثی، نسبت به فولاد، حالت کاتدی دارد و لذا در صورتی که آنها بیکدیگر متصل شده و در یک خاک خورنده قـرارگـیرند، انتظـار خـوردگـی شدید فولاد وجود دارد. متشابها" در مورد خطوط لوله فولادی زیرزمینی که به میله های بزرگ مسی(میله های اتصـال زمین) متصل شده و در خاک با مقاومت ویژه پایین قرار داده شوند. خوردگی شدید بر خطوط لوله فـولادی رخ خواهـد داد.

خوردگی الکتروشیمیایی یک فلز یا آلیاژ ، که در اثر وجود غیر یکنواختی در یک محیط بوجود می آید بـه خـوردگـی پیل غلظتی موسوم می باشد. حداقل پنج نوع پیل غلظتی وجود دارد. از میان این پنج نوع، پیـل غلظتـی اکسـیژن یـا اختلاف دمشی، معمولا" بیشتر باعث بوجود آمدن خوردگی در سازه های فولادی زیر زمینی ، می گردد.نواحی سطحی از خط لوله که در تماس با الکترولیت حاوی اکسیژن بالا قرار دارند، عموما" نسبت به نواحی در تمـاس بـا الکـترولیت حاوی اکسیژن کمتر، کاتدی هستند. این امر از آن جهت قابل درک است که در محیطهای خنثی یا قلیایی، نواحی بـا دمش اکسیژن بالا، ترجیحا" مکانهای کاتدی بوده و در این نواحی واکنش احیاء اکسیژن رخ می دهد.

در سراسر خطوط لوله زیر زمینی، خوردگی پیل غلظتی، می تواند حتی بر فواصل نسبتاً بلند، رخ دهد. این امر بوسیله آنچه که اغلب با نام جریانهای خوردگی خط طولانی[1] عنوان می شوند، ایجاد می گردد. مثلاً قسمتی از خط لوله فولادی واقع در گل و ماسه، عموماً نسبت به قسمتهایی از خط لوله که در تماس با خاک رس است، کاتدی خواهدبود (شکل۱۱).همچنین سطوحی از یک خط لوله که در زیر یک رودخانه مدفون است نسبت به سطوحی از همان خط لوله که در خاک هوادهی شده مجاور رودخانه مدفون است آندی خواهد بود.

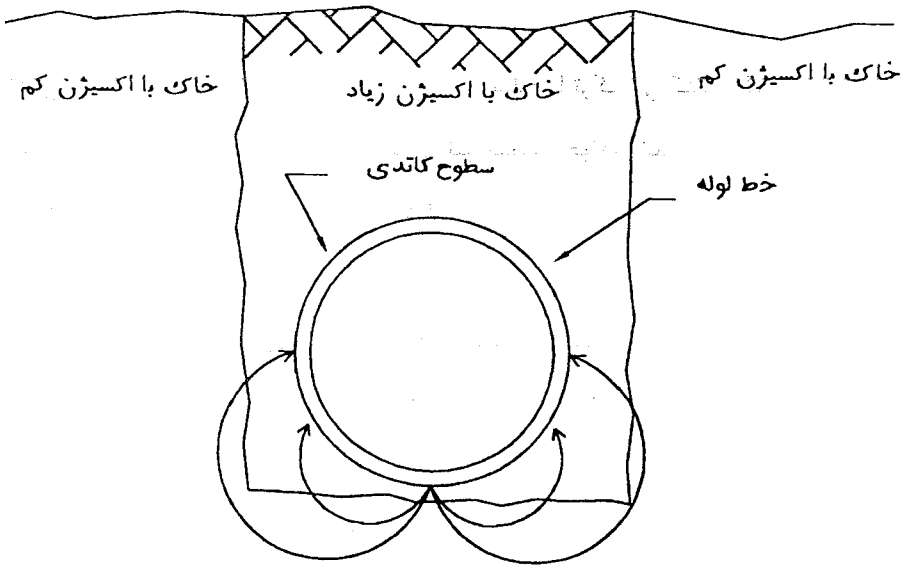


شکل (۱۱) : خوردگی پیل غلظتی اکسیژن در یک خط لوله فولادی زیر زمینی

غیر یکنواختی موضعی خاک نیز می تواند در خوردگی پیل غلظتی خطوط لوله زیر زمینی، مؤثر باشد. مثلاً فولاد در تماس با خاک حاوی اکسیژن کم (خاک دست نخورده) عموماً نسبت به فولاد در تماس با خاک هوادهی شده، آندی خواهد بود (شکل ۱۲). حملات خوردگی به قسمت زیرین خطوط لوله، بواسطه بزرگی نسبت سطح کاتد به آند تشدید میشود. متشابهاً، قسمتی از فولاد که در تماس با خاک رس قرار دارد، نسبت به قسمت دیگری از فولاد که در تماس با شن قرار دارد آندی خواهد بود. به اعتقاد بسیاری از مهندسین خوردگی، خوردگی موضعی حاصل از تشکیل پیل غلظتی یک عامل اصلی در مورد ایجاد سوراخهای خوردگی در خطوط لوله زیر زمینی می باشد. جدول (۲) پتانسیل تعدادی از فلزات و آلیاژها را در خاک خنثی نسبت به الکترود مرجع مس - سولفات مس نشان میدهد.

---

۱) Long line Corrosion



شکل (۱۲): خوردگی پیل غلظتی اکسیژن موضعی در یک خط لوله فولادی زیر زمینی

جدول (۲) : پتانسیل تعدادی از فلزات و آلیاژها در خاک

مواد	پتانسیل، ولت
منیزیم	-۱/۷۵
۹۱Mg-۶Al-۳Zn-۰/۱۵Mn	-۱/۵۵
روی	-۱/۱
آلیاژ ۹۵Al – ۵Zn	-۱/۰۵
آلومینیوم	-۰/۸۰
فولاد (تمیز و بدون زنگ)	-۰/۸۰ تا -۰/۵
فولاد (زنگ زده)	-۰/۵ تا -۰/۲
چدن خاکستری	-۰/۵
سرب	-۰/۵
فولاد دربتن	-۰/۲
مس، برنج، برنز	-۰/۲
چدن با سیلسیم بالا	-۰/۲
فولاد با لایه اکسید مغناطیسی	-۰/۲
گرافیت (کربن)	+۰/۳

۳- شناخت روشهای مرسوم حفاظت کاتدی

۳-۱- مقدمه

خوردگی زمانی کاهش می یابد که جریان آندی (خوردگی) ، که سازه را ترک می کند، بطور محسوسی کاسته شود. بطور تئوری در صورت به صفر رسیدن این جریان، خوردگی نیز متوقف خواهد شد. آزمایش پیل خوردگی و کاربرد قانون اهم، نشان می دهند که دو روش برای نائل شدن به این هدف وجود داشته که عبارتند از:

۱- بی نهایت بزرگ ساختن مقاومت کل مدار

۲- کم نمودن اختلاف پتانسیل بین مکانهای آندی و کاتدی به مقادیر بسیار کوچک.

حفاظت کاتدی در واقع یک روش کنترل خوردگی بوده که در آن انحلال آندی از طریق کاهش اختلاف پتانسیل بین مکانهای آندی و کاتدی، به حداقل می رسد.

اساساً حفاظت کاتدی یک روش الکتریکی برای کاهش خوردگی بر روی سازه هایی که در معرض الکترولیتهایی چون خاکها و آبها قرار دارند می باشد. در این روش، عمل کنترل خوردگی بواسطه جاری ساختن مقدار مناسبی جریان مستقیم از آندهای کمکی، به میان الکترولیت و در نهایت بداخل سازه تحت حفاظت انجام می پذیرد. به طور تئوری وقتیکه پتانسیل های مدار باز مکانهای کاتدی، به پتانسیلهای مدار باز نقاط آندی پلاریزه شوند، خوردگی سازه کاملاً متوقف می شود. در واقع در این روش کل سازه نسبت به آندهای کمکی کاتدی می شود.

حفاظت کاتدی یک روش نوین کنترل خوردگی نیست. احتمالاً اولین نمایش عملی از حفاظت کاتدی، در سال ۱۸۲۴ اتفاق افتاد. در آن زمان خوردگی صفحات مسی بدنه کشتیها در آب دریا، از طریق وصل کردن آنها به بلوکهای چدنی بطور مؤثری کاهش یافت. در این روش از یک جریان خوردگی گالوانیک، برای حفاظت مس استفاده شد. قابل ذکر است که استفاده از روش حفاظت کاتدی به علت رسوبات گیاهان دریایی بر بدنه کشتیهای حفاظت شده، ادامه نیافت زیرا با متوقف شدن خوردگی مس دیگر یونهای مس که مسموم کننده ارگانیزمهای دریایی بودند وارد آب دریا نمی شدند. بعدها در سال ۱۹۱۶ اولین بار از یک جریان مستقیم اعمالی برای کاهش خوردگی استفاده شد. در این روش با استفاده از جریان مستقیم حاصل از یک منبع تولید برق با خروجی متغیر، محفظه فولادی آب کندانسورهای کشتیهای بزرگ با موفقیت حفاظت گردید. این امر بوسیله اتصال محفظه آب و قطعات چدنی بترتیب به ترمینالهای منفی و مثبت منبع تولید برق، انجام گردید.

از این بحث مختصر می توان نتیجه گرفت که دو نوع روش حفاظت کاتدی وجود دارد. یکی استفاده از جریانی است که توسط اتصال فلزی بین فلزات یا آلیاژهایی تولیدمی شود که از نظر الکتروشیمی نا متشابه بوده و در معرض الکترولیت قرار داده شده اند. این روش عموماً به سیستم حفاظت کاتدی از نوع آندهای فدا شونده اطلاق می شود. روش دیگر استفاده از منبع تولید جریان برق مستقیم و آندهای کمکی است

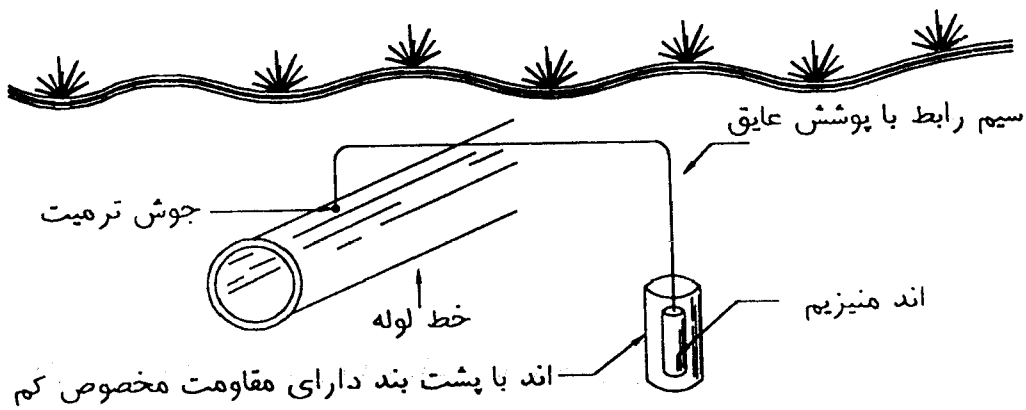
که عموماً به سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان اطلاق می گردد. چون منبع تولید برق همراه با یک دستگاه یکسو کننده می باشد لذا گاهی اوقات به این سیستم، روش حفاظت کاتدی از نوع یکسو کننده نیز اطلاق می شود.

هر دو نوع سیستم حفاظت کاتدی برای حفاظت نمودن خطوط لوله فولادی زیر زمینی استفاده می شوند. قبل از اینکه یک سیستم حفاظت کاتدی انتخاب، طراحی و نصب گردد مزایا و محدودیتهای هر یک باید در نظر گرفته شود.

۳-۲- سیستم حفاظت کاتدی از نوع آندهای فدا شونده

این سیستمها، جریان کاتدی مورد نیاز برای حفاظت را بوسیله خوردگی گالوانیک فراهم می آورند. جریان بوسیله متصل نمودن سازه تحت حفاظت به فلز یا آلیاژی که از نظر الکتروشیمیایی فعالتر از فلز سازه می باشد تولید میشود (اتصال به صورت فلزی بوده و سازه و آند هر دو باید در تماس با الکترولیت باشند). جریان از آند به الکترولیت و سپس بداخل سازه تحت حفاظت وارد می شود.

اجزاء اصلی تجهیزات حفاظت کاتدی از نوع آند فدا شونده مطابق با شکل (۱۳)، عبارت از سازه تحت حفاظت، آند (با پشت بندی مخصوص یا بدون آن) و یک سیم رابط با پوشش عایق می باشد.



شکل (۱۳): سیستم حفاظت کاتدی از نوع آندهای فدا شونده

میزان جریان کاتدی تولیدی از آند فدا شونده، به اختلاف پتانسیل بین آند و سازه بستگی دارد. بطور تئوری هر فلز یا آلیاژی که از نظر الکتروشیمیایی از دیگری فعالتر باشد، قادر به محافظت فلز نجیب تر، به صورت کاتدی خواهد بود. بر اساس اطلاعات جدول فلزات، فلزاتی چون منیزیم، روی، آلومینیم، و آلیاژهایشان می توانند برای حفاظت کاتدی فولاد در یک خاک خنثی استفاده شوند. اما در عمل تنها روی با خلوص بالا (Zn ٪۹۹/۹۹) و آلیاژهای منیزیم برای حفاظت فولاد در خاکها و آبهای شیرین استفاده میشوند. آلیاژهای آلومینیوم برای این محیط ها مناسب نمی باشند، چون لایه های سطحی که بر روی آند تشکیل می شوند باعث کاهش خروجی جریان می گردند. آلیاژهای آلومینیم برای حفاظت کاتدی فولاد در آب دریا و دیگر آبهای شور استفاده می شوند.

آندهای فدا شونده در حین تولید جریان حفاظتی، خورده میشوند. نرخ مصرف بستگی به میزان جریان تولید شده و ماده آند دارد. بر طبق قانون فاراده، نرخ مصرف تئوری روی و منیزیم بترتیب برابر ۲۳/۱۵ و ۸/۷ پوند بر آمپر سال میباشد. متأسفانه در خلال تولید جریان حفاظتی، مقداری از آند بواسطه خود خوردگی از بین میرود. با توجه به این امر راندمان روی و منیزیم، بترتیب حدود ۹۰درصد و ۵۰ درصد میباشد. وزن عملی فلز که بر حسب آمپر سال جریان حفاظتی، مصرف میگردد، تقریباً ۲۶ پوند برای روی و ۱۷/۴ پوند برای منیزیم میباشد. با فرض اینکه آندهای روی و منیزیم، فاکتور مصرفی برابر با ۸۵ درصد داشته باشند (یعنی در صورت مصرف ۸۵٪ از آند، تعویض آن ضروری باشد)، عمر مفید یک آند فدا شونده را می توان با استفاده از فرمولهای زیر بدست آورد :

$$L_{Zn} = \frac{۳۲/۴\ W}{I}$$

و

$$L_{Mg} = \frac{۴۹/۳\ W}{I}$$

در فرمولهای فوق L عمر مفید آند بر حسب سال، W وزن آند بر حسب پوند و I خروجی جریان آند بر حسب میلی آمپر می باشد.

اگر چه روی، راندمان خروجی جریان بالاتری دارد اما بیشتر آندهای فدا شونده نصب شده برای حفاظت خطوط لوله فولادی زیر زمینی، از آلیاژهای منیزیم ساخته می شوند. دلیل اصلی آنست که آلیاژهای منیزیم دارای پتانسیل محرکهٔ بزرگتری می باشند. برای یک سازه فولادی پلاریزه شده تا پتانسیل ۰/۸۵- ولت (نسبت به الکترود اشباع مس - سولفات مس)، پتانسیل محرکه برای روی بسیار خالص حدود ۰/۲۵ ولت است. این مقدار، خیلی کمتر از

دامنه پتانسیل محرکه آلیاژهای منیزیم که بین ۰/۷ تا ۰/۹ ولت است مـی باشـد. آندهـای روی عمومـاً منحصـر بـه کاربردهایی می شوند که در آنها مقاومت ویژه متوسط الکترولیت کمتر از حدود ۲۰۰۰ اهم -سانتی متر باشد.

دو آلیاژ منیزیم که بعنوان آندهای فدا شوند استفاده میشوند عبارت از آلیاژ استاندارد (Mg - ۶Al - ۳Zn - ۰/۱۵Mn) و آلیاژ با پتانسیل بالا (Mg - ۱Mn) می باشند. اختلاف اصلی بین ایندو مـاده، آنسـت کـه آلیـاژ اسـتاندارد پتانسـیل محرکه کمتری نسبت به آلیاژ با پتانسیل بالا دارد. برای یک سـازه فـولادی پلاریـزه شـده تـا پتانسـیل ۰/۸۵- ولـت (نسبت به الکترود اشباع مس- سولفات مس) ، پتانسیل محرکه آلیاژ منـیزیمی اسـتاندارد ۰/۷ ولـت و بـرای آلیـاژ بـا پتانسیل بالا، ۰/۹ ولت می باشد. اگر چه این پتانسیلهای محرکه، بالاتر از پتانسـیل محرکـه آندهـای روی بـا خلـوص بالاست ولی هنوز آندهای آلیاژی منیزیم کاربردهای محدودی دارند. این آندهـا، مجموعـاً منحصـر بـه محیـط هـایی می شوند که مقاومت ویژه متوسطی کمتر از حدود ۱۰۰۰ اهم – سانتی متر دارند. با این وجود آندهای آلیاژی منیزیم می توانند در محیط های با مقاومت ویژه بالاتر استفاده شوند مشروط بر اینکـه سـازه بـه خوبـی پوشـش داده شـده و جریان کوچکی نیز لازم باشد. برای کاربردهای زیر زمینی، آندهای روی با خلوص بالا و منیزیم آلیاژی، هردو معمـولاً بهمراه با یک پشت بند [1] مخصوص استفاده میشوند. پشت بند می تواند محیطی یکنواخت در اطراف آند فراهم آورده، مقاومت آند به الکترولیت را کاهش داده، رطوبت را حفظ نموده و از روئین شدن آند جلوگـیری نمـاید. پشـت بندهـا، عموماً شامل یک مخلوط حاوی گچ (سولفات کلسیم آبدار)، بنتونیت و گاهی اوقات سولفات سدیم مـی باشـند. مثـلاً پشت بندی که عموماً برای آندهای آلیاژی منیزیم استفاده می شود، حـاوی۷۵ درصـد گـچ، ۲۰ درصـد بنتونیـت و ۵ درصد سولفات سدیم میباشد. یکی از پشت بندهای مورد استفاده برای آندهای روی با خلوص بالا محتـوی ۵۰ درصـد گچ و ۵۰ درصد بنتونیت می باشد.

انواع مختلفی از اشکال آند فدا شونده وجود دارند. آندهای روی با خلوص بالا، معمولاً به شکل ورقـه، شـمش، میلـه و نوار ساخته می شوند. آندهای منیزیمی معمولاً توسط ریخته گری و اکستروژن شکل می گیرند و این آندهـا بصـورت نوار نیز موجود می باشند.

سیستم حفاظت کاتدی از نوع آندهای فدا شونده، دارای مزایا و محدودیتهایی می باشد که در جدول (۳) ارائه شده است. اساساً این سیستم عموماً در مواردی که به مقادیر جریان کم نیاز بوده و یا در محلهایی که مقاومت ویژه الکـترولیت، بـه قدر کافی پایین باشد استفاده می شود. در این صورت جریان مورد نیاز با استفاده از تعداد محدودی از آنـد حـاصل مـی گردد. آندهای فدا شونده، همچنین برای تکمیل نمودن سیستم های حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان و برای تصحیـح و کنترل شرایط ویژه خوردگی ناشی از جریان سرگردان استفاده می شوند.

---

۱) Backfill

جدول (۳) : مزایا و معایب سیستم حفاظت کاتدی از نوع آندهای فدا شونده

مزایا :

۱- به منبع جریان برق خارجی نیاز ندارد.
۲- احتیاج به تنظیم کردن ندارد
۳- نصب آن آسان و ارزان می باشد.
۴- تولید جریانهای سرگردان نمی کند.
۵- آندهای جدید به آسانی قابل نصب در سیستم می باشند.
۶- نگهداری آن آسان است.
۷- توزیع جریان آن بر روی سازه یکنواخت است.

معایب :

۱- دارای پتانسیل محرکه کم می باشد.
۲- دارای خروجی جریان محدود و کم می باشد.
۳- سازه های با پوشش ضعیف نیاز به تعداد زیادی آند دارند.
۴- برای محیط های دارای مقاومت مخصوص بالا مناسب نمی باشند.

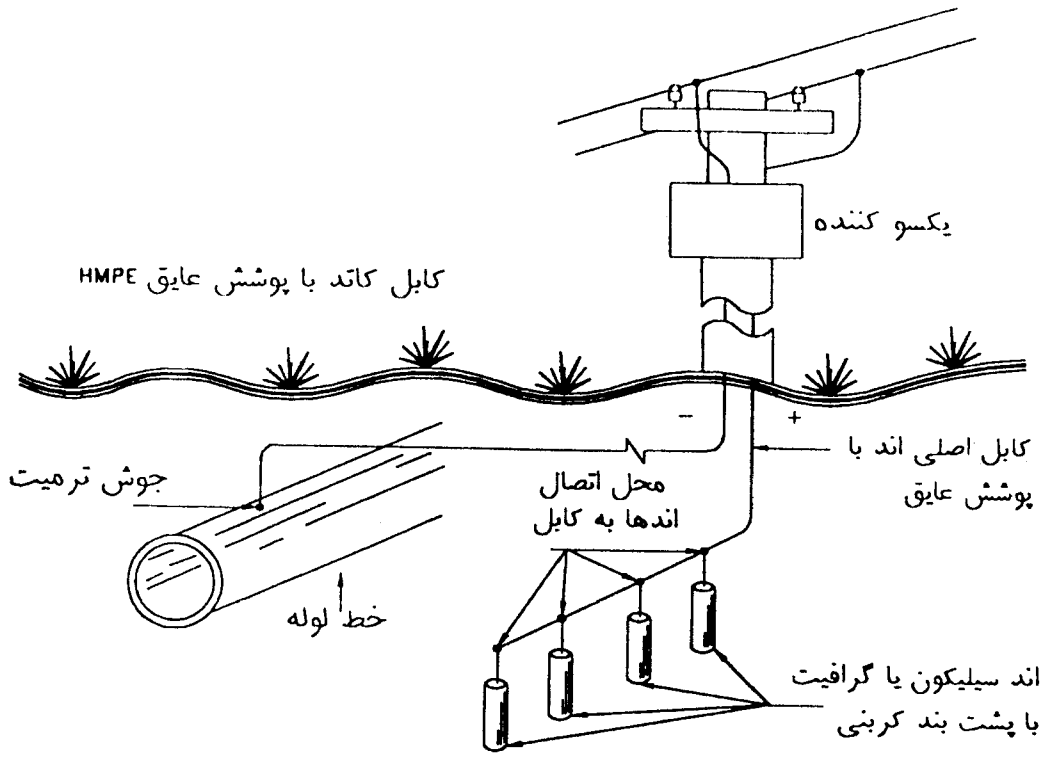
۳-۳- سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان [۱]

در این سیستم، جریان مورد نیاز برای حفاظت از یک منبع جریان برق خارجی تأمین می گردد. یک منبع تولید برق DC، جریان را مجبور به تخلیه از آندها به داخل الکترولیت و سپس به سازه تحت حفاظت می نماید. در این روش جریان مورد نیاز بواسطه خوردگی یک فلز یا آلیاژ فدا شونده تولید نمی گردد، و از آندها صرفاً بعنوان آندهای کمکی استفاده می شود گرچه می توان از مواد مصرف شونده نیز بعنوان آند استفاده نمود.

اجزاء اصلی سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان مطابق با شکل (۱۴) عبارت از سازه تحت حفاظت، یک منبع تولید برق DC، یک گروه از آندهای کمکی (بستر آند) با پشت بند کربنی یا بدون آن و کابلهای با پوشش عایق می باشد. قابل ذکر است که سازه تحت حفاظت به قطب منفی و بستر آند به قطب مثبت منبع تولید برق وصل می شوند.

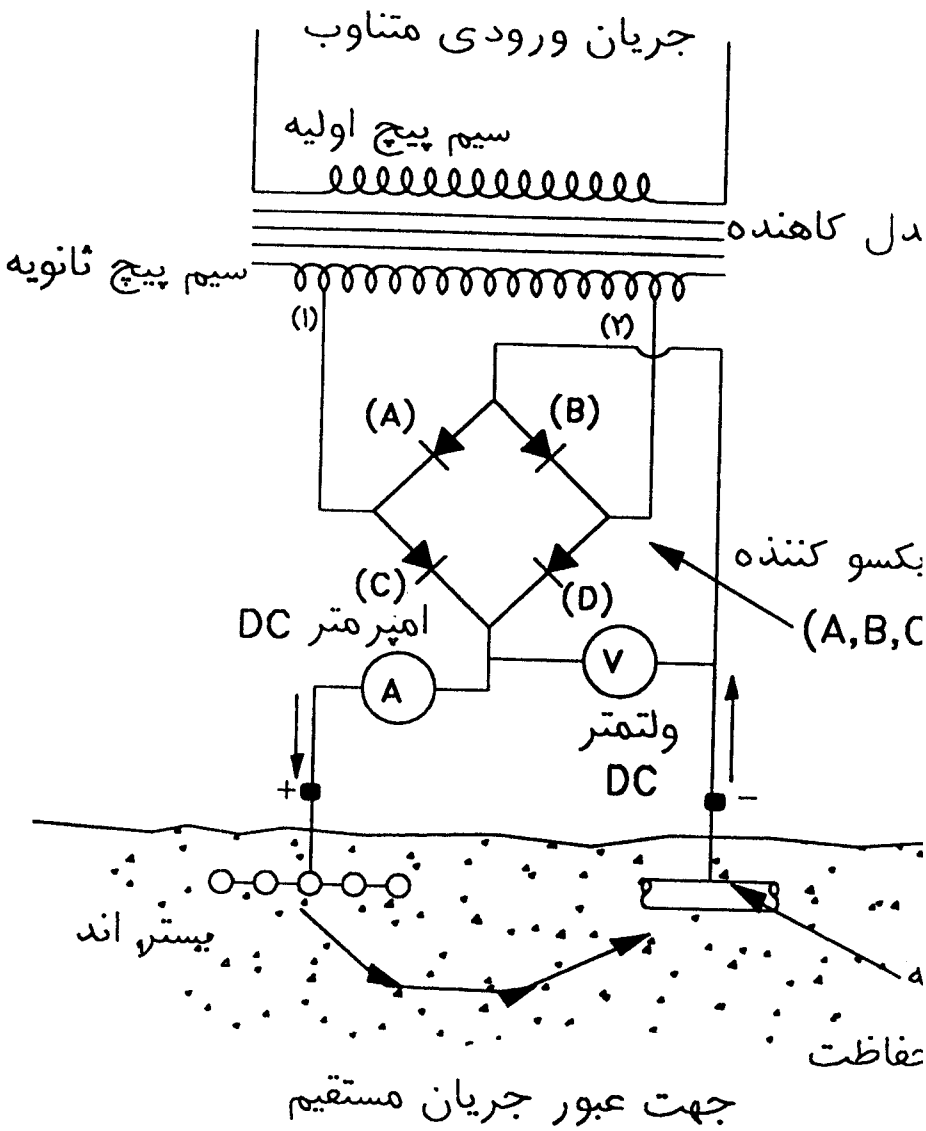
---

۱) Impressed Current



شکل (۱۴) : سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان

منبع تولید برق DC، معمولاً یک دستگاه یکسو کننده است. جریان مستقیم را همچنین میتوان با استفاده از ژنراتورهای نیرو محرکه، باطریها، ژنراتورهای بادی، ژنراتورهای حرارتی-برقی، پیلهای خورشیدی پیلهای سوختی نیز تولید نمود. اجزاء اصلی دستگاه یکسو کننده عبارت از کلید قطع مدار برای محافظت از اجزاء سیستم، یک ترانسفورمر کاهنده برای کاهش ولتاژ AC، کلیدهای تنظیم حساس و غیر حساس، عامل یکسو کننده برای تبدیل AC به DC و وسایلی برای اندازه گیری ولتاژ DC و خروجی جریان میباشد (شکل ۱۵). عامل یکسو کننده می تواند از جنس سیلیسیم یا سلنیم باشد. اگر چه نوع سیلیسیمی، به سرعت سلنیومی فرسوده نمی شود، اما در مقابل اضافه بارهای جریانی یا ولتاژی مقاوم نمی باشد. نوع سلنیومی، بشکل گسترده ای برای سیستم های حفاظت کاتدی استفاده می شود، احتمالاً به خاطر اینکه کمتر نسبت به اضافه بارهای جریانی یا ولتاژی حساس میباشد. اما در مواقعیکه به جریان حفاظت کاتدی بزرگ نیاز باشد، اغلب از نوع سیلیسیمی استفاده می شود که این به علت راندمان بالاتر آنها در تبدیل جریان AC به DC می باشد.



اء اصلی یک دستگاه یکسوکننده که در سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان بکار می رود.

۶۹/۱:	شناخت سیستم های حفاظت کاتدیک	صفحه ۳۴
وری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ :شهریور ۷۹

چدن با کرم و سیلیسیم بالا (Fe-14.5Si - 4.5 Cr) ، گرافیت و آهن یا فولاد به عنوان آندهای کمکی در سیستم های حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان برای سازه های فولادی زیر زمینی استفاده میشوند. نرخهای مصرف برای چدن با کرم و سیلیسیم بالا، گرافیت و آهن یا فولاد در این محیطها، بترتیب کمتر از ۲،۱ تا ۴/۳ و ۲۰ تا ۲۲ پوند بر آمپر سال هستند. استفاده از آهن و فولاد به عنوان آندهای کمکی بطور قابل ملاحظه ای در حال کاهش است و این به علت نرخهای مصرف بالای این آندها و همچنین تقاضاهای روزافزون برای داشتن بستر آندهایی با عمر طولانی می باشد. همچنین انتظار عمر طولانی از بسترهای آند گرافیتی نیازمند استفاده از پشت بندهای کربنی کاملاً فشرده در اطراف آنها است. اگر در بستر آندهای گرافیتی از پشت بندهای هادی الکتریکی استفاده نشود این بسترها خیلی سریع دچار شکستهای ناگهانی خواهند شد. بعلاوه آندهای گرافیتی دارای محدودیتهایی جهت اعمال چگالی جریان می باشند. اعمال چگالی جریان برای آند گرافیتی در خاک نباید از حدود ۱ آمپر بر فوت مربع و در آب شیرین، از ۰/۲۵ آمپر بر فوت مربع تجاوز نماید. در غیر اینصورت آند دچار شکست های ناگهانی خواهد شد. ضرورت استفاده از پشت بند و وجود محدودیتهای اعمال چگالی جریان برای بستر آند چدنی با کرم و سیلیسیم بالا، در مقایسه با گرافیت آنچنان بحرانی نمی باشد. معمولاً آندهای گرافیتی، به شکل استوانه و با قطر ۳ اینچ و ارتفاع ۶۰ اینچ ساخته می شوند. آندها دارای سیم رابط از نوع شماره ۸ با ۷ رشته می باشند. سیم های رابط دارای پوشش عایق از جنس پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا (HMPE) می باشد. باید توجه نمود که آب بندی اتصال سیم رابط به آند به طرز صحیح و مناسب بسیار مهم است. زیرا تعداد زیادی از بستر آندهای گرافیتی، به علت عدم رعایت آن در مدت کوتاهی از بین رفته اند. همچنین به علت تردی ذاتی گرافیت توجه و دقت در نصب این آندها نیز از اهمیت خاصی برخوردار است.

اطلاعات زیادی درباره اشکال مختلف آند چدنی با کرم و سیلیسیم بالا، موجود است. برای حفاظت از سازه های فولادی زیر زمینی، آندهایی با شکل استوانه ای ساده استفاده می شوند. یک انتهای آند، معمولاً به منظور فراهم کردن اتصالی مطمئن با سیم رابط، بزرگتر ساخته می شود. ابعاد ویژه آند عبارت از قطر ۱/۵ تا ۳ اینچ و طول ۶۰ اینچ می باشد. آندها معمولاً از یک سیم رابط عایق از نوع شماره ۸ با۷ رشته ساخته می شوند.پوشش عایق سیم های رابط از جنس پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا می باشد آب بندی اتصال سیم رابط به آند باید به طرز صحیح و مناسب صورت گیرد. قابل ذکر است که چدن با کرم و سیلیسیم بالا، تا حدی ترد بوده و باید در نصب آنها دقت لازم مبذول گردد.

بسترهای آندی سیستم های حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان که برای حفاظت از سازه های فولادی زیرزمینی، بکار می روند، اغلب بوسیله پشت بندهای کربنی احاطه می شوند. موادی که عموماً برای پشت بند استفاده می شوند عبارت از نرمه (خرده) کک ذغال سنگ ، نرمه کک نفت کلسینه شده، و ذرات گرافیت طبیعی می باشند. این پشت بند ۳ وظیفه مهم را بر عهده دارد :

۱) بواسطه افزایش ابعاد مؤثر آند، مقاومت آند به زمین را کاهش می دهد.

۲) بواسطه افزایش وزن آند، عمر سیستم را افزایش می دهد

۳) با ایجاد محیط یکنواخت در اطراف آند، حملات خوردگی موضعی بر سطح آند را به حداقل می رساند.

قابل ذکر است که از پشت بند کربنی نمی توان انتظار افزایش عمر مفید بستر آند را داشته مگر آنکه در اطراف آندها بطور کاملاً فشرده بکار رفته باشند.

آندها در داخل بستر آند باید توسط سیم با پوشش عایق از جنس پلی اتیلن با وزن ملکولی بالا و در اندازه مناسب به قطب مثبت یکسو کننده وصل شوند. سیم های رابط آند باید محکم و بطور محفوظ به کابل اصلی وصل شوند. معمولاً برای ایجاد اتصالات با مقاومت کم و دائمی از پیچهای چند تکه استفاده می شود. تمام اتصالات به کابل اصلی آند، باید کاملاً عایق بندی شده تا از نفوذ رطوبت و متعاقباً از بین رفتن بستر آند، جلوگیری شود. در حال حاضر این امر با استفاده از مواد تجاری به بهترین نحو صورت می گیرد، آب بندیهای غیر قابل نفوذ، توسط ریخته گری یک رزین اپوکسی دو بسته ای در اطراف اتصال الکتریکی، بدست می آید.

کابل با پوشش عایق از جنس پلی اتیلن با وزن ملکولی بالا که برای اتصال قطب منفی یکسو کننده به سازه فولادی مدفون استفاده میشود، باید از لحاظ اندازه بطور صحیح و مناسب انتخاب شده باشد، این کابل باید به کمک جوشکاری ترمیمی به سازه متصل شده، و در صورتیکه سازه مدفون دارای پوشش باشد ناحیه جوش نیز باید به طور صحیح پوشش داده شود.

مزایا و محدودیتهای سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان در جدول (۴) ارائه شده است. اساساً این سیستم، در مواقعی چون حفاظت از سازه های طولانی، و همچنین در خاک با مقاومت مخصوص بالا، بکار می رود. یک مزیت بی نظیر سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان، قابلیت حفاظت از سطوح بزرگ بوسیله یک دستگاه یکسوکننده و بستر آند واحد می باشد. بعلاوه از آنجا که در این سیستم، جریان و ولتاژ قابل تنظیم می باشند لذا سیستم انعطاف پذیری بیشتری دارد. علیرغم آنچه که بر شمرده شده این سیستم ها، نیاز به طراحی و نصب بسیار دقیق دارند، در غیر اینصورت، خوردگی ناشی از جریان سرگردان بر سازه های مجاور میتواند مسأله ساز شود.

جدول (۴) : مزایا و معایب سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان

مزایا :

۱- قابل طراحی برای محدوده وسیعی از ولتاژ و جریان می باشد.
۲- از یک بستر آند واحد جریان خروجی بسیار بالایی را می توان بدست آورد.
۳- سطح وسیعی از خط لوله توسط یک بستر آند قابل حفاظت می باشد.
۴- ولتاژ و جریان قابل تغییر و تنظیم می باشد.
۵- در محیط های با مقاومت ویژه بالا کاربرد دارد
۶- حفاظت از سازه های بدون پوشش و یا با پوشش ضعیف با استفاده از این روش بطور مؤثر امکان پذیر می باشد.

معایب :

۱- باعث ایجاد جریانهای سرگردان بر سازه های اطراف میشود.
۲- فعالیت آن با قطع جریان برق متوقف می شود.
۳- نیاز به بازرسیهای ادواری و نگهداری دقیق دارد
۴- به منبع جریان برق خارجی نیاز دارد
۵- حفاظت اضافی در این سیستم منجر به بوجود آمدن آسیبهایی بر روی پوشش می گردد.

۴- بررسی فنی و اقتصادی حفاظت کاتدی در نیروگاهها

۴-۱- مقدمه

بیشترین مطالعات و تجربیات بدست آمده در زمینه حفاظت کاتدی عمدتا" مربوط به حفاظت سازه های مدفون در خاک و همچنین سازه های غوطه ور در الکترولیت می شود. بخش دیگری از حفاظت کاتدی که باید مورد بحث قرار گیرد مربوط به سازه های حاوی الکترولیت می باشد. قابل ذکر است که تعدادی از سازه های موجود در نیروگاهها از این نوع می باشند. گوناگونی سازه هایی که در این رده جای دارند زیاد است بنابراین چند نوع از آنها بصورت نمونه انتخاب شده و جنبه های مختلف آنها از دیدگاه فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار می گیرد. از انواع این موارد می توان نمونه های زیر را نام برد:

۱- سطح خارجی کف مخازن حاوی سوخت یا مایع

۲- مخازن ذخیره آب شیرین

۳- مخازن حاوی آب دریا

۴- کندانسورها و خنک کننده ها

۵- پمپها

۶- کانالهای ورودی آب و صفحات صافی های موجود در کانالهای خنک کننده آب

۷- سطوح داخلی خطوط لوله

۴-۲- حفاظت کاتدی سطح خارجی کف مخازن

بطور کلی موارد زیر در ارتباط به خوردگی کف مخازن صادق است :

۱- حضور رطوبت، مواد غیریکنواخت در محیط اطراف مخزن و، بوجود آمدن پیل اختلاف دمش اکسیژن از عوامل اصلی بوجود آمدن خوردگی در کف مخازن می باشد. در ضمن مؤثرترین مکانیزم حاکم عبارت از خوردگی حفره ای و خوردگی گالوانیکی است. قابل ذکر است که خوردگی عمومی نیز در کف مخازن مشاهده می شود که مقدار آن از سطح بیرونی بطرف مخزن افزایش می یابد.

۲- طراحی نادرست سیستم حفاظت کاتدی با بستر آندی کم عمق یکی دیگر از دلایل ایجاد خوردگی می باشد. در این حالت، عدم توجه به اصول طراحی صحیح باعث می شود تا جریان حاصل از سیستم حفاظت کاتدی برای حفاظت کف مخزن کافی نبوده و همچنین توزیع جریان حفاظت برای تمام قسمتهای کف مخزن یکنواخت نباشد.

حفاظت کاتدی برای کف مخازن با روشهای مختلف اجرا می شود. برای حفاظت کاتدی مخازن کوچک که با دیگر سازه های فلزی زمین ارتباط الکتریکی ندارند و نیز به جریان کمتری برای حفاظت احتیاج دارند از آندهای فدا

شونده استفاده می شود در ضمن در مواردیکه به مقدار جریان قابل ملاحظـه ای نیـاز اسـت از سیسـتم اعمـال جریـان استفاده می شود.

روشهای مختلفی برای نصب آندها بمنظور توزیع جریان حفاظت بر روی کف مخازن وجود دارد. وضعیتهای نصب برخـی از این سیستم ها در زیر توضیح داده می شود:

۱- سیستمهایی که در آنها آندها بطور عمودی یا افقی در اطراف مخزن نصب می شوند. (شکل ۱۶).

