جمهوری اسلامی ایران

راهنمای حفاظت کاتدی خطوط لوله و سازه‌های فولادی

نشریه شماره ۳۱۱

وزارت نیرو
سازمان مدیریت منابع آب ایران
دفتر استانداردها و معیارهای فنی
http:/www.wrm.or.ir/standard

سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور
معاونت امور فنی
دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی
http:/www.mporg.ir

جمهوری اسلامی ایران

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور

راهنمای حفاظت کاتدی خطوط لوله و سازه‌های فولادی

نشریه شماره ۳۱۱

معاونت امور فنی

دفتر امور فنی، تدوین معیارها و

کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله

وزارت نیرو

شرکت مدیریت منابع آب ایران

دفتر استانداردها و معیارهای فنی

انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور ۸۴/۰۰/۶۲

۱۳۸۴

فهرست‌برگه

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله

راهنمای حفاظت کاتدی خطوط لوله و سازه‌های فولادی/ معاونت امور فنی، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله؛ وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، دفتر استانداردها و معیارهای فنی.- تهران: سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور اداری، مالی و منابع انسانی، مرکز مدارک علمی، موزه و انتشارات، ۱۳۸۴.

XIII ، ۱۳۴ ص.: مصور.- (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله؛ نشریه شماره ۳۱۱) (انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور؛ ۸۴/۰۰/۶۲)

ISBN 964-425-645-X

مربوط به بخشنامه شماره ۱۰۱/۵۳۵۳۹ مورخ ۱۳۸۴/۳/۲۹

کتابنامه: ص. ۱۳۴

۱. لوله‌ها – حفاظت کاتدی – دستنامه‌ها. ۲. سازه‌های فولادی – حفاظت کاتدی – دستنامه‌ها. الف. شرکت مدیریت منابع آب ایران. دفتر استانداردها و معیارهای فنی. ب. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. مرکز مدارک علمی، موزه و انتشارات. ج. عنوان. د. فروست.

۱۳۸۴ ش. ۳۱۱ ۲۴ س / ۳۶۸ TA

شابک ۹۶۴-۴۲۵ - ۶۴۵-X ISBN 964-425-645-X

راهنمای حفاظت کاتدی خطوط لوله و سازه‌های فولادی

ناشر: سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور اداری، مالی و منابع انسانی، مرکز مدارک علمی، موزه و انتشارات

چاپ اول، ۱۰۰۰ نسخه

قیمت: ۱۸۰۰۰ ریال

تاریخ انتشار: سال ۱۳۸۴

لیتوگرافی: قاسملو

چاپ و صحافی: اتحاد

همه حقوق برای ناشر محفوظ است.

بسمه تعالی

ریاست جمهوری
سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور
رئیس سازمان

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی ، مهندسان مشاور و پیمانکاران	شماره : ۱۰۱/۵۳۵۳۹
	تاریخ : ۸۴/۳/۲۹

موضوع :
راهنمای حفاظت کاتدی خطوط لوله و سازه‌های فولادی

به استناد آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی ، موضوع ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و در چهارچوب نظام فنی و اجرایی طرح‌های عمرانی کشور (مصوبه شماره ۲٤٥۲٥/ت ۱٤۸۹۸هـ ، مورخ ۱۳۷٥/٤/٤ هیأت محترم وزیران) به پیوست نشریه شماره ۳۱۱ دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله این سازمان ، با عنوان *«راهنمای حفاظت کاتدی خطوط لوله و سازه‌های فولادی»* از نوع گروه سوم ، ابلاغ می‌گردد .

دستگاه‌های اجرایی ، مهندسان مشاور ، پیمانکاران و عوامل دیگر می‌توانند از این نشریه به عنوان راهنما استفاده نمایند و در صورتی که روش‌ها ، دستورالعمل‌ها و راهنماهای بهتری در اختیار داشته باشند ، رعایت مفاد این نشریه الزامی نیست .

عوامل یاد شده باید نسخه‌ای از دستورالعمل‌ها ، روش‌ها و یا راهنمایی‌های جایگزین را برای دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله این سازمان ، ارسال دارند .