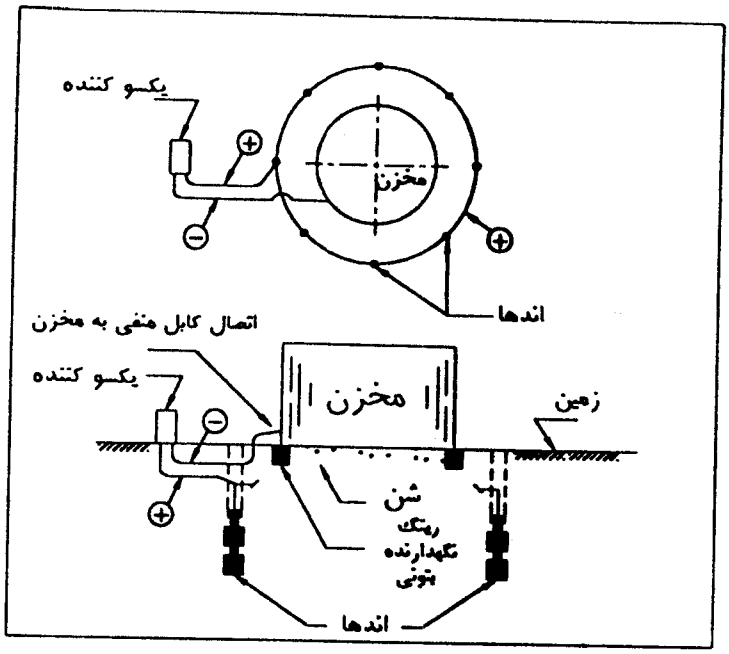
۲- سیستمهایی که در آنها آندها بطور عمودی یا افقی زیر کف مخزن نصب می شوند. (شکل ۱۷).

۳- سیستم هایی که در آنها آندها در چاه عمیق قرار داده می شوند (شکل ۱۸).

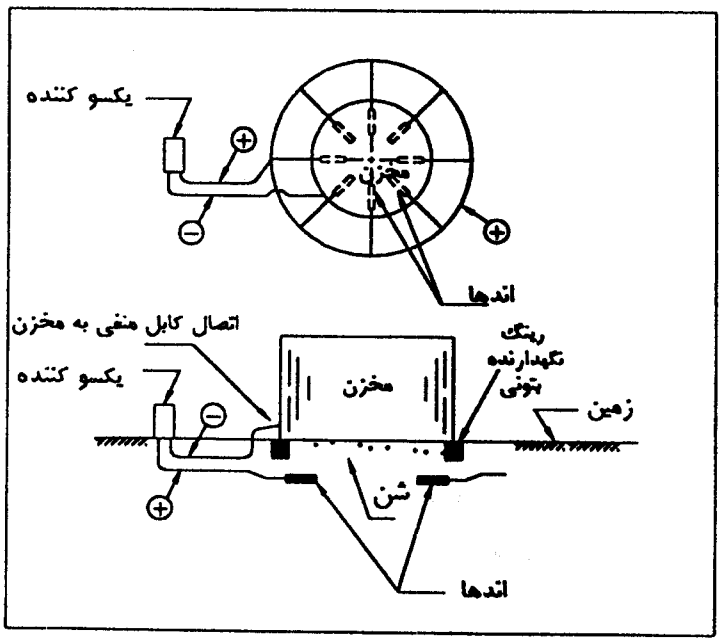
۴- سیستمهایی که در آنها آندها با زاویه مشخص نسبت به کف مخزن در زیر آن قرار داده می شوند (شکل ۱۹).

یک نکته در تمام روشهای مختلف فوق قابل ذکر است و آن اینکه اندازه گیری پتانسیل بین سـازه و زمیـن در محیـط مخزن، مقدار واقعی پتانسیل را در مرکز مخزن نشان نمیدهد. این مطلب بخصوص برای مخازن با قطر بـزرگ از صحـت بیشتری برخوردار است.

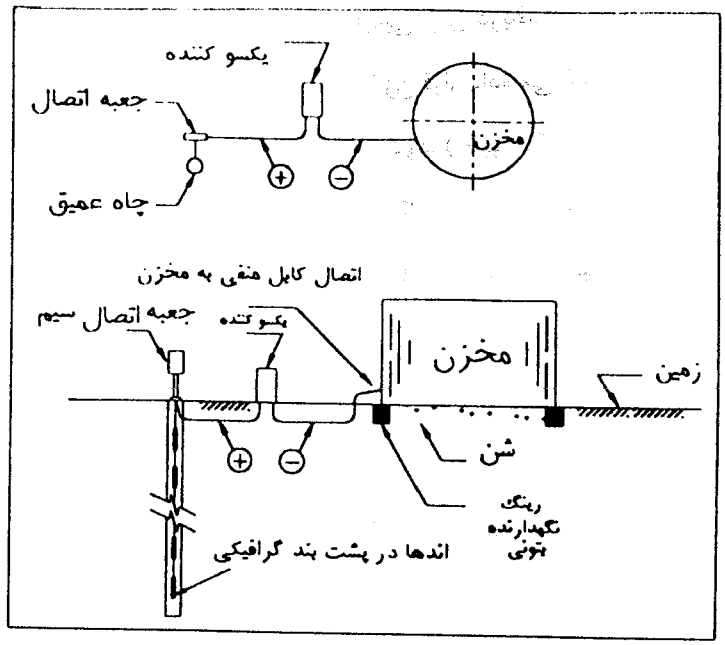
هم اکنون، زیر کف بیشتر مخازن ذخیره سازی سطحی جدید، لایه آستری ثانویه قرار داده میشود. این لایـه هـا از نـوع مواد عایق نظیر پلی اتیلن با دانسیته بالا تهیه می شوند. بدلیل مسدود نبودن مناسب خاک در زیر مخازن، تقطیر شـدن آب در خاک و نیز محصور شدن آب زیر زمینی در ناحیه بین کف مخزن و لایه ثانویه، آب به این ناحیـه وارد مـی شـود بنابراین از نظر ملاحظات اقتصادی و ایمنی بکار گیری حفاظت کاتدی برای کف مخازن ضروری می باشد. اما با توجه به استفاده از لایه های عایق در زیر مخازن، نمی توان از روشهای مرسوم حفاظت کاتدی مطابق با آنچه کـه اشـاره گردیـد استفاده کرد تحت این شرایط می توان از سیستمهای آندهای فدا شونده (مانند روی، منیزیم بشکل نوار) برای حفـاظت کاتدی استفاده کرد. کاربرد این روش دارای محدودیتهایی است که به پتانسیل کاری پائین و عمر سیستم آندهـای فـدا شونده مربوط می گردد. از آنجا که بسیاری از مخازن ذخیره سازی سطحی برای مدت زمان ۴۰ تا ۵۰ ساله طراحی مـی گردند لذا استفاده از یک سیستم حفاظت کاتدی اقتصادی با طول عمر مناسب مطلوب خواهد بود. یکـی از ایـن روشـها عبارت از استفاده از سیستم حفاظت کاتدی شبکه آندی می باشد. در این روش از یک نـوار تیتـانیومی بـه پـهنای ۶/۳ میلی متر با پوشش اکسیدهای فلزی مرکب استفاده می شود. این نوارها بفاصله ۱/۵ متری از کف مخزن، روی لایه ای از شن متراکم و بالای لایه آستری ثانویه بطور طولی کشیده می شود. سپس میله های هادی تیتانیم در یک خط مستقیم به آندهای نواری جوش داده میشوند. به این ترتیب یک شبکه آندی تشکیل می گردد. (شکل ۲۰).



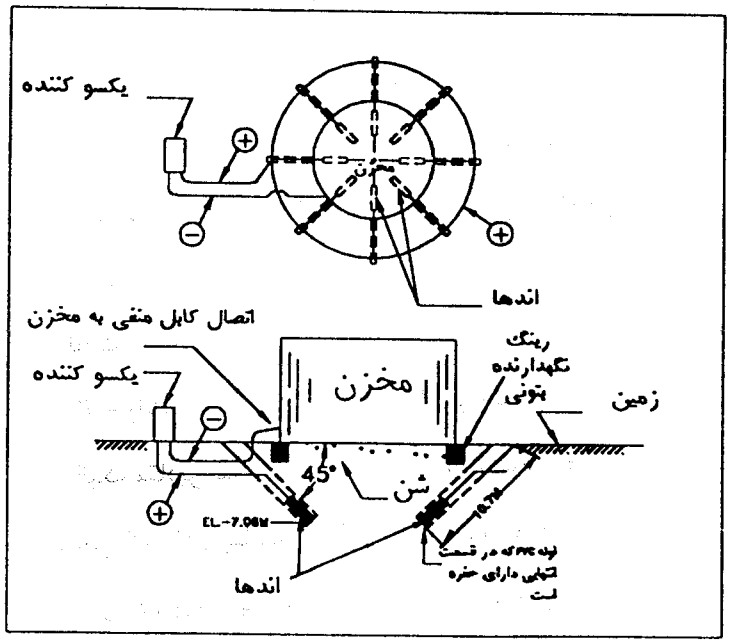
شکل (۱۶): آندهای عمودی سیستم اعمال جریان، مدفون در اطراف مخزن



شکل (۱۷): آندهای افقی، مدفون در زیر مخزن



شکل (۱۸): آندهای سیستم اعمال جریان، مدفون در چاه عمیق



شکل(۱۹): آندهای سیستم اعمال جریان، مدفون با زاویه ۴۵ درجه نسبت به کف مخزن

استفاده از میله های هادی، مقاومت مدار را کاهش میدهد و افت ولتاژ را در طول نوار آندی محدود مینماید. بنابراین جریان حفاظت بطور کامل توزیع خواهد شد. همچنین با افزایش محلهایی برای دریافت جریان روی این شبکه افت ولتاژ بمقدار بیشتری کاهش می یابد. چند الکترود مرجع هم در زیر کف مخزن قرار داده می شود و تمامی سیمها بداخل جعبه تقسیمی که به سطح خارجی دیواره متصل است انتقال داده می شود. (طبق شکل ۲۱).

استفاده از سیستم شبکه آندی اعمال جریان در جایی که مخزن دارای یک لایه آستری عایق است یک روش اقتصادی مؤثر برای حفاظت کاتدی کف مخازن ذخیره سازی سطحی است. مزیتهای این سیستم عبارتند از :

۱- افزایش عمر مخازن ببالای ۵۰ سال

۲- توزیع یکنواخت جریان و تعدیل ولتاژ کاری سیستم

۳- کاهش دانسیته جریان مورد نیاز

۴- کاهش هزینه های کاری با کمتر شدن مصرف انرژی و در نتیجه کاهش جریان مورد نیاز و تقلیل مقاومت مواد

۵- عدم نیاز به پشت بند کربنی در اطراف آند

۶- افزایش مقاومت نقاط اتصال جوش داده شده و در نتیجه اطمینان از سلامت شبکه

۷- عدم تأثیر پذیری از سازه های دیگر و عدم نیاز به عایق سازی الکتریکی

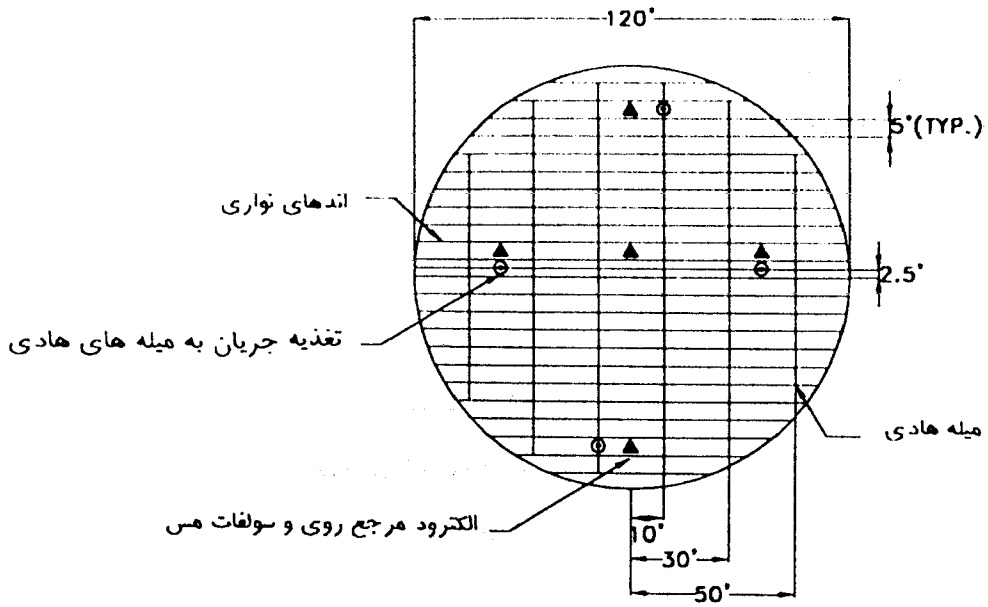
۸- آسان شدن نصب سیستم و در نتیجه کاهش هزینه های عملی برای نصب

۹- کاهش قابل ملاحظه خوردگی زیر سطحی کف مخازن

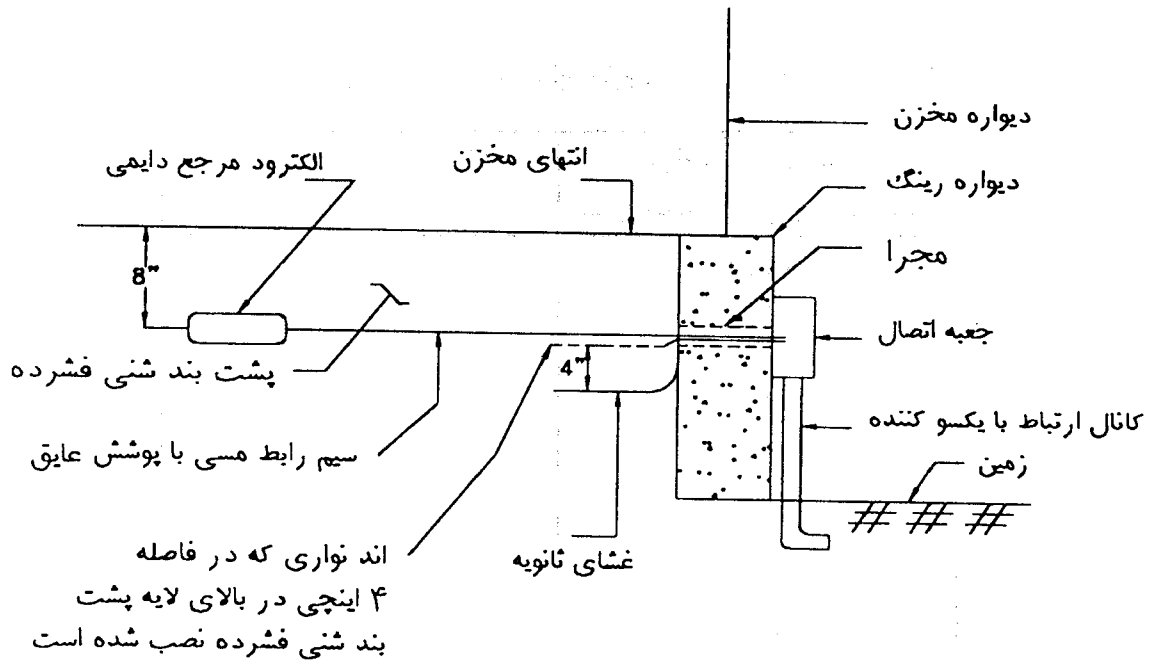
۴-۲-۱- معیارها و محدودیتهای مونیتورینگ حفاظت کاتدی در کف مخازن

روش استاندارد برای تعیین تأثیر حفاظت کاتدی، عبارت از اندازه گیری پتانسیل بین مخزن و خاک است این اندازه گیریها با استفاده از یک ولتمتر با مقاومت داخلی بالا و یک الکترود مرجع در تماس با خاک زیر مخزن صورت می گیرد.

پتانسیل طبیعی فولاد ساده کربنی لخت در تماس با خاک، هنگامی که نسبت به الکترود مس - سولفات مس اندازه گیری شود بین ۰/۵- ولت تا ۰/۶- ولت می باشد. مقادیر اندازه گیری شده مثبت تر از آن نشانگر آنست که سازه تحت تأثیر خوردگی می باشد. در حالیکه مقادیر منفی تر نشانگر آنست که یا سازه خوب پوشش شده است و یا آنکه تحت حفاظت کاتدی می باشد. هنگامی که مقدار پتانسیل اندازه گیری شده ۰/۸۵- ولت باشد نشان میدهد که مخزن بطور کامل حفاظت می شود. برای اندازه گیری صحیح پتانسیل باید الکترود مرجع در نزدیکی کف مخزن قرار داده شود. یک مسئله در ارتباط با اندازه گیری پتانسیل در کف مخازن، مشکل بودن و یا غیر ممکن بودن قرار دادن الکترودهای مرجع در کف مخازن می باشد.اندازه گیری پتانسیل از طریق قرار دادن الکترود مرجع در حاشیه مخازن ممکن است تولید نتایج غلط نماید. این امر بدلیل گرادیانهای پتانسیل ایجاد شده در خاک در نتیجه تخلیه جریان از



شکل (۲۰) : حفاظت کاتدی کف مخزن با استفاده از سیستم اعمال جریان



شکل (۲۱) : حفاظت کاتدی کف مخزن با استفاده از سیستم اعمال جریان (تصویر از مقطع جانبی)

آند می باشد. این مطلب بویژه در زمانیکه آندها در حاشیه مخازن چیده شده اند بیشتر صدق می کند. مقادیر پتانسیل اندازه گیری شده در حاشیه مخازن، به معیار حفاظت نزدیکتر بوده و هر چه الکترود مرجع به سمت مرکز مخزن نزدیکتر شود، پتانسیل ها مثبت تر می گردند. این امر نشان دهنده فقدان حفاظت کافی در این نواحی می باشد. برای مثال برای مخازنی به قطر ۳۶ متر که بوسیله سیستم های حفاظت کاتدی از نوع توزیع آندهای عمودی یا افقی در زیر مخزن و یا با استفاده از چاه آندی عمیق حفاظت می شوند. پتانسیل مرکز مخزن حدود ۳۰۰ میلی ولت نسبت به حاشیه مخزن مثبت تر است. در این حالت با ایجاد توزیع جریان یکنواخت در کف مخزن با استفاده از سیستم های آندی زاویه دار این مشکل مرتفع می شود.

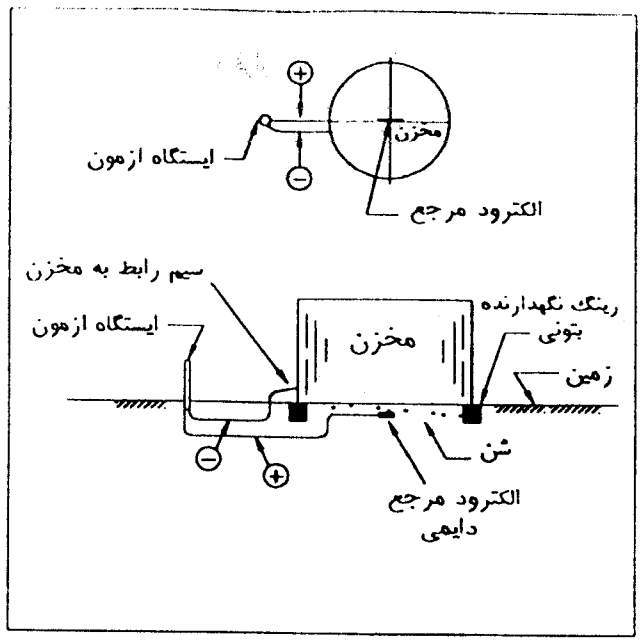
جدول (۵) مقادیر واقعی پتانسیل اندازه گیری شده زیر کف مخزنی به قطر ۳۶ متر را نشان میدهد همانطور که مشاهده می شود اختلاف پتانسیل بین محیط و مرکز مخزن حدود ۳۰۰ میلی ولت است بنابراین یک بازرسی مناسب برای تعیین میزان رضایت بخش بودن حفاظت کاتدی در کف مخزن مستلزم آنست که حداقل یک اندازه گیری پتانسیل بین خاک و سازه در مرکز مخزن انجام شود. برای مخازن نو، مشکل اندازه گیری پتانسیل در مرکز مخزن با انجام مراحل زیر آسان می شود.

۱- از طریق نصب الکترودهای مرجع دائمی و نیز نصب یک سیم رابط زیر کف مخزن که به یک ایستگاه اندازه گیری پتانسیل متصل می شود. (طبق شکل۲۲)

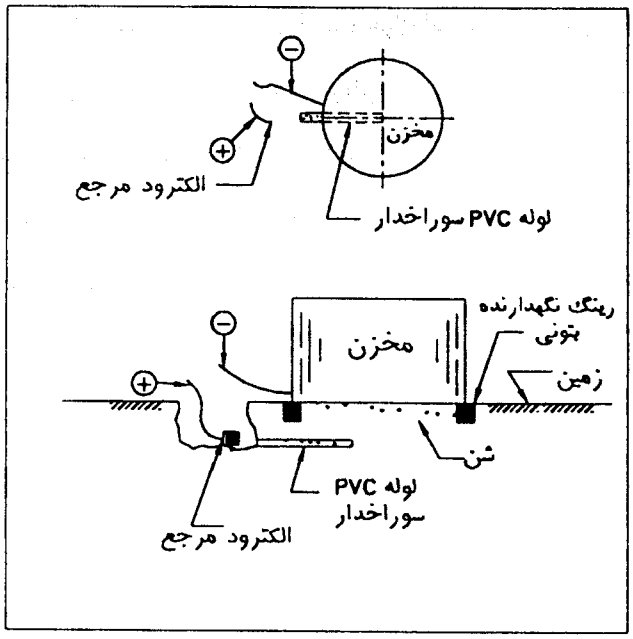
۲- نصب یک لوله سوراخدار در خاک، در این حالت الکترود مرجع براحتی می تواند در داخل لوله حرکت نموده و پتانسیل را اندازه گیری نماید. (طبق شکل۲۳)

جدول (۵) : اندازه گیری پتانسیل در سطح خارجی کف یک مخزن با قطر ۳۶ متر

پتانسیل مخزن نسبت به خاک (ولت)	موقعیت الکترود مرجع مس- سولفات مس (برحسب متر)
-۱/۴۹۲	لبه کف مخزن
-۱/۳۷۹	۱/۵
-۱/۲۹۱	۳/۰
-۱/۲۴۲	۴/۵
-۱/۱۸۳	۶/۰
-۱/۱۵۱	۷/۵
-۱/۱۲۷	۹/۰
-۱/۱۰۹	۱۰/۵
-۱/۰۹۷	۱۲/۰
-۱/۱۰۹	۱۳/۵
-۱/۱۰۹	۱۵/۰
-۱/۱۰۱	۱۶/۵
-۱/۱۱۲	(مرکز کف مخزن) ۱۸/۰



شکل (۲۲): الکترود مرجع دائمی و ایستگاه اندازه گیری پتانسیل



شکل (۲۳): روش اندازه گیری پتانسیل کف مخزن با استفاده از لوله PVC سوراخدار و الکترود مرجع

۴-۳- مخازن ذخیره آب شیرین

این مخازن برای نگهداری و ذخیره آب مورد استفاده قرار می گیرند. این مخازن از فلزات مختلفی تهیه می شوند، فولاد، چدن، مس، فولاد گالوانیزه و آلومینیوم از جمله این مواد هستند روشهای حفاظت کاتدی برای هر فلز متفاوت بوده اما بطور کلی در همه آنها معیار حفاظت، رسیدن به پتانسیل مشخصی نسبت به الکترود مرجعی که در محل مناسبی قرارداده شده است می باشد.

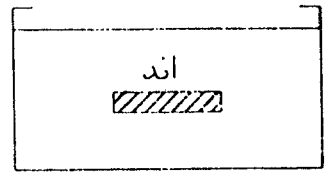
این مخازن با اشکال و ابعاد مختلفی ساخته و تهیه می شوند. برای حفاظت کاتدی در وهله اول توجه به ابعاد آن ضروری می باشد. برای مثال یک مخزن به شکل مکعب مستطیل را در نظر بگیرید که قسمت بالای آن باز بوده و توسط یک آند که در وسط آن قرار داده شده حفاظت می شود. (شکل ۲۴ الف). حال اگر ابعاد این مخزن دو برابر شود با توجه به افزایش سطح آن بمیزان چهار برابر، حفاظت مورد نیاز نیز بهمین میزان افزایش خواهد یافت. تجربیات نشان میدهد برای آنکه عمر مخزن جدید مطابق با عمر مخزن اولیه باشد لازم است تا از آرایش جدیدی مشابه شکل(۲۴-ب) استفاده گردد. بدین ترتیب به کمک بررسیها و تجربیات می توان پیش بینی های لازم را از نقطه نظر فنی و مهندسی برای حفاظت مخازن بزرگتر بعمل آورد.

در مخازن مکعب مستطیلی مشکلترین مناطق از نظر حفاظت، گوشه ها هستند. معمولاً حفاظت گوشه ها بخصوص در سانتیمترهای آخر مشکل است و این امر هر چه زوایا تندتر باشد مشکلتر نیز خواهد بود.جریان لازم برای حفاظت در گوشه ها کمتر می باشد. دلیل آن نیز عدم حرکت الکترولیت و هوازدایی در آن مناطق می باشد. مشکلات مربوط به حفاظت گوشه ها در مورد سازه های بزرگ همچون سکوهای دریایی (اسکله ها) نیز وجود دارد. در این گونه موارد اغلب گوشه ها را توسط جوشکاری به شکل انحناء دار با شعاع انحناء ۲/۵ سانتیمتر درآورده و بدین ترتیب مشکلات حفاظتی آنها را برطرف می نمایند. برای حفاظت بهتر و آسانتر گوشه ها، حتی اگر کل مخزن رنگ یا پوشش نشده باشد بهتر است در گوشه ها اینکار انجام شود.

خوردگی در آب شیرین بدلیل بالا بودن مقاومت مخصوص الکترولیت و تشکیل لایه های سطحی در آن محدود میباشد. تحت این شرایط احتمال خوردگیهای موضعی از نوع حفره دار شدن بیشتر خواهد بود. یکی از مواردیکه در خوردگی آب شیرین مؤثر است مس می باشد که در اثر عبور آب از لوله ها یا مخازن، مس کنده شده و وارد محلول می شود و سپس برسطح فولادی مخازن ذخیره آب رسوب می کند. خوردگی از این نوع حتی در مواردیکه میزان مس در حدود ppm ۱ باشد بوقوع می پیوندد. رسوبات مس در مخازن بصورت کاتد عمل کرده و باعث خوردگی گالوانیکی می شود. پیل گالوانیکی حاصله حدود نیم ولت پتانسیل محرکه داشته در نتیجه منجر به خوردگی موضعی از نوع سوراخ شدن در دیواره مخزن می شود.

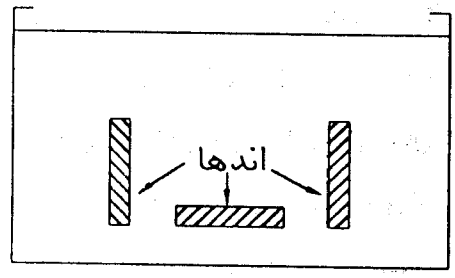
در صورتیکه فلزات دیگری بصورت براده، تراشه و غیره به مخزن وارد شوند خوردگی تشدید خواهد شد. در ضمن وقوع خوردگی های حاد در اثر وجود پیچ گوشتی، و پیچ و مهره ها، چکش و غیره که در مخازن باقیمانده اند نیز گزارش

شده است. خوردگی در محلهایی چون مناطق جوش، لایه های اکسیدی یا حتی در اثر رسوبات یا اشیاء غیرفلزی نظیر سرباره یا ذرات پلاستیکی از طریق ایجاد پیلهای اختلاف غلظت اکسیژن و درجه حرارت بوجود می آید. فلزات و آلیاژهایی نظیر مس، سرب، روی، برنج، برنز، آلومینیوم، لحیم، فولاد ضد زنگ بصورت مجموعه های مختلف در بسیاری مخازن بکار می روند. وجود انها باعث تشدید خوردگی می کردد. تغییر در طراحی مخازن و استفاده از یک جنس در انها مثلا فولاد گالوانیزه اولین قدمی است که می توان در جهت پیشگیری از خوردگی برداشت.



مخزن

(الف)



مخزن

(ب)

شکل (۲۴) (الف) : مخزن کوچک تحت حفاظت کاتدی با یک آند مرکزی
(ب) مخزن بزرگتر تحت حفاظت کاتدی با آرایش منظم متشکل از سه آند

۴-۴- مخازن آب سرد

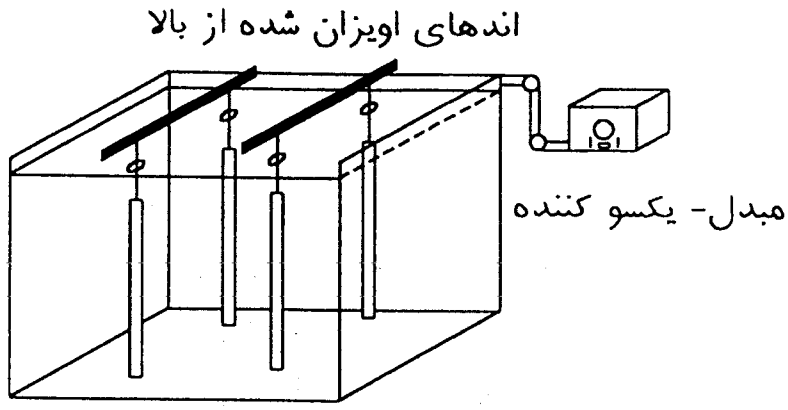
گرچه امروزه اغلب مخازن کوچک از مواد غیر فلزی و پلاستیکی تهیه می شوند ولی تعداد زیادی مخـازن ذخـیره آب از جنس فولاد گالوانیزه نیز موجود می باشد. برای جلوگیری از خوردگـی ایـن منـابع مـی تـوان از روش حفـاظت کـاتدی استفاده کرد. اعمال یک میلی آمپر بر فوت مربع جریان، پتانسیل فلز را به ۱/۱ ولت (نسبت به نیم پیل مس- سـولفات مس) رسانده و برای حفاظت فولادی که در زیر لایه گالوانیزه قرار دارد، به ۰/۱ تا ۰/۲ میلی آمپر بر فوت مربـع جریـان نیاز می باشد. از آنجا که وجود مس در آب یکی از اصلی ترین علل خوردگی این نوع مخازن مـی باشـد، اخـیراً روشـی ابداع شده است که در آن با عبور آبها از داخل صفحاتی از جنس روی، مس موجود در آب جدا می گردد. این کار بـاعث افزایش عمر مخازن گالوانیزه و آلومینیومی می شود. میتوان از آندهای روی نیز برای حفاظت در این مورد استفاده کـرد. روی همچنین برای حفاظت مخازن مسی ایده ال می باشد در این مورد گرچه خوردگی مس بـه خـودی خـود مشـکل نمی باشد ولی با حفاظت این مخازن مسی مانع جدا شدن ذرات مس (هر چنـد در مقـادیر نـاچـیز) و ورود آن بـه آب گردشی در سیستم شده و در نتیجه از ایجاد خوردگی در نواحی دیگر سیستم جلوگیری می شود.

مخازن ذخیره آب اغلب روکش می شوند و برای اینکار از رنگهای قیری [1] که تأثیری در طعم آب ندارند؛ اسـتفاده مـی گردد. دانسیته جریان لازم برای حفاظت این نوع مخازن پائین بوده بنابراین می توان از آندهای کوچک روی نیز در ایـن رابطه استفاده کرد. اگر نیاز به جریان بیشتری باشد، از آندهای منیزیمی که بصورت استوانه هـای بلنـد همـراه بـا میلـه مرکزی ریخته گری شده اند، استفاده می شود. برای مخازن بزرگتر از روش اعمال جریـان اسـتفاده مـی شـود. در ایـن حالت از آندهای تیتانیمی روکش شده یا پلاتینه شده استفاده می شود. مزایای این آندها آن اسـت کـه بـه راحتـی بـه شکل سیم هایی با مقاومت پائین در می آیند. در ضمن می توان از آندهای مصرف شونده نیز برای اینکار استفاده کرد.

در صورت استفاده از آندهای مصرف شونده یا فدا شونده باید بـه ایـن نکتـه دقـت کـرد کـه محصـولات مضـر ناشـی از خوردگی وارد آب نشود. بسیاری از آندها باعث تغییر طعم آب می شوند از جمله این آندها، روی اسـت کـه عـلاوه بـر تأثیر بر طعم آب، حالت تهوع آور نیز دارد. منیزیم، آلومینیوم هر دو تولید اکسیدهایی کرده که در تولید داروهای معـده مورد استفاده قرار می گیرند. در بسیاری ساختمانهای بزرگ مخازنی بکار می رود که از قطعـات فـولادی تهیـه شـده و میتوان دوام آنها را با استفاده از یک سیستم کوچک حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریـان، بیشـتر کـرد. در ایـن حـالت ماکزیمم ۵ آمپر جریان با ۲۰ ولت برای حفاظت کافی بوده، چنین سیستمی در شکل (۲۵) نشان داده شده است.

---

۱) Bituminous



شکل (۲۵) : حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان برای مخازن کوچک

در هنگام حفاظت از مخازن ذخیره آب و هنگام استفاده از الکترود مرجع مس - سولفات مس دقت و توجه زیادی باید صورت گیرد زیرا مس که یکی از خطرناکترین آلودگیها می باشد براحتی بر روی اتصالات و سطوح گالوانیزه دیواره مخزن رسوب می کند. استفاده از میله روی در محلول آب نمک یا استفاده از الکترود مرجع کلرور نقره مشکل فوق را برطرف می کند. اگر لازم باشد که اندازه گیریها بطور مداوم صورت گیرد، الکترود روی رفتار گمراه کننده ای نشان خواهد داد و بهتر است تا از الکترود منیزیم علیرغم عدم دقت آن در حد الکترود مس - سولفات مس، استفاده شود. منیزیم تا حد قابل قبولی میزان حفاظت ارائه شده را مشخص می نماید.

در بسیاری نقاط برای جبران فشار آب مصرفی از برجهای آب استفاده میشود. بعضی از این مخازن مکعب مستطیل شکل بوده که قبلاً روش حفاظت آنها توضیح داده شد. تعداد قابل توجهی از این برجها دارای یک لوله بزرگ در وسط هستند که مخزن استوانه ای، کروی یا بیضوی روی آن قرار میگیرد و به آن تکیه دارد. مخزن و این لوله در مجاورت آب بوده و هر دو نیاز به حفاظت دارند. قسمت فوقانی، با اعمال جریان یا با استفاده از آندهای منیزیمی محافظت می شود و برای لوله بالابرنده نیز زنجیره ای از آندهای فدا شونده منیزیمی و یا اعمال جریان با تیتایم پلاتینه شده یا آلومینیومی مصرف شونده بکار می رود. شکل(۲۶) نمونه ای از چنین طراحی و نصب آنرا نشان داده است.

۴-۵- مخازن آب داغ

خوردگی در مخازن آب داغ خیلی سریعتر از مخازن آب سرد صورت می گیرد. حرارت بالا، مقاومت آب را تا حدود نصف کاهش داده و از طرفی وجود لایه های حرارتی ناشی از گرم شدن آب خود موجب تشکیل پیل های خوردگی با ابعاد بزرگ می شود. اثر نمکهای حل شده و کوپل های فلزی در حرارتهای بالا افزایش یافته و واکنشهایی نظیر حل شدن مس تشدید می شود. مخازن گالوانیزه مشکل دیگری هم خواهند داشت و آن این است که پوشش روی که در حالت عادی و درجه حرارت معمولی نسبت به فولاد بصورت آندی عمل می کند، در حرارتهای بالا (بالاتر از ۶۰ درجه سانتی گراد) بصورت عکس عمل کرده و حالت کاتدی پیدا می کند. وجود یونهای کلرور و سولفات این اثر عکس شدن پلاریته را کاهش می دهد.

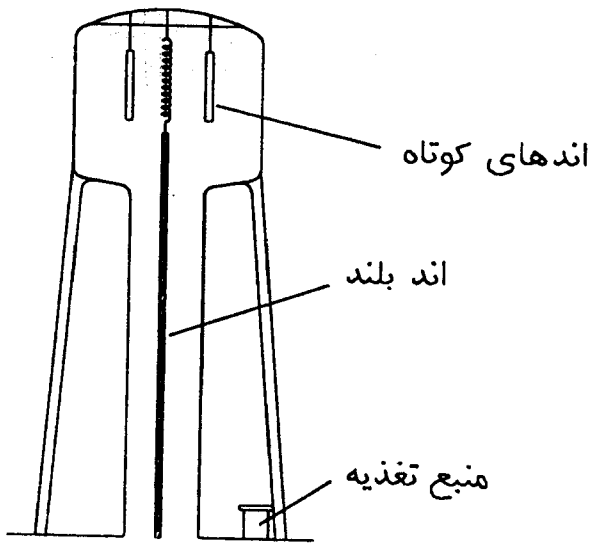
مشکل فوق فقط در اثر حرارت بوجود می آید اما در بسیاری مخازن آب داغ، مشکل دیگری هم بوجود می آید و آن اینست که المانهای حرارتی آنها که از مس قلع دار یا آلیاژ مس- نیکل هستند، در اثر تماس با جداره مخزن ایجاد پیل گالوانیکی می کنند، حتی اگر از جداره هم کاملاً ایزوله شوند همان مشکل جدا شدن مس و ته نشین شدن روی دیواره مخزن و مشکلاتی که قبلاً توضیح داده شد وجود خواهد داشت. خورده شدن مس به خودی خود مشکلی نبوده ولی حل شدن آن در حد ppm باعث از بین رفتن پوشش گالوانیزه لوله های آب در عرض مدت چند ماه می شود.

مخازن آب داغ را به خوبی می توان با آندهای منیزیمی حفاظت کرد. آندها باید قادر باشند ۲ تا ۳ میلی آمپر بر فوت مربع جریان را به دیواره ها منتقل نمایند. در اثر تجربه ثابت شده است که مخازن آب داغ یا در عرض چند سال اول

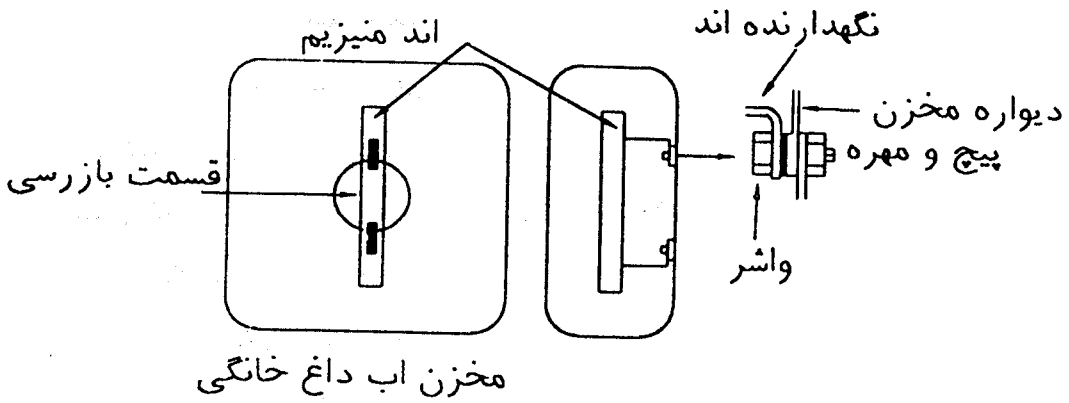
خورده شده و یا بمدت ۱۵ الی ۲۰ سال بدون عیب دوام می آورند. آزمایشات انجام شده بر روی خوردگی فولادهای گالوانیزه در آبهای سخت نشان داده که تشکیل یک لایه و پوسته رسوبی ناشی از سختی اب باعث حفاظت آن می شود. اگر تشکیل این لایه به دلیل نرم بودن آب صورت نگیرد، مخزن سریعاً دچار شکست می شود. اگر مخزنی تا یکسال تحت حفاظت کاتدی بوده و در این مدت رسوب گچی روی آنرا بپوشاند، حفاظت آن برای ۱۵ تا ۲۰ سال بعد ادامه خواهد داشت. حتی اگر آندهای موجود جریان لازم را تأمین ننمایند.

مخازن عموماً یا به شکل مکعب مستطیل و یا استوانه ساخته میشوند. نوع مکعب مستطیلی آن را می توان با استفاده از آند ۴۵ سانتیمتری که روی یک صفحه چسبانده شده یا در سوراخ مخصوص پیچ شده، حفاظت کرد. نمونه ای از آن در شکل (۲۷) نشان داده شده است. نگهدارنده این آندها از فولاد گالوانیزه یا آلومینایزه بوده و شیار آن قابل تنظیم برای فواصل مختلف پیچ است. آند در جای خود ثابت و بوسیله پیچ و واشر به قسمت مربوطه محکم می شود به طوری که آند اتصال الکتریکی خوبی را با دیواره مخزن برقرار سازد.

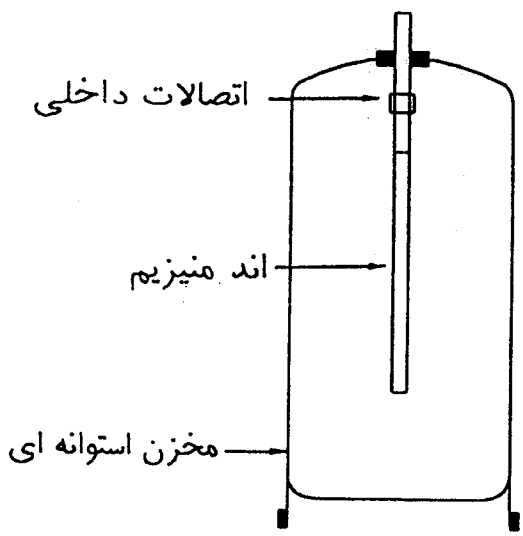
مخازن استوانه ای بزرگتر را بهتر است با استفاده از آندهای منیزیمی میله ای که مغزی در آنها پیچ شده و یا مستقیماً به اتصالات لوله وصل شده، حفاظت کرد. اغلب لوله ورودی به شکلی طراحی می شود که آند قابل نصب روی آن باشد. شکل (۲۸) نمونه ای از آند نصب شده در یک مخزن استوانه ای را نشان میدهد.



شکل (۲۶) : حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان برای یک برج فولادی آب



شکل (۲۷) : آند منیزیمی برای مخازن آب داغ



شکل (۲۸): آند منیزیمی میله ای برای حفاظت مخازن استوانه ای آب داغ

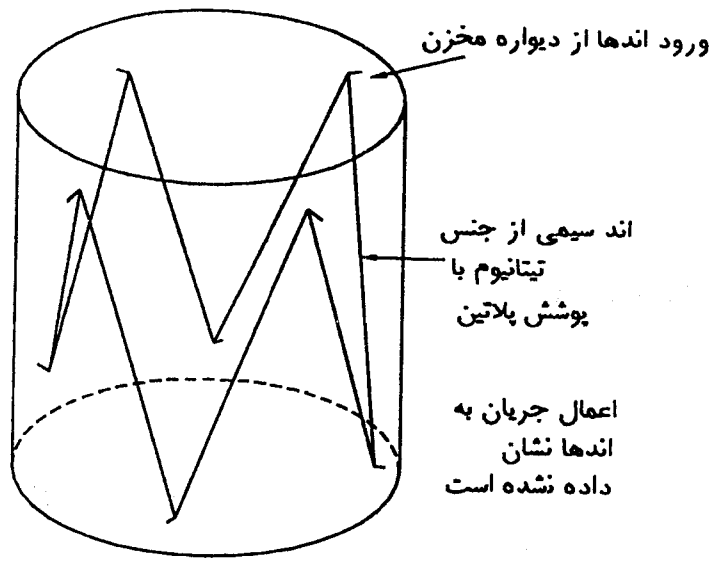
مخازن آب داغ صنعتی معمولاً از فولاد تهیه شده اغلب نیز گالوانیزه نمی باشند. این مخازن کاربردهای متعدد داشته و درجه حرارت آن نیز معمولاً از ۲۶ تا ۹۴ درجه سانتیگراد می باشد. دانسیته جریان لازم برای محافظت آنها ۳ تا ۴ میلی آمپر بر فوت مربع بوده که البته مقدار دقیق آن بستگی به آب، درجه حرارت و کوپل های فلزی مخزن دارد. خوردگی این مخازن ناشی از مس موجود در آب، پیل های گالوانیکی ناشی از اتصال دو فلز یا اختلاف غلظت هوا که در اثر ایجاد رسوب حاصل شده است می باشد. تیتانیم پلاتینه در این مورد ارجح بوده هر چند می توان از گرافیت، مگنتایت و چدن پر سیلیسیم نیز تا دمای ۵۰ درجه سانتیگراد استفاده کرد. چدن سیلسیم دار با میزان مولیبدنیم بالا برای آب در حال جوش مناسب گزارش شده است. همچنین می توان از آندهای مصرف شونده نیز استفاده کرد به شرط اینکه محصولات ناشی از خوردگی آنها باعث آلودگی آب آشامیدنی یا آب سیستم نشوند و یا متفاوت خورده شدن آند در نواحی داغ و سرد مخزن باعث شکست زودرس آند نشود. آندهای منیزیمی نیز قابل استفاده بوده گر چه در حرارتهای بالا خیلی سریع مصرف می شوند. برای سیستم جریان اعمالی لازم است از ولتاژهای بالا استفاده شده و تیتانیم پلاتینه شده نیز کاملاً پلاتینه شده باشد.

آب تغذیه بویلرها اغلب در مخازن فولادی و در دمای بالا نگهداری میشود. آب، خالص بوده و برای جلوگیری از تشکیل لایه های رسوبی، املاح آن گرفته می شود. نتیجتاً این آب مقاومت ویژه خیلی بالا در حد ۴۰/۰۰۰ اهم سانتی متر داشته و احتمال خوردگی موضعی از نوع حفره ای در آن وجود دارد. آب ورودی ممکن است بصورت مخلوط آب و بخار پمپ شده و ارتعاشات حاصله ممکن است باعث پوسته پوسته شدن و تخریب لایه اکسیدی گردد. برای این مخازن می توان از حفاظت کاتدی استفاده کرد. شکل (۲۹) سیستمی را نشان می دهد که در آن از سیم تیتانیم پلاتینه شده برای اینکار استفاده شده است. مخزن ممکن است کاملاً در بسته بوده و دسترسی به آن به راحتی ممکن نباشد. این امر طرح و آرایش آندها را تعیین و مشخص می کند. می توان از آندهای مصرف شونده نیز استفاده کرد. اگر از آلومینیوم خیلی خالص استفاده شود، برای بهسازی آب تأسیسات نیز مفید خواهد بود.

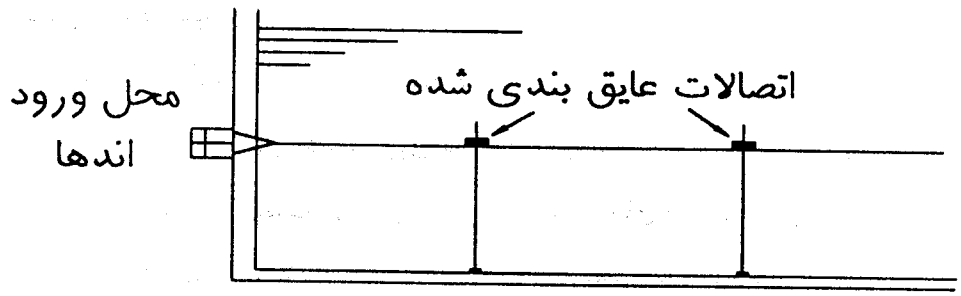
با توجه به بالا بودن مقاومت ویژه آب و درجه حرارت، تشخیص کفایت حفاظت با استفاده از الکترودهای مرجع معمولی مشکل خواهد بود. با استفاده از معیار تغییر پتانسیل روی کوپن های فولادی کوچک یا الکترودهای درجه حرارت بالا مثل الکترود نقره / سولفات نقره اینکار صورت می پذیرد. در بعضی ماشین های صنعتی مثل ماشین های شستشوی بطری ها یا سترون کننده ها از آب داغ استفاده می شود که این آب در مخزن، ذخیره و نگهداری می شود. مخازن اغلب از جنس فولاد بوده و اگر آب خیلی داغ لازم باشد، معمولاً در همان جا حرارت داده و داغ می شود.

در اغلب صنایع، بخار کافی وجود داشته و از آن می توان برای گرم کردن آب مخازن استفاده کرد. چرخش بخار از میان کویلهای مسی یا دمیدن آن از میان نازلهای مسی یا آلیاژ مس، باعث حرارت دادن آب می گردد. خوردگی این مخازن سریع بوده و لازم است حفاظت کاتدی کامل و دقیقی روی انواع آنها صورت پذیرد.

اتصال آندها به کابل در درون مخزن مشکل بوده، به شکلی که بسیاری از آندها از طریق نگـهدارنده بـه دیـواره وصـل میشوند. نمونه ای از آن در شکل (۳۰) نشان داده شده است.



شکل (۲۹): حفاظت کاتدی مخازن آب تغذیه بویلر با استفاده از سیستم اعمال جریان و آندهای سیمی



شکل (۳۰) : حفاظت کاتدی مخازن صنعتی با استفاده از سیستم اعمال جریان و آندهای سیمی

۴-۶- مخازن آب دریا

سیستم هایی که با استفاده از آب دریا خنک می شوند، همچنین جدا کننده ها دارای مخازن بزرگی از فولاد مشابه مخازن نفت هستند. برای جلوگیری ازایجاد رسوب، آب خام فیلتر شده مرتباً در داخل آنها به گردش در می آید و خوردگی یکی از مشکلات مهم و اساسی این مخازن می باشد. پوشش های بکار رفته در این مخازن عبارت از قیرهای سنگین، قطران ذغال سنگ، رنگهای اپوکسی قطران ذغال سنگ، همچنین آستر و لایه های بتنی می باشند. اما حفاظت کاتدی در این رابطه روش ارزانتر و موفق تری است گر چه استفاده از پوشش تا بالای خط آب ضروری می باشد.

۴-۶-۱- حفاظت کاتدی مخازن با استفاده از سیستم اعمال جریان

مخازن باز که در معرض هوا قرار دارند از طریق اعمال جریان و با استفاده از آندهای دائم حفاظت می شوند. اگر مخزن بسته باشد، سقف فولادی آن در معرض خوردگی خواهد بود و می توان از سقفهای پلاستیکی تقویت شده برای این کار استفاده نمود و نگهدارنده های سیستم حفاظت کاتدی را نیز بر روی آن سوار کرد.

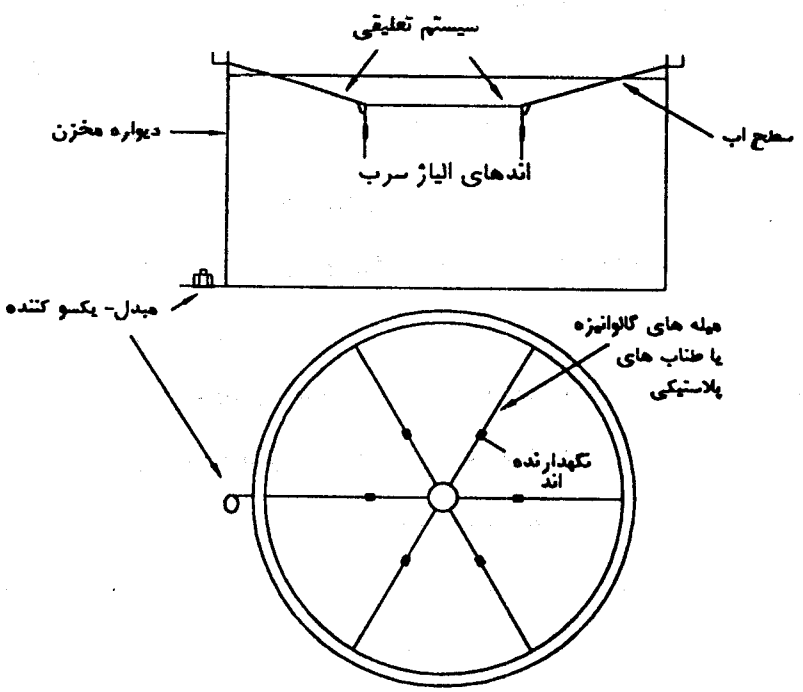
مخازن بزرگ آب دریا در ابتدا برای حفاظت به جریانی معادل با ۱۰ الی ۱۲ میلی آمپر بر فوت مربع نیاز داشته که بعد از پلاریزاسیون، این جریان به ۳ تا ۴ میلی آمپر برفوت مربع کاهش می یابد. کل جریان در ابتدا ۳۰۰ آمپر بوده که بعد به حدود ۱۰۰ آمپر تنزل می یابد.

آندهای تهیه شده از آلیاژ سرب، مگنتایت و تیتانیم پلاتینه شده برای حفاظت این مخازن ایده آل بوده و غوطه ور کردن این آندها در آب ارزانترین و ساده ترین راه برای مهندسین است. در شکل (۳۱) آرایش آندهای سربی با استفاده از آندهای بلند اکسترود شده به قطر ۶ میلیمتر نشان داده شده است در انتهای آندها مهره ماسوره ای است که اتصالات از طریق آن صورت گرفته و با رزین مناسب، کاملاً آب بندی می شود. آند بهمراه کابل تغذیه اش غوطه ور شده و مجموعه فوق از سیستم نگهدارنده ای که از میله فولادی یا طناب پلاستیکی است آویزان می شود.

آندهای تیتانیمی پلاتینه شده سبک تر بوده و می توان آنها را توسط طنابهای پلاستیکی آویزان کرد. اگر آب دارای تلاطم شدید باشد، لازم است مهار شده تا از ایجاد خستگی در محل اتصال کابل تغذیه آند جلوگیری شود.

بکارگیری آندهای فدا شونده ساده است. آندهای روی و آلومینیومی را می توان با مغزی مستقیماً به دیواره وصل کرد یا به پایه ای که در بالای مخزن است آویزان نمود. حفاظت وسط مخزن از آندهای دیواره تأمین می شود. در اینجا نیازی به نیروی محرکه (ولتاژ محرکه) بالای آندهای منیزیمی نبوده بخصوص که آندهای منیزیمی هزینه بیشتری خواهند داشت. از آندهای مصرف شونده نیز می توان استفاده کرد مگر در مواردی که چسباندن آنها مشکل بوده و یا محل قرار دادن آنها مشکلاتی ایجاد کند که کاربرد آنها را غیر اقتصادی نماید.

آندهای دائمی برای مخازن در بسته مضر بوده در حالیکه استفاده از آندهای مصرف شونده و فدا شـــونده در ایـن نـوع مخازن که در آن آب راکد بوده و در تماس با هوا نیست مزایای خاصی دارد. این شرایط در مخازنی کـه در آنـها نفـت ذخیره می شود نیز ممکن است وجود داشته باشد در این حالت انجام حفاظت کاتدی بدون تصاعد گاز در آنـد، منجـر به هوازدایی تدریجی آب و به دنبال آن کاهش جریان مورد نیاز خواهد شد. آندهای فدا شونده با ولتاژ محرکـه پـایین بطور اتوماتیک از این کاهش بیشترین استفاده را می برند. آندهای مصرف شونده و فدا شونده قابل کنترل، باید میزان خروجی جریانشان بطور اتوماتیک کنترل شده تا از این مزیت بتوانند بهره گیرند.



شکل (۳۱): آرایش آندهای سیستم اعمال جریان

۴-۷- کندانسورها و کولر ها

اکثر کندانسورها از قسمتهایی مانند محفظه آب آهنی دارای پوشش یا بدون پوشش، لوله های آلومینیومی ، برنجی و یا مس نیکل و صفحه لوله هایی از جنس برنج معروف به مانتزمتال تشکیل شده است مسائل خوردگی به سه بخش تفکیک گردیده است :

- خوردگی آهن در محل ورودی آب به محفظه آب و خوردگی در خروجی آن
- خوردگی سایشی داخل لوله ها و صفحه لوله ها
- خوردگی حفره ای در داخل لوله ها

وقتی محفظه آهنی آب فاقد پوشش باشد، مشکل خوردگی سایشی چندان حاد نخواهد بود. زیرا آهن بعنوان آند نسبت به مواد برنجی عمل کرده در نتیجه باعث بوجود آمدن حفاظت کاتدی به مقدار مشخص بر صفحه لوله ها و ورودی و خروجی لوله ها شده و بدنبال آن خوردگی در محفظه آهنی آب بوجود خواهد آمد.

هنگامی که از لوله هایی از جنس دیگر استفاده شود، بخصوص هنگامی که لوله های تیتانیمی یا لوله هایی از فولاد ضد زنگ جایگزین لوله های مستعمل کندانسورهای قدیمی شوند این مشکل به خوردگی موضعی همچون خوردگی شیاری و خوردگی حفره ای و خوردگی گالوانیکی بین صفحه لوله ها و لوله ها تغییر خواهد کرد.

در کشورهای اسکاندیناوی ، در جایی که برای اولین بار از مخازن آهنی با پوشش لاستیکی، صفحه لوله ها از جنس برنج نوع مانتزمتال و لوله هایی از برنج آلومینیوم یا آلیاژ مس- نیکل استفاده شد، مشکل نشتی لوله ها افزایش یافت.

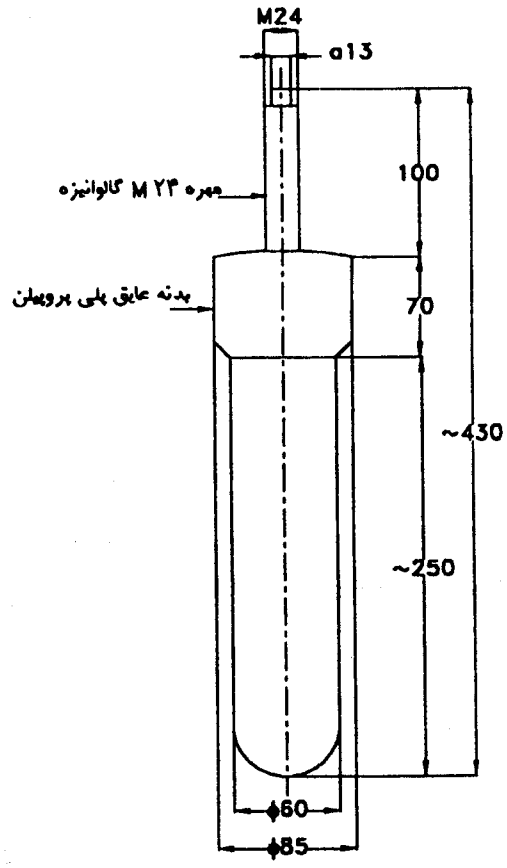
در کندانسورهایی که دارای قسمتهایی همچون محفظه آهنی آب، صفحه لوله ها از جنس آلیاژ مانتزمتال یا فولاد ضد زنگ و لوله هایی از جنس برنج آلومینیوم یا آلیاژ مس- نیکل هستند، از حفاظت کاتدی برای حفاظت در مقابل خوردگیهای زیر استفاده میشود :

- خوردگی عمومی و گالوانیکی محفظه آب
- خوردگی سایشی صفحه لوله ها و ورودی لوله ها
- خوردگی شیاری و خوردگی گالوانیکی در شیارهای بین لوله ها و صفحه لوله ها هنگامی که آنها از مواد متفاوت ساخته شده باشند.
- خوردگی حفره ای سطوح داخل لوله ها

امروزه با طراحی صحیح یک سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان می توان مسائل ناشی از این خوردگیها را حل نمود. البته قابل ذکر است برای انجام طراحی صحیح حفاظت کاتدی نوع طرح کندانسور نیز نقش مهمی را بعهده دارد. جهت حفاظت کاتدی انواع متفاوتی از آندها وجود دارند، بر اساس اطلاعات بدست آمده بهترین توزیع جریان حفاظتی و در نتیجه بهترین حفاظت رامی توان از طریق نصب آندهای میله ای بر دیواره محفظه آب بدست آورد. اگر از آندهای

پلاتینه شده استفاده می شود بهتر است از آندهای نیوبیوم با پوشش نسبتاً ضخیم از پلاتین استفاده گردد. بخصوص اگر آب مورد استفاده آب شور باشد.

اخیراً از نوعی آند مگنیتی نیز استفاده شده است (شکل ۳۲). از مزایای این آند می توان سرعت مصرف بسیار پایین، استحکام بالا و مقاومت در مقابل سایش های مکانیکی را نامبرد.



شکل (۳۲): آند مگنتیات از نوع MT-6 برای حفاظت کاتدی کندانسورها

شکل هندسی محفظه آب بر روی نحوه توزیع آندها اثر می گذارد بخصوص هنگامی که دیواره محفظه دارای پوشش بوده و صفحه لوله ها بدون پوشش باشد. اگر دیواره انتهایی محفظه آب مسطح و موازی صفحه لوله ها باشد آندها باید با فواصل مساوی بر روی دیواره پخش شوند. اگر محفظه بصورت نیم کره بوده و یا نسبت به صفحه لوله ها زاویه دار باشد در این صورت صفحه لوله ها در داخل برد اعمال پتانسیل تمام آندها قرار خواهد داشت بنابراین آندی که به صفحه لوله ها نزدیکتر باشد جریان خروجی بیشتری را نسبت به آندهای دورتر ارائه خواهد کرد. اگر آب دارای

مقاومت ویژه بالا باشد در این صورت توزیع نا مناسب آندها موجب توزیع جریان غیر یکنواخت شده و در نتیجه در بعضی مناطق حفاظت اضافی و در مناطق دیگر حفاظت غیر کافی بوجود خواهد آمد.

اگر دیواره محفظه دارای پوشش نباشد، سطح فعال آندها باید در فاصله معینی از دیواره محفظه قرار گیرد تا بتواند توزیع مناسبی را هم برای دیواره و هم برای صفحه لوله ها ایجاد نماید. این مسئله بویژه هنگامیکه آب دارای مقاومت ویژه بالایی باشد از اهمیت خاصی برخوردار است.

یک روش برای حفاظت در مقابل خوردگی سایشی در قسمتهایی از داخل لوله ها، ایجاد حفاظت اضافی در صفحه لوله ها می باشد تحقیقات نشان میدهد که پلاریزاسیون در داخل لوله ها بتدریج با فاصله یافتن از صفحه لوله ها بشدت افت می کند.

در این تحقیقات از دو نوع کندانسور آزمایشی استفاده شده است که در آنها الکترودهای مرجع در فواصل معینی از صفحه لوله ها قرار داشته اند. در این آزمایشات جنس لوله ها از برنج آلومینیوم بوده و از آب دریا با مقاومت مخصوص ۰/۷۵ اهم متر و سرعت ۲ متر بر ثانیه استفاده شد. لوله ها از طرف سطح خارجی خود حرارت داده شدند. دیواره داخلی لوله، بدون استفاده از جریان حفاظتی، پتانسیلی حدود ۱۵۰- میلی ولت نسبت به SCE داشت. دانسیته جریان ایجاد شده با فاصله ۰/۱ متر از ورودی لوله در یک سطح کاتدی محاسبه شده معادل ۷۵۰ میلی آمپر بر متر مربع بود. در کندانسورها با یک آند از نوع Pt/Ti ، پس از ۱۴۴ ساعت، پتانسیل صفحه لوله ها برابر با ۱۰۱۱- میلی ولت بود. در عین حال پتانسیل در فاصله ۱۹۰ میلیمتری از ورودی لوله ۴۲۵- میلی ولت بود. همچنین در فاصله ۱۷۰۰ میلیمتری از ورودی لوله پلاریزاسیون کمی تا ۲۰۰- میلی ولت گرفته شد.

دانسیته جریان مورد نیاز برای ایجاد سطح حفاظت کافی بستگی به سرعت آب و میزان تلاطم آن دارد. در نظر گرفتن یک مقدار جریان کلی، بدلیل اختلاف زیاد بین کندانسورهای مختلف و نیز شرایط گوناگون جریان آب مشکل است، اما عموماً دانسیته جریان مورد نیاز در قسمت ورودی مخزن آب نباید کمتر از ۶۵۰ میلی آمپر بر متر مربع برای هر ۱۰۰ میلی متر از طول مجموعه لوله ها محاسبه شده باشد. دانسیته جریان مورد نیاز در خروجی مخزن بدلیل میزان تلاطم کمتر آب در این قسمت، خیلی کمتر است.

اگر سرعت آب در مدت عملکرد عادی کندانسور نسبتاً ثابت بوده و لوله ها نیز از جنس تیتانیم یا فولاد ضد زنگ فریتی نباشند. نیاز به کنترل پتانسیواستاتیکی مبدل - یکسو کننده نخواهد بود.

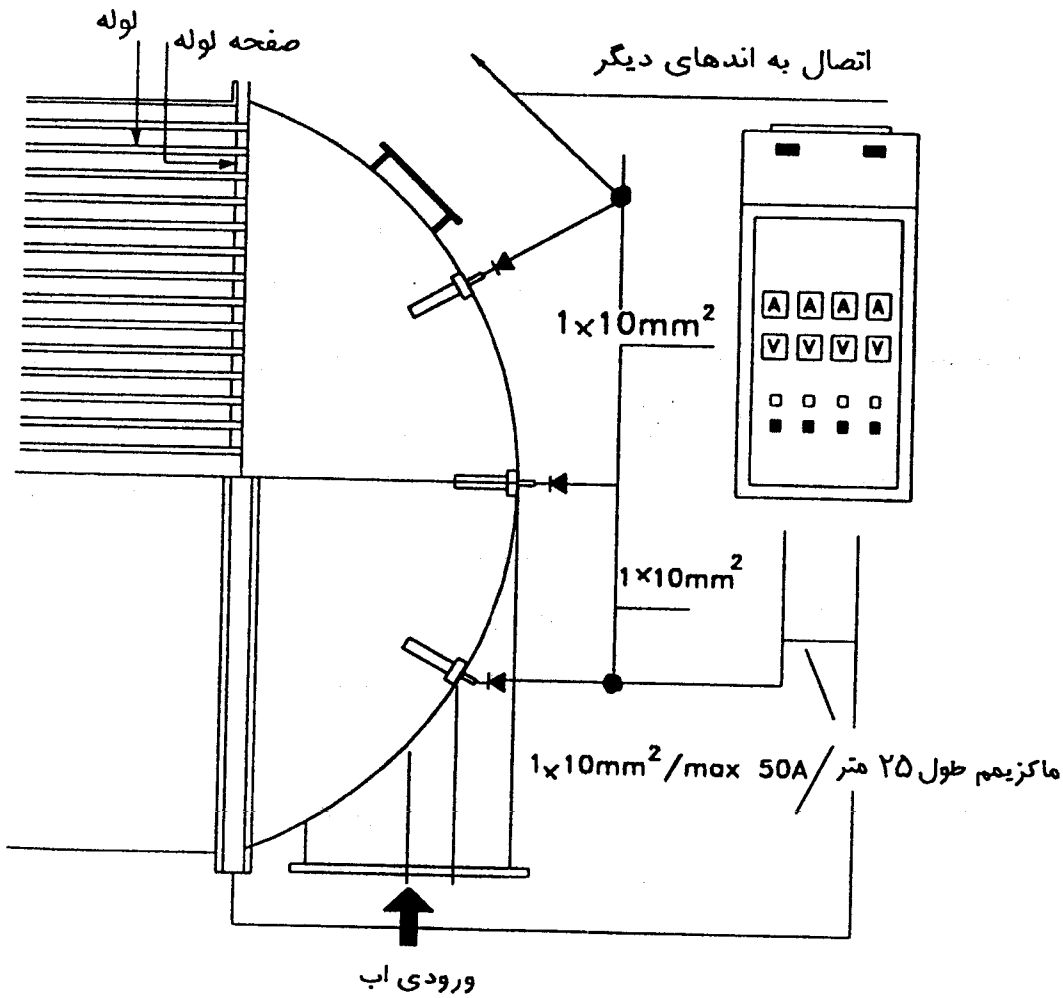
برای اطمینان از اینکه جریان حفاظتی نسبت به تغییرات مقاومت مخصوص آب، متغیر نباشد، لازم است از یک یکسو کننده با جریان ثابت استفاده شود.

اگر در مواقعی جریان آب متوقف شده و آب در داخل کندانسور راکد گردد خروجی جریان یکسو کننده باید کاهش یابد یا برای مدت کوتاهی قطع شود. دلیل آن اختلاف زیاد در دانسیته جریان مورد نیاز در حالات مذکور یعنی حالت

تلاطم و حالت رکود می باشد، اعمال دانسیته جریان بالا در آب راکد می تواند باعث ایجـاد رسـوبهای آهکـی حجیـم گردد.

برای تنظیم پتانسیل حفاظت به مقدار صحیح و پایش پتانسیل، مطلوب است که حداقل یـک الکـترود مرجـع دائمـی نزدیک صفحات لوله ای قرار داده شود. بهتر است از الکترودهای مرجع از جنس روی استفاده شود که دارای مقـاومت کافی در مقابل صدمات مکانیکی موجود در محفظه آب می باشد.

شکل (۳۳) یک محفظه آب با آندهای مگنتیتی را نشان می دهد. از نقطه نظر مکانیکی نیز مهم است تا آندها محکم بر دیواره محفظه نصب گردند زیرا بار مکانیکی وارد شده به آندها که از طریق ارتعاشات و جریانات آب بوجود می آیـد بسیار زیاد است.



شکل (۳۳): یک محفظه آب با آند مگنتایت نوع MT-6

روش معمول برای حفاظت داخل لوله های مسی کندانسور از خوردگی حفره ای، افزودن سولفات آهن بـه آب قبـل از ورود آن به کندانسور است، بنابراین با تولید یونهای Fe^{2+} ، لایه ای از اکسیدهای مرکب محافظ روی سطوح داخل لوله ایجاد می شود. در ابتدا یونهای Fe^{2+} از آندهای آهنی تولید می شدند. وقتی از سولفات فرو استفاده شود غلظت بهینه آن در آب در صورت استفاده بطور پیوسته ۰/۰۳ ppm و بطور متناوب ۱-۰/۱ ppm خواهد بود.

در سالهای گذشته از یک سیستم حفاظت کاتدی جریان اعمالی با آندهای آهنی در محفظه آب کندانسـورها اسـتفاده شده است، نتایج حاصل از این تحقیقات نشان می دهد که تلفیـق ایـن دو، هـم حفـاظت کـاتدی فراهـم آورده و هـم یونهای Fe^{2+} ایجاد می نماید. این سیستم طوری طراحی شده بود که مقدار Fe^{2+} وارد شده به آب خنـک کـن حـدود ۰/۰۰۳ ppm بود که این غلظت کمتر از غلظت $FeSO_4$ در حالت استفاده از آن بتنهایی می باشد. در هـر حـال تلفیـق این غلظت کم با حفاظت کاتدی، حفاظت کافی را ایجاد می کند و یک مزیت آن در مقایسـه بـا اسـتفاده از سـولفات آهن، ایجاد یک لایه اکسیدی بسیار نازک است که از دیدگاه انتقال حرارت نیز بسیار مطلوب مـی باشـد. از ایـن نـوع سیستم حفاظت کاتدی با استفاده از آندهای آهنی در ابتدا برای کندانسـورهای کشـتی اسـتفاده شـد و امـروزه چنـد کشتی با این نوع سیستم تجهیز شده اند که در تمام حالات حفاظت عالی برای آن گزارش شده است. همچنیـن نـوع مشابهی از این نوع سیستم تا حد زیادی در کندانسورهای نیروگاهی استفاده شده اسـت. در اکـثر حـالات لایـه هـای اکسید حاصله توانسته اند حفاظت کافی در مقابل خوردگی حفره ای داخل لوله ها نیز ایجاد نمایند.

بررسیها نشان می دهد در صورتی که آب خنک کننده حاوی سولفید باشد، اثر حفاظت کنندگی آن کاهش می یـابد، این حالت بویژه در حالتی که آب دارای ترکیبات گوگرد دار بوده و درجه حرارت آن نیز پایین باشد حادتر مـی شـود. همچنین مشخص گردیده که تشکیل لایه های اکسیدی در درجه حرارت زیر ۵ درجه سانتی گراد بسیار کندتر اسـت. تقلیل یافتن اثر حفاظت کنندگی نه تنها وقتی که یونهای آهن بصورت الکترولیتی تولید می شـوند آشـکار مـی شـود بلکه در حالتی که از سولفات آهن هم استفاده می کنیم محرز خواهد بود. بهرحال این اثر را می توان با مصرف روزانـه بالاتر و نیز با تزریق به موقع سولفات آهن در سیستم آب خنک کننده بهبود بخشید.

در طول سالهای اخیر تمایل به استفاده از لوله هایی از جنس تیتانیم و فـولاد ضـد زنـگ بـرای کندانسـورها افزایـش یافته است. در این کندانسورها صفحات لوله ها بکار گرفته شده از یک آلیاژ مس می باشد. استفاده از این لولـه هـا در کنار صفحات لوله ای از جنس آلیاژ مس می تواند منجر به خوردگی گالوانیکی صفحه لوله ها گـردد. در نتیجـه بـرای جلوگیری از خوردگی صفحه لوله ها به حفاظت کاتدی نیاز می باشد.

هنگامی که فولاد ضد زنگ فریتی و تیتانیم حفاظت کاتدی می شوند باید به این نکته توجه شـود کـه مـوادی از ایـن قبیل مستعد به نوعی خوردگی موسوم به تردی هیدروژنی هستند.

همچنین اطلاعات بدست آمده از کندانسور هایی که بطور کاتدی حفاظت می شوند و نیز دارای لوله هایی از فولاد ضد زنگ فریتی هستند نشان می دهند که تردی هیدروژنی فقط هنگامی اتفاق می افتد که انتهای لوله ها با پتانسیلهایی بسیار کمتر از ۸۰۰- میلی ولت نسبت به الکترود کالومل اشباع[۱] (SCE) پلاریزه شود.

آزمایشات انجام شده روی لوله های تیتانیم ثابت کرده است که حداقل در درجه حرارتهای نسبتاً پایین این مواد در مقایسه با فولادهای ضد زنگ فریتی، نسبت به تردی هیدروژنی مقاوم ترند. بدین علت که در این دماها دیفوزیون هیدروژن به داخل تیتانیم بکندی صورت میگیرد و هیدروژن مانند یک لایه هیدرید در سطح فلز باقی میماند. همچنین پیشنهاد شده است که در درجه حرارت زیر۴۵درجه سانتیگراد در آب دریا این محدوده پتانسیل میتواند پایینتر از ۱۰۰۰- میلی ولت نسبت به SCE باشد. این پیشنهاد بر اساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در آب حاوی ۳ درصد NaCl و در پتانسیلهای ۱۲۰۰- میلی ولت نسبت به SCE ارائه گردیده است. در تحقیقات دیگری در آب دریای طبیعی، هیدرید شدن در پتانسیل ۱۰۰۰- میلی ولت نسبت به SCE رخ داده است. نتیجه ای که از این آزمایشات استخراج میشود این است که حفاظت کاتدی مواد آهنی یا فولاد کربنی که در تماس با فولاد ضد زنگ فریتی یا تیتانیم قرار دارند در پتانسیلهای ۷۵۰- میلی ولت تا ۸۰۰- میلی ولت نسبت به SCE امکان پذیر بوده بدون اینکه خطر تردی هیدروژنی برای تیتانیم یا فولاد ضد زنگ فریتی وجود داشته باشد. بهرحال، برای اطمینان از اینکه، پتانسیل به مقادیر پایینتر کاهش نیابد باید پتانسیل یکسو کننده به طور پتانسیو استاتیکی کنترل شود.

۴-۸- حفاظت کاتدی پمپها

لزوم حفاظت کاتدی پمپها به طور قابل توجهی بستگی به طراحی آن دارد. یک نوع معمولی از پمپ اصلی آب در یک سیستم آب خنک کن استفاده می شود که دارای یک سانتریفوژ یک یا دو مرحله ای، پمپ عمودی پروانه دار، یک محور اصلی و یک محفظه فولادی با پوشش اپوکسی یا اپوکسی قطران ذغال سنگ می باشد. تمام قسمتهای متحرک آن مانند محور اصلی و پروانه از فولاد ضد زنگ هستند.

با انجام چنین طراحی، احتمال وقوع خوردگی گالوانیکی روی مواد فولادی وجود دارد. زیرا روی سطوح فولادی پوشش داده شده، هنگامی که دانسیته جریان آندی ناشی از عمل گالوانیکی در نقاط بدون پوشش مانند حفره های ریز خیلی زیاد باشد، خوردگی موضعی شدیدی اتفاق می افتد.

همچنین یک خطر دیگر که همان خوردگی شیاری است روی مناطقی از پمپ که از جنس فولاد ضد زنگ هستند به وجود می آید، و این بخصوص در زمانی که آب جریان نداشته و بطور راکد در پمپ باقی می ماند حادتر می باشد.

این نوع خوردگی، حتی در حالتی که اتصال الکتریکی بین فولاد و فولاد ضد زنگ نیز برقرار باشد اتفاق می افتد. از

---

(۱) Saturated Calomel Electrode

آنجا که فولاد دارای پوشش است پیل گالوانیکی ایجاد شده نمیتواند دانسیته جریان کاتدی کافی را بر روی فولاد ضد زنگ ایجاد کند تا از شروع و توسعه خوردگیهای موضعی جلوگیری نماید. با طراحی صحیح سیستم حفاظت کاتدی می توان هم خوردگی گالوانیکی روی فولاد و هم خوردگی شیاری روی فولاد ضد زنگ را متوقف کرد.

در پمپهای بزرگ مانند پمپهای اصلی آب خنک کن، حفاظت کاتدی را می توان هم به روش آندهای فدا شونده و هم از طریق سیستم های جریان اعمالی انجام داد. تقریباً تمامی قسمتهای داخلی پمپهای اصلی در نیروگاههای هسته ای با آند تجهیز می شوند.

بخصوص هنگامی که حفاظت با استفاده از آندهای فدا شونده اعمال می شود، ضروری است تا در صورت امکان سطوح بیشتری از کاتد پوشش داده شود بدین ترتیب جریان مورد نیاز برای حفاظت کاهش می یابد. در این حالت اندازه آندها را می توان کوچکتر و تعداد آندها را نیز کمتر انتخاب کرد و حتی می توان طول عمر نسبتاً طویلی را برای آند محاسبه نمود. غالباً پوشش دادن محفظه چدنی و محوری که از نوع فولاد ضد زنگ است یک مزیت است. بدلیل اختلاف در طراحی ساختمان پمپها یک طراحی حفاظت کاتدی جزئی را نمی توان بعنوان یک طراحی استاندارد بکار برد. طول عمر طراحی شده آند بر اساس نیاز مشتری انجام می شود اما طول عمر عادی حدود ۵ سال پیش بینی می شود.

دانسیته جریان مورد نیاز بدلیل سرعت بالای جریان آب، عموماً بالا است. روی فولاد سخت، این دانسیته جریان میتواند به چند صد میلی آمپر در متر مربع هم برسد، البته مقدار دقیق آن بستگی به سرعت آب دارد، اما در آب راکد این مقدار کمتر از ۱۰۰ میلی آمپر بر متر مربع است. مقادیر تقریبی دانسیته جریان ممکن است بصورت جدول زیر ذکر گردد :

- پروانه از جنس فولاد ضد زنگ	۱۰۰۰-۵۰۰	میلی آمپر بر متر مربع
- دیگر سطوح فولادی بدون پوشش	۲۵۰- ۱۵۰	میلی آمپر بر متر مربع
- سطوح فولادی دارای پوشش	۲۵-۱۰	میلی آمپر بر متر مربع

روی نواحی فلزی پوشش داده شده، دانسیته جریان مورد نیاز بر اساس کیفیت پوشش و ضخامت آن محاسبه میشود. هنگام طراحی یک آند داخلی، برای حفاظت از پمپها، این نکته خیلی مهم است که طراحی نباید بگونه ای باشد تا آندهای داخلی جریان آب را آشفته سازند.