حمید شرکاء
معاون رییس جمهور و رییس سازمان

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی :

دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این دستورالعمل نموده و آنرا برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است . با وجود تلاش فراوان ، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی ، فنی ، ابهام ، ایهام و اشکالات موضوعی نیست .

از این‌رو ، ***از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را بصورت زیر گزارش فرمایید :***

۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید .

۲- ایراد مورد نظر را بصورت خلاصه بیان دارید .

۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید .

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید .

کارشناسان این دفتر نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود .

نشانی برای مکاتبه : تهران، خیابان شیخ‌بهائی، بالاتر از ملاصدرا، کوچه لادن، شماره ۲۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور ، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله

صندوق پستی ۴۵۴۸۱- ۱۹۹۱۷

http://tec.mporg.ir

بسمه تعالی

پیشگفتار

استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل تهیه (مطالعات امکان‌سنجی)، مطالعه و طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری طرح‌های عمرانی به لحاظ توجیه فنی و اقتصادی طرح‌ها، کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید) و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری از اهمیت ویژه برخوردار می‌باشد.

نظام فنی و اجرایی طرح‌های عمرانی کشور (مصوبه مورخ ۱۳۷۵/۴/۴ هیأت محترم وزیران) بکارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام شده طرح‌ها را مورد تأکید جدی قرار داده است.

باتوجه به مراتب یاد شده و شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، امور آب وزارت نیرو (طرح تهیه و تدوین ضوابط و معیارهای صنعت آب کشور) با همکاری معاونت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (دفتر امورفنی،تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله) براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه اقدام به تهیه استانداردهای مهندسی آب نموده است.

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین شده است :

- استفاده از تخصص‌ها و تجربه‌های کارشناسان و صاحبنظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاه‌های اجرایی، سازمان‌ها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- پرهیز از دوباره‌کاری‌ها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استانداردها و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات تهیه‌کننده استاندارد

ضمن تشکر از کارشناسان محترم برای بررسی و اظهار نظر در مورد این استاندارد، امید است مجریان و دست‌اندرکاران بخش آب، با بکارگیری استانداردهای یاد شده، برای پیشرفت و خودکفایی این بخش از فعالیت‌های کشور تلاش نموده و صاحبنظران و متخصصان نیز با اظهار نظرهای سازنده در تکامل این استانداردها مشارکت کنند.

معاون امور فنی

بهار ۱۳۸۴

ترکیب اعضای تهیه کننده، کمیته و ناظران تخصصی

چهار فصل اول این استاندارد توسط اعضای کمیته لوازم و تجهیزات دفتر استانداردها و معیارهای فنی تهیه شده است که اسامی اعضای این کمیته به ترتیب حروف الفبا به شرح زیر می‌باشد:

آقای منصور توفیقی	شرکت مهندسین آوین آروین	فوق‌لیسانس مکانیک
آقای علیرضا تولایی	کارشناس آزاد	فوق لیسانس راه و ساختمان
آقای رحیم زمانیان	کارشناس ارشد خوردگی وزارت نفت	فوق لیسانس مهندسی شیمی
خانم مهین کاظم‌زاده آزاد	دفتر استانداردها و معیارهای فنی	لیسانس راه و ساختمان
آقای محمد معین‌پور	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس راه و ساختمان
آقای حسن میرزایی	شرکت مهندسین مشاور آبسو	فوق‌لیسانس مکانیک
آقای سیف علی وفامهر	شرکت جامع پیمان	لیسانس متالوژی

سایر فصل‌های این استاندارد در معاونت پژوهشی دانشکده صنعت آب و برق با مسئولیت آقایان رحیم زمانیان و خسرو رحمانی و همکاری افراد زیر به ترتیب حروف الفبا تهیه شده است :

آقای منصور توفیقی	شرکت مهندسین آوین آروین	فوق لیسانس مکانیک
آقای خسرو رحمانی	دانشکده صنعت آب و برق	فوق لیسانس خوردگی
آقای رحیم زمانیان	کارشناس ارشد خوردگی وزارت نفت	فوق لیسانس مهندسی شیمی
آقای مجتبی فاضلی	دانشکده صنعت آب و برق	فوق لیسانس عمران
آقای محمد معین پور	کارشناس آزاد	فوق لیسانس راه و ساختمان