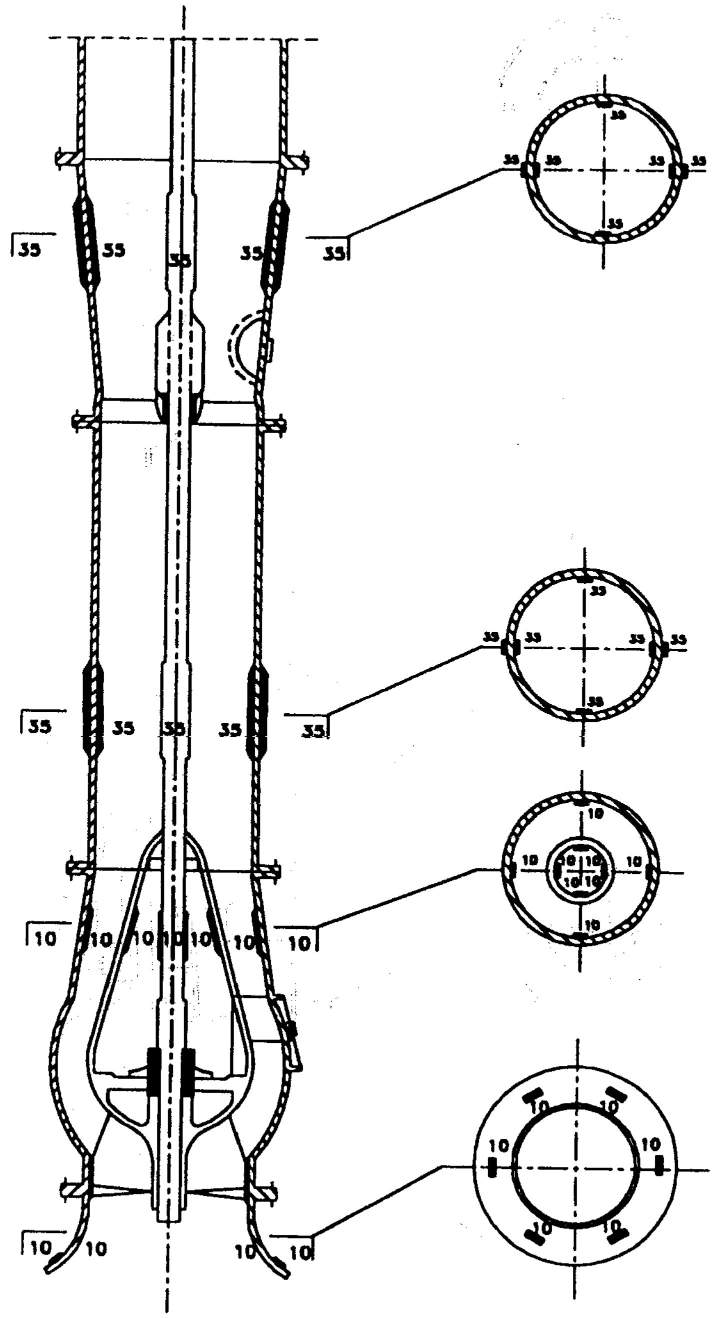
اشکال ۳۴ و ۳۵ دو نوع مختلف از پمپ اصلی آب خنک کن را نشان میدهند که در آنها آندهای فدا شونده توزیع شده اند از این دو نوع پمپ در نیروگاههای اتمی استفاده می شود. بعضی اوقات لازم است با طراحی ویژه ای به کمک آندهای کوچک، حفاظت را برای فضاهای باریک فراهم کرد. بنابراین می توان نوعی سیستم بصورت تلفیقی از آندهای فدا شونده و سیستم اعمال جریان، طراحی کرد. در این حالت نیز نمی توان از یک طراحی استاندارد استفاده کرد و بخاطر اختلاف در طراحی پمپها و شرایط عملی، هر حالت طراحی باید بطور جداگانه صورت گیرد.

شکل (۳۶) نیز نوعی پمپ اصلی آب خنک کن را نشان می دهد که در آن از ۴ آنـد میلـه ای Pt/Nb بـرای حفـاظت قسمتهای داخلی پمپ استفاده شده است. هرگز انتظار نمی رود که جریان حاصل از این آندها بتواند حفاظت کافی را برای سطوح داخلی فضاهای باریک نزدیک پروانه پمپ حتی اگر این سطوح با رنگ اپوکسی یا اپوکسـی قطـران ذغـال پوشش داده شده باشند را تأمین نماید.

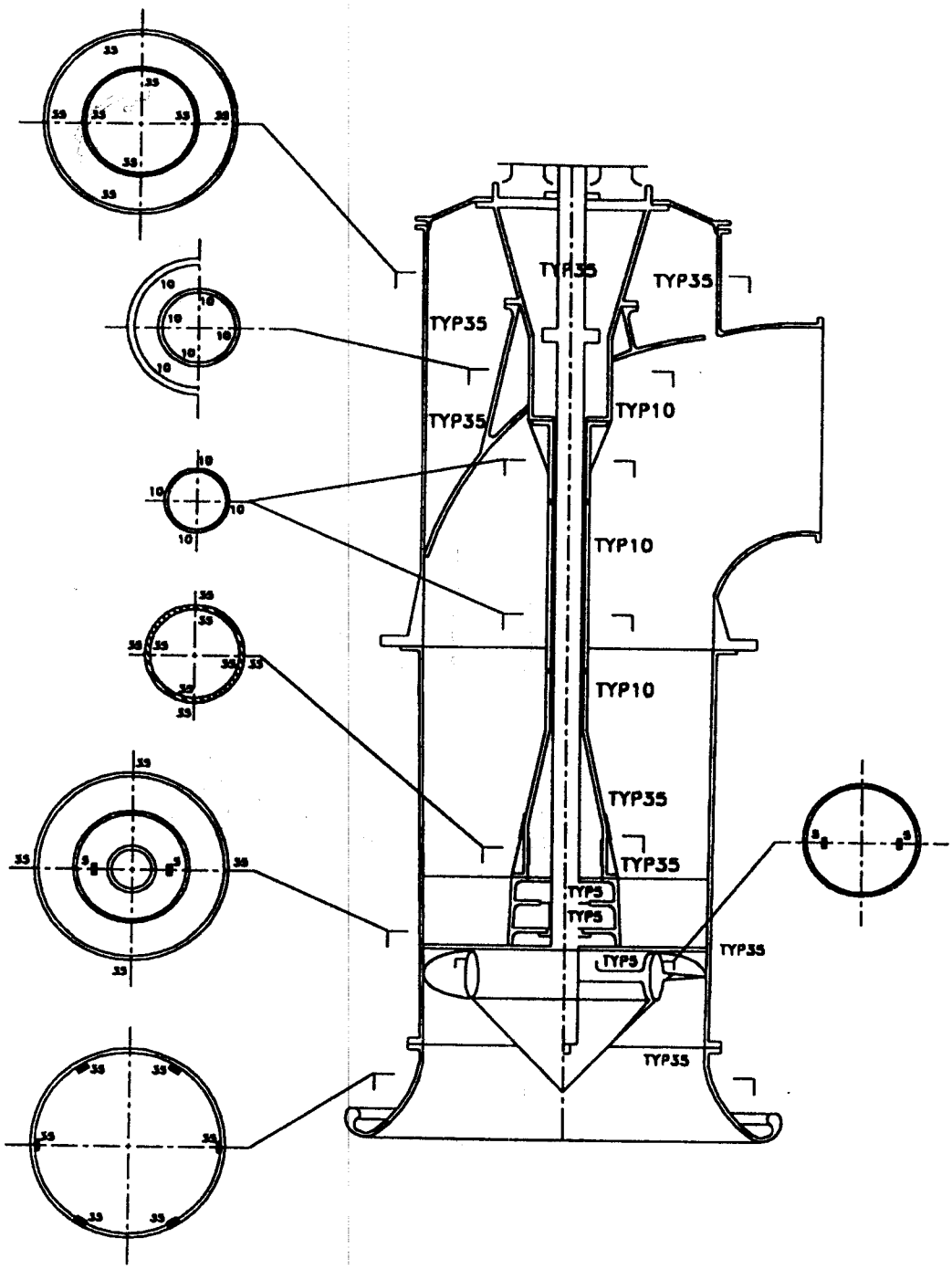
بنابراین علی رغم بکارگیری از سیستم حفاظت کاتدی اعمال جریان در داخل پمپ از آندهای فدا شـونده نـیز کـه در داخل فضاهای باریک نصب شده اند استفاده می گردد. ورودی پمپ نـیز بطـور الکـترولیتی بوسـیله دو آنـد از جنـس مگنتایت حفاظت می شود. این آندها روی بتن در خارج پمپ و نزدیک آن نصب می شـوند.بـرای مونیتورینـگ سـطح حفاظت و تنظیم جریان حفاظت، یک الکترود مرجع از جنس روی در داخل دیواره پمپ نصب می شود.

اگر پمپ بصورت متناوب، بمدت طولانی تر و در حالی که آب راکد است، کار نماید در این صورت هـم یکسـو کننـده باید بطور پتانسیو استاتیک کنترل شده و هم جریان مورد نیاز باید به میزان کمـتری تقلیـل یـابد. در غـیر اینصـورت بخاطر بالاتر بودن دانسیته جریان مورد نیاز در آب متلاطم نسبت به آب راکد حفاظت اضـافی شـدیدی در آن ایجـاد می شود.

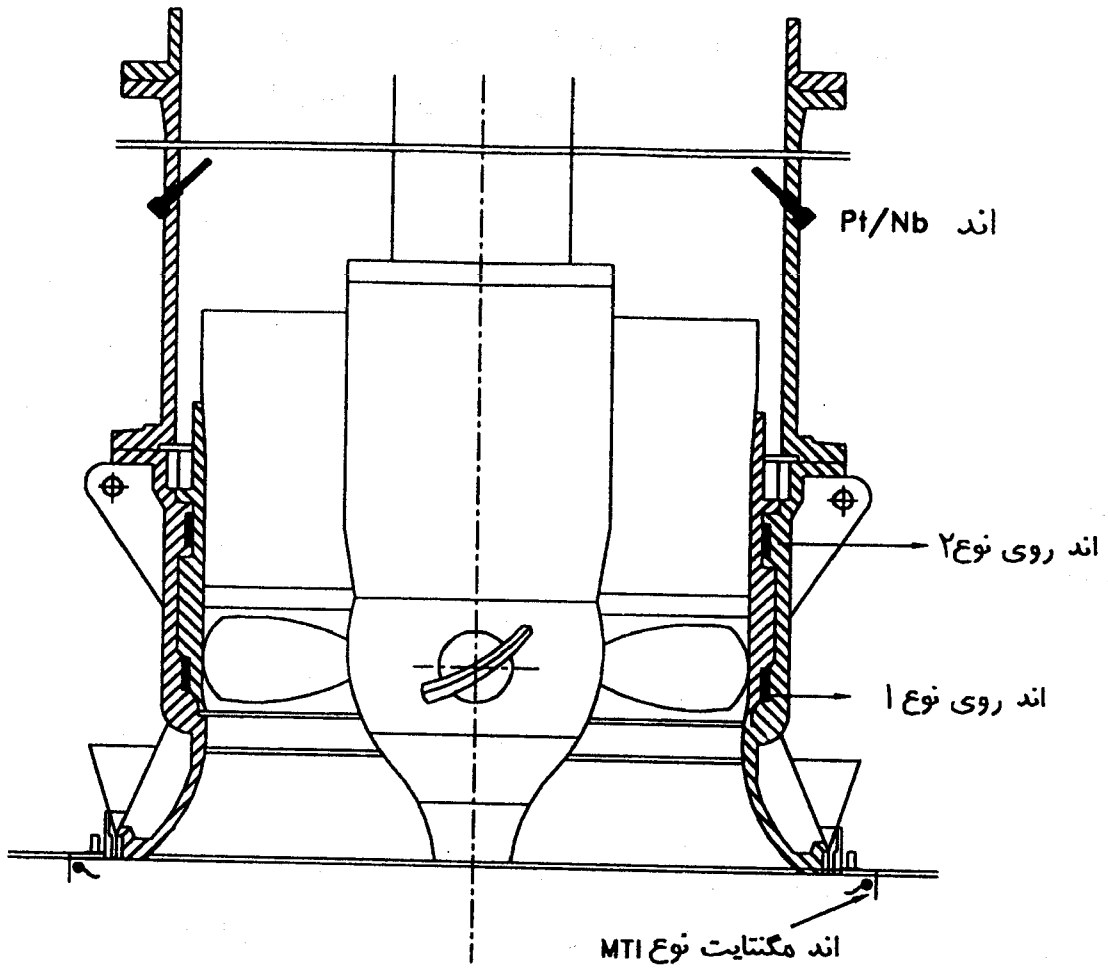
قسمتهای خارجی پمپ ها بسیار آسانتر از نواحی داخل پمپها حفاظت می شوند، این قسـمتها هـم از طریـق سیسـتم اعمال جریان و هم از طریق سیستم آندهای فدا شونده قابل حفاظت می باشند. طراحی چنین سیستم هایی متفـاوت از طراحی های متداول، برای سازه های فولادی پوشش داده شده نمی باشد



شکل(۳۴) : حفاظت کاتدی داخل نوعی پمپ با استفاده از آندهای روی



شکل (۳۵) : حفاظت کاتدی داخل نوعی پمپ با استفاده از آندهای روی



شکل (۳۶): ترکیبی از دو سیستم اعمال جریان و آندهای قربانی شونده برای حفاظت کاتدی داخل پمپ

۴-۹- حفاظت کاتدی ورودیها [1] و صافیهای کانال آب [2]

امروزه تقریباً تمام سطوح فلزی صافیهای ورودی آب خنک کن بطور کاتدی حفاظت می شوند. صافیهای ثابت و دروازه مجراهای ورودی عموماً از فولاد کربنی ساخته می شوند و با رنگ اپوکسی یا اپوکسی قطران ذغال سنگ پوشش داده می شوند. همچنین بعضی از قسمتهای صافیهای متحرک از فولاد کربنی پوشش داده شده و بعضی از قسمتهای دیگر آن از فولاد ضد زنگ آستنیتی تشکیل شده اند. دروازه مجراهای ورودی از ناحیه صافی فاصله دارند در صورتی که مقاومت مخصوص آب کمتر از ۱ اهم - متر باشد با آندهای فدا شونده آلومینیومی و اگر مقاومت مخصوص آب بالا باشد با استفاده از آندهای روی حفاظت می شوند.

هنگام استفاده از آندهای فدا شونده در صافی های ثابت باید به شدید بودن سایش مکانیکی روی پوشش توجه خاص نمود. شدت این سایش بحدی است که فقط پس از یک دوره کوتاه کاری خسارت جدی بر روی پوشش بوجود می آید. در نتیجه طراحی دانسیته جریان مورد نیاز باید با ضریب اطمینان بالایی همراه باشد در غیر اینصورت احتمالاً سطح حفاظت به سرعت به مقادیر پایین تری کاهش می یابد.

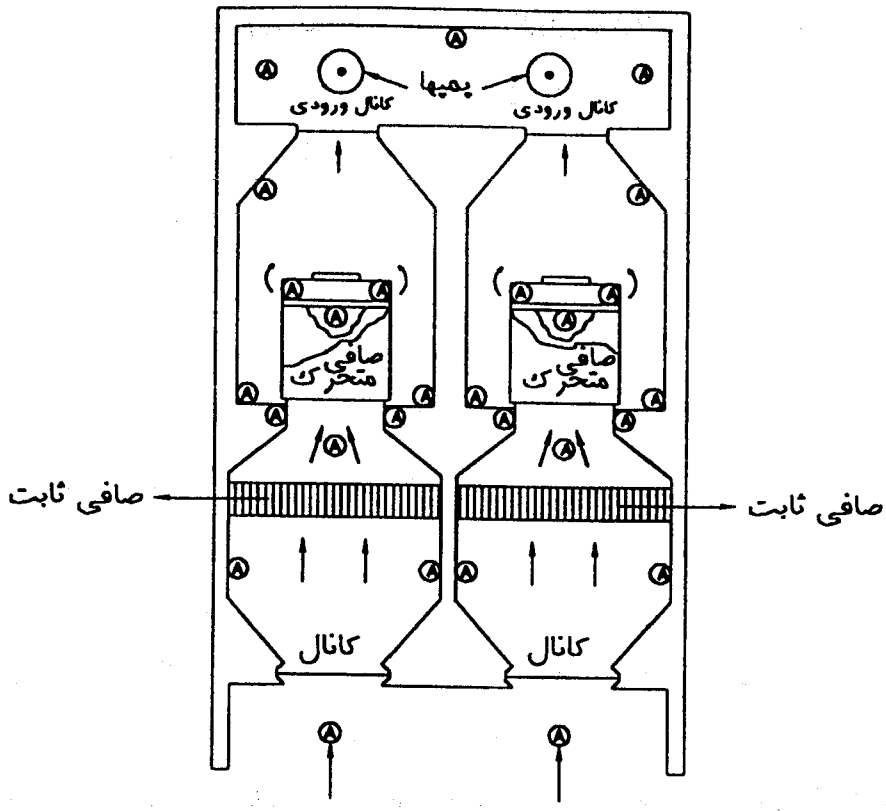
اگر مقاومت مخصوص آب متغیر باشد طراحی باید بر اساس بالاترین مقاومت مخصوص ممکن انجام شود. این موضوع سبب میشود تا خروجی جریان آند در طول دوره ای که مقاومت مخصوص آب افزایش می یابد افت زیادی نداشته باشد.

در قسمتهای مرکزی صافیها، کلیه اجزاء اغلب با سیستم حفاظت کننده منظم و مشابهی تحت حفاظت می باشند. شکل (۳۷) یک سیستم صافی با دو مجرای آب را نشان می دهد که در آن همچنین توزیع آندهای اصلی نشان داده شده است. در طراحی چنین سیستمی این مسئله مهم است که خروجی جریان حاصل از آندهای گروهی بتوانند بطور جداگانه کنترل شوند، زیرا جریان مورد نیاز برای قسمتهای مختلف سازه تفاوت زیادی باهم دارند. معمولاً آندها به دیواره های بتنی نصب می شوند. انواع مختلفی از این آندها وجود دارند. شکل (۳۸) نوعی آند مگنتیتی MT-4K را نشان می دهد.

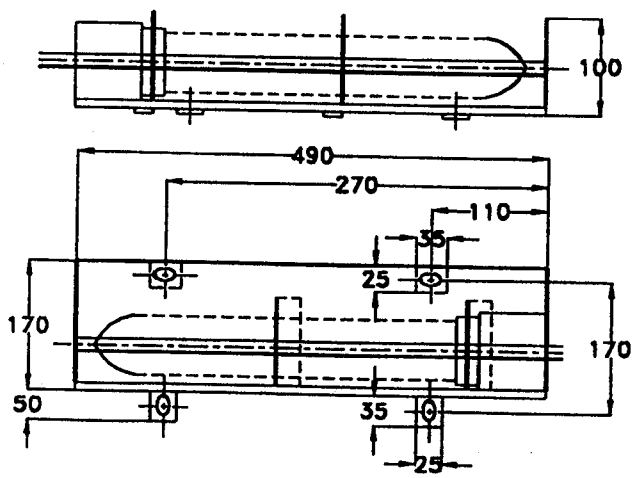
برای مونیتورینگ سطح حفاظت بهتر است از تعدادی الکترود مرجع ثابت از جنس روی که در نزدیکی سازه تحت حفاظت نصب می گردند استفاده شود. بعضی اوقات، هنگامی که قرار دادن الکترود مرجع نزدیک سازه امکان پذیر نباشد از یک الکترود پلاریزاسیون که در واقع ترکیبی از یک الکترود مرجع روی و یک الکترود فلزی قابل اتصال به سازه میباشد استفاده میشود. بطوری که مقدار واقعی پتانسیل حفاظت بر روی این الکترود فلزی اندازه گیری میشود.

---

۱) Gates ۲)Screens



شکل (۳۷): سیستم های صافی (Screening) با دو مجرای آب (محل آندها با علامت A نشان داده شده است.)



شکل (۳۸): آند مگنتایت MT-4K برای حفاظت کاتدی سیستم های صافی

اگر سازهء تحت حفاظت مشتمل بر آلیاژهای مختلفی همچون فولاد کربنی، و فولاد ضد زنگ باشد در این صورت می توان از یک الکترود از جنس فولاد ضد زنگ برای اندازه گیری میزان پولاریزاسیون بر روی آن سازه استفاده کرد. همچنین محاسبه دانسیته جریان کاتدی روی الکترود با اندازه گیری شار جریان روی آن امکان پذیر است. شکل (۳۹) یک نوع از الکترود پولاریزاسیون را نشان میدهد.

حفاظت صافیهای متحرک پیچیده تر از صافیهای ثابت است، زیرا در سازه صافیهای متحرک هم فولاد ضد زنگ و هم فولاد کربنی پوشش داده شده وجود دارد. برای نمونه ریلهای راهنما، زنجیرها و نگهدارنده شبکه صافیها از فولاد کربنی پوشش دار ساخته می شوند. در صورتیکه، شبکه صافیها از فولاد ضد زنگ ساخته شده اند. در نتیجه فولاد کربنی، بشدت تحت تأثیر خوردگی گالوانیکی قرار می گیرد. نتایج نشان می دهد که دریافت حفاظت کافی در فضاهای باریک روی ریلها، از آندهایی که در قسمت دورتری از آن واقعند امکان پذیر نیست.

بعضی از آندهای سیمی را باید مستقیماً در داخل فضای بسته ریلها قرار داد. بدلیل فاصله زیاد، ممکن نیست از سیم تیتانیوم یا نیوبیوم پلاتینه شدن یکنواخت استفاده کرد، همچنین بدلیل مقاومت مخصوص بالای این نوع آندهای سیمی، خروجی جریان در محل اتصال کابل، خیلی پایین بوده که این امر منجر به حفاظت ناکافی در آن قسمت میشود. اما با استفاده از نوعی آند سیمی مخصوص از Pt/Ti با محور مسی که در داخل لوله های پلاستیکی قرار گرفته این محدودیتها مرتفع میگردد. این نوع آند در شکل (۴۰) نشان داده شده است.

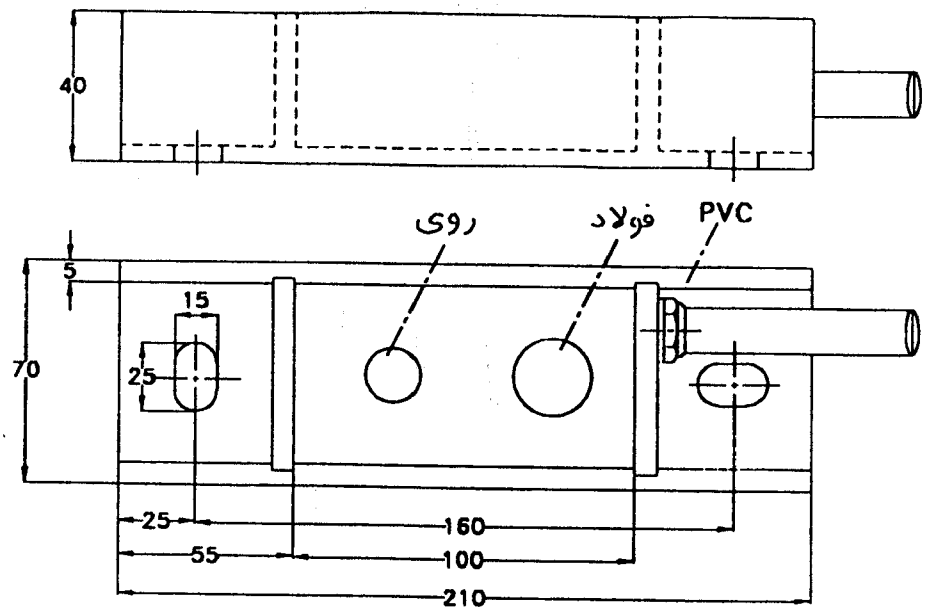
در شکل (۴۱) صافی متحرک با ۸ آند مگنتیت (MT-1) و ۲ آند سیمی نشان داده شده است. در این حالت نیز از دو الکترود پلاریزاسیون (یکی از جنس فولاد ضد زنگ و دیگری از جنس فولاد کربنی) برای مونیتورینگ استفاده میشود. موقعیت این الکترودها در شکل با P_1 و P_2 مشخص شده است.

۴-۱۰- حفاظت کاتدی داخل لوله ها

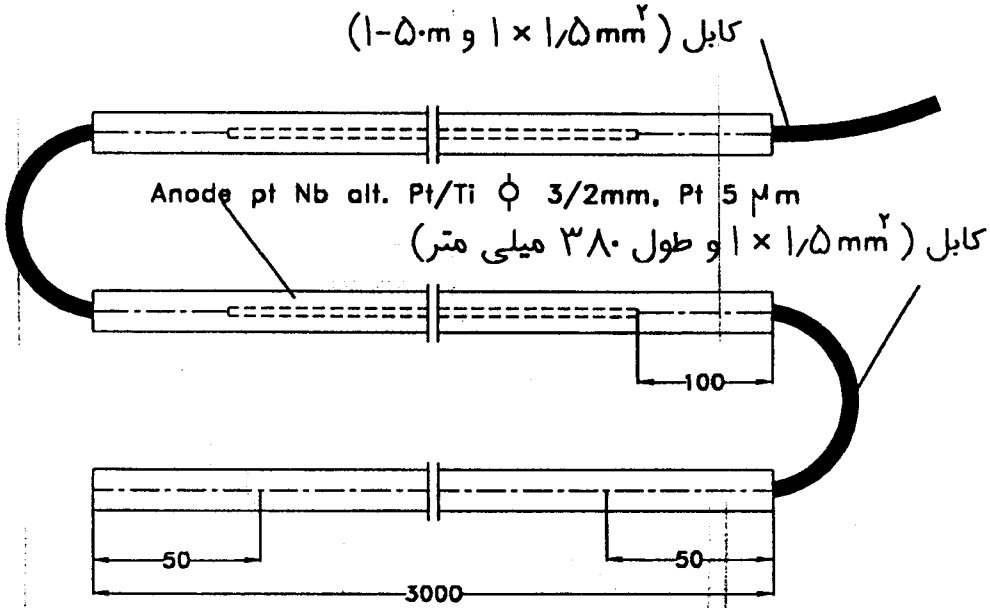
لوله هایی که در سیستم های خنک کننده آب دریا در نیروگاههای اکثر کشورها استفاده میشوند از فولاد کربنی پوشش داده شده هستند. در سوئد معمولاً در جایی که داخل لوله ها با پلاستیک پوشش داده شده اند به حفاظت داخلی احتیاج نبوده است. بهرحال هرگز نباید یک لایه نازک پوشش داخلی رنگ اپوکسی یا اپوکسی قطران ذغال بعنوان یک ممانعت کننده کامل خوردگی در نظر گرفت بلکه باید همواره آنرا با یک سیستم حفاظت کاتدی نیز تلفیق نمود.

طراحی یک سیستم حفاظت کاتدی داخل لوله ها در نیروگاهها با دیگر سیستم های حفاظت کاتدی داخل لوله تفاوتی ندارد. در نتیجه میتوان از قوانین عمومی طراحی که برای مقاومت مخصوص آب، سرعت آب ، نوع پوشش بکار رفته و نوع جنس لوله، در نظر گرفته می شود استفاده کرد.

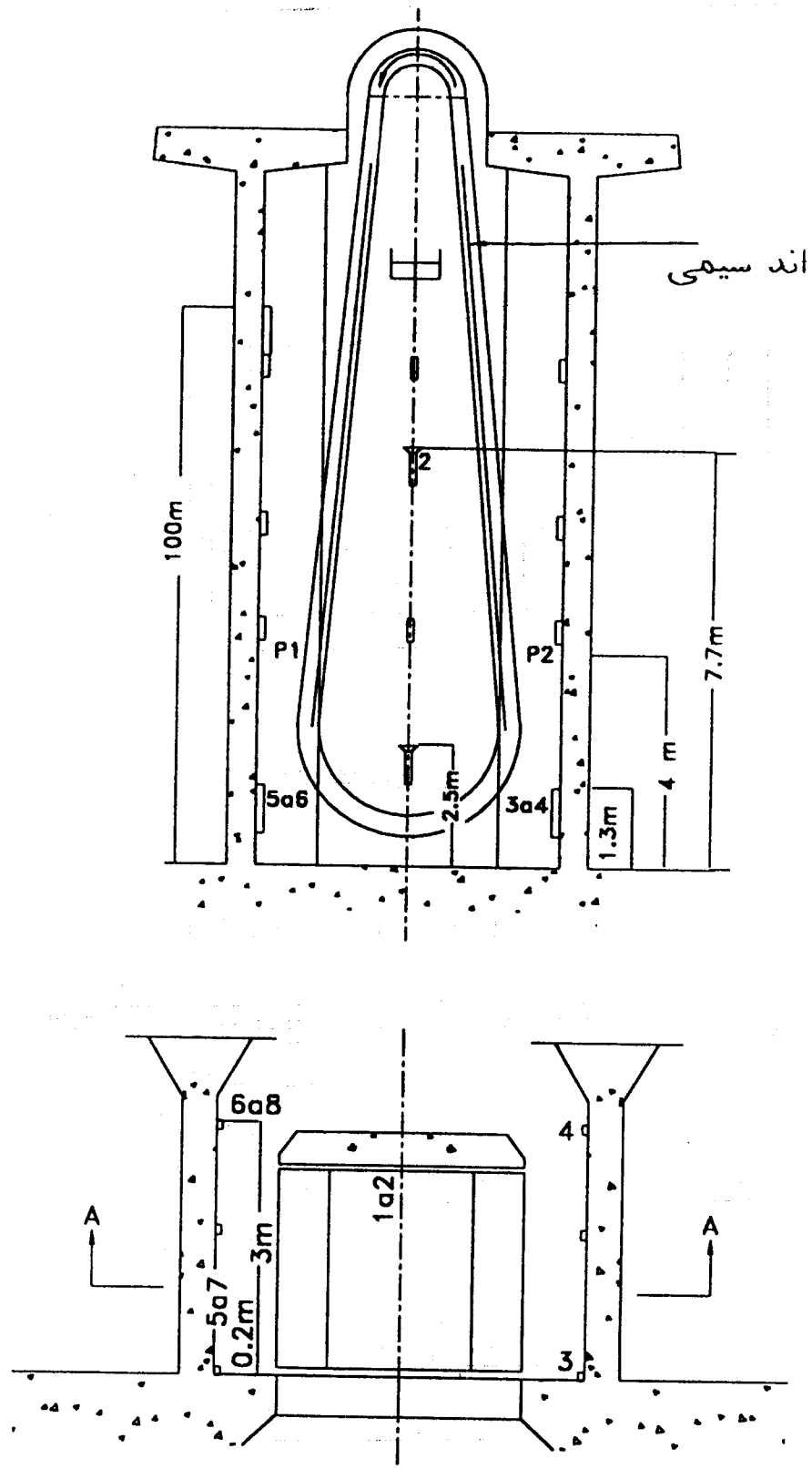
برای حفاظت کاتدی از طریق سیستم جریان اعمالی، از آندهای میله ای نیوبیوم یا تیتانیم پلاتینه در امتداد شعاع لوله استفاده می شود که این آندها در سرتاسر لوله توزیع می شوند. مشکلی که در ارتباط با این طراحی وجود دارد



شکل (۳۹): الکترود پولاریزاسیون



شکل (۴۰) : آند سیمی مخصوص از جنس Pt/Ti با هسته مسی در داخل لوله های پلاستیکی



شکل (۴۱): حفاظت سیستم صافی متحرک با آندهای مگنتایت (با شماره ۸-۱)، آندهای سیمی و الکترودهای پولاریزاسیون (P_1 و P_2)

شماره استاندارد: ۶۹/۱	شناخت سیستم های حفاظت کاتدیک	صفحه ۷۲
معاونت تحقیقات و فن آوری	استاندارد و آئین کار سیستم های حفاظت کاتدی	تاریخ :شهریور ۷۹

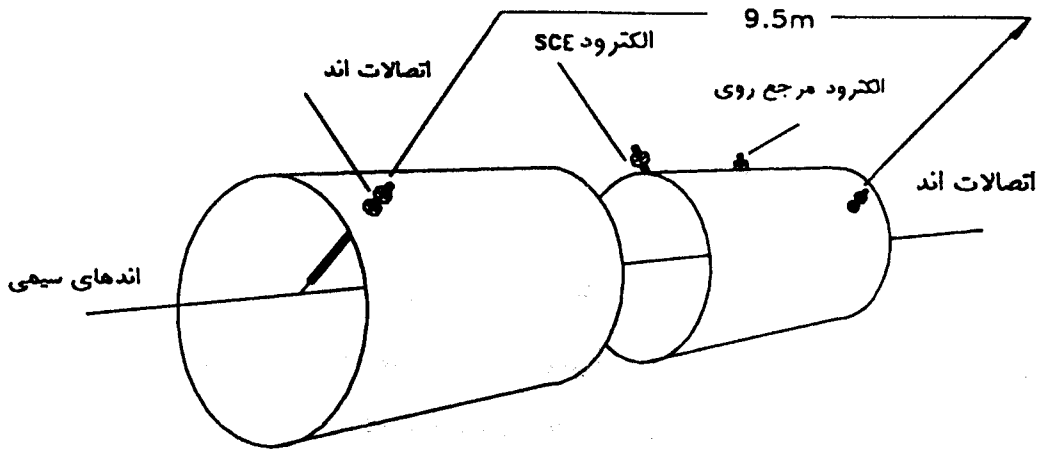
این است که برای اطمینان از حفاظت کامل به تعداد زیادی از آندها در لوله نیاز است، بخصوص اگر لوله پوشش داخلی نداشته و یا کیفیت پوشش ضعیف و قطر لوله نیز کوچک باشد.

افزایش سرعت آب مستلزم نزدیکتر شدن فواصل بین آندهاست. سرعت زیاد آب بدین معنی است که ضخامت لایه دیفوزیون برای نفوذ اکسیژن در سطح کاتد کاهش یافته است. این پدیده سبب می شود که دانسیته جریان حدی برای احیای اکسیژن افزایش یافته و در نتیجه دانسیته جریان لازم برای ایجاد پتانسیل حفاظت افزایش می یابد. در یک مقاومت مخصوص ثابت آب ، دانسیته جریان بالاتر به منزله افت پتانسیل در امتداد جهت حرکت آب در لوله است و در نتیجه نیاز به کمتر شدن فواصل بین آندها می باشد.

در بسیاری حالات طراحی مربوط به آند میله ای توزیع شده، غیر اقتصادی است بنابراین ممکن است از نوعی آند سیمی که در مرکز لوله قرار می گیرد استفاده شود، آندهای سیمی از جنس تیتانیم و نیوبیوم پلاتینه شده می باشند. چنین طراحی آندی از لحاظ توزیع جریان مطلوب بوده می توان از آن برای لوله هایی که در آن آب با مقاومت مخصوص بالا جریان دارد استفاده شود. شکل (۴۲) نوعی سیستم آندی سیمی را نشان می دهد که برای حفاظت لوله فولادی AISI 304 S/S در سیستم های آب شیرین کن استفاده می شود.

طول لوله ۱/۶ متر و قطر آن ۱ متر است. نوع سیم آندی، تیتانیم با پوشش پلاتین به ضخامت ۲/۵ میکرومتر است که روی اتصال دهنده های تیتانیمی به طول ۲۵۰ میلی متر معلق می شود. این اتصال دهنده ها نیز کاملاً با لایه پلاتینیم به ضخامت ۵ میکرو متر پوشش می شوند. جریان از طریق این اتصالات به سیم آندی می رسد. فاصله هر دو محل اتصال نسبت به هم ۹/۵ متر است برای مونیتورینگ توزیع جریان حفاظت از ۵ الکترود مرجع ثابت از جنس روی استفاده می شود. همچنین از یک الکترود کالومل برای کالیبره کردن آنها استفاده می گردد.

اگر داخل لوله پوشش داده شود، ترجیحاً از آندهای میله ای استفاده می شود و برای پوششی با کیفیت عالی در آب با مقاومت مخصوص کم، این امکان وجود دارد که آندها در فاصله بیشتری از یکدیگر نسبت به یک لوله فولادی بدون پوشش قرار گیرند. در نظر گرفتن یک فاصله کلی امکان پذیر نیست زیرا پارامترهایی مانند مقاومت آب ، سرعت جریان آب و کیفیت پوشش، اثرات متفاوتی داشته و برای هر حالت باید یک سیستم حفاظت کاتدی معینی طراحی شود. در ضمن داخل لوله ها را می توان با آندهای فدا شونده نیز حفاظت کرد. البته این بیشتر برای مواقعی است که لوله حاوی آب دریا با مقاومت مخصوص پایین باشد. بهرحال برای رسیدن به توزیع جریان کافی، ضروری است که تعداد زیادی آند در امتداد لوله توزیع گردد. در این رابطه نوعی سیستم با آندهای استوانه ای از جنس روی که روی سیم فولادی قرار میگیرد ابداع شده است. میله اتصال آندها به شکل صحیحی به جداره لوله متصل می شوند. این آندها بسته به جریان خروجی مورد نیاز آند و نیز طول عمر آند در اندازه های استاندارد متعددی ساخته می شوند.



شکل (۴۲) : لوله فولاد ضد زنگ با حفاظت کاتدی داخلی از نوع سیستم اعمال جریان توسط آندهای سمی Pt/Ti

۵- نتایج تحقیقات و بررسیهای انجام گرفته

۵-۱- مقدمه

همانطور که قبلاً عنوان گردیده است از حفاظت کاتدی عمدتاً برای حفاظت سازه های مدفون در خاک، سازه های غوطه ور در الکترولیت وسازه های حاوی الکترولیت استفاده می شود. در نیروگاهها انواع مختلف این سازه ها موجود میباشند بنابراین نیاز به استفاده از حفاظت کاتدی بعنوان روش مطمئن برای کنترل خوردگی حائز اهمیت است.
قابل ذکر است که استفاده از حفاظت کاتدی هم از دیدگاه اقتصادی و هم از دیدگاه پیشگیری از خطرات بسیار مفید می باشد در این قسمت تعدادی از فوائد استفاده از حفاظت کاتدی ارائه می گردد :

۱- ممانعت از التزام به استفاده صرف از آلیاژهای گرانقیمت در ساخت مخازن و لوله ها و غیره

۲- جلوگیری از انجام طراحیهای بیش از حد در ساخت مخازن و لوله ها، بدین صورت صرفه جویی قابل ملاحظه در مواد بوجود آمده و از طرفی با سبکتر شدن مخازن و لوله ها هزینه حمل و نقل کاهش یافته و نصب آنها نیز آسانتر می شود.

۳- جلوگیری از هزینه های سنگین و طاقت فرسای مربوط به تعمیر و یا تعویض قطعات خورده شده، قابل ذکر است که در اکثر موارد در خطوط لوله مدفون در خاک و یا غوطه ور در دریا پیدا کردن محل خوردگی و تعمیر آن کار بسیار مشکل و پر هزینه می باشد.

۴- جلوگیری از بهدر رفتن مواد از یک سازه خورده شده

۵- جلوگیری از خوردگی لوله ها و در نتیجه آغشته شدن آب مقطر نیروگاهی به آبهای آلوده و ناخالصی ها که در اثر آن خوردگی در تمام قطعات موجود در فرآیند تولید برق تشدید می گردد.

۶- جلوگیری از آلودگی محیط بخصوص آبهای زیر زمینی در اثر نشتی های حاصل از خوردگی در مخازن سوخت یا لوله های حامل سوخت.

۷- جلوگیری از خطرات مربوط به انفجار، آتش سوزی و خروج گازها و مواد سمی در اثر نشتی های حاصل از خوردگی در مخازن و لوله ها

۸- جلوگیری از آسیب رسیدن به وسایل و قطعات گرانقیمت نیروگاهی در اثر خوردگی در سازه های اطراف آنها

تجربیات حاصل از کار و تحقیق در نیروگاههای سوخت فسیلی و همچنین نیروگاههای اتمی نشان می دهد که شدیدترین مسائل خوردگی در سیستم های آب خنک کن آنها واقع می شود. بخصوص هنگامیکه از آب دریا یا آب شور بعنوان آب خنک کن استفاده شود.

فاکتورهای متعدد دیگری نیز در سیستم های آب خنک کن وجود دارد که ممکن است سرعت خوردگی مواد فلزی مورد استفاده را افزایش دهند. این فاکتورها عبارتند از :

۱- بالا بودن سرعت آب و وجود تلاطم در جریان آب

۲- حضور ناخالصی ها در آب

۳- تشکیل لایه های سطحی و در نتیجه افزایش خوردگیهای موضعی

۴- کلر دهی آب بمنظور جلوگیری از تشکیل لایه های سطحی

۵- در تماس قرار گرفتن مواد فلزی مختلف که ایجاد خوردگی گالوانیکی می نمایند.

علاوه بر استفاده از ممانعت کننده های خوردگی، حفاظت کاتدی نیز بطور گسترده بمنظور کاهش خوردگی در قسمتهایی از نیروگاهها استفاده شده است و عموماً با موفقیتهای بزرگی همراه بوده است. قابل ذکر است که در مواردی که یا این سیستم ها بطور صحیح طراحی نشده اند و یا شرایط عملی بطور کامل مشخص نبوده است حفاظت قابل قبولی در این سیستم ها مشاهده نشده است.

اجزاء اصلی در سیستم های آب خنک کن که باید حفاظت شوند عبارتند از :

۱- کندانسورها و خنک کننده ها

۲- پمپها

۳- کانالهای آب خنک کن و صافی های متحرک و ثابت

۴- سطوح داخلی لوله ها

۵-۲- بررسی بازدیدهای بعمل آمده

برای آشنایی با نحوه کار سیستم های حفاظت کاتدی موجود در نیروگاهها و بازنگری و ارزیابی بر عملکرد سیستمهای تحت حفاظت کاتدی و شناساندن اهمیت استفاده از حفاظت کاتدی برای سازه های نیروگاهی برنامه بازدید از نیروگاهها تنظیم گردید. در این برنامه از سه نیروگاه نکا، توس و زرگان بازدید بعمل آمد. گزارش این بازدیدها تهیه شده است. خلاصه این گزارشات بشرح زیر می باشد :

۵-۲-۱- نیروگاه شهید سلیمی نکا

تجهیزاتی از این نیروگاه که تحت حفاظت کاتدی می باشند عبارتند از :

الف - لوله های مدفون در خاک

در این نیروگاه ۳ نوع لوله گاز با قطرهای ۱۰۰، ۱۲۵و ۱۰۰۰ میلیمتر و طولهای بترتیب ۶۰۰، ۷۰۰و ۸۰۰ متر در زمین مدفون می باشند ضخامت جداره این لوله ها ۶ میلیمتر بوده و نوع پوشش آنها پوشش قیری و پوش پلی اتیلن میباشد.

دو لوله با قطر بزرگتر با استفاده از سیستم اعمال جریان و لوله سوم با استفاده از آندهای فدا شونده منیزیمی حفاظت می شوند. نوع آندهای سیستم اعمال جریان عبارت از آندهای آهنی با سیلیسیم بالا با بکفیل کربنی میباشد. قابل ذکر است که احداث لوله ها در سال ۱۳۵۵ انجام شده و سیستم حفاظت کاتدی آنها در سال ۱۳۶۰ نصب شده است. متأسفانه نقشه ها و مدارک طراحی مربوط به سیستم حفاظت کاتدی لوله ها در اختیار محققین قرار داده نشد. از

لوله ها در ایستگاه های آزمون، اندازه گیری پتانسیل بـا اسـتفاده از الکـترود مرجـع مـس - سـولفات انجـام گردیـد. پتانسیل ها بین ۱/۱۵- ولت تا ۰/۹۰- ولت قرار داشتند.

ب - سطح خارجی کف مخازن

شرایط مخازن ذخیره سوخت موجود در این نیروگاه بشرح زیر است :

۱- یک مخزن گازوئیل و دو مخزن ذخیره مازوت با قطر ۷۵ متر و ارتفاع ۱۶ متر که دارای پوشش اپوکسی بوده و بر روی لایه ای از بتون مستقر شده اند. این مخازن از داخل دارای پوشش اپوکسی بوده و سطح خارجی کف آنـها نیز با سیستم اعمال جریان تحت حفاظت کاتدی می باشند. نوع آندهای بکار رفته در آنها نیز آهن بـا سیلیسـیم بالا و بکفیل کربنی می باشد. این مخزن فاقد الکـترود مرجـع مرکـزی از جنـس Zn بـوده و پتـانسیل آن توسـط الکترود مرجع مس - سولفات مس اندازه گیری می شود. دستگاه یکسو کننده سیستم اعمال جریان با هوا خنـک شده و ولتاژ و آمپر خروجی بترتیب ۱۶ ولت و ۶۵ آمپر می باشد.

۲- یک مخزن ذخیره مازوت کوچکتر که دارای پوشش اپوکسی بوده و بر روی لایه ای از آسفالت مستقر شده است. این مخزن از داخل دارای پوشش اپوکسی بوده و سطح خارجی کف آن نیز با سیستم آندهای فدا شونده منیزیمی و بکفیل از نوع مخلوطی از سولفات کلسیم آبدار و بنتونیت تحت حفاظت کاتدی است. متأسفانه نقشه های مربوط به حفاظت کاتدی مخازن در دسترس نبود. و پتانسیل مخزن - خاک نسبت به الکترود مرجع مس - سولفات مس اندازه گیری و پتانسیل ۱/۱۵- ولت قرائت گردید. طبق گفته مسئولین، پتانسیل های این مخازن بطور ماهیانه اندازه گیری شده و ثبت می گردد.

۳- سیستم خنک کننده

آب خنک کن این نیروگاه آب دریا و سیستم خنک کننده آن کندانسور می باشد. حداقل و حداکثر دمـای ورودی آب بترتیب ۷ و ۳۱ درجه سانتیگراد است. دمای خروجی آب نیز ۱۰درجـه سـانتیگراد بیـش از دمـای ورودی آن می باشد. نوع سیستم حفاظت کاتدی داخل کندانسور نوع آندهای فدا شونده می باشد. تعـداد ۱۹۲ آنـد قربـانی شونده از جنس آهن مالیبل با ابعاد ۱۰×۱۲۰×۱۵۰ میلیمتر و وزن ۲ کیلو گرم در این کندانسـور اسـتفاده شـده است. این آندها معمولاً هر ۹ ماه تا یکسال یکبار مورد بازرسی قرار گرفته و در صورت لزوم تعویض می گردد.

کانالهای ورودی آب دریا توسط آندهای فدا شونده منیزیمی تحت حفاظت کاتدی می باشند. فیلتر های ورودی نیز بـا استفاده از سیستم اعمال جریان و آندهای آهن با سیلیسیم بالا تحت حفاظت کاتدی می باشند تعداد فیلترها ۴ عدد می باشد که هر دو فیلتر توسط یک دستگاه یکسو کننده که توسط هوا خنک میشوند تحت اعمال جریان هستند.

د - اسکله

در این نیروگاه یک اسکله با صفحات فولادی وجود دارد. طول مستقیم صفحات ۸۰۰ متر و ارتفاع آن از کف دریا ۶ متر بوده و صرفاً با پوشش اپوکسی قطران ذغال سنگ حفاظت شده و تحت حفاظت کاتدی نمی باشند.

اطلاعات در ارتباط با دستگاه های یکسو کننده مورد استفاده :

ولتاژ A.C ورودی : ۳۸۰ ولت	خروجی : ۱۰۰ ولت
آمپر خروجی : ۱۰۰ آمپر	نحوه خشک شدن یکسو کننده : با هوا
مقطع کابل مثبت : ۵۰×۲۰ میلی متر مربع	مقطع کابل منفی : ۵۰×۲ میلی متر مربع
ولتاژ قرائت شدن : ۱۶ ولت	جریان قرائت شده : ۶۵ آمپر

۵-۲-۲- نیروگاه حرارتی توس

در این نیروگاه ۳ نوع لوله حامل گاز، آب خنک کن و آب های پساب بانضمام مخازن آب داغ و همچنین لوله های ورودی و خروجی به برج خنک کن تحت حفاظت کاتدی می باشند. حفاظت کاتدی در این نیروگاه کلاً با روش اعمال جریان و با استفاده از یک دستگاه یکسو کننده انجام میگیرد. در ضمن از یک بستر آند متمرکز با تعداد ۲۰ عدد آند از جنس آهن با سیلیسیم بالا استفاده می شود. دستگاه مبدل و یکسو کننده کل سیستم های تحت حفاظت داخل اطاق و روی دیوار قرارداده شده اند. در ضمن در اطاق کنترل مرکزی نیروگاه نیز مقدار پتانسیل اعمال شده بر تمام سازه های تحت حفاظت مونیتور می شود. مقدار این پتانسیل در زمان بازدید در حدود ۲/۳ ولت بود. این سیستم مونیتورینگ تنها مجهز به یک چراغ سیگنال خطا و یک ولت متر بود. در این نیروگاه مجموعاً ۶۴ ایستگاه آزمون حفاظت کاتدی وجود دارد. برنامه دقیق و ادواری برای ثبت اطلاعات از این ایستگاهها وجود ندارد. این ایستگاهها بطور تصادفی مورد ارزیابی قرار میگیرند. در این نیروگاه چندین مخزن بزرگ ذخیره سوخت وجود دارد که همه آنها توسط رنگ حفاظت می شوند و هیچکدام تحت حفاظت کاتدی نمی باشند. مشخصات یکسو کننده بشرح زیر است :

ابعاد : ۳۰۰×۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلیمتر	ولتاژ AC ورودی : ۲۲۰ ولت
ولتاژ DC خروجی : ۴۰ ولت	آمپر خروجی : ۴ آمپر
عامل یکسو کننده : سلنیوم	نحوه خنک شدن : با هوا
قطر کابل مثبت : ۶×۴ میلیمتر مربع	قطر کابل منفی : ۶×۴ میلیمتر مربع

برای خنک کنندگی این نیروگاه از برج خنک کن استفاده می شود. که تمام مخازن و لوله های مدفون در اطراف این برج تحت حفاظت کاتدی بوده و تمام مخازن و لوله هایی که مدفون نیستند بطور دقیق عایق بندی شده اند. در اطراف برج خنک کن تعداد زیادی ایستگاه آزمون وجود دارد.

۵-۲-۳- نیروگاه حرارتی زرگان

این نیروگاه از ابتدای سال تأسیس و راه اندازی (۱۳۵۴) دارای یک سیستم حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان بوده که توسط شرکت GEC طراحی و نصب شده است. این سیستم دارای یک بستر آند متمرکز از نوع آندهای گرافیتی بوده که توسط آن عمدتا" خطوط لوله مدفون آب و گاز تحت حفاظت کاتدی بودند. این سیستم تا سال ۱۳۶۲ فعال بوده است. در این سال بعلت پاره ای از مشکلات نیروگاه زرگان تصمیم به بازنگری این سیستم می گیرد که در طی آن از یک شرکت ایرانی برای این امر دعوت بعمل می آورد. مسئولین این شرکت در طی اجرای این طرح محل نصب بستر آند را از موقعیت قبلی به محل دیگری تغییر داده اند. متأسفانه مدارک و مستندات طرح جدید در آرشیو دفتر فنی نیروگاه قابل دسترس و یا موجود نبودند. بنابراین مستندات قبلی با وضع جدید سیستم های حفاظت کاتدی تطابق نداشتند.

در مرحله بعد با تهیه الکترود مرجع مس - سولفات مس و یک عدد ولتمتر آزمایشات پتانسیل سنجی در ایستگاههای آزمون سیستم حفاظت کاتدی انجام شد.پتانسیل های اندازه گیری شده بطور متوسط حدود ۰/۵۵- ولت بود. کوچکترین ولتاژ ۰/۲- ولت و بزرگترین آن ۰/۹۷- ولت بود. با توجه به پتانسیل های اندازه گیری شده از مبدل و یکسو کننده بازدید بعمل آمد. نکته جالب توجه این بود که با آنکه ولتمتر تابلو عدد۱۲ ولت را نشان میداد آمپرمتر تابلو بر روی صفر قرار داشت. با در نظر گرفتن این مطلب که ممکن است اشکالی در آمپر متر تابلو وجودداشته باشد بجای فیوز خروجی، آمپر متر خارجی بطور سری در مدار قرار داده شد که نتیجه همان ولتاژ ۱۲ ولت و جریان صفر بود. برای اطمینان بیشتر پس از قطع کلید اصلی یکسو کننده اندازه گیری ولتاژ در ایستگاههای آزمون مجددا" انجام پذیرفت و هیچگونه تغییری در قرائت ولتاژ های اندازه گیری شده مشاهده نگردید که این نشان دهنده قطع کامل سیستم حفاظت کاتدی نیروگاه زرگان می باشد.

واحد دوم نیروگاه که در سال ۱۳۵۴ توسط GEC طراحی شده بود تا سال ۱۳۶۴ اجرا نشده بود پس از نصب و اجرای واحد دوم نیروگاه توسط یک شرکت کره ای سیستم های حفاظت کاتدی آن نیز مطابق نقشه های طراحی شده GEC اجرا گردیده است. بعلت قفل بودن محفظه مبدل و یکسو کننده، قرائت پتانسیل و جریان این سیستم امکان پذیر نبود. در یک ایستگاه آزمون ، اندازه گیری پتانسیل انجام پذیرفت که عدد ۰/۹۷- ولت قرار گردید که نشان دهنده فعال بودن سیستم حفاظت کاتدی موجود در واحد دوم می باشد این سیستم هر چند ظاهرا" فعال می باشد لکن نیاز به بازنگری کلی و بهینه سازی دارد. در بررسیهای بعمل آمده مشخص گردید که بغیر از لوله های مدفون در زمین،

سایر تجهیزات همچون مخازن سوخت فاقد سیستم های حفاظت کاتدی می باشند و با توجه به خورندگی شدید خاک و آغشته بودن سطح خاک به نمک، نصب سیستم حفاظت کاتدی برای تجهیزاتی که در زمین قرار گرفته اند ضروری می باشد. قابل ذکر است که مسئولین دفتر فنی طی چند سال اخیر هیچگونه آزمایشات ادواری پتانسیل سنجی انجام نداده اند. در ضمن محل ایستگاه های آزمون برای مسئولین راهنما مشخص نبود. با توجه به وجود چند سیستم حفاظت کاتدی در این نیروگاه و نبودن افراد دوره دیده و مجرب نیاز به دوره های آموزشی در این زمینه احساس می شود.

در این نیروگاه ۳ نوع لوله مدفون متشکل از لوله حامل آب، لوله حامل گاز و لوله حامل مازوت با قطرها و طول های مختلف وجود دارند که تحت حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان می باشند نوع پوشش لوله ها پوشش قیر طبیعی می باشد. سیستم خنک کننده این نیروگاه از نوع برج خنک کننده می باشد. مشخصات یکسو کننده بشرح زیر است :

ولتاژ AC ورودی : ۴۰۰ ولت — ولتاژ DC خروجی : صفر تا ۱۵ ولت

آمپر خروجی : ۱۰۰ آمپر — عامل یکسو کننده : سیلیسیمی

نحوه خنک شدن : با روغن — سطح مقطع کابل مثبت : ۵۰ میلیمتر مربع

سطح مقطع کابل منفی: ۷۵ میلیمتر مربع — ولتاژ قرائت شده : ۱۰ ولت

جریان قرائت شده : صفر آمپر

۵-۳- بحث و تحلیل از نتایج بازدیدها

در ارتباط با بازدیدهای بعمل آمده مواردی وجود دارد که نیاز به بررسی و تحلیل دارند. در زیر تحلیل این موارد بطور خلاصه ارائه می شود.

۱- در خلال بازدید دسترسی به هیچیک از نقشه ها و مدارک مربوط به حفاظت کاتدی مقدور نگردید. البته در بعضی از نیروگاهها وجود مسائل حراستی و امنیتی را دلیل عدم ارائه نقشه ها ذکر می کردند. ولی در مذاکرات با کارشناسان بعضی از نیروگاهها مشخص گردید که حتی محل ایستگاههای آزمون حفاظت کاتدی نیز برای آنها دقیقاً مشخص نیست بدین ترتیب معلوم می گردد که اهمیت و جایگاه واقعی این رشته برای نیروگاهها چندان مشخص نبوده و در ارتباط با آن حداقل آموزش های ضروری ارائه نگردیده است. یکی از موارد جالب توجه در طی این بازدیدها آن بود که در دفتر فنی یکی از نیروگاهها مدارک و نقشه های مربوط به آن نیروگاه وجود نداشت و مدتی نیز برای یافتن آن وقت صرف گردید. ولی در خلال تفحص برای آن نقشه ها و مدارک مربوط به سیستم های حفاظت کاتدی نیروگاه دیگری پیدا گردید.

در این ارتباط این نکته قابل ذکر است که در دسترس بودن نقشه ها و مدارک مربوط به سیستم های حفاظت کاتدی در مراکز نیروگاهی بسیار مهم می باشد. برای هر گونه توسعه و گسترش نیروگاه و عبور خطوط لوله و نصب دو سازه ای در زمین ابتدا باید به نقشه های حفاظت کاتدی مراجعه شود. زیرا خطوط لوله مدفون تحت حفاظت کاتدی تقریبا" از اکثر نقاط و محلهای نیروگاه عبور کرده اند. در ضمن این خطوط اکثرا" دارای پوشش هستند. پوشش ها همانطور که قبلا" نیز بدان اشاره شده است وظیفه حفاظت اولیه خطوط لوله را از خوردگی بعهده دارند. پوشش های محافظ خطوط لوله در محیطهای زیر زمینی تحت تأثیر عوامل زیر بشدت آسیب پذیر بوده و منهدم می گردند :

۱- آسیب های حاصل از ساخت و سازه های بعدی در اطراف خطوط لوله

۲- نفوذ توسط ریشه های درختان

۳- ترکهایی که بوسیله تنشهای مکانیکی و حرارتی حاصل می گردد.

۴- مواد شیمیایی موجود در خاک

بنابراین اگر بدون توجه به نقشه ها و مدارک مربوط به حفاظت کاتدی در اطراف خطوط لوله مبادرت به ساختمان سازی گردد و یا هر گونه طرح توسعه ای برای نیروگاه انجام گردد باید توجه شود که این فعالیتها می توانند به پوشش خطوط لوله آسیب جدی برسانند. کاشتن درخت در اطراف خطوط لوله و همچنین ایجاد صدمات بر آندها باعث ایجاد خلل در عملکرد آنها میشود. برای مثال در یکی از نیروگاهها بدون توجه به محل بستر آند در اطراف آن درخت کاشته بودند و در حین کند و کاو برای کاشتن درختان تعدادی از کابلهای ارتباطی بستر آند از محل خود خارج شده و یا توسط صدمات مکانیکی قطع شده بودند. هر گونه تنش مکانیکی باعث ترک دار شدن پوشش های خطوط لوله می گردد. در ضمن آغشته شدن خاک اطراف خطوط لوله به هر نوع ماده شیمیایی می تواند باعث بوجود آمدن آسیبهای جدی بر پوشش خطوط لوله شود.

در صورتیکه پوشش های خطوط لوله بهر نحو آسیب ببیند میزان جریان لازم برای حفاظت خطوط لوله افزایش خواهد یافت. اینحالت از لحاظ فنی و اقتصادی مطلوب نمی باشد. اگر سازه تحت حفاظت کاتدی با استفاده از آندهای فدا شونده باشد در این صورت با افزایش جریان لازم برای حفاظت به تعداد آندهای بیشتری برای حفاظت نیاز میباشد و این کار مستلزم صرف هزینه بسیار برای کندن زمین و نصب آندهای جدید می باشد. در صورتیکه بازرسی ادواری انجام نشود و در نتیجه آندهای جدید نصب نشود در این صورت قسمت اعظم خط لوله بدون حفاظت مانده و در زمان کوتاهی خورده خواهد شد اگر خطوط لوله تحت حفاظت کاتدی با سیستم اعمال جریان باشد در صورت خرابی پوشش باید سریعا" پتانسیل و جریان مورد نیاز سازه مطابق با نیاز جدید تنظیم گردد در غیر اینصورت سازه تحت خوردگی شدید قرار خواهد گرفت.

مطلب دیگر در ارتباط با اهمیت در اختیار داشتن نقشه های مربوط به حفاظت کاتدی آنست که خطوط لوله تحت حفاظت کاتدی با سیستم اعمال جریان می توانند با ایجاد جریانهای سرگردان تولید مشکلات خوردگی برای خطوط لوله و سازه های مدفون در اطراف خود نماید. بنابراین اگر قرار است در اطراف سازه های تحت حفاظت کاتدی سازه دیگری قرار داده شود حتماً باید اول به نقشه های حفاظت کاتدی مراجعه کرده و سپس سازه های جدید را در فاصله مناسب و مطمئن از سازه های تحت حفاظت کاتدی نصب نمود.

۲- در هیچیک از نیروگاههای بازدید شده، پرسنل مجرب و آموزش دیده در زمینه حفاظت کاتدی وجود ندارد. از آنجا که بی توجهی و عدم وجود دانش فنی در این رشته در نهایت منجر به عدم نگهداری صحیح و بهینه از سیستمهای حفاظت کاتدی می گردد لذا توجه مجدد به مطالب ارائه شده در قسمت مقدمه این بخش در ارتباط با مسائل و عواقب از کار افتادن سیستم های حفات کاتدی ضروری می باشد. بعبارت دیگر هزینه برگزاری دوره های آموزش بسیار کمتر از هزینه های مربوط به توقف های ناگهانی در نیروگاهها، تعویض قطعات و هزینه غیر قابل جبران حاصل از آلودگیهای محیطی و خطرات احتمالی جانی می باشد.

۳- تقریباً تمام نیروگاههای بازدید شده فاقد برنامه منسجم و دقیق ادواری برای بازرسی از سازه های تحت حفاظت کاتدی می باشند. حتی طبق گفته پرسنل دفتر فنی یکی از نیروگاهها در طی چند سال اخیر هیچگونه بازرسی از سازه های تحت حفاظت کاتدی انجام نشده است.
در اینجا مجدداً قابل ذکر است که حتی محل ایستگاههای آزمون برای پرسنل بعضی از دفاتر فنی نیروگاهها مشخص نیست. در صورتیکه اندازه گیری پتانسیل سنجی سازه - خاک مهمترین ارزیابی و حداقل آزمون ضروری برای اطلاع از عملکرد سیستم های حفاظت کاتدی می باشد. این آزمایش بسهولت توسط یک تکنسین دوره دیده بوسیله یک الکترود مرجع مناسب و یک ولتمتر قابل اندازه گیری است. در صورتیکه پتانسیل سنجی بطور ادواری و منظم انجام پذیرد از طریق تغییرات پتانسیل می توان از وجود اشکال در عملکرد سیستم حفاظت کاتدی اطلاع حاصل کرده و با رفع بموقع آن از پیشامدهای ناگوار بعدی جلوگیری بعمل آورد.

۴- عدم توجه به جریانهای سرگردان حاصل از سازه های تحت حفاظت کاتدی با سیستم اعمال جریان تقریباً در تمام نیروگاهها مشهود است. مثلاً در بعضی از نیروگاهها تعدادی از مخازن بزرگ سوخت تحت حفاظت کاتدی با سیستم اعمال جریان بوده و در مجاورت آنها نیز تعدادی از مخازن جدید نصب شده اند که فاقد حفاظت کاتدی بوده و فقط دارای رنگ می باشند. از آنجا که تجربیات و تحقیقات نشان می دهد که در چنین شرایطی احتمال وجود خوردگی حاصل از جریانهای سرگردان بر سازه های جدید و فاقد حفاظت کاتدی وجود دارد لذا باید در تمام نیروگاهها در ارتباط با جریانهای سرگردان و راههای پیشگیری و کنترل آن آموزش لازم داده شود. برای مثال ممکن است محلی

که در آن سازه جدید نصب می شود از لحاظ مقاومت ویژه الکتریکی در وضعیتی باشد که برای مدت زمان طراحی شده برای سازه نیاز به حفاظت کاتدی نداشته باشد اما این فقط مربوط به زمانی است که در اطراف سازه جریانهای سرگردان نباشد. حال در صورت وجود جریانهای سرگردان، دیگر صرفاً با اندازه گیری مقاومت ویژه خاک نمی توان از نیاز یا عدم نیاز به حفاظت کاتدی با اطمینان اطلاع حاصل نمود.

۵- در اکثر نیروگاهها صرفاً سازه های مدفون در زمین و یا غوطه ور در آب حفاظت کاتدی شده اند و اکثر مخازن فولادی حاوی آب شیرین یا آب دریا از داخل تحت حفاظت کاتدی نبوده و فقط با رنگ حفاظت می شوند. حتی در نیروگاه نکا از حفاظت کاتدی برای حفاظت صفحات پایه های اسکله استفاده نمی شود و آنها فقط دارای رنگ میباشند. در ضمن برای حفاظت قسمت داخلی پمپها که در تماس مستقیم با آب دریا قرار دارند از حفاظت کاتدی استفاده نمی شود. بنابراین نیاز است تا بررسیهای لازم برای شناخت کلیه سازه های نیروگاهی انجام پذیرد و روشهای اقتصادی اعمال سیستم های حفاظت کاتدی مناسب برای آنها طراحی گردد. باید اهمیت استفاده از حفاظت کاتدی برای سازه های حاوی الکترولیت در نیروگاهها مطرح گردیده و آموزشهای لازم برای اعمال روشهای مناسب حفاظت کاتدی برای اینگونه سازه ها ارائه گردد.

۶- شناخت و بررسی آزمونهای مختلف

۶-۱- آزمون جریانهای خط لوله

علیرغم آنکه بخش عمده ای از خوردگی یک خط لوله حفاظت نشده ناشی از وجود پیلهای موضعی است، ولی جریانهای «خوردگی خط بلند» نیز یکی از عوامل مطرح در خوردگی مذکور می باشد. این جریانها از پیلهای خوردگی که در فاصله هزاران فوت یا مایل از لوله تشکیل شده ناشی می گردد. حال وقتی اندازه و جهت این جریانها مشخص گردد، موقعیت و شدت جریان خوردگی خطوط بلند قابل شناسایی خواهد بود.

جریانهای موجود در خطوط لوله عمدتا" با استفاده از روش دو سیم اندازه گیری می شود شکل (۴۳). این روش شامل مراحل زیر است :

۱- اندازه گیری دقیق افت ولتاژهای کوچک در اندازه های مشخصی از طول سازه (مثلا: در هر ۱۰۰ فوت) و ثبت قطب اتصال ولتمتر (برای مشخص کردن جهت جریان در هر طول مشخصی از سازه).

۲- تصحیح مقادیر افت ولتاژ بدست آمده برای مقاومت مدار خارجی با استفاده از رابطه $Va = Vm \left[\frac{R_m + R_w}{R_m} \right]$

که در آن V_a افت ولتاژ واقعی، V_m افت ولتاژ اندازه گیری شده، R_m مقاومت دستگاه اندازه گیری و R_w نیز مقاومت سیم های اتصال است.

۳- تبدیل مقادیر افت ولتاژ تصحیح شده به جریان با استفاده از قانون اهم و مقاومت خط لوله برای مقدار مشخصی از طول سازه برای محاسبه پارامتر اخیر از رابطه زیر استفاده می شود :

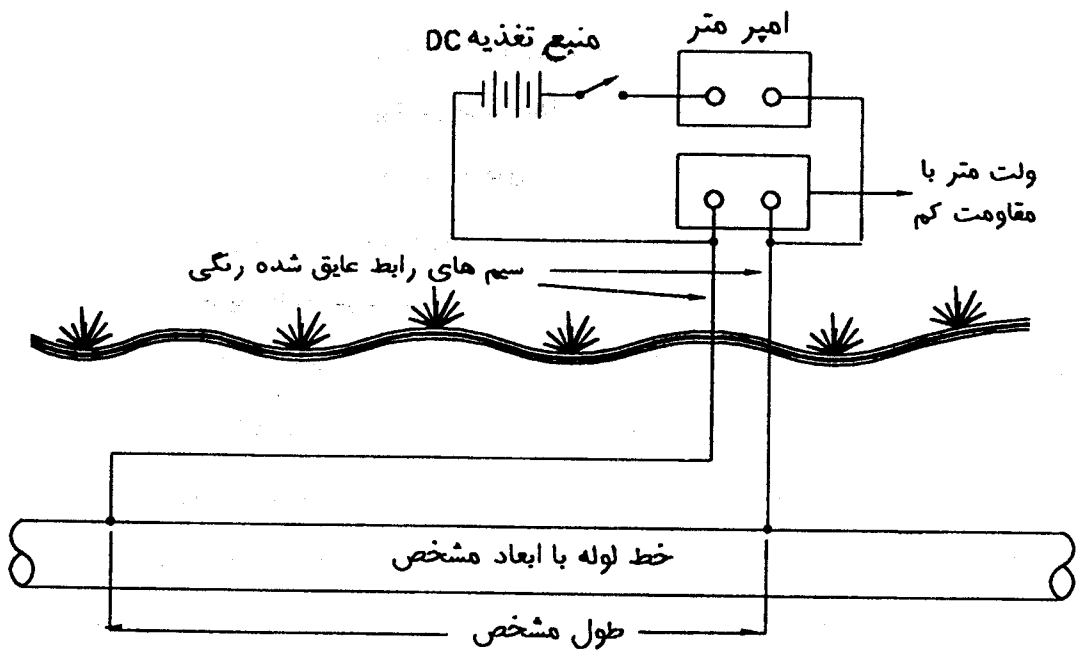
$R_p = \frac{16.061(\rho')}{W}$ که در آن R_p مقاومت هر فوت از لوله بر حسب میکرو اهم ،ρ' مقاومت ویژه لوله بر حسب میکرو اهم - سانتی متر و w وزن هر فوت از لوله بر حسب پوند می باشد. گر چه مقدار ۱۸ میکرو اهم - سانتی متر مقدار قابل قبولی برای ρ' به شمار میاید ولی با این حال برای هر فولاد با ترکیب شیمیایی مشخص مقاومت ویژه مشخصی وجود دارد. جریان خط لوله با رسم بردار جریان برای هر محدوده طولی مورد آزمایش به صورت تابعی از فاصله در طول سازه نشان داده می شود. با فرض اینکه هیچگونه تماس فلزی با سازه مدفون دیگری وجود نداشته باشد، عمدتا" خوردگی در جایی رخ می دهد که جریانهای با مقادیر بالا از دو جهت در امتداد خط لوله به نقطه بخصوصی از سازه وارد میشوند. در واقع این نقطه محلی است که جریان به الکترولیت تخلیه می گردد. بردارهای جریان خط لوله که در شکل (۴۴) رسم شده مؤید این مطلب است که در نقطه تقریبا" ۵۵۵۰ فوتی خط لوله و در یک سطح نسبتا" کوچک، مقدار مشخصی از جریان وارد الکترولیت می گردد.

در نقاطی از سازه که مقدار جریان وارده به آن از مقدار جریانی که از آن خارج می شود، بیشتر باشد نیز خوردگی رخ می دهد. برای مثال در شکل (۴۴) دیده می شود که در موقعیت های ۵۶۵۰ و ۶۷۵۰ فوتی خط لوله در نواحی نسبتا" کوچکی جریان از سازه وارد الکترولیت می گردد.

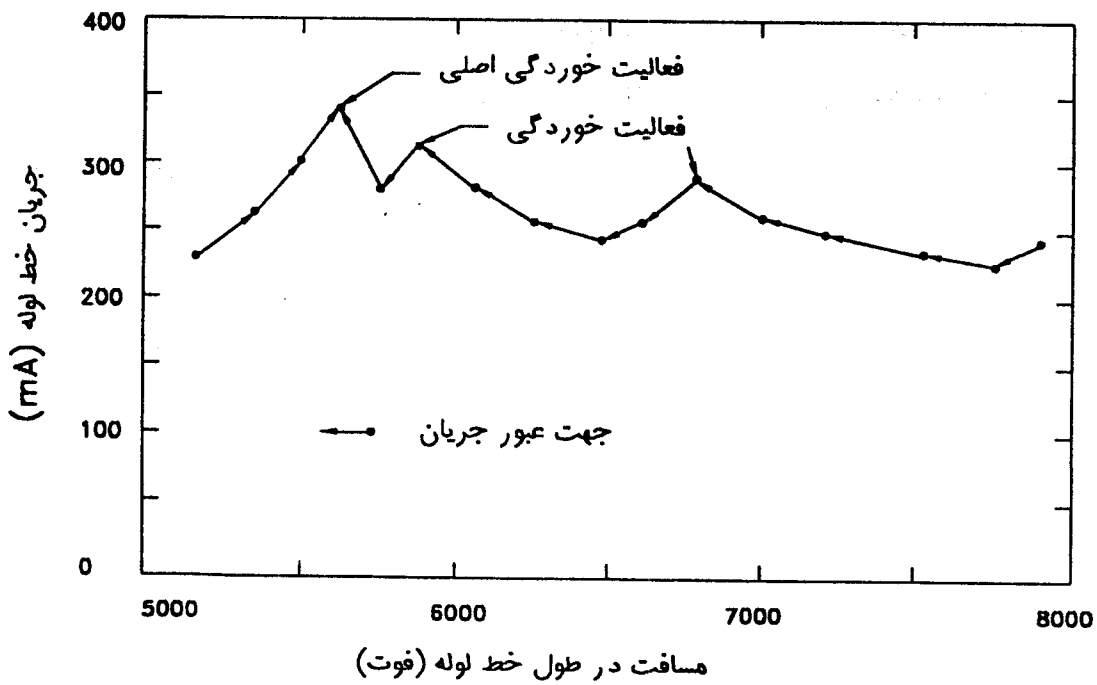
اغلب این امکان وجود دارد که داده های جریان خط لوله را بـه نتـایج بررسـی مقـاومت ویـژه الکـترولیت ارتبـاط داد جریانهای خوردگی خط بلند عموماً در نواحی که مقاومت ویژه الکترولیت پایین است، وارد الکترولیت می گردد آنچـه که مسلم است بررسیهای جریان خط لوله در سازه های بدون پوشش نسبت به سازه های با پوشش مناسب از اهمیـت بیشتری برخوردار است. در یک خط لوله با پوشش خوب مقدار جریانی که از سازه وارد الکترولیت مـی گـردد، خیلـی کم است و غالباً کمتر از مقادیری است که توسط روشهای اندازه گیری معمول بدست می آید. این موضوع با توجه بـه آنکه جریان فقط در نقاط بدون پوشش به سازه وارد یا از آن خارج می شود. کاملاً قابل قبول می باشـد. در ضمـن بـا توجه به بالا بودن دانسیته جریان آندی در نقاط بدون پوشش، آسیب شدیدی در این نقاط به خط لوله وارد می گردد.

در اندازه گیری جریان خطوط لوله خطاهایی نیز ممکن است رخ دهد که نباید از آنها صرفنظر نمود. اگـر از پـروب بـه جای سیمهای رابط دائمی استفاده می شود، عدم تماس خوب با لوله، مقـاومت بـالایی را بوجـود خواهـد آورد کـه در نهایت با ایجاد افت ولتاژ زیاد باعث بوجود آمدن خطا می گردد. اگر خط لوله به جای جوش دارای اتصـالات مکـانیکی باشد، افت ولتاژهای غیر مشخصی ثبت خواهد شد. همچنین اگر خط لوله شامل یک فلانج عایق باشـد، مقـادیری کـه در طول خط لوله اندازه گیری می گردد، کاملاً بی معنی خواهد بود. به این مسئله نیز باید توجه نمود که تغییرات نـا مشخص در اندازه و ضخامت دیواره خط لوله می تواند مقاومت سازه را نیز تغییـر دهـد. کـه ایـن مـورد را میتـوان بـا استفاده از اندازه گیری جریان خط لوله و کالیبره کردن هر واحد طول از خط لوله حل کرد. البته قابل ذکر اسـت کـه این روش پرهزینه و وقت گیر می باشد.

اندازه گیری جریان خط لوله محدود به مناطقی می گردد که به دلیل شرایط بحرانی خط لوله به اطلاعات دقیـق نیـاز باشد. از این روش برای اطمینان از وجود یا عدم وجود خوردگی ناشی از جریـان سـرگـردان و مشـخص کـردن نقـاط تخلیه جریان به الکترولیت استفاده می گردد.



شکل (۴۳) : روش دو سیم برای اندازه گیری جریان خط لوله

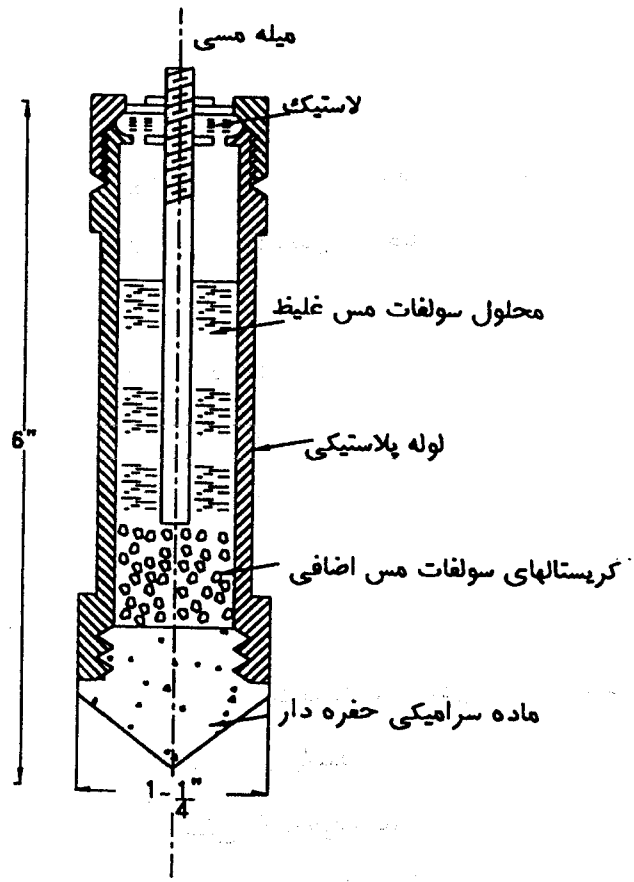


شکل (۴۴): منحنی های بردارهای جریانی یک خط لوله فولادی بدون پوشش

۶-۲- آزمون پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت

اگر آزمون پتانسیل سازه به الکترولیت به درستی انجام شود، می تواند در بررسی خوردگی در امتداد یک خط لوله بسیار مؤثر باشد. این آزمون معمولاً با استفاده از یک ولتمتر با مقاومت بالا انجام می پذیرد. که در آن قطب منفی ولتمتر به سازه مدفون در زمین و قطب مثبت آن به یک الکترود مرجع که به زمین اتصال دارد، وصل میگردد. در محیطهایی مانند خاک و آب شیرین بیشتر از الکترود اشباع مس - سولفات مس استفاده می شود شکل (۴۵).

در مورد خطوط لوله زیر زمینی پتانسیلهای سازه به الکترولیت در فواصل متفاوت و معینی در امتداد خط لوله توسط الکترود مرجع که با محیط اتصال داشته و در موقعیت دقیقاً بالای سازه قرار گرفته اندازه گیری می گردد شکل (۴۶). لازم به ذکر است که موقعیت الکترود مرجع نسبت به سازه در خطوط لوله بدون پوشش نسبت به خطوط لوله دارای پوشش از اهمیت بیشتری برخوردار است.



شکل (۴۵): الکترود مرجع مس - سولفات اشباع

این نکته نیز حائز اهمیت است که پتانسیل اندازه گیری شده بین سازه و الکترولیت شامل افت ولتاژ بین نقطه تماس الکترود مرجع و سطح فلز موجود در زیر زمین نیز می شود. این افت اهمی در محیط هایی با مقاومت ویژه بالایی چون خاک خیلی خشک یا بتن می تواند قابل توجه باشد. خطاهای موجود در اندازه گیری پتانسیل سازه به الکترولیت در نواحی که با بتن پوشیده شده با خیس کردن آن نواحی و استفاده از یک الکترود مرجع با سطح بزرگ و نوک نسبتاً پهن به حداقل می رسد. در صورت امکان بهتر است الکترود روی یک ترک در بتن قرار داده شود.

در خطوط لوله بدون پوشش یا با پوشش ضعیف، مناطق با پتانسیل منفی تر معمولاً نقاطی هستند که در تماس با الکترولیت های با مقاومت ویژه پایین قرار دارند. این مناطق که نسبت به مناطقی که پتانسیل سازه به الکترولیت در آنها مثبت تر است، آندی می باشند. نقاطی از یک خط لوله بدون پوشش که دارای پتانسیل منفی تر (آندی) است، شامل موارد زیر می باشد :

۱) زیر رودخانه ها

۲) مناطق تقاطع جاده ها

۳) مناطق دارای خاک رس

انتظار می رود اختلاف زیاد پتانسیل بین نقاط آندی و کاتدی در یک خط لوله میزان خوردگی را تشدید کند. این مطالب در مورد محیطهای با مقاومت ویژه پایین صحیح بوده ولی در محیطهای با مقاومت ویژه بالا حتی اختلاف پتانسیلهای بزرگ هم نمی تواند باعث خوردگی شدید گردد بنابراین اختلاف پتانسیلها باید در ارتباط با مقاومت ویژه خاک و اطلاعات دیگر بررسی گردد.

معمولاً بهتر است تا پتانسیلهای سازه به الکترولیت در امتداد خطوط لوله بدون پوشش در نواحی جانبی سازه (در فاصله ۲۰ تا ۵۰ فوتی از سازه) نیز اندازه گیری شود. استفاده از این داده ها به همراه پتانسیلهای اندازه گیری شده در روی خط میتواند درمورد نوع خوردگی موجود نیز اطلاعاتی ارائه نماید. مثلاً خوردگی گالوانیک، خوردگی ناشی از جریان سرگردان و غیره (خوردگی یکنواخت و خوردگی حاصل از پیل غلظتی) اغلب با استفاده از این داده ها قابل تشخیص می باشند. اما در هنگام استفاده از این روش موارد زیر باید رعایت گردد :

۱) نقاطی از خط لوله که در آنها پتانسیل جنب سازه نسبت به پتانسیل بالای سازه مثبت تر است، نقاط آندی و نقاطی که در آن این مقدار منفی تر است، نقاط کاتدی می باشند.

۲) هنگامی که نواحی آندی در نقاط با پتانسیل منفی بالا بوجود آید در این حالت خوردگی یکنواخت رخ داده و خوردگی ناشی از جریان سرگردان و خوردگی گالوانیک بوجود نخواهد آمد.

۳) وقتی نواحی آندی در مناطقی با پتانسیل منفی کم ایجاد شود، خوردگی احتمالاً ناشی از جریان سرگردان یا گالوانیک خواهد بود. پتانسیلهای مثبت بیانگر خوردگی ناشی از جریان سرگردان می باشد.

شکل (۴۷) پتانسیلهای سازه نسبت به الکترولیت را که در امتداد یک خط لوله فولادی بدون پوشش اندازه گیری شده است، نشان می دهد. چون نواحی آندی نواحی با پتانسیل منفی نسبتاً بالا (یعنی ۰/۴۵- تا ۰/۶۵- ولت نسبت به الکترود مرجع مس-سولفات مس) هستند، بنابراین می توان نتیجه گیری کرد که سازه تحت تأثیر خوردگی یکنواخت بوده و احتمال بوجود آمدن خوردگی گالوانیک یا جریان سرگردان وجود ندارد.

شکل (۴۸) پروفیل پتانسیل برای یک خط لوله فولادی بدون پوشش که در یک نقطه به یک میله بزرگ اتصال زمین مسی متصل است را نشان می دهد. در نواحی که پتانسیلهای منفی پایین (یعنی ۰/۱۵- تا ۰/۲۵- ولت نسبت به الکترود مس-سولفات مس) چه در بالا و چه در کنار خط لوله اندازه گیری شود، خوردگی گالوانیک شدیدی در جریان است. مشاهده خوردگی عادی در نقاطی بجز نواحی دارای اتصال دو فلزی، حاکی از آن است که خوردگی ناشی از جریان سرگردان در آنها وجود ندارد.

وقتی که یک خط لوله فولادی بدون پوشش تحت تأثیر خوردگی ناشی از جریان سرگردان قرار گیرد، پروفیل پتانسیل آن شبیه پروفیل پتانسیل خوردگی گالوانیک خواهد بود. در این حالت نواحی آندی در جایی بوجود می آیند. که در آن چه در بالا و چه در کنار سازه، مقادیر پتانسیل اندازه گیری شده مقادیر منفی پایین می باشد. (شکل ۴۹). خوردگی ناشی از جریان سرگردان عموماً قابل تشخیص است چون اولاً نواحی از لوله که مجاور به مناطق آندی هستند، تقریباً تماماً کاتدی می باشند. این موضوع کاملاً قابل درک است زیرا مناطقی که در آن جریان سرگردان در خط لوله جریان می یابد، باید کاتدی و مناطق موضعی تخلیه جریان نیز باید آندی باشد ثانیاً مقدار اختلاف پتانسیل ها برای نواحی که تحت تأثیر خوردگی ناشی از جریان سرگردان هستند، بیشتر از موارد مربوط به خوردگی گالوانیک می باشد.

مفهوم جامع تری از داده های پتانسیل سازه به الکترولیت، با استفاده از موارد زیر بدست می آید.

۱- پتانسیل خطوط لوله جدیدتر نسبت به خطوط قدیمی تر، منفی تر است.

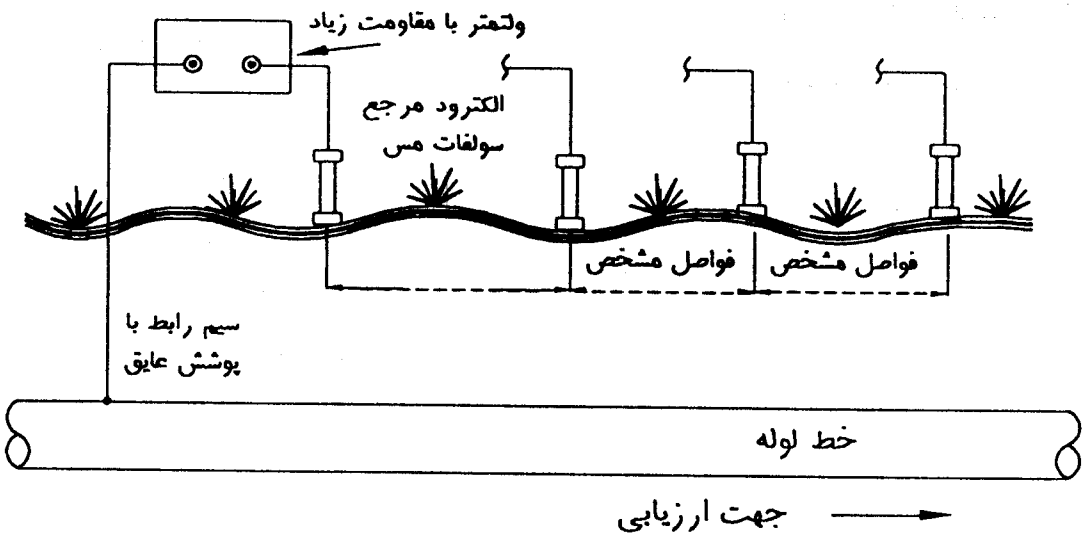
۲- تغییرات پتانسیل بر حسب فاصله در یک خط لوله بدون پوشش نسبت به یک سازه با پوشش کامل بیشتر است.

۳- پتانسیل در خاکهای اسیدی و خنثی نسبت به خاکهای قلیائی منفی تر است.

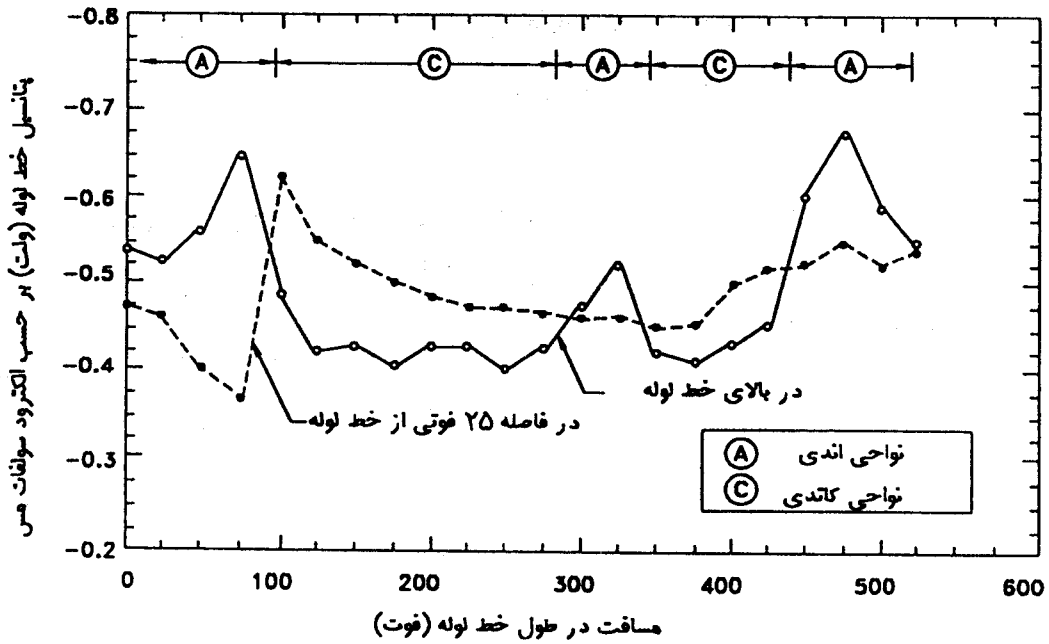
۴- پتانسیل سازه های با پوشش کامل نسبت به سازه های بدون پوشش منفی تر است.

۵- در خطوط لوله بدون پوشش، نقاط با مقاومت ویژه پایین متناظر با مناطق با پتانسیل منفی تر است.

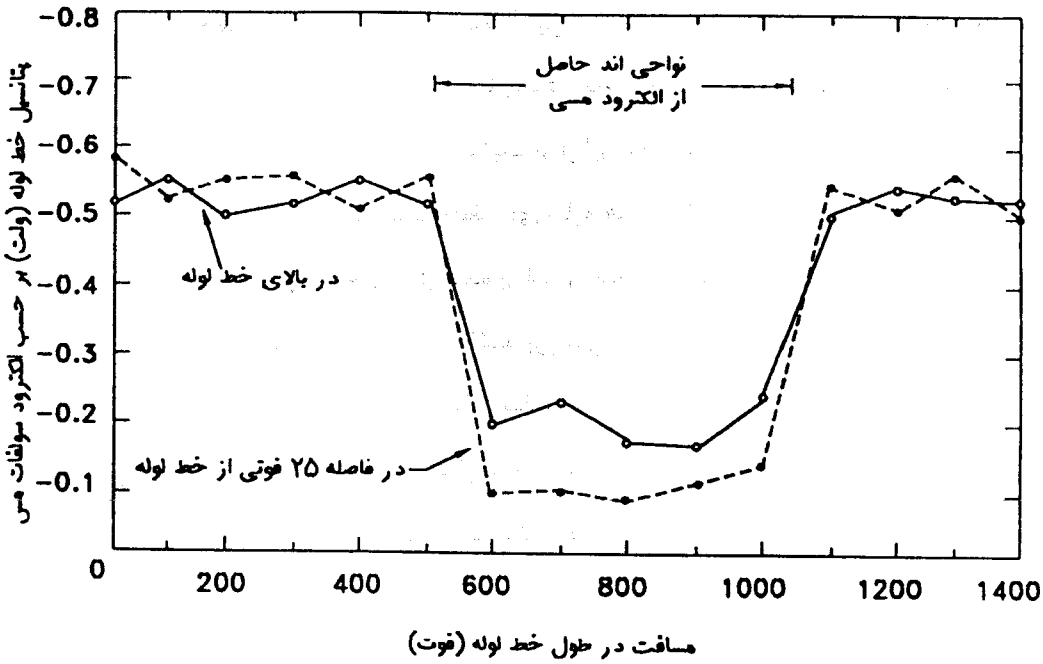
۶- محدوده پتانسیل در یک خط لوله بدون پوشش عموماً بین ۰/۵- و ۰/۶- ولت (نسبت به الکترود مرجع مس-سولفات مس) می باشد. سازه های جدید و بدون پوشش پتانسیلهایی منفی تر از این محدوده و سازه های قدیمی تر و بدون پوشش پتانسیلهایی مثبت تر از این محدوده خواهند داشت.



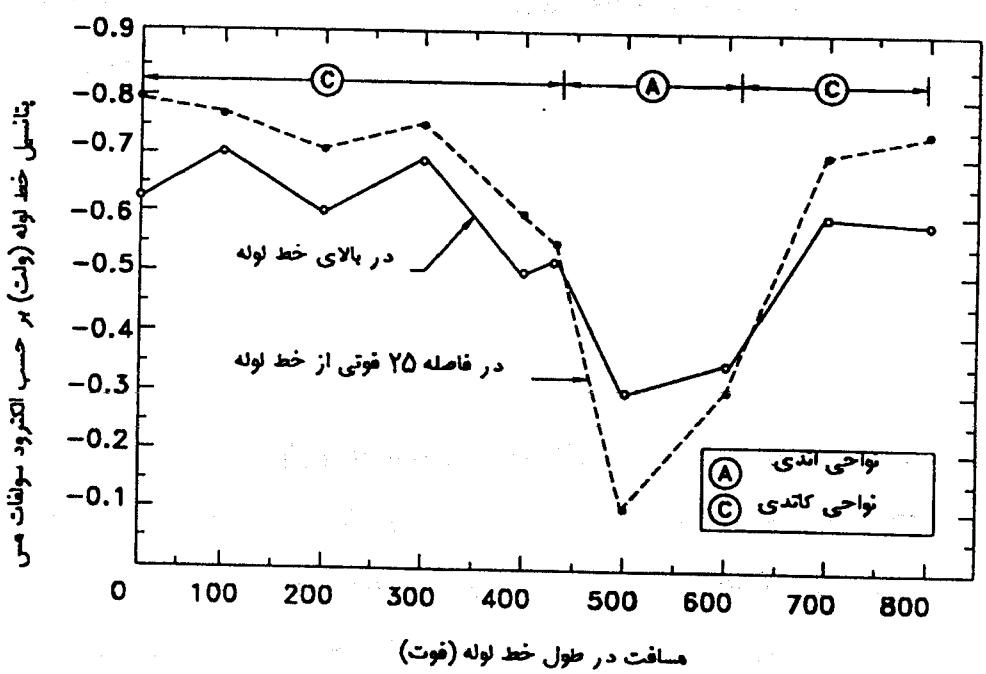
شکل (۴۶) : روش اندازه گیری پتانسیل خط لوله نسبت به خاک



شکل (۴۷): اندازه گیری پتانسیل لوله نسبت به خاک بر روی یک خط لوله فولادی بدون پوشش



شکل(۴۸): اندازه گیری پتانسیل لوله نسبت به خاک بر روی یک خط لوله فولادی بدون پوشش که در یک نقطه به یک میله اتصال زمین مسی بزرگ متصل می باشد.



شکل (۴۹): اندازه گیری پتانسیل لوله نسبت به خاک بر روی یک خط لوله فولادی بدون پوشش که تحت تأثیر جریانهای سرگردان می باشد.

۷- محدوده پتانسیل در یک خط لوله با پوشش خوب عموماً بین ۰/۶۵- تا ۰/۷۵- ولت (نسبت به الکترود مرجع مس - سولفات مس) می باشد سازه های جدید و با پوشش کامل، پتانسیلهایی منفی تر از این محدوده و سازه های قدیمی تر و با پوشش ضعیف پتانسیلهایی مثبت تر از این محدوده دارند.

باید توجه کرد که بررسی پتانسیل سازه به الکترولیت فقط برای سازه های فولادی که تحت حفاظت کاتدی قرار نگرفته اند، کاربرد دارد. علاوه بر این آنچه تا حال ذکر شده بر اساس مواردی بوده که در عمل مشاهده شده و برای تمام شرایط موجود در خطوط لوله قابل استفاده نمی باشد بررسی پروفیل پتانسیل سازه به خاک در امتداد یک خط لوله فقط به عنوان جزئی از کل مطالعات خوردگی سازه بحساب می آید.

علاوه بر تجزیه و تحلیل انواع خوردگی که در امتداد خطوط لوله فولادی بدون حفاظت کاتدی ممکن است رخ دهد، بررسی پتانسیل سازه به الکترولیت برای ارزیابی تأثیر و چگونگی فعالیت سیستم های تحت حفاظت کاتدی نیز ضروری میباشد.

۶-۳- آزمون جریان مورد نیاز برای حفاظت

جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی به نرخ خوردگی و مساحت فلزی که در تماس با الکترولیت است، بستگی دارد. هر عاملیکه سرعت خوردگی را افزایش دهد، جریان مورد نیاز جهت حفاظت را نیز افزایش خواهد داد. همچنین با افزایش مساحت فلز در تماس با الکترولیت نیز جریان مورد نیاز برای حفاظت افزیش پیدا می کند.

سرعت خوردگی با تغییرات عوامل زیر افزایش پیدا می کند :

۱) افزایش دما

۲) کاهش مقاومت ویژه الکترولیت

۳) افزایش اختلاف غلظت اکسیژن

۴) فعالیت باکتریهای خاص

۵) کاهش PH

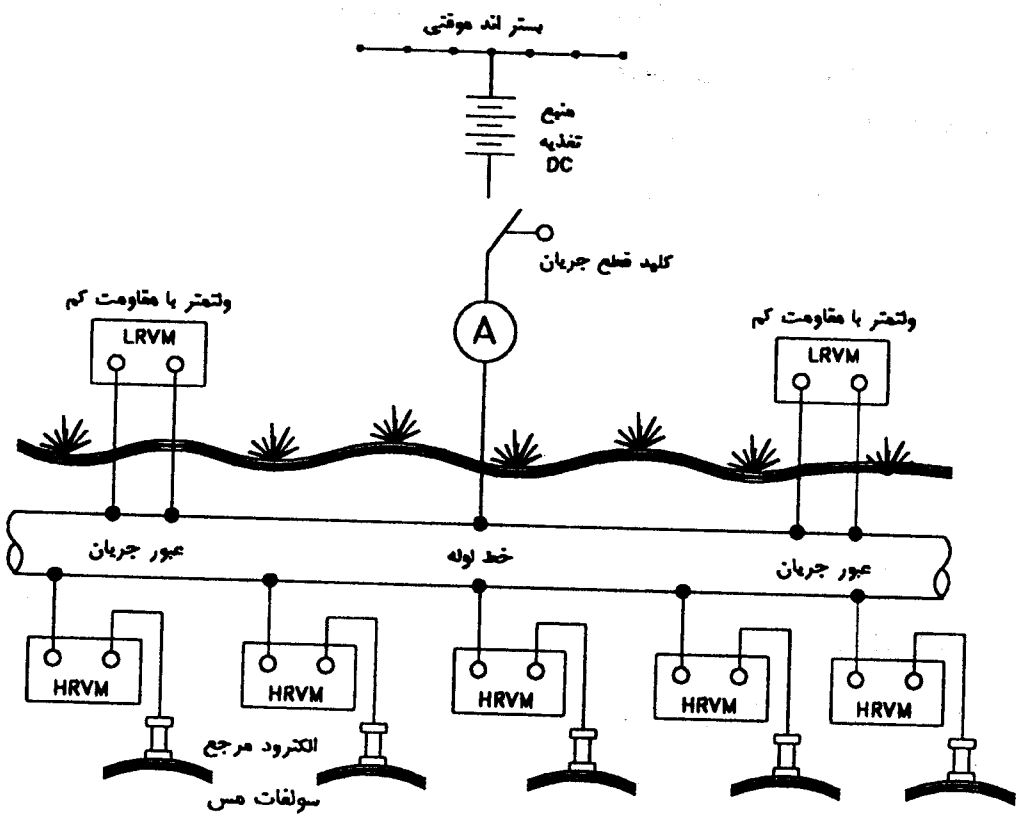
با توجه به اینکه سرعت خوردگی را می توان به دانسیته جریان خوردگی معادل تبدیل کرد، لذا جریان مورد نیاز برای بسیاری از محیط ها را می توان تخمین زد. مثلاً اگر سرعت خوردگی متوسط فولاد در یک محیط بخصوص ۳mpy باشد، دانسیته جریان خوردگی معادل، حدود ۶ میلی آمپر بر فوت مربع خواهد بود. جریان مورد نیاز برای حفاظت ۵ مایل از لوله بدون پوشش با قطر ۶ اینچ و سطح ۵۵۲۹۲ فوت مربع در این محیط حدود ۳۳۲ آمپر می باشد. این روش مقدماتی تخمین جریان مورد نیاز برای حفاظت از نظر تئوری صحیح است. چون سرعت خوردگی فولادی که در مجاورت خاک قرار دارد، معمولاً به صورت کاتدی کنترل می شود (یعنی پلاریزاسیون پیل خوردگی عمدتاً در کاتد اتفاق می افتد و پتانسیل خوردگی به پتانسیل تعادلی یا برگشت پذیر آند تبدیل می گردد). متأسفانه سرعت خوردگی

فولاد در بسیاری از محیطهای زیر زمینی دقیقاً مشخص و ثابت نبوده و در امتداد یک خط لوله، تغییرات فاحشی در سرعت خوردگی آن وجود دارد. علاوه بر این سرعتهای خوردگی عموماً با استفاده از نمونه های نسبتاً کوچک بدست آمده اند و شامل جریانهای خوردگی خطوط بلند که احتمال وجودشان نیز کم نیست، نمی شود.

جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی فولاد در محیطهای مختلف خط لوله با استفاده از اطلاعات جدول (۶) که به صورت تجربی بدست آمده اند قابل تخمین می باشد. این جدول ابتدا برای ارائه اطلاعاتی درباره دانسیته جریان کاتدی در الکترولیت های مختلف تهیه شده است. با این حال در تخمین جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی، با استفاده از دانسیته های جریان موجود در جدول فوق باید دقت بیشتری مبذول گردد. در پیش بینی جریان مورد نیاز برای حفاظت و مواردیکه از داده های دانسیته جریان برای اینکار استفاده می شود، باید دقت کرد که هر گونه صدمه به خطوط لوله بدون پوشش و یا قدیمی، سطح مؤثر سازه را افزایش می دهد. به طوری که نا همواریهای سطحی ایجاد شده در اثر خوردگی، جریان مورد نیاز را تا حدود ۲۰٪ افزایش می دهد.

مساحت سطح فلزی که باید مورد حفاظت قرار گیرد، با اعمال یک پوشش آلی به سازه زیر زمینی به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. خطوط لوله با پوشش کامل به جریان حفاظتی کمتری نسبت به خطوط لوله بدون پوشش یا پوشش ضعیف نیاز دارند. مثلاً جریان مورد نیاز تئوری برای حفاظت کاتدی ۲۰ مایل از خط لوله بدون پوشش به قطر ۸ اینچ که در معرض خاک خنثی هوادهی شده کامل قرار گرفته، ۴۴۰ آمپر می باشد. (با فرض اینکه به دانسیته جریان ۲ میلی آمپر بر فوت مربع برای حفاظت نیاز باشد). حال اگر همان سازه به طور کامل پوشش داده شود، و راندمان پوشش نیز ۹۹درصد باشد (یعنی ۹۹ درصد از سطح سازه توسط پوشش محافظت شده باشد)، جریان مورد نیاز برای حفاظت تقریباً تا ۴/۴ آمپر کاهش می یابد. متأسفانه تخمین راندمان پوشش مشکل است و این امر در محاسبه جریان لازم برای حفاظت حتی در صورت مشخص بودن دانسیته جریان حفاظتی، ایجاد اشکال خواهد کرد.

برای طراحی مطلوب، جریان مورد نیاز حفاظتی باید از طریق انجام آزمایشات بدست آید. این آزمایشات با استفاده از یک آند موقت و یک منبع جریان مستقیم انجام می گیرد (شکل ۵۰). بستر آند موقت شامل ۶ قطعه از لوله فولادی با قطر ۲ اینچ و طول ۶ فوت می باشد که به طور عمودی در خاک در فاصله ای دور نسبت به سازه زیر زمینی قرار دارند. بسته به جریان مورد نیاز، منبع جریان نیز از باتری ۱۲ ولت تا دستگاه جوشکاری با خروجی ۳۰۰ آمپر متغیر خواهد بود.



شکل (۵۰) : روش اندازه گیری جریان لازم برای حفاظت کاتدی خط لوله فولادی زیرزمینی

جدول (۶) : دانسیته جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی لوله های بدون پوشش

دانسیته جریان میلی آمپر بر فوت مربع	محیط
۱/۵ -۰/۴	خاک خنثی
۳ - ۲	خاک خنثی کاملاً هوادهی شده
۶ - ۱	خاک مرطوب
۱۵ - ۳	خاک به شدت اسیدی
۴۲ - ۶	خاک حاوی باکتریهای احیاء کننده سولفات
۲۵ - ۳	خاک گرم شده
۵	آب شیرین ساکن
۵-۶/۵	آب شیرین جاری
۱۵ - ۵	آب شیرین متلاطم حاوی اکسیژن حل شده
۵-۲۰	آب دریا

اصولاً آزمایشات فوق الذکر با اعمال مقدار مشخصی جریان توسط بستر آند موقت و از طریق یک الکترولیت به سازه تحت حفاظت انجام می شود. میزان حفاظت در نقاط مختلف یک خط لوله با استفاده از اندازه گیری پتانسیل سازه به الکترولیت در آن نقاط ارزیابی می گردد که معیارهای ارزیابی در قسمتهای بعدی این مجموعه ارائه می گردد. حال اگر نتایج مذکور صحیح باشد، می توان تخمین نسبتاً دقیقی از جریان مورد نیاز برای حفاظت طول مشخصی از خط لوله بدست آورد.

البته این نکته را باید به خاطر سپرد که حتی اگر آزمون اندازه گیری جریان هم به درستی انجام شده باشد، ضرورتاً مقدار صحیح جریان واقعی مورد نیاز را ارائه نمی کنند. بین سازه هایی که موقتاً حفاظت شده اند و شرایط حقیقی تفاوتهایی وجود دارد که این تفاوتها بشرح زیر می باشند :

۱- موقعیت بستر آندها نسبت به سازه

۲- نوع و تعداد آندهای موجود در بستر آند

۳- پشت بند مورد استفاده در بستر آند

۴- اثرات پلاریزاسیون

۵- طول خط لوله حفاظت شده توسط یک منبع جریان مستقیم

لازم به ذکر است که آزمون اندازه گیری جریان برای خطوط لوله با پوشش کامل نسبت به سازه های بدون پوشش یا با پوشش ضعیف از اهمیت بیشتری برخوردار است.

۶-۴- آزمون مقاومت مؤثر پوشش

مهمترین هدف از استفاده از پوشش های محافظ بر سازه های موجود در زیر زمین، کاهش مقدار جریان خوردگی است. این هدف هنگامی حاصل می گردد که پوشش بکار برده شده دارای مقاومت مؤثر بالایی باشد. برای کاهش خوردگی سازه های زیر زمینی از محدوده وسیعی از پوششهای محافظ استفاده می شود. این پوششها شامل لعاب قطران زغال سنگ و آسفالت، ملاط قیری، واکسها، گریسها، نوارهای پلی اتیلن وپلی وینیل کلراید، فیلمهای پلی اتیلن و پلی پروپیلن و فیلمهای نازک رزینهای اپوکسی گرما سخت و اپوکسی قطران زغال سنگ می باشد. بسیاری از این پوششها اگر به طور صحیحی اعمال شوند می توانند پوششی را با مقاومت مؤثر در حدود 10^{12} اهم بر فوت مربع بوجود آورند. متأسفانه پوشش دادن به ندرت به صورت کامل انجام می گیرد و همواره نقاط لخت، یا نقایصی در پوششها یافت میشوند که در آنها امکان وقوع خوردگی وجود دارد. علاوه بر آن بسیاری از پوششها در محیطهای زیر زمینی با گذشت زمان رو به زوال می گذارند. عوامل این زوالها و نقائص عبارتند از :

۱- آسیب هایی که توسط ساخت و ساز های بعدی ایجاد می شوند.

۲- نفوذ توسط ریشه های درختان

۳- آسیبهایی که از تکه سنگها و کلوخه های موجود در پشت بند حاصل می گردد.

۴- بی دقتی در حمل و نقل به هنگام نصب

۵- ترکهایی که بوسیله تنشهای مکانیکی و حرارتی حاصل می گردند.

۶- مواد شیمیایی موجود در خاک

۷- فعالیت برخی باکتریهای خاص

۸- وجود ترکهای مویی در پوشش

۹- دماهای کاری بالا

نقایص موجود در پوششها باعث کاهش مقاومت آنها در برابر عبور جریان خوردگی می شوند (بعبارت دیگر مقاومت مؤثر پوشش را کاهش می دهند). آگاهی از مقاومت مؤثر پوشش در امتداد یک خط لوله در زیر زمین بسیار حائز اهمیت است. مقاومت مؤثر پوشش اطلاعاتی راجع به مقدار جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی سازه ارائه می دهد. این داده ها در ارزیابی عملکرد پوشش نیز مفید می باشند. با انجام آزمون در فواصل زمانی مختلف از عمر یک سیستم می توان اطلاعاتی را در ارتباط با اثرات سوء محیطی بر پوشش بدست آورد. این اطلاعات بویژه برای مواردیکه از این پوششها برای پروژه های بعدی نیز استفاده خواهد شد بسیار مفید می باشد.

داده های مقاومت مؤثر پوشش برای طراحی سیستم های حفاظت کاتدی نیز مفید می باشند. این بدان جهت است که در سازه های با پوشش خوب مقاومت کاتد جزء مهمی از کل مقاومت مدار می باشد. وقتی از یک سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان برای تکمیل عملکرد حفاظتی پوشش بهره گرفته می شود، مقاومت کل مدار و جریان

مورد نیاز برای حفاظت دو عاملی هستند که خروجی یکسوکننده را مشخص می کنند. البته برای طراحی سیستم های حفاظت کاتدی از نوع آند فدا شونده نیز مقاومت کاتدی دقیقاً همین نقش را ایفا می کند. در یک پتانسیل محرکه و جریان معین، مقاومت مؤثر پوشش بر تعداد آندهایی که برای ایجاد حفاظت مناسب لازم می باشند اثر میگذارد. در برخی از مناطق یک خط لوله، مقاومت مؤثر پوشش به طور غیر عادی پایین بوده که باید به آن توجه خاص مبذول نمود. حتی محل بستر آند در سیستم های حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان نیز تحت تأثیر این نواحی می باشند. مقاومت مؤثر پوشش قسمتی از خط لوله که دارای پوشش کامل است، همزمان با انجام آزمایشات تعیین جریان لازم برای حفاظت قابل اندازه گیری می باشد. البته اندازه گیریها نباید فوراً بعد از نصب خط لوله انجام گیرد. بلکه باید به اندازه کافی زمان داد تا رطوبت و خاک در پشت بند خط لوله در نقاط بدون پوشش با فولاد تماس پیدا کند. در غیر اینصورت مقاومت مؤثر پوشش بدست آمده بیشتر از مقدار واقعی خواهد شد.

مقاومت مؤثر پوشش برای طول معینی از خط لوله (معمولاً ۳ تا ۵ مایل از یک سازه با پوشش خوب) معمولاً طبق شکل (۵۱) و با استفاده از روشی که شامل مراحل زیر می باشد اندازه گیری میشود :

۱- اعمال یک جریان موقت کاتدی به بخشی از یک خط لوله

۲- قطع این جریان موقت در فواصل زمانی مشخصی (مثلاً ۴۰ ثانیه وصل و ۲۰ ثانیه قطع)

۳- اندازه گیری اختلافهای ایجاد شده توسط جریان موقتی، هم در جریان خط لوله و هم در پتانسیل الکترود مرجع مس - سولفات مس واقع در فاصله دور در دو انتهای بخشی از خط لوله که برای بررسی انتخاب شده بمحض آنکه این اختلافها در جریان خط لوله (یعنی $\Delta I = I_{on}-I_{off}$) و پتانسیل الکترود مرجع (یعنی $\Delta E= E_{on}-E_{off}$) برای دو موقعیت اندازه گیری مشخص گردد. با استفاده از رابطه زیر مقاومت خط لوله - زمین برای آن بخش بدست خواهد آمد.

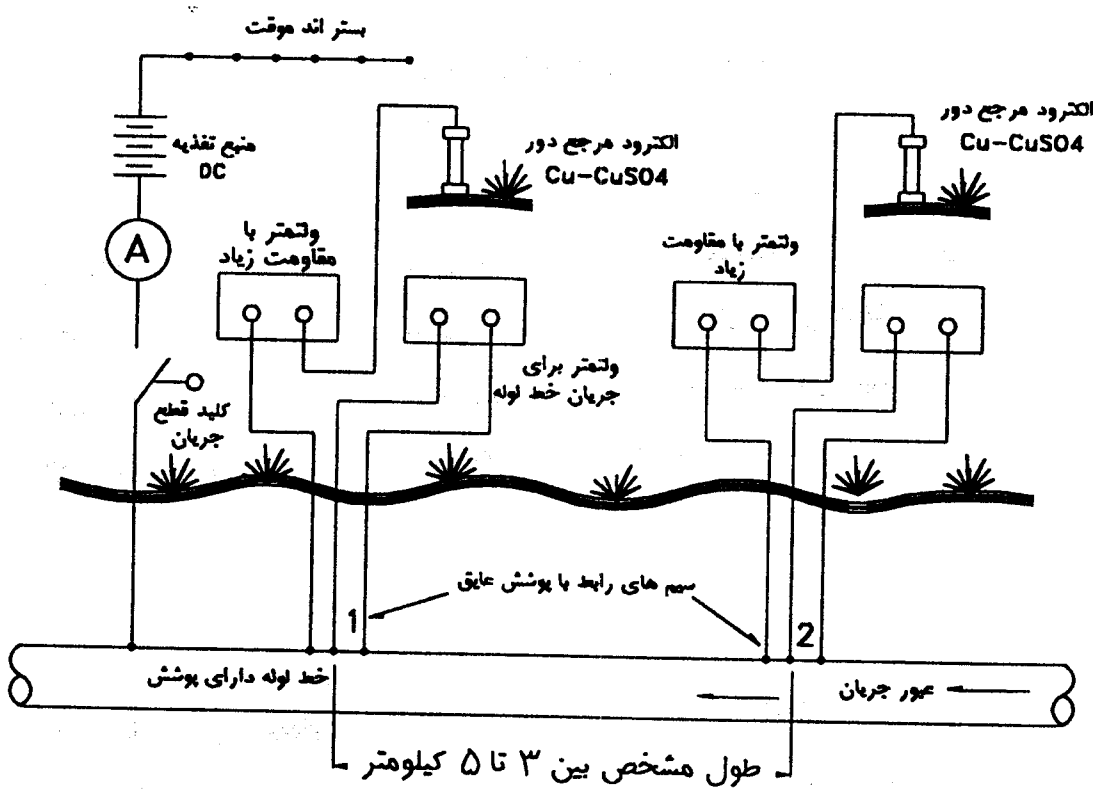
$$R_c = \frac{\Delta E_1 + \Delta E_2}{2(\Delta I_1 - \Delta I_2)}$$

که ΔE_1 و ΔE_2 اختلاف در پتانسیلهای الکترود مرجع بر حسب ولت ، ΔI_1 و ΔI_2 اختلاف در جریان خطوط لوله بر حسب آمپر و R_c مقاومت خط لوله نسبت به زمین بر حسب اهم می باشد. مقاومت مؤثر پوشش (R) برای هر فوت مربع از خط لوله با ضرب نمودن پتانسیل خط لوله نسبت به زمین (R_c) در تعداد فوت مربعهای موجود در دو موقعیت اندازه گیری بدست می آید. از این روش برای بازرسی تمام خط لوله استفاده می شود.

برای دستیابی به نتایج صحیح در این روش، جریان خط لوله باید به دقت اندازه گیری گردد. شرایطی که منجر به اندازه گیری غلط جریان خط لوله میشود، در قسمت آزمون جریانهای خط لوله ارائه گردیده است در ضمن تا

مادامیکه خط لوله تحت تأثیر جریانهای سرگردان قرار نداشته باشد اندازه گیری پتانسیل الکترود مرجع چندان مشکل نخواهد بود.

این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که مقاومت ویژه خاک بر مقاومت مؤثر پوشش تأثیر می گذارد. مثلاً ممکن است بخشی از یک خط لوله دارای پوشش که در محیطی با مقاومت ویژه بالا باشد، مقاومت مؤثر پوشش بالایی داشته باشد و یا بالعکس طول مشابهی از خط لوله دارای پوشش که در معرض خاک با مقاومت ویژه پایین قرار دارد، دارای مقاومت مؤثر پوشش پایین باشد. در هر صورت دلیل آن سری قرار گرفتن مقاومت شعاعی خاک اطراف خط لوله با مقاومت پوشش است.



شکل (۵۱): روش اندازه گیری مقاومت مؤثر پوشش

۶-۵- معیارهای اطمینان از حفاظت کافی

انجمن ملی مهندسین خوردگی آمریکا، استاندارد شماره RP-01-09 را که شامل ۵ معیار برای حفاظت کاتدی است پیشنهاد کرده اند این معیارها به صورت جداگانه و یا بصورت مجموعه نشان میدهند که آیا کنترل مناسبی برای خوردگی سازه های فولادی زیر زمینی انجام گرفته است یا خیر. این معیارها عبارتند از :

۱- پتانسیل منفی (کاتدی) حداقل برابر ۰/۸۵ ولت بین سازه و یک الکترود مرجع Cu/CuSO4 که با الکترولیت در تماس است، اندازه گیری شود.

۲- تغییر پتانسیل منفی (کاتدی) حداقل برابر با ۳۰۰ میلی ولت بین سازه و یک الکترود مرجع Cu/CuSO4 که با الکترولیت در تماس است اندازه گیری شود. این پتانسیل پس از اعمال جریان حفاظتی اندازه گیری میشود. این تغییر پتانسیل در واقع اختلاف بین پتانسیل سازه حفاظت نشده و پتانسیل سازه در حالتی که جریان حفاظتی بر آن اعمال گردیده است خواهد بود. معیار تغییر پتانسیل فقط برای سازه هایی بکار می رود که در تماس با فلزات غیر متشابه نمی باشند.

۳- تغییر پلاریزاسیون منفی (کاتدی) حداقل ۱۰۰ میلی ولت بین سازه و یک الکترود مرجع Cu/CuSO4 که با الکترولیت در تماس است، اندازه گیری گردد. این مقدار تغییر پتانسیل پلاریزاسیون با قطع جریان حفاظتی و اندازه گیری افت پلاریزاسیون مشخص میشود. به محض اینکه جریان قطع شود، یک تغییر پتانسیل ناگهانی ایجاد می شود.

۴- حداقل پتانسیل منفی (کاتدی) مطابق با آنچه که در ابتدای قسمت تافل منحنی E-logi سیستم فولاد - الکترولیت برقرار است اعمال گردد. این پتانسیل باید بین سازه و الکترود مرجع مس - سولفات مس که در تماس با الکترولیت می باشد اندازه گیری گردد. اندازه گیری جریان خالص حفاظتی از الکترولیت بداخل سازه اعمال میگردد. این روش به معیار جریان زمینی موسوم می باشد.

در مورد خطوط لوله فولادی مدفون عمدتا از ۳ معیار اول از معیارهای مذکور استفاده میگردد.

معیار جریان زمینی برای تجزیه و تحلیل خوردگی در فواصل طولانی لوله غیر عملی است. چون برای آزمایش در هر نقطه نیاز است که حفاری صورت گیرد. لذا برای هر مایل از خط لوله نیاز به صدها آزمایش خواهد بود با این وجود این روش در مشخص کردن نقاط با خوردگی موضعی شدید (نواحی آندی کوچک در تماس با نواحی کاتدی بزرگتر) کارآیی خوبی دارد.

معیار منحنی E-logi کاربرد محدودی دارد. چرا که وجود جریانهای سرگردان تأثیر سویی بر داده های اصلی خواهد داشت علاوه بر این تعیین دقیق پتانسیل در جایی که رفتار تافل در منحنی شروع می شود، به خصوص در محیطهای حاوی اکسیژن زیاد مشکل است. این معیار بیشتر در حفاظت کاتدی جداره لوله های چاههای نفت و گاز به کار برده می شود و در مورد خطوط لوله مدفون در زمین کمتر مورد استفاده قرار میگیرد. سه معیاری که عمدتا در خطوط لوله فولادی مورد استفاده قرار میگیرد، همگی بر اساس اندازه گیری میزان پتانسیل سازه به الکترولیت بنا

شده اند. ضمن اینکه در این موارد الکترود مرجع حتی الامکان باید نزدیک به سازه قرار گیرد. هر کدام از معیارهای حفاظت کاتدی، مزایا و محدودیت های خاص خود را دارند که این مزایا و محدودیت ها برای انتخاب بهترین معیار حفاظت باید مد نظر قرار گیرند.

معیار پتانسیل سازه به الکترولیت حداقل برابر با ۰/۸۵- ولت عملی ترین و اقتصادی ترین معیار برای خطوط لوله فولادی با پوشش مناسب است. این معیار با توجه به اینکه پتانسیل نواحی آندی در سازه های حفاظت نشده نباید منفی تر از ۰/۸ ولت باشد معقول بنظر می رسد.

از دیدگاه تئوری نیز وقتی سازه تا حداقل ۰/۸۵- ولت پلاریزه می شود، خوردگی باید متوقف گردد ولی برای اطمینان از حفاظت کاتدی، برخی اوقات از پتانسیل ۱- ولت نیز به جای ۰/۸۵- ولت استفاده می گردد. این معیار مخصوصاً در مورد لوله های با پوشش خوب، خطوط لوله جدید یا خطوط لوله هایی که در معرض خاکهای حاوی باکتریهای غیر هوازی فعال هستند. و همچنین نواحی که در آن جریانهای سرگردان وجود دارد و یا نواحی که کوپلهای گالوانیک (فلزات یا آلیاژهای غیر مشابه) وجود دارد مورد استفاده قرار می گیرد. از این معیار در لوله های لخت بخصوص خطوط لوله قدیمی فولادی، بدلیل جریان زیادی که برای دستیابی به پتانسیل ۰/۸۵- ولت لازم است کمتر استفاده میگردد. مثلاً اگر پتانسیل سازه در حالتی که حفاظت نشده بین ۰/۲- ولت و ۰/۵- ولت باشد، مسلماً رساندن پتانسیل به میزان ۰/۸۵- ولت نیازمند مصرف انرژی زیاد خواهد بود. در ضمن در شرایطی همچون خاکها و آبهای حاوی اکسیژن زیاد نیز دستیابی به معیار ۰/۸۵- ولت به دلیل دپلاریزاسیون مشکل خواهد بود.

در حفاظت خطوط لوله بدون پوشش یا با پوشش ضعیف به خصوص خطوط لوله فولادی قدیمی، عمدتاً از معیار تغییر پتانسیل معادل با ۳۰۰- میلی ولت استفاده می شود. این معیار بخصوص در مورد خاکها و آبهای حاوی اکسیژن زیاد که در آنها دپلاریزاسیون مشخصی اتفاق می افتد، مناسب است. معیار تغییر پتانسیل معادل با ۳۰۰- میلی ولت مخصوصاً در محلهایی که در آنها نواحی آندی و کاتدی روی خط لوله چندان موضعی نیستند مفید می باشد. البته باید در نظر داشت که این معیار ممکن است یک خط لوله جدید با پوشش مناسب را بیش از حد حفاظت نموده و در نتیجه به پوشش آن آسیب وارد نماید. که مورد آخر بخصوص در خاکهای با مقاومت ویژه پایین که در آن امکان گذشتن از حد ولتاژ اضافی هیدروژن وجود دارد بیشتر مشکل آفرین خواهد بود. از معیار تغییر پتانسیل معادل با ۳۰۰- میلی ولت در مناطقی که در آن جریانهای سرگردان وجود داشته باشد نیز خطرناک است: حال اگر موضوع پیل گالوانیک مطرح گردد، این معیار نباید مورد استفاده قرار گیرد. چون تغییر پتانسیل ۳۰۰- میلی ولت گرچه خوردگی گالوانیک فولاد متصل به مس را کم می کند اما ضرورتاً حفاظت کاتدی مناسبی فراهم نمی کند. معیار تغییر پتانسیل پلاریزاسیون معادل با ۱۰۰- میلی ولت نیز برای خطوط لوله قدیمی و بدون پوشش مورد استفاده قرار میگیرد. محدودیت های این معیار نیز مشابه مواردی است که در مورد معیار تغییر پتانسیل معادل با ۳۰۰- میلی ولت بدانها اشاره شد. با این وجود این معیار برای الکترولیتهای با افت ولتاژ اهمی بالا معیار مناسبی

می باشد. از این معیار برای خطوط لوله ای که با آندهای فدا شونده حفاظت می شوند، استفاده نمی گردد. زیرا در این سیستم قطع جریان مشکل است.

قبل از اینکه معیار خاصی را برای اطمینان از حفاظت مناسب خط لوله انتخاب گردد باید برخی عوامل و شرایط را مد نظر داشت. خوشبختانه هنگامی که معیار مناسبی انتخاب گردد و اطلاعات مربوط به پتانسیل سازه - الکترولیت به دقت ارزیابی گردد. می توان با درجه بالایی ازمیزان حفاظت مناسب سازه اطمینان حاصل نمود.

۷- شناخت و بررسی استانداردهای معتبر بین المللی

۷-۱-بررسی استاندارد BS 7361, Part1 , 1991

استاندارد BS 7361 که در واقع جایگزین استاندارد CP 1021 : 1973 شده است در ارتباط با روشهای حفاظت از خوردگی سازه های فلزی مدفون یا غوطه ور و همچنین حفاظت داخلی مخازن حاوی الکترولیت بحث می نماید. این استاندارد در مورد حفاظت کاتدی سازه های فرا ساحلی مطالبی ارائه نمی نماید.

این استاندارد شرایط عمومی را که تحت آن کاربرد حفاظت کاتدی بعنوان یک روش کنترل خوردگی اقتصادی می باشد را بیان میکند.

۷-۱-۱- فهرست مطالب استاندارد BS7361

فصل اول - مقدمه، موارد هدف و تعاریف واژه های علمی و فنی

فصل دوم - اصول و مبانی علمی خوردگی و حفاظت کاتدی، شامل :

۱- مقدمه

۲- عملکرد فلزات مدفون یا غوطه ور بدون اعمال حفاظت کاتدی

۳- طبیعت خوردگی فلزات

۴- پولاریزاسیون

۵- تشکیل پیل ها

۶- روئین شدن

۷- واکنشها در نقاط کاتدی

۸- حفاظت کاتدی

۹- اصول حفاظت کاتدی

۱۰- معیارهای حفاظت کاتدی

فصل سوم - کاربرد : بررسیها در ارتباط با اکثر انواع سازه ها، شامل:

۱- مقدمه

۲- محدوده های کاربرد

۳- اصول طراحی

۴- طراحی یا ایجاد تغییر و تحول لازم در سازه های تحت حفاظت

۵- سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده

۶- اصول کلی در ارتباط با آندهای فدا شونده

۷- طراحی سیستم آندهای فدا شونده

۸- انواع مواد آندهای فدا شونده

۹- سیستم حفاظت کاتدی از طریق اعمال جریان

۱۰- اصول کلی سیستم اعمال جریان

۱۱- انواع آندها و بستر آندها برای سیستم حفاظت کاتدی نوع اعمال جریان

۱۲- منابع جریان

۱۳- سیستم های مبدل - یکسو کننده

۱۴- وسایل کنترل

۱۵- مقایسه سیستم های مختلف

۱۶- بررسیهای خاص

۱۷- اثرات ثانویه حفاظت کاتدی

۱۸- اثرات جریانهای سرگردان حاصل از تأسیسات حفاظت کاتدی

۱۹- پیشگیری از خسارات و آسیبهای حاصل از حفاظت اضافی

۲۰- اثرات جریان های متناوب بر روی سیستم های حفاظت کاتدی

۲۱- روشهای آزمایش

فصل چهارم : کاربرد حفاظت کاتدی برای سازه های مدفون، شامل:

۱- مقدمه

۲- موارد عمومی

۳- عوامل مؤثر در طراحی

۴- سیستم حفاظت کاتدی بروش آندهای فدا شونده

۵- سیستم حفاظت کاتدی بروش اعمال جریان

۶- خطوط لوله

۷- آماده سازی سازه ها

۸- کاربردهای حفاظت کاتدی

۹- بررسیهای خاص

۱۰- کابلها

۱۱- حفاظت کف مخازن ذخیره و سازه های مشابه

۱۲- سازه های مدفون در مجاورت وسایل برقی با برق مستقیم

فصل پنجم : آرماتورهای فولادی در بتون، شامل:

۱- مقدمه

۲- حفاظت کاتدی فولاد در بتون

۳- کاربرد حفاظت کاتدی در بتون

۴- بازرسیهای مقدماتی

۵- آزمایشات چشمی

۶- ازمایشات ترسیم نقشه با خطوط هم پتانسیل

۷- آنالیز میزان کلر

۸- اندازه گیری عمق کربناسیون

۹- وضعیت قرار گیری آرماتورها

۱۰- معیارهای حفاظت

۱۱- بررسیها از دیدگاه طراحی

۱۲- دانسیته جریان لازم برای حفاظت

۱۳- توزیع آندها

۱۴- سیستم های آندی

۱۵- اتصالات کاتدی

۱۶- کنترل جریان

۱۷- آرماتورهای پیش تنیده

۱۸- حدود پتانسیل حفاظت

۱۹- عوامل مؤثر در انتخاب نوع سیستم حفاظت کاتدی

۲۰- مونیتورینگ حفاظت کاتدی

فصل ششم : کاربرد حفاظت کاتدی در کشتی ها، شامل :

۱- مقدمه

۲- حفاظت کاتدی بدنه کشتی ها

۳- عوامل مؤثر در طراحی

۴- دانسیته جریان لازم برای حفاظت

۵- کاربرد سیستم آندهای فدا شونده

۶- کاربرد سیستم اعمال جریان

۷- حفاظت بدنه کشتی در خلال تعمیرات و آماده سازی

۸- حفاظت مخازن کشتی ها

۹- پارامترهای مؤثر در طراحی حفاظت کاتدی

۱۰- پوششهای محافظ

۱۱- نوع آندهای مناسب برای حفاظت کاتدی

فصل هفتم : سازه های غوطه ور، شامل :

۱- مقدمه

۲- آماده سازی سازه

۳- کاربردهای حفاظت کاتدی

۴- تداخل با سازه های اطراف

فصل هشتم : حفاظت داخلی سازه های حاوی الکترولیت، شامل:

۱- مقدمه

۲- عوامل مؤثر در طراحی

۳- آندهای فدا شونده

۴- سیستم اعمال جریان

۵- ارزیابی میزان حفاظت اعمال شده

۶- مخازن ذخیره

۷- مخازن نگاهداری مواد شیمیایی

۸- سیستم های حاوی آب در گردش

۹- مبدلهای حرارتی (از نوع لوله و صفحه)

۱۰- کولرها

فصل نهم : روشهای مراقبت از سازه های مجاور، شامل :

۱- مقدمه

۲- سازه های مدفون

۳- آزمایشات تداخل

۴- معیارهای محدود سازی تداخل ها

۵- طراحی تأسیسات حفاظت کاتدی برای کاهش خوردگی حاصل از تداخل

۶- روشهای کاهش تداخل

۷- کشتی ها و سکوها : تداخل در دریا و رودخانه

فصل دهم : اندازه گیری های الکتریکی، شامل :

۱- مقدمه

۲- وسایل اندازه گیری پتانسیل

۳- الکترودهای مرجع و پتانسیل های آنها

۴- ولت مترها

۵- وسایل ثبت اطلاعات

۶- روشهای اندازه گیری پتانسیل

۷- سازه های مدفون

۸- سازه های غوطه ور

۹- سازه های حاوی الکترولیت

۱۰- اندازه گیری جریان مستقیم

۱۱- سیستم های اعمال جریان

۱۲- مدارهای با ولتاژ خیلی پایین

۱۳- آمپر متر با مقاومت صفر

۱۴- جریان خطوط لوله

۱۵- اندازه گیری مقاومت

۱۶- مقاومت الکترود زمین و مقاومت مخصوص خاک

۱۷- آزمایشات مقدماتی قبل از نصب سیستم حفاظت کاتدی

۱۸- بازرسیهای پتانسیل طبیعی سازه - الکترولیت

۱۹- جریانهای الکتریکی سرگردان

۲۰- بازرسیهای خاص

۲۱- بازرسیهای پیرسون

۲۲- بازرسیهای میرایی جریان

فصل یازدهم : راه اندازی، بهره برداری و نگهداری، شامل :

۱- مقدمه

۲- آزمایشات لازم در خلال انجام راه اندازی

۳- سازه های مدفون

۴- سازه های غوطه ور ثابت

۵- بدنه های کشتی ها

۶- سازه های بتونی مسلح

۷- حفاظت داخلی سازه های حاوی الکترولیت

۸- بهره برداری و نگهداری : بررسیهای مربوط به انواع سازه ها

۹- نگهداری تأسیسات آندهای فدا شونده

۱۰- نگهداری تأسیسات سیستم اعمال جریان

۱۱- سازه های مدفون : عملکرد و نگهداری

۱۲- سازه های غوطه ور : عملکرد و نگهداری

۱۳- سازه های بتونی مسلح : عملکرد و نگهداری

۱۴- حفاظت داخلی سازه ها : عملکرد و نگهداری

۱۵- مخازن کشتی ها : عملکرد و نگهداری

فصل دوازدهم : مراقبتها، شامل :

۱- مقدمه

۲- استانداردها و قوانین کاربردی

۳- خطرات شوک های الکتریکی

۴- سازه های مدفون

۵- سازه های غوطه ور

۶- سازه های حاوی الکترولیت

۷- شرایط ایجاد اشکال در سیستم های تولید برق

۸- ولتاژها و جریانهای متناوب القایی

۹- تصاعد گازهای خطرناک

۱۰- تصاعد گاز هیدروژن

۱۱- تصاعد گاز کلر

۱۲- تأسیسات حفاظت کاتدی در آتمسفرهای خطرناک

۱۳- اتصالات عایق

۱۴- اتصالات مدار کوتاه بین نقاط با پتانسیلهای مختلف

۱۵- جدا شدن اتصالات یا ایجاد شکستگی در خطوط لوله تحت حفاظت

۱۶- وسایل الکتریکی

۱۷- وسایل آزمایش

۱۸- آندهای داخلی

۱۹- خطوط بار گذاری

۲۰- آموزش پرسنل

بررسی مطالب و نکات مهم در فصول مختلف

۷-۱-۲- کاربردهای حفاظت کاتدی برای سازه های مدفون

در این فصل اطلاعاتی راجع به کاربردهای حفاظت کاتدی برای سازه های مدفون همچون خطوط لوله، کابلها و سطح خارجی کف مخازن ارائه می گردد. در این فصل همچنین راجع به حفاظت کاتدی طول کوچکی از یک خط لوله که در داخل آب غوطه ور می گردد مانند عبور خط لوله از داخل رودخانه نیز پرداخته می شود. عوامل مؤثر در طراحی عبارتند از:

الف - طبیعت محیط خورنده : طبیعت شیمیایی و فیزیکی محیط و تغییرات روزانه و فصلی آن برای طراحی ضروری بوده و در هنگام اندازه گیری جریان مورد نیاز باید ملحوظ گردد.

ب - طبیعت پوشش : توجه به پتانسیل بعنوان تنها معیار حفاظت کاتدی کافی نیست و با توجه به افت پتانسیل در داخل پوششهای دارای ضخامت و مقاومت مختلف باید به این امر توجه خاص مبذول گردد. بمنظور جلوگیری از کنده شدن پوشش باید جریان حفاظتی طوری تنظیم گردد تا پتانسیل سازه - الکترولیت از حد مجازی که سازنده های پوشش اعلام کرده اند منفی تر نگردد.

ج - سطح پلاریزاسیون : برای سازه های فولادی، معیار معمولی حفاظت عبارت از ۰/۸۵- ولت نسبت به الکترود مس - سولفات مس می باشد. اما هنگامیکه شرایط خاک غیر هوازی بوده و خاک دارای باکتریهایی از نوع احیا کننده سولفات باشد[1] ، معیار حفاظت ۰/۹۵- ولت خواهد بود.

د - مقاومت الکتریکی خطی

ح - میزان نزدیکی سازه تحت حفاظت با دیگر سازه های مدفون

و - در دسترس بودن منبع تولید جریان برق

ز - جریانهای سرگردان

۷-۱-۲-۱- سیستم آندهای فدا شونده

در اینجا از آندهای منیزیمی بطور وسیع استفاده می شود. اما از آندهای روی در مواقعی که مقاومت مخصوص خاک خیلی کم باشد مثلاً کمتر از ۱۰ اهم- متر استفاده می شود. گرچه آندهای منیزیمی دارای پتانسیل محرکه بالاتری هستند اما استفاده از آنها منوط به دارا بودن مقاومت مخصوص خاک پایین تر از ۵۰ اهم - متر می گردد. برای کاهش مقاومت بین آندهای فدا شونده و خاک از یک نوع پشت بند مخصوص استفاده می شود. مواد پشت بند باید یک نوع الکترولیت با مقاومت مخصوص مناسب بوده و نسبت به آند خورنده نباشد. فرمول عمومی پشت بند عبارتست از ۷۰٪ سولفات کلسیم، ۲۵٪ بنتونیت و ۵٪ سولفات سدیم می باشد. در اینجا قابل ذکر است که در این گونه موارد هرگز نباید از پشت بند کربنی استفاده شود. تأسیسات حفاظت کاتدی با آند منیزیمی برای مدت زمانهای بیش از ده سال طراحی می گردد. با این حال باید عملکرد آندها را از طریق اندازه گیریهای پتانسیل و جریان کنترل نمود و در صورت ضرورت آنها را تعمیر یا تعویض نمود. احتمال بوجود آمدن تداخل حاصل از سیستم آندهای فدا شونده بسیار ضعیف بوده و در ضمن خسارات ناشی از حفاظت اضافی نیز بسیار کم می باشد.

---

۱) Sulphate Reducing Bacteria

۷-۱-۲-۲- سیستم اعمال جریان

در اینجا از مواد کربنی (مانند کک) بعنوان پشت بند استفاده می شود. قابل ذکر است که مواد پشت بند در قسمت بالای آند از جنس شن های نسبتاً درشت باشد تا خروج گاز حاصل از واکنش امکان پذیر باشد. این گاز بطور عادی اکسیژن است. اما در صورتیکه محلول حاوی یون کلراید باشد گاز خروجی گاز کلر خواهد بود که در این صورت باید مواد عایق برای اتصال آن به کابل در مقابل گاز کلر مقاوم باشد.

معمولاً استفاده از یک آند که دارای مقاومت مناسبی نسبت به خاک باشد غیر ممکن است بهمین دلیل در اکثر موارد از مجموعه ای از آندها که بطور موازی با یکدیگر متصل شده اند استفاده می شود که به آن بستر آندی گویند.

آندها و یا بستر آند باید در محلی که دارای کمترین مقاومت مخصوص ممکن باشد دفن گردند، در صورتیکه این محل بطور طبیعی مرطوب نباشد باید بصورت مصنوعی آن را مرطوب نگهداشت. این محل بایستی دارای فاصله مناسبی نسبت به سازه های اطراف بوده و همچنین از لحاظ نگهداری و کنترل قابل دسترس بوده و همچنین به محل منبع جریان برق نزدیک باشد. بستر آند بطور معمول باید در فاصله ای حداقل برابر با ۱۰۰ متر از سازه تحت حفاظت قرار داده شود تا بتواند توزیع جریان یکنواختی را ارائه نموده و در نتیجه حفاظت اعمال شده بر سازه یکنواخت باشد. اما در مواردیکه سازه دارای شکل پیچیده باشد باید از تعدادی از بسترهای آند کوچکتر که خیلی نزدیک به سازه تحت حفاظت قرار داده می شوند استفاده نمود.

۷-۱-۲-۳- پیوستگی الکتریکی در خطوط لوله

ضروریست که سازه های تحت حفاظت از لحاظ فلزی پیوسته بوده و دارای مقاومت الکتریکی پایین باشند خطوط لوله فولادی که توسط جوشکاری بیکدیگر وصل شده اند از لحاظ الکتریکی پیوسته هستند ولی خطوط لوله با اتصالات مکانیکی ممکن است دارای پیوستگی لازم نباشند. مقاومت محل اتصال در خطوط لوله باید پایین باشد.

۷-۱-۲-۴- پوشش خطوط لوله

خطوط لوله مدفون معمولاً پوشش می شوند. پوششها دانسیته جریان لازم برای حفاظت را کاهش میدهند و توزیع حفاظت را بر سطح خطوط لوله یکنواخت می نمایند. و تنها در محلهایی که پوشش ها دارای عیب و حفره می باشند حفاظت کاتدی ضروری می گردد. انواع پوششهای مناسب برای خطوط لوله عبارتند از :

۱- قطران ذغال سنگ یا پوششهای با قیر طبیعی، اینها معمولاً بطور داغ اعمال شده و همراه با این پوششها از فیبرهای غیر آلی بعنوان تقویت کننده استفاده می شود.

۲- نوارهای پلاستیکی بر پایه پلی وینیل کلراید یا پلی اتیلن که در بعضی اوقات بهمراه آن از ترکیبات لاستیکی نیز استفاده می شود.

۳- رزینهای اورتان که توسط برس یا اسپری اعمال می گردد

۴- پلی اتیلن با دانسیته بالا

۵- رزینهای اپوکسی

قابل ذکر است که مقاومت الکتریکی پوشش خطوط لوله هنگامیکه حفاظت کاتدی اعمال می گردد بسیار مهم است در ابتدای حفاظت کاتدی با استفاده از مواد پوشش مناسب حتی به مقاومت الکتریکی پوشش معادل با ۱۰۰۰۰ اهم متر مربع نیز می توان رسید. همانطور که گفته شد با اعمال پوشش مناسب فقط نیاز خواهد بود تا حفره های ریز موجود در پوشش را حفاظت نمود در نتیجه دانسیته جریان لازم برای حفاظت در ابتدا ۰/۰۵ میلی آمپر بر مترمربع یا کمتر خواهد شد.

در اطراف خط لوله باید پشت بندی با حداقل ضخامت ۱۵۰ میلی متر استفاده شود. مواد پشت بند باید عاری از سنگ و شن و همچنین مواد کربنی نظیر کک باشد. در صورتیکه نتوان از مواد طبیعی بعنوان پشت بند استفاده شود میتوان از موادی همچون شبکه های مش نازک پلاستیکی بر روی خطوط لوله استفاده نمود. در ضمن در محلهایی که خطوط لوله از رودخانه عبور می کند می توان از پوشش بتونی بر روی پوشش خطوط لوله استفاده نمود.

بمرور که پوشش به زوال کشیده می شود دانسیته بیشتری برای حفاظت نیاز می باشد و این باید بهنگام طراحی ملحوظ گردد. عواملی که باعث زوال پوشش می گردند عبارت از باکتریهای خاک، تنشهای خاک، حرکات خطوط لوله، اثرات درجه حرارت مواد موجود در داخل خطوط لوله، جذب رطوبت، خسارات مکانیکی ناشی از برخورد هر شئی با خطوط لوله و حفاظت اضافی می باشند.

۷-۱-۲-۵- اتصالات عایق در خطوط لوله

در خیلی از موارد سازه تحت حفاظت دارای پوشش در تماس الکتریکی با سازه هایی می باشد که یا دارای پوشش نبوده و یا از پوشش ضعیفی برخوردار هستند بعنوان نمونه ای از این سازه ها می توان از مخازن ذخیره، میله اتصال زمین و غیره نامبرد. این نوع سازه ها می توانند مقدار زیادی از جریان حفاظتی را دریافت نمایند. برای جلوگیری از این اتلاف جریان باید این نوع سازه ها را از سازه تحت حفاظت ایزوله نموده تا جریان حفاظتی صرف حفاظت سازه مورد نظر گردد. ایزولاسیون الکتریکی همچنین برای جداسازی فلزات غیر متشابه و همچنین جداسازی تأسیسات تحت حفاظت کاتدی با سیستم اعمال جریان از تأسیسات تحت حفاظت کاتدی با سیستم آند فدا شونده نیز کاربرد دارد. به سازه ایزوله شده از سازه تحت حفاظت سازه ثانویه می گویند. قابل ذکر است که هنگام بررسی از چگونگی انجام حفاظت بر سازه تحت حفاظت باید سازه ثانویه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

اتصالات بکار رفته در ایزولاسیون باید در مقابل شرایط حاکم بر سازه یا تأسیسات از جمله فشار و دما و غیره مقاوم باشند. شکسته شدن و از بین رفتن ایزولاسیون یکی از عوامل اصلی در ناکام ماندن حفاظت کاتدی بر سازه ها می باشد.

بهمین دلیل باید محل ایزولاسیون، روش ایزولاسیون و سهولت تعمیر یا تعویض اتصالات عایق مورد بررسی دقیق قرار گیرد.

۷-۱-۲-۶- ایستگاههای آزمون

این ایستگاهها باید در مسیر خطوط در فواصل مناسب (معمولاً یک ایستگاه در هر کیلومتر) برای اندازه گیری پتانسیل لوله-خاک در نظر گرفته شوند. هادیهای عایق شده که از یک سر به خط لوله متصل شده اند از سر دیگر به ترمینالهای موجود در ایستگاهها وصل می گردند. در صورتیکه در نقاط خاصی شرایط خاص موجود باشد مثلاً در نقاطی که خاک بطور قابل ملاحظه ای خورنده است می توان ایستگاههای آزمون اضافی را نیز تعبیه کرد. در ضمن در محلهایی که خط لوله در مجاورت با سازه های دیگر قرار می گیرد نیز وجود ایستگاههای آزمون اضافی برای بررسی و آزمایشات تداخل ضرورت می یابد.

ضروری است تا محل اتصال سیم ها به خط لوله بطور دقیق عایق بندی شوند. روش اتصال سیم ها به خط لوله میتواند بر حسب شرایط محیط متغیر باشد اما هر روش که انتخاب شود باید توجه شود که ارتباط الکتریکی بطور صحیح برقرار باشد. اتصالات جوشکاری شده یا لحیم کاری شده به اتصالات پیچ و مهره ای ارجحیت دارد. در ارتباط با انجام اتصالات با خطوط لوله فولادی با مقاومت کششی بالا باید توجه خاص مبذول شود که محل اتصالات در فاصله ای کمتر از ۱۵۰ میلی متر از محل جوشهای طولی خط لوله نبوده و در ضمن محل اتصال نیز باید بطور دقیق جوشکاری شود همچنین باید مطمئن بود که عمل جوشکاری اثرات منفی از لحاظ متالورژیکی بر خط لوله نداشته باشد. در صورتیکه جوشکاری مناسب نمی باشد باید از رزینهای اپوکسی هادی استفاده شود. درهنگام انجام اتصالات به لوله های چدنی باید توجه شود که لوله تحت آسیب ترک دار شدن قرار نگیرد. برای انجام اتصالات به لوله های دارای پوشش باید مواظبت نمود تا پوشش تحت تأثیر کندگی قرار نگیرد. سیم هایی که به محل ترمینال موجود در ایستگاههای آزمون وصل می شوند باید دارای مشخصه هایی بوده تا براحتی قابل شناسایی باشند. قسمت بیرونی محفظه های اندازه گیری باید در مقابل شرایط آب و هوایی کاملاً مقاوم باشند. این محفظه ها باید پس از انجام آزمایشات قفل شده تا از هر گونه تعرض در امان باشند.

۷-۱-۲-۷- کاربرد های حفاظت کاتدی در خطوط لوله

استفاده از سیستم های آندهای فدا شونده محدود به خطوط لوله ای است که اولاً دارای پوشش مناسب بوده و ثانیاً در خاکهایی که دارای مقاومت ویژه پایین یا متوسط هستند قرار گرفته باشند.سیستم اعمال جریان برای محدوده وسیعی از مقاومت ویژه خاک و همچنین برای محدوده وسیعی از پوششها با کیفیت مختلف کاربرد دارد. انتخاب بین یکی از دو سیستم بستگی به ارزیابی دقیق فنی و اقتصادی دارد.

۷-۱-۲-۸- روش آندهای فدا شونده

آندها باید در فواصل مشخصی در طول خط لوله طوری توزیع شوند که حفاظت کامل به تمام نقاط بین فواصل اعمال گردد. تا آنجا که شرایط و موقعیت قرار گرفتن خط لوله اجازه می دهد باید آندها در نقاطی با مقاومت ویژه پایین و در حداقل مسافت ۱/۵ متر از خط لوله و در عمق معادل با عمق دفن خط لوله قرار داده شوند. در ضمن لازم است که آندها بطور پیوسته مرطوب بمانند. در صورتیکه در اطراف سازه تحت حفاظت سازه ثانویه وجود داشته باشد لازم است تا برای کاهش اثرات تداخل، آندها در فاصله حداقل ۲ متر از سازه های مدفون ثانویه قرار گیرند. همچنین سازه های ثانویه نباید بین سازه های تحت حفاظت و آندها قرارداشته باشند.

تحت شرایط خاص، ترجیح داده می شود تا تعدادی از آندها بطور گروهی در نقطه ای دور از خط لوله قرار گیرند. از آندهای فدا شونده همچنین برای حفاظت موقتی قسمتهایی از یک خط لوله استفاده می شود. برای مثال در فاصله زمانی قبل از راه اندازی یک سیستم حفاظت کاتدی اعمال جریان نیاز است تا قسمتهایی از خط لوله بطور موقت حفاظت شوند. در ضمن برای بالا بردن ضریب اطمینان حفاظتی در نقاطی از خطوط لوله که به آن نقاط حساس گفته میشود نیاز است که بطور موضعی از آندهای فدا شونده استفاده شود.

۷-۱-۲-۹- تأسیسات تحت حفاظت با روش اعمال جریان

با استفاده از این سیستم طول قابل ملاحظه ای از خط لوله توسط یک منبع جریان واحد تحت حفاظت قرار می گیرد. خط لوله لخت ممکن است برای هر ۲ یا ۳ کیلومتر نیاز به منبع جریان داشته باشند. استفاده از پوشش با کیفیت خوب ممکن است این فاصله را به ده برابر یا بیشتر بسته به مقاومت پوشش، مقاومت طولی خط لوله افزایش دهد.

منبع تولیدبرق مستقیم معمولی عبارت از یک مبدل - یکسو کننده می باشد. هنگامیکه جریان برق اصلی در اختیار نباشد از منابع دیگر همچون پیل های خورشیدی و سیستم های ترموالکتریک می توان استفاده کرد.

بستر آند باید در فاصله کافی (حدود ۱۰۰ متر یا بیشتر) از خطوط لوله قرار داده شود. سیستم باید بطور ادواری تحت بازرسی باشد. در نقاطی که عوامل فصلی باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه ای در مقاومت بستر آند می نماید باید از منبع جریان برق مستقیم با خروجی جریان ثابت استفاده شود قابل ذکر است که در طراحی سیستم اعمال جریان باید اثرات تداخلی آن بطور دقیق ملحوظ گردیده و روشهای مناسب کنترل آن نیز اعمال گردد. تحت شرایط خاص یک سیستم حفاظت کاتدی ممکن است برای حفاظت دو سازه مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

۷-۱-۲-۱۰- غلاف های فلزی خطوط لوله

در بعضی نقاط بر سطح خطوط لوله مدفون از غلافهای فلزی استفاده می شود. این غلافها به سطح خطوط لوله جوش داده می شود تا از عدم ورود رطوبت به سطح فلز اطمینان حاصل شود. در ضمن فضای بین غلافها و خطوط لوله را نیز

با گاز خنثی و خشک نظیر گاز نیتروژن تحت فشار پر می نمایند. اگر سطح خارجی غلافهای فلزی پوشش داده شود در این صورت دانسیته جریان مورد نیاز برای حفاظت خط لوله تغییر چندانی نخواهد کرد و این ایده آل ترین حالت است.
اگر غلافهای فلزی مانند بالا تهیه و استفاده نشده باشد در این صورت مشخص نمی باشد که شرایط حفاظت کاتدی خط لوله چگونه خواهد بود. در این گونه موارد بهتر است بجای استفاده از غلاف از لوله های ضخیم تر استفاده شود حال اگر استفاده از غلاف بدلایلی ضروری و اجباری باشد در این صورت باید سطح خط لوله موجود در داخل غلاف با ضریب اطمینان بالا پوشش داده شود ثانیاً باید غلاف فلزی از سطح خط لوله بخوبی عایق بندی شود. ثالثاً سطح خارجی غلاف فلزی باید با دقت پوشش داده شود. در ضمن باید از بوجود آمدن آسیبها و خسارات به پوشش هم برای سطح خط لوله و هم بر سطح خارجی پوشش پیشگیریهای لازم بعمل آید.
راه دیگر برای کنترل خوردگی خط لوله موجود در سطح زیرین غلاف فلزی آن است که از آندهای فدا شونده روی و منیزیم استفاده شود. این آندها باید در فضای محدود بین غلاف فلزی و خط لوله بکار برده شده و سپس به سطح خط لوله متصل شوند. مشکلی که در این روش حفاظتی وجود دارد آنست که مشخص نخواهد بود که وضعیت حفاظتی در این سطح فضای بسته و با عدم یکنواختی توزیع رطوبت چگونه خواهد بود.

۷-۱-۲-۱۱- خطوط لوله پوشش شده با بتون

بعضی نقاط از خطوط لوله همچون محل عبور خط لوله از رودخانه باید توسط بتون پوشش داده شود. در این حالت قبل از اعمال پوشش بتون باید سطح خط لوله با همان پوششی که بر دیگر نقاط خط لوله پوشش شده است با دقت پوشش داده شود.

۷-۱-۲-۱۲- حفاظت خطوط لوله قدیمی

حفاظت کاتدی، معمولاً بروش اعمال جریان، را می توان به خطوط لوله قدیمی لخت و یا دارای پوشش ضعیف برای افزایش عمر آنها اعمال نمود. برای این خطوط لوله در ابتدا دانسیته جریان حفاظتی بالا مورد نیاز می باشد.
اما بمرور با انجام پولاریزاسیون بر سطح خطوط لوله، نیاز به دانسیته جریان حفاظتی کم شده بطوریکه پس از مدتی میزان دانسیته جریان مورد نیاز بمقدار قابل ملاحظه ای کاهش خواهد یافت.

۷-۱-۲-۱۳- جدا شدن لایه های اکسیدی

در صورتیکه برای طولانی کردن عمر خطوط لوله قدیمی از حفاظت کاتدی استفاده شود ممکن است موقتاً تعداد نشتی های خط لوله بدلیل جدا شدن لایه های اکسیدی از نقاط خورده شده قبلی افزایش یابد. اکثریت این نشتی ها در اولین یا حداکثر دومین سال پس از اعمال حفاظت کاتدی بوجود می آیند.

۷-۱-۲-۱۴- محل تقاطع خطوط لوله با رودخانه

هنگامیکه نیاز باشد تا یک خط لوله مدفون در قسمت کوتاهی از مسیر خود از داخل رودخانه بگذرد آن قسمت نیز در محاسبات مربوط به حفاظت کاتدی این خط لوله باید ملحوظ گردد. برای حفاظت باید اتصال این قسمت با قسمتهای دیگر بسیار خوب بوده تا پیوستگی الکتریکی برقرار بوده و همچنین توزیع یکنواخت پتانسیل نیز انجام گردد. پوشش این قسمت باید مناسب بوده و با همان کیفیتی که دیگر قسمتها پوشش شده اند پوشش گردد و سپس از پوشش بتونی بر سطح آن استفاده گردد قابل ذکر است که پوشش بتونی هم برای ایجاد مقاومت در مقابل صدمات مکانیکی و هم از جهت سنگین تر شدن و در نتیجه غوطه ور ماندن در داخل آب استفاده می شود.

در صورتیکه برای این قسمت از خط لوله نیاز به دانسیته جریان بیشتری باشد باید ابتدا این قسمت را با فلنجهای عایق از دیگر قسمتها جدا ساخته و سپس یک سیستم حفاظت کاتدی اختصاصی برای آن در نظر گرفت.

۷-۱-۲-۱۵- حفاظت کاتدی کابلها

اصول کلی حفاظت کاتدی کابلهای مدفون دارای پوشش های محافظ فلزی و آرماتورهای فولادی مانند اصول حفاظت کاتدی خطوط لوله مدفون می باشد.

در حفاظت کاتدی کابلها باید توجه گردد که اتصالات فلزی مناسب در کل سازه بطور یکنواخت برقرار باشد. پوشش مناسب برای کابلها عبارت از کاغذهای قیری و یا لایه هایی از ماده هسیان می باشند. کابلهای با پوشش سربی در محیطهای مرطوب قابل حفاظت هستند. در این حالت این نوع کابل را می توان بدون اعمال پتانسیل بشدت منفی برای طولهایی تا حد ۲ کیلومتر از نقطه شروع حفاظت نمود.

برای حفاظت کاتدی کابلهای آلومینیومی یا دارای پوشش آلومینیومی مشکلات خاصی وجود دارد.

۷-۱-۲-۱۶- حفاظت کاتدی کف مخازن

مخازن ذخیره بزرگ مانند آنچه که در صنایع نفت مورد استفاده قرار می گیرد معمولاً بر روی یک پی خاکی نصب میگردند. قسمت بالایی پی این مخازن از مخلوطی از شن و قیر تشکیل شده است. برای کف این مخازن نیز از یک نوع پوشش استفاده می شود. در خلال نصب و نیز پس از کار کردن، این مخازن دچار خمیدگی و فرورفتگی می شوند در نتیجه مخلوط قیر و شن موجود در زیر آنها پس زده می شوند. در اثر این پس زدگی قسمتهایی از کف مخازن در تماس مستقیم با پی خاکی قرار می گیرد. قابل ذکر است که همچنین در اثر جوشکاری قسمتهایی از پوشش کف مخازن از بین می رود و در نتیجه مجدداً کف مخازن در تماس مستقیم با خاک قرار میگیرد. حال اگر خاک کف مخازن دارای نمک باشد یا مثلاً بصورتی در تماس با آب دریا قرار داشته باشد در این صورت محیط زیر کف مخازن محیطی بشدت

خورنده خواهد بود. در این صورت برای تقویت حفاظت حاصل از پوشش کف مخازن نیاز است تا از حفاظت کاتدی نیز استفاده شود.

پی کف مخازن باید بصورتی درست شده باشد تا بتواند جریان حفاظتی را بطور یکنواخت در کف مخازن توزیع نماید. برای این منظور نباید از شن و سنگهای درشت برای پی کف مخازن استفاده کرده و باید این پی از ذرات بسیار ریز شن که بطور کاملا" یکنواخت کوبیده و فشرده شده اند استفاده شود. حداقل ضخامت این لایه باید ۱۵۰ میلی متر باشد.

این مخازن فولادی معمولا" از طریق جوشکاری تهیه می شوند بنابراین دارای یکنواختی الکتریکی می باشند. وقتیکه گروهی از مخازن تحت حفاظت کاتدی می باشند باید اتصال الکتریکی مناسب بین تک تک مخازن موجود باشد. در صورتیکه نیاز باشد تا فقط مخازن حفاظت کاتدی شوند باید در محل اتصال آنها با خطوط لوله از اتصالات عایق استفاده شود. در صورتیکه مواد قابل اشتعال در داخل مخازن نگهداری می شود باید اتصالات عایق در خارج از مخازن قرار داده شوند. الکترود زمین نیز به این نوع مخازن وصل می شود باید از جنس روی، فولاد ضد زنگ یا فولاد گالوانیزه باشد.

دانسیته جریان لازم برای حفاظت مخازن بدون پوشش در حدود ۱۰ میلی آمپر بر متر مربع بوده و برای انجام حفاظت کاتدی نیز بهتر است تا از روش اعمال جریان استفاده شود. البته برای مخازن کوچک و همچنین در مواقعی که خاک دارای مقاومت مخصوص پایین باشد می توان از روش آندهای فدا شونده نیز استفاده کرد.

درصورتیکه عملی باشد باید بسترهای آند بطور قرینه در اطراف مخزن یا گروهی از مخازن قرار داده شود در صورتیکه فضای کافی در اطراف مخزن وجود داشته باشد باید بستر آندها را در فاصله ای حداقل برابر با اندازه قطر مخزن از لبه کناری محیط مخزن قرار داد تا بتواند توزیع جریان مناسبی را بر سطح زیرین کف مخازن ارائه نماید. در صورتیکه این حالت عملی نباشد باید تعدادی از آندها یا بستر آندها را در اطراف مخزن با فواصل منظم قرار داده و یا از یک گودال آندی با تعدادی آند استفاده شود. در حالت اخیر برای ایجاد توزیع جریان یکنواخت باید آند بالایی حداقل ۱۰ متر از کف مخزن فاصله داشته باشد.

پتانسیل سازه - خاک در زیر مخازن تحت حفاظت یکسان نمی باشد بطوریکه پتانسیل در لبه بیرونی محیط مخازن باید منفی تر از ۰/۸۵- ولت باشد تا پتانسیل حفاظتی کافی در مرکز کف مخازن حاصل گردد. برای مخازن جدید، الکترودهای مرجع را می توان در محل های مشخصی در پی کف مخازن نصب نمود. این الکترودها باید طوری نصب گردند که برای مدت مدیدی سالم باقی مانده و برای اندازه گیری قابل استفاده باشند.

در صورتیکه الکترودهای مرجع دائمی در کف مخازن نصب نشده باشند می توان از الکترودهای مرجع معمولی مس - سولفات مس استفاده نمود. در این صورت فقط می توان پتانسیل لبه کناری مخازن را اندازه گیری نمود. اگر این پتانسیل در محدوده ۱/۲۰- تا ۱/۱۰- ولت باشد می توان انتظار حفاظت کامل در مرکز کف مخازن را داشت.

کف مخازنی که برای مدت طولانی خالی می مانند بطور قطع تحت حفاظت کاتدی کامل نخواهند بود و این بدلیل آنست که مخازن خالی از کف زمین بسمت بالا کشیده می شوند و در نتیجه تماس خود را با محیط خورنده زمین از دست می دهند که این باعث منقطع شدن اثر حفاظت کاتدی می شود.

کف مخازن قدیمی هر چند وقت یکبار عوض می شود. در این صورت باید اطمینان حاصل نمود که کف قبلی بطور کامل از بدنه جدا شده است و سپس باید برای کف جدید تمام تمهیداتی را که برای نصب مخازن جدید توضیح داده شد بکار برد.

۷-۱-۳- حفاظت کاتدی داخلی

در این قسمت به بررسی حفاظت کاتدی داخلی از مخازن حاوی الکترولیت همچون مخازن ذخیره سیستم های حاوی آب در گردش، و دیگر سازه های صنعتی پرداخته می شود.

۷-۱-۳-۱- عوامل مؤثر در طراحی

در انجام حفاظت کاتدی داخلی معمولاً بسیار مشکل است تا فاصله مناسب بین آندها و سطوح تحت حفاظت برای انجام حفاظت یکنواخت تعیین کرد. در نتیجه در این مورد وضعیت حفاظتی هر آند موضعی تر از حالات دیگر حفاظت کاتدی می باشد. در این مورد استفاده از پوششهای محافظ نیز غیر اقتصادی است بنابراین تنها راه برای حصول حفاظت اصولی، تعیین محل های دقیق برای نصب آندها می باشد. این آندها باید در محلهایی قرار داده شوند که در آنجا خوردگی شدید می باشد. بررسی طبیعت الکترولیت (میزان اکسیژن، دما، مقاومت ویژه و سرعت حرکت الکترولیت) بسیار مهم است. عامل دیگر در مطالعات برای حفاظت کاتدی داخلی عبارت از نوع آلیاژهای غیر آهنی مصرفی در واحدها می باشد. یک تفاوت عمده در این نوع حفاظت وجود آبهای غیر خالص و دماهای بالاتر از نرمال است. در ضمن در داخل سازه های صنعتی امکان تجمع گازهایی چون هیدروژن و کلر نیز وجود دارد.

۷-۱-۳-۲- سیستم آندهای فدا شونده

آند روی در غیاب کلراید و در دماهای بالاتر از ۶۰ درجه سانتیگراد نجیب تر از فولاد است. همچنین در دماهای بالاتر از ۴۰ درجه سانتیگراد دچار خوردگی بین دانه ای می شود بنابراین استفاده از این آند در دماهای بالا توصیه نمی شود. آندهای فدا شونده برای استفاده های داخلی باید مطابق با شکل هندسی سازه ها طراحی شوند.

۷-۱-۳-۳- سیستم اعمال جریان

برای محطیهای کاملا" بسته از آندهای تیتانیوم پلاتینه شده استفاده می شود. این آندها دارای یک نقطه اتصال بوده و تعویض آنها بسیار آسان است. این سیستم ها نیاز به کنترل اتوماتیک دارند. از آنجا که حفاظت کاتدی محدود به محیط داخل سازه ها می شود بنابراین حفاظت کاتدی با استفاده از این روش تولید تداخل برای سازه های اطراف نمیکند.

۷-۱-۳-۴- معیارهای ارزیابی حفاظت

آندهای فدا شونده معمولا" توسط جوشکاری یا با استفاده از پیچ و مهره به سازه متصل می شوند بنابراین بطور عادی اندازه گیری خروجی جریان غیر ممکن است. گرچه اندازه گیری پتانسیل انجام پذیر است اما بهترین معیار جهت ارزیابی حفاظت، بررسی سطوح داخلی سازه و میزان خوردگی آند می باشد. همچنین باید بررسی شود که هیچگونه تجمع ترکیبات حاصل از خوردگی آندها بوجود نیامده است.قابل ذکر است که جمع شدن تولیدات حاصل از خوردگی آندها می تواند باعث ممانعت از گردش آب و همچنین ایجاد خوردگی گردد. تجمع تولیدات حاصل از خوردگی آندها بیشتر بر روی آندهای منیزیمی و عمدتا" در سازه هایی که مرتبا" با آب شستشو نمی شوند اتفاق می افتد. در سیستم اعمال جریان پیش بینی برای نصب الکترودهای مرجع برای ثابت نگهداشتن شرایط صحیح کار کردن سیستم و همچنین کنترل اتوماتیک آن ضروری می باشد.

۷-۱-۳-۵- مخازن ذخیره الکترولیت

سیستم حفاظت کاتدی از نوع اعمال جریان برای حفاظت مخازن بزرگ مانند برجهای آب بالا سری، مخازن ذخیره آب دریا در نیروگاهها و غیره بکار می رود. در مورد مخازن باز، آندهایی از جنس آهن حاوی سیلیسیم بالا و تیتانیوم پلاتینه شده یا آندهای سربی (در صورتیکه سمی بودن سرب مسئله ای نباشد) که از بالا بداخل سیستم آویزان شده اند مورد استفاده قرار میگیرند. آندها باید طوری در داخل مخازن توزیع شوند که باعث بوجود آمدن توزیع یکنواخت به تمام نقاط شوند برای مثال بهتر است که دارای فواصل مشخص از ته و سطوح جانبی مخازن باشند تا بتوانند به گوشه ها نیز حفاظت یکنواخت را اعمال نمایند. هنگامیکه مقاومت ویژه آب بطور قابل ملاحظه ای بالا باشد برای مثال در مخازن آب تغذیه بویلرها، از آندهای تیتانیوم پلاتینه شده با مغزی مسی می توان استفاده کرد. از آنجا که مقاومت ویژه آب بالا می باشد بنابراین برای ایجاد حفاظت یکنواخت استفاده از آندهای با طول زیاد ضروری است. وقتی از آندهای فدا شونده استفاده شود آنها را می توان مستقیما" به سطح فلز سازه تحت حفاظت متصل کرد. خوردگی بیشتر در نزدیکیهای محل عبور آب یعنی در محلهایی که احتمال بوجود آمدن شرایط اختلاف دمش هوا وجود دارد رخ می دهد. آندها باید حداقل در فاصله ۶۰۰ میلی متری در زیر سطح آب توزیع گردند.برای حفاظت مخازن آب خانگی، جریان حفاظتی کافی از یک آند منیزیمی تک قابل حصول می باشد.

غیر از مخازن اب، مخازن حاوی الکترولیتهای دیگر همچون مخازن ذخیره آب نمک، مخازن ذخیره اسیدها، نیز تحت حفاظت کاتدی قرار می گیرند. تمام عوامل و اصولی که برای حفاظت مخازن حاوی آب گفته شد برای حفاظت این نوع مخازن نیز قابل اعمال می باشد با این تفاوت که نوع آندها باید از نوع مقاوم در مقابل مواد شیمیایی باشند. بهمین دلیل از آندهای فدا شونده نمی توان استفاده کرد و بهتر است از آندهای تیتانیوم پلاتینه شده و سیستم اعمال جریان استفاده شود.

۷-۱-۳-۶- سیستم های حاوی آب در گردش

سیستم های حاوی آب در گردش معمولاً از چدن یا فولاد نرم تهیه شده و در صورتیکه فلزات تحت شرایط سخت مانند سایش های مکانیکی، دماهای بالا یا خنک کن های خورنده نباشند با افزایش ضخامت فلزات می توان عمر کافی برای سازه تضمین نمود. در مورد چدن معمولاً از طریق ریخته گری لوله هایی با ضخامت مناسب و کافی تهیه میگردد. اقدام برای حفاظت کاتدی لوله های فولادی نیز نیازمند بررسیهای اقتصادی است زیرا چنین لوله هایی نیاز به تعداد زیادی آند برای حفاظت دارند.

سرعت خوردگی موضعی در این سیستم ها بدلیل استفاده از فلزات و آلیاژهای مختلف بالا می باشد. معمولاً در این سیستم ها قطعات و اجزاء آهنی نقش آند را داشته و خورده می شوند. این فرآیند در صورتیکه اکسیژن موجود در آب و همچنین سرعت گردش آب بالا باشد شدیدتر می گردد. در این حالت حفاظت کاتدی مبدلهای حرارتی و کولرهای بزرگ کاملاً اقتصادی خواهد بود.

وجود مشکلات در راه استفاده از سیستم های حفاظت کاتدی در موارد فوق کاربرد این سیستم مفید را حتی برای شرایط بسیار خورنده محدود کرده است. بهمین دلیل اصول طراحی صحیح و دقیق حفاظت کاتدی در این گونه موارد چندان توسعه نیافته است. برای مثال در مورد پمپها حتی با روش اعمال جریان استفاده از تعدادآند لازم برای حصول حفاظت کاتدی مؤثر بخصوص در محلهایی که احتمال وجود خوردگیهای شدید گالوانیک وجود دارد محدود می باشد. و این بخاطر تداخل و تأثیر منفی وجود آندها بر روی جهت حرکت و گردش آب دارد. متشابهاً کاربرد حفاظت کاتدی در داخل شیرها محدودیت دارد مثلاً در این حالت توجه به مدت زمانیکه شیر باز بوده ویا بسته می باشد مهم است زیرا قرار گرفتن آندها در وضعیت مناسبی که بتوانند در تمام این حالات جریان کافی را به سطوح مورد نیاز برسانند ضروری می باشد. در صورتیکه آب برای مدت طولانی راکد باشد لازم است تا با اتخاذ راههایی از جمع شدن گاز کلر در سیستم که در اثر انجام واکنش در آندها حاصل می گردد جلوگیری بعمل آید.

۷-۱-۳-۷- مبدلهای حرارتی (لوله و صفحه)

معمولاً مبدلهای حرارتی از محفظه آب چدنی با لوله ها و صفحه لوله از جنس آلیاژهای پایه مس ساخته می شوند. در این حالت محفظه آب چدنی تحت خوردگی خواهد بود. هر چه فاصله بین محفظه چدنی و اجزاء ساخته شده از آلیاژهای مس بیشتر می شود. خوردگی نیز کاهش می یابد. شدیدترین خوردگی بر محفظه چدنی که معمولاً از نوع خوردگی حفره ای می باشد در حوالی تماس آن با صفحه لوله رخ می دهد.

صفحه لوله و انتهای لوله های غیر آهنی نیز ممکن است تحت تأثیر خوردگی باشند که این بدلیل وجود تلاطم آب و در نتیجه بوجود آمدن خوردگی سایشی بوجود می آید. در این حالت نیز استفاده از حفاظت کاتدی می تواند میزان حملات حاصل از خوردگی را بحداقل برساند. مشاهده شده است که در صورت تغییر جنس محفظه آب از چدنی به غیر فلزی و در نتیجه حذف شدن سیستم حفاظت کاتدی محفظه، میزان خوردگی انتهای لوله ها افزایش می یابد. بنابراین در صورت استفاده از محفظه آب غیر فلزی حتماً باید با نصب آندهای فدا شونده از بوجود آمدن خوردگی در انتهای لوله ها جلوگیری گردد.

در سیستم های حاوی آب گردشی، سرعت حرکت آب معمولاً خیلی بیشتر از حالت سازه های غوطه ور است این حالت به انضمام وجود فلزاتی که نسبت به آهن الکتروپوزیتیوتر هستند دانسیته جریان لازم برای حفاظت را افزایش میدهند. بر اساس تجربه می توان گفت که دانسیته جریان لازم برای حفاظت کندانسورها و کولرها تقریباً ۲ آمپر بر متر مربع بر سطح کل صفحه لوله می باشد. عوامل تعیین کننده نوع سیستم حفاظت کاتدی عبارت از مقدار جریان مورد نیاز، در دسترس بودن جریان برق، احتمال خطرات، سهولت تعمیر و نگهداری و غیره می باشد. سیستم اعمال جریان بدلیل آنکه در آن تنظیم جریان مورد نیاز بطور دستی یا اتوماتیک در هر زمان و مستقل از سرعت حرکت آب و ترکیب آب خنک کن قابل کنترل می باشد ارجح است.

سیستم آندهای فدا شونده قابل تنظیم نبوده و بطور متناوب نیاز به تعویض دارد. بهمین دلیل استفاده از آن در کندانسورهای نیروگاهی بدلیل مشکلات تعویض آندها و همچنین پر هزینه بودن آن محدودیت دارد. سیستم آندهای فدا شونده برای واحدهای کوچکتر بویژه برای واحدهایی که برنامه منظم ادواری برای توقف و تعمیرات اساسی دارند مناسبتر می باشد. از دیگر موارد کاربرد آندهای فدا شونده می توان از استفاده آنها در اتمسفرهای پر خطر را نام برد. زیرا در صورت استفاده از سیستم اعمال جریان در این اتمسفرها نیاز به استفاده از وسایل گرانقیمت مقاوم در مقابل شعله خواهد بود.

در بعضی از واحدهای مدرن از لوله های تیتانیومی برای کندانسورها استفاده می شود. در این حالت برای رسیدن به حفاظت کاتدی کامل باید از پتانسیل های منفی تری استفاده شود استفاده از این حد پتانسیل باعث تصاعد هیدروژن شده و در نتیجه هیدرید تیتانیوم تولید می گردد. هیدرید تیتانیوم باعث ایجاد تردی در انتهای لوله های تیتانیومی میکند.

۷-۱-۳-۸- سیستم آندهای فدا شونده

این آندها از جنس آلیاژهای روی و یا منیزیم می باشند. در مواردی که آب خنک کن دارای مقاومت ویژه پایین است مانند آب دریا آندهای روی با توجه به داشتن عمر طولانی تر مناسبتر می باشند. در صورتیکه آب خنک کن دارای مقاومت ویژه بالا باشد آندهای منیزیمی بدلیل داشتن پتانسیل محرکه بالاتر و خروجی جریان بیشتر مناسبتر هستند. در موارد خاص همچون مواردی که محفظه آب دارای پوشش خوب بوده و یا از جنس مواد غیر آهنی باشد می توان از آندهای آهنی برای حفاظت صفحه لوله و انتهای لوله ها استفاده کرد. در اینجا قابل ذکر است که تشکیل تولیدات حاصل از خوردگی آهن بر سطح فلزات غیر آهنی مفید می باشد. بدین دلیل گاهی اوقات سولفات فرو را بداخل سیستمها تزریق می کنند تا تولید تشکیل لایه های ممانعت کننده از خوردگی کند.

در هر واحد، سرعت مصرف آند بطور عمده توسط دمای متوسط، سرعت حرکت و مقاومت ویژه آب خنک کن تعیین میشود. اگر حفاظت کاتدی به یک محفظه آب قدیمی اعمال گردد، ماکزیمم مقدار ماده آند که قابل نصب در سیستم می باشد توسط ابعاد فیزیکی محفظه تحت تأثیر می باشد. قابل ذکر است که نصب آند نباید باعث تلاطم ویا ایجاد تغییراتی در سرعت آب خنک کن شود.

در اکثر واحدهای صنعتی، در خلال تعمیرات اساسی فرصت مناسبی برای بازبینی و تعویض آندها بوجود می آید. در پالایشگاه های نفت معمولاً هر دو سال یکبار تعمیرات اساسی صورت می پذیرد بنابر این می توان آندها را بصورتی تهیه کرد که برای این فاصله زمانی کفایت نماید. در بعضی موارد می توان در طراحی محفظه آب تغییراتی بوجود آورد مثلاً می توان درب محفظه را گودتر طراحی نمود تا فضای مناسب برای نصب آندها فراهم شده و در نتیجه از بوجود آمدن تلاطم های ناخواسته در آب خنک کن جلوگیری بعمل آید.

حداقل وزن آندهایی از جنس آلیاژ روی که در کندانسورهای خنک شونده با آب دریا استفاده شده تا طول عمری معادل ۵ سال داشته باشد از فرمول زیر بدست می آید :

$$W = ۸۰D^{۲}$$

که در این فرمول :

W = وزن آندهای روی (بر حسب کیلوگرم)

D = قطر اسمی قسمت تر شده صفحه لوله (بر حسب متر)

در مناطق گرم و خشک عمر آند تقریباً برابر با نصف مقدار مذکور می باشد

۷-۱-۳-۹- سیستم اعمال جریان

معمولاً در حالت استفاده از سیستم اعمال جریان از پوشش های با کیفیت بالا استفاده نمی شود. از آندهای تیتانیوم پلاتینه شده که از یک طرف بدیواره محفظه آب نصب شده اند استفاده می گردد. این آندها با فواصل مشخص در

محفظه آب نصب می شوند تا بتوانند جریان مورد نیاز برای حفاظت را بطور یکنواخت توزیع نمایند. برای بررسی عملکرد حفاظتی سیستم حفاظت کاتدی باید از الکترودهای مرجع استفاده شودو این الکترودها در نقاطی که در آنها بیشترین اثرات گالوانیک وجود دارد و کاملاً دور از آندها نصب می شوند. در صورتیکه حفاظت کافی در این نقاط مشاهده گردد این بمنزله آنست که تمام نقاط تحت حفاظت کاتدی مناسب قرار دارند. معمولاً مرسوم نیست تا کولرهایی با قطر کمتر از ۵۰۰ میلی متر تحت حفاظت کاتدی قرار گیرند. در صورتیکه تحت شرایط خاص نیاز به انجام حفاظت کاتدی برای کولرهایی با قطر کوچکتر می باشد در این صورت تمام مواردی را که برای کولرهای بزرگتر گفته شد بجز محل نصب آندها، باید در این جا نیز رعایت شود. در این حالت باید آندها بصورت یکسر در گیر در درب محفظه نصب گردند.

۷-۱-۴- مهمترین منابع و مراجع استاندارد BS 7361 :

1. Evans, U.R. Metallic Corrosion, Passivity and Protection. 2nd ed., London: Edward Arnold, 1946.
2. Evans, U.R. An Introduction to Metallic corrosion. London: Edward Arnold, 1948.
3. Evans, U.R. The Corrosion and Oxidation of Metals. London: Edward Arnold, 1958.
4. UHLIG, H.H. The Corrosion Handbook. New York John Wiley & London: Chapman and Hall, 1955.
5. UHLIG, H.H. Corrosion and Corrosion Control. New York: John Wiley, 1971.
6. SHREIR, L.L. Corrosion (2 vols.). London: Newnes-Butterworth, 1976.
7. SHREIR, L.L. Electrochemical Principles of Corrosion - A Guide for Engineers. London: Department of Industry. 1982.
8. MORGAN, J.H. Cathodic Protection. 2nd ed., National Association of Corrosion Engineers, 1987.
9. BOOKER, C.L.J and ASHWORTH, v. Cathodic protection theory and practice. Chichester : Ellis Horwood, 1986
10. WEST, J.M. Basic Corrosion and Oxidation. Chichester: Ellis Horwood, 1971.
11. APPLEGATE, L.M. Cathodic Protection. New York: McGraw Hill, 1960.
12. SCHELL, J.C. and MANNING, D.G. Evaluating the performance of CP systems in reinforced concrete bridge substructures, Paper No. 263 Corrosion '85, Boston, March 25 - 29, 1985.
13. DWIGHT, H.B. Calculation of resistances to ground. Electrical Engineering, 1936 pp 1319-1328.
14. NISANIOGLU, K. An analysis of resistance formulae for reactive anodes. Materials performance. December 1984, pp 36 - 44.
15. VON BAECKMANN, W.G., WILHELM, N. and PRINZ. W. Protective measures against over - voltages in cathodically - protected pipelines. Das Gas - Und Wasserfach. 1966, 107, No. 43 (Gas) 1213 - 1219. (Reference translation.1B2598 - Electrical Research Association).

16. GOLDE, R.H. Protection of structures against lightning. In: Proceedings of the Institution of electrical Engineers. October, 1968.

17. JACQUET, B. and MOORE, W.B.R.
Effects of Earth Currents on Buried Pipelines and Cables. CIGRE Study Commitee No. 36. Paris: August 1988.

18. PARKER, M.E. and PEATTIE, E.G. Pipeline Corrosion and Cathodic Protection. 3rd., Gulf Publishing, 1984.

19. SUNDE, E.D. Earth Conduction Effects in Transmission Systems. D. Van Nostrand, 1949.

20. NACE RP 01-69-83
Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems.

21. NACE RP 0286-86 The Electrical Isolation of Cathodically Protected Propelines.

22. NACE Standard RP 0290-90. Cathodic protection of reinforcing steel in atmospherically exposed concrete structures.

23. CIGRE Study Commitee 21/WG 05. Guide to special earthing devices for use with cathodically protected pipe - type cables. Electra. No. 77 , july 1981.

24. BLAKELEY, P.R. Interferance Problems and Solutions on the Tyne and Wear Metro.Institution of Corrosion Science and Technology, Proceedings of the UK Corrosion Conference 1984.

25. Concrete in the Oceans. Technical Report No. 10.
Development of inspection techniques for reinforced concrete. OTH 84 205. HMSO, 1985.

26. Department of Transport. Specification for road and bridge works. Specification for high way works parts 1-7, October, 1986. HMSO.

27. WILLIS, A.D. Cathodic protection of novel offshore structures. Proceedings of the Second International Conference on Cathodic Protection: Institute of Corrosion Science and Technology, June 1989, Stratford - on - Avon.

28. LLOYDS REGISTER OF SHIPPING. Rules and regulaions for the classification of fixed offshore installations. Part 8 (1988): Corrosion protection.

29. DET NORSKE VERITAS. Recommended Practice B401.

30. No. 75. MARGERSON, S.N.A., ROBINSON, H. and WILKINS, H.A.
The ignition hazard from sparks from magnesium-based alloys. 1953.

31. Report of a Symposium on Experiences of Cathodic Protection in Steam and Process Plant. 20 June, 1969. London: Institution of Mechanical Engineers.

32. Electrical Power Research Institute, Palo Alto, California. Report CS-2961 Current Cathodic Protection Practice in Steam Surface Condensers.

33. SIMON, P.D. Cathodic Protection of main Condenser Circulating water Boxes. Paper 192. In: Corrosion 78. Houston: NACE.

34. SIMON, P.D. Tube Sheet Corrosion and Mitigation Techniques in a Seawater Cooled Titanium-Aluminium Bronze Condenser. Paper 77. In: Corrosion 83. Aneheim. NACE.

35. AMES, D.W. and TIERNEY, J.R. Corrosion Control. In: Proceedings of the Institution of Railway Signal Engineers, 1968/9.

36. IVES, D.J. and JANZ, G. Reference Electrodes. Interscience, 1966.

37. MATTHEWMAN, W. Automation in cathodic protection. In:
Corrosion Sceience. 6. Oxford: Pergamon Press, 1966, P. 385.

38. MATTHEWMAN, W. Advances in automation of cathodic protection. Anti-corrosion Methods and Materials. 1966, 1(8), 6.

39. GOSDEN, J.H. Interference testing - does CP 1021 need updating?
Proceedings of the UK Corrosion Conference, 1984.

40. VON BAECKMANN, W.G., BALTES, A. and PRINZ, W.
New developments in measuring the effectiveness of cathodic protection. ACA Conference 22. Australian Corrosion Association, Hobard, Australia, November, 1982.

41. British Gas Engineering Standard PS/ECP 1.
Code of Practice for cathodic protection of buried steel pipelines. Supplement 2 : Recommended procedure for close interval surveys and pipe to soil potential measurement.

42. HEWES, F.W. Prediction of shallow and deep groundbed resistance using electromagnetic conductivity measurement technique. NACE. Corrosion 87, paper 310.

43. INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Recommendations for the Protection of Underground Cables Against Corrosion. Geneva, 1961.

44. CORROSION ENGINNEERING ASSOCIATION.
State of the art report. Specialized Surveys for Buried Pipelines document 0288.

45. PEARSON, J.M. , Electrical examination of coatings on buried pipelines. Petroleum Engineer 1941, 12(10), 82.

46. DEPARTMENT OF ENERGY DIVING INSPECTOýRATE. Diving Safety Memorandum No. 2/1985. Shock Hazards from Impressed Current Anodes. January 1985.

47. NACE Standard RP-01-77 (1983 Revision). Recommended Practice on Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems.

48. DABKOWSKI, J. Mitigation of Induced Voltages on Buried Pipelines. Materials Performance. 1981, 29,(1) PP. 9-15.

۷-۲- بررسی استاندارد DIN 30676 تحت عنوان " طراحی و کاربرد حفاظت کاتدی برای سطوح خارجی "

۷-۲-۱- فهرست مطالب

۱- محدوده کاربردها

۲- مفاهیم و تعاریف

۳- اصول و معیارهای حفاظت کاتدی

۳-۱- محدوده پتانسیل برای حفاظت کاتدی و پتانسیل حفاظتی

۳-۲- شرایط قبلی برای کاربرد معیار پتانسیل

۴- روشهای اندازه گیری مربوط به حفاظت کاتدی

۴-۱- اندازه گیری پتانسیل سازه - خاک

۴-۲- اندازه گیری جریانی که در طول خط لوله عبور می کند

۴-۳- آزمایشات برای تعیین اثر اتصالات عایق بندی

۴-۴- اندازه گیری تداخل ولتاژ بالا

۵- طراحی حفاظت کاتدی

۵-۱- شرایط کاربرد حفاظت کاتدی

۵-۲- اطلاعات طراحی مورد نیاز

۵-۳- تمهیدات لازم برای سازه ها جهت انجام حفاظت کاتدی

۵-۳-۱- اتصالات عایق بندی

۵-۳-۲- ایستگاهها و رابط های الکتریکی اندازه گیری

۵-۳-۳- پل های الکتریکی

۵-۳-۴- غلاف فلزی روی خطوط لوله

۵-۳-۵- مقاطع و محلهای نفوذ خطوط لوله بداخل دیوار

۵-۳-۶- نقشه خطوط لوله و تقاطع آنها با پلها

۵-۳-۷- شیرهای کنترل الکتریکی

۵-۳-۸- محافظ های رعد و برق

۵-۳-۹- انتخاب محل

۵-۳-۱۰- آزمایش برای تداخل خوردگی

۵-۳-۱۱- اندازه گیری جریان حفاظتی مورد نیاز

۵-۴- نیازهای یک سیستم که توسط روشهای حفاظت کاتدی رفع می شود

۵-۴-۱- سیستم اعمال جریان

۵-۴-۱-۱- پوششهای محافظ

۵-۴-۱-۲- واحدهای مبدل - یکسوکننده

۵-۴-۲- آندهای فدا شونده

۵-۴-۳- کابلهای d.c

۷-۲-۲- مهمترین منابع و مراجع برای تهیه استاندارد DIN 3067 :

1- DIN 40050 - Degree of Protection Provided by Enclosures

2- DIN 50900 Part 1 - Corrosion of Metals - General Concepts

3- DIN 50900 Part 2 - Corrosion of Metals - Electrochemical Concepts

4- DIN 509/8 - Corrosion of Metals - Electrochemical Corrosion Testing

5- DIN 50927 - Design and Application of Electrochemical Corrosion Protection of The Internal Testing

6- DIN 50928 - Corrosion of Metal Testing

7- DIN VDE 0100 - Erection of Power Installations

8- DIN VDE 0150 - Protection Against Corrosion Due to Stray Currents From D.C. Systems

۷-۳- بررسی استاندارد صنعت نفت ایران (IPS)

استاندارد IPS در زمینه حفاظت کاتدی در ۴ بخش با عناوین زیر ارائه شده است :

۱- استاندارد مهندسی برای حفاظت الکتروشیمیایی (IPS - E - TP - 820)

Engineering standard for Electrochemical protection

۲- استاندارد ساخت برای حفاظت کاتدی

(IPS - C - TP - 820)

Construction Standard for Cathodic Protection

۳- استاندارد وسایل و مواد برای حفاظت کاتدی (IPS - M - TP - 750)

Material and Equipment Standard for Chthodic Protection

۴- استاندارد بازرسی برای پایش حفاظت کاتدی (IPS - I - TP - 820)

Inspection Standard for Monitoring Protection

۷-۳-۱- بررسی استاندارد مهندسی برای حفاظت الکتروشیمیایی (IPS - E - TP - 820)

۷-۳-۱-۱- فهرست مطالب

۱- هدف

۲- منابع

۳- تعاریف

۴- واحدها

۵- منظور از حفاظت کاتدی

۶- کاربردهای عمومی حفاظت کاتدی

۷- معیارهای حفاظت کاتدی

۸- انواع سیستمهای حفاظت کاتدی

۹- وسایل و امکانات برای سیستم جریان اعمالی

۱۰- حفاظت کاتدی خطوط لوله مدفون

۱۱- حفاظت کاتدی در سازه های صنعتی

۱۲- حفاظت کاتدی سطوح داخلی سازه ها

۱۳- حفاظت کاتدی سازه های دریایی

ضمیمه A : بررسیهای حفاظت کاتدی از دیدگاه طراحی

ضمیمه B : اصول طراحی حفاظت کاتدی خطوط لوله مدفون

ضمیمه C : اصول طراحی حفاظت کاتدی سازه های دریایی

۷-۳-۱-۲- مهمترین منابع و مراجع برای تهیه این استاندارد :

1- BS 4683 , part 2 (1971)	The constraction and testing of falmeproof enclosures of electrical apparatus
2- BS 6651 (1985)	The protection of structures against lightning
3- CP 1003	Electrical apparatus and associated equipment for use in explosive atmosspheres of gas or rapour other thm mining applications.
4- BS 7361 (1991)	Cathodic protection
5- BS 7430 (1991)	Code of practice for earrhing
6- DIN 30676	Design and application of cathodic protection of external surfaces

7- IPS -C - TP - 274 Construction standard for coatings

8- IPS - C - TP - 820 Construction standards for cathodic protection

9- IPS - E - TP - 100 Engeneering standard for paints

10- IPS - E - EL - 100 Engeneering standard for electrical system design

11- IPS - AA - EL 155- Material and equipment standard for transformer - rectifier

12- NACE standard (RP01 - 69 - 83)
Recommended practice - control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems

13- NACE standard (RP - 0388 - 88)
Recommended practice - impressed current cathodic protection of internal submerged surface of steel water storage tanks

۷-۳-۲- استاندارد IPS - I - TP - 820 تحت عنوان " بازرسی برای مونیتورینگ سیستم های حفاظت کاتدی "

۷-۳-۲-۱- هدفهای استاندارد IPS - I - TP - 820

۱- انجام دقیق بازرسی های ضروری جهت کنترل سیستم های حفاظت کاتدی اعمال شده به سازه های مدفون و غوطه ور در مراحل طراحی، نصب و راه اندازی و همچنین تعمیر و نگهداری

۲- ارائه اطلاعات ضروری در زمینه روشها و تجهیزات و انجام آزمایشات در محل

۳- بازرسی پوشش ها از لحاظ راندمان و همچنین بررسی اثرات آنها بر روی توزیع جریان

۷-۳-۲-۲- فهرست مطالب استاندارد IPS - I - TP - 820 :

۱- هدف

۲- منابع و مراجع

۳- تعاریف و اصطلاحات

۴- واحدها

۵- بررسیهای عمومی

۶- معیارهای حفاظت کاتدی

۷- بازرسیهای ادواری شامل :

- ارزیابی پتانسیل

- فاصله زمانی مناسب برای ارزیابی پتانسیل

- وسایل و تجهیزات برای ارزیابی پتانسیل

- روشها و مراحل انجام ارزیابی پتانسیل

- ارزیابی پتانسیل خطوط لوله مدفون

- روشهای جبران افت پتانسیل در خطوط لوله تحت حفاظت

- حفاظت اضافی

- ارزیابی پتانسیل در محل های تقاطع

- ارزیابی پتانسیل برای بتون مسلح تحت حفاظت کاتدی

- ارزیابی پتانسیل در سازه های فرا ساحلی

- الکترودهای مرجع

- روشهای ارزیابی پتانسیل در سازه های فرا ساحلی

- پتانسیل سنجی با ولتمتر، کابل و الکترود اندازه گیری

- ارزیابی پتانسیل برای خطوط لوله غوطه ور در آب

- فواصل زمانی ارزیابی

- بازرسی یکسوکننده

- بازرسی بستر آند

- ارزیابی جریان

- بازرسی آندهای قربانی شونده فرا ساحلی

۸- بازرسی پس از گزارش عدم کارایی سیستم های حفاظت کاتدی شامل :

- افزایش مقاومت مدار

- جریان های سرگردان

- آزمایشات تعیین پیوستگی الکتریکی

- مسائل مربوط به سیستم های حفاظت کاتدی از نوع آندهای قربانی شونده

۹- بازرسی و ارزیابی راندمان پوششها شامل :

- اندازه گیری مقاومت پوشش

- روشهای آزمایش میرائی

- روش پیرسون

- بازرسی پوشش توسط متد اسکن کردن

- بازرسی های چشمی

- ارزیابی پتانسیل در بالای خطوط لوله

- ثبت آنالیز اطلاعات

۱۰- تداخل ها شامل :

- تداخل ها در اطراف کاتد

- تداخل ها در اطراف آند

- روشهای پیشگیری از تداخل ها

۷-۳-۲-۳- مهمترین منابع و مراجع استاندارد IPS - I - TP - 820

1-BS 148 - Specification for unused mineral insulating oils for transformers and switchgear

2-BS CP10221 (1973) - Code of practice for cathodic protection

3-AS 2832.1 (1985) - Guide to the cathodic protection of metals , pipes , cables and ducts.

4-AS 2832.2 (1991) - Guide to the cathodic protection of compact buried structures

5-AS 2832.3 (1992) - Guide to the cathodic protection of fixed immersed structures

6-AS 2832.4 (1994) - Guide to the cathodic protection of internal surfaces

7-DNV RP B 401 (1976) - Rules for the design , construction and inspection of submarine pipelines and pipeline risers

8-DNV RP B 403 (1987) - Monitoring of cathodic protection systems.

9-DNV RP B 404 (1977) - Rules for the design , construction and inspection of offshore structures

10-DNV Technical Note A5/1 Rev.1 = Cathodic protection Evaluation

11-NACE - RP - 01- 76- Control of corrosion of steel fixed offshore platforms associated with petroleum production

12-NACE task group - T.7L4 - Collected papers on cathodic protection current distribution

13-NACE task group T.101 - Cathodic protection criteria - a literature survey

14-NACE - RP 0187 - 87 - Recommended practice design consideration for corrosion control of reinforced steel in concrete

۸- فهرست منابع و مراجع

1- Morgan, J.H., Cathodic protection, 2nd edition, NACE , Houston , Texas , 1987

2- Ashworth, V. and GooGan, C. , Cathodic protection theory and practice, Ellis Horwood, 1993

3- Applegate, L. M. , Cathodic protection , New York , MCG raw Hill, 1960

4- Peabody, A. W. , Control of pipeline corrosion, NACE, 1967

5- Baeckman, W.G and Schwenk, W. , Handbook of cathodic protection, Redhill, surrey, portcullis press, 1975

6- RP - 01- 64 - 92, Recommended practice : control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems, NACE, Houston, 1992

7- RP B401, Cathodic protection design, DET Norske Veritas, Hovik, Norway, 1986

8- RP - 02 - 85, Recommended practice : control of external corrosion on metallic buried, partially buried, or submerged liquid storage systems, NACE, Houston, 1985

9- BS 7361 part 1, 1491, Cathodic protection - code of practice for land and marine applications, British standards institution, London, 1991

10- TNA 703, Cathodic protection evaluation, Det Norske veritas, Hovik, Norway, 1981,

11- Watson, T.R,B. Economic evaluation of corrosion control, paper presented to NACE Canadian Region western conference, 1980

12- Hanson, C.F. , Materials in power plant, series 3 NO.s, London, Chanaden press, 1975

13- Shreir, L. L. Corrosion C2 Vol.S. London, Newnes Butter worth, 1976

14- Shreir, L.L. Electro chemical principles of corrosion - A Guide for engineers, London, department of industry, 1982

15- Parker, M.E and peattie, E.G. , pipeline corrosion and cathodic protection, 3rd ed. , Gulf publishing, 1984.

16- Uhlig, H.H. The corrosion handbook, New York, John wiley and London, chaman and Hall, 1955

17- West, S.M. Basic corrosion and oxidation chichester, Ellis Horwood, 1971

18-Myers, J.R. , Corrosion control for underground steel pipelines, Air force institute of technology, 1977

19-Palmer, J.D. , Soil resistivity measurement and analysis, Materials performance, Vol.13, No.1,1974

20-Stratfull, R.F., A new test for estimating soil corrosivit based on investigation of metal highway culverts, corrosion, Vol. 17, 1961

21-Peabody, A.W. , pipeline testing Fundamentals, Materials protection and performance, Vol. 12, No. 2, 1973

22-Uhlig, H.H. , corrosion and corrosion control, New York, John Wiley, 1971

23-Kemp, W.E. Coal tar enamel coatings for underground pipelines, Materials protection, Vol.9, No.6, 1970

24-RP - 02- 72, Direct calculation of economic appraisals of corrosion control measures, NACE, Houston, 1972

25-Ringer, F.W. , Solution of cathodic protection interference problems, corrosion, Vol.11, 1955

26-DIN 30676, Design and application of cathodic protection of external surfaces, 1985

27-Garrity,K. , Cathodic protection of external tank bottoms, Materials performance, 1988

28-Kroon, D.H. Cathodic protection of above ground storage tank bottoms, Materials performance, 1994

29-Rials, S.R. , Evaluation of corrosion prevention methods for above ground storage tank bottoms, Materials performance, 1993

30-Schrmak, S.A., Cathodic protection applications for above ground wastewater storage and treatment tanks, Materials performance, 1992