گروه نظارت که مسئولیت نظارت تخصصی بر تدوین این استاندارد را به‌عهده داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا عبارتند از :

آقای عبدالحسین بلوریزاده	شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس	فوق لیسانس مهندسی شیمی و پتروشیمی
آقای علیرضا تولایی	کارشناس آزاد	فوق لیسانس راه و ساختمان
خانم مهندس مهین کاظم‌زاده‌آزاد	دفتر استانداردها و معیارهای فنی	لیسانس راه و ساختمان

اسامی اعضای کمیته تخصصی آب و فاضلاب دفتر استانداردها و معیارهای فنی که بررسی و تأیید استاندارد حاضر را به عهده داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا عبارتند از :

آقای فرخ افرا	مهندسی مشاور سختاب	فوق لیسانس راه و ساختمان
آقای نعمت‌الله الهی پناه	شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور	فوق‌لیسانس هیدرولوژی
آقای ابوالقاسم توتونچی	مهندسی مشاور ایراناب	فوق‌لیسانس راه و ساختمان
آقای علیرضا تولایی	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس راه و ساختمان
آقای عباس حاج‌حریری	شرکت آب و فاضلاب استان تهران	فوق‌لیسانس مدیریت صنایع
خانم مینا زمانی	دفتر استانداردها و معیارهای فنی	لیسانس مهندسی شیمی
آقای جلال‌الدین شایگان	دانشگاه صنعتی شریف	دکترا در مهندسی بیوشیمی
آقای علی‌اکبر هوشمند	شرکت تهران میراب	لیسانس مهندسی مکانیک

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
۱- هدف	۳
۲- دامنه کاربرد	۳
۳- تعاریف	۳
۳-۱ آند	۳
۳-۱-۱ آند کنسولی	۳
۳-۱-۲ آند پیوسته	۳
۳-۱-۳ آند فدا شونده (آند گالوانیک)	۴
۳-۱-۴ مواد پرکننده اطراف آند	۴
۳-۱-۵ ناحیه آندی	۴
۳-۲ آزمایش واکنش متقابل	۴
۳-۳ اتصال‌های الکتریکی	۴
۳-۳-۱ اتصال الکتریکی	۴
۳-۳-۲ اتصال برای پیوستگی	۴
۳-۳-۳ اتصال تخلیه	۵
۳-۳-۴ اتصال اصلاحی	۵
۳-۳-۵ اتصال مقاومتی	۵
۳-۳-۶ اتصال ایمنی	۵
۳-۳-۷ مقاومت اتصال	۵
۳-۴ اتصال زمین	۵
۳-۵ قطع اتصال	۵
۳-۵-۱ اتصالی عایقی	۵
۳-۵-۲ فلنج عایق	۵
۳-۶ اختلاف پتانسیل بین سازه و الکترولیت	۶
۳-۷ الکترود	۶
۳-۸ الکترولیت	۶

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۹ الکترودهای مرجع	۶
۳-۹-۱ الکترود مرجع (نیمه پیل)	۶
۳-۹-۲ الکترود مرجع جیوه - کلرور جیوه	۶
۳-۹-۳ الکترود مرجع مس - سولفات مس	۶
۳-۹-۴ الکترود مرجع نقره - کلرور نقره	۶
۳-۹-۵ الکترود هیدروژن استاندارد	۷
۳-۹-۶ الکترود حساس	۷
۳-۱۰ الکترو نگاتیو	۷
۳-۱۱ الکترو پازیتیو	۷
۳-۱۲ الکترو اسمز	۷
۳-۱۳ اختلاف تماس با هوا	۷
۳-۱۴ بادکردگی (لایه رنگ)	۷
۳-۱۵ باکتری‌های احیاکننده سولفات	۸
۳-۱۶ بستر زمین (بستر آندی)	۸
۳-۱۷ بی‌هوازی	۸
۳-۱۸ پتانسیل اکسیداسیون و احیا	۸
۳-۱۹ پتانسیل حفاظتی	۸
۳-۲۰ پتانسیل محرک (سیستم آند فدا شونده)	۸
۳-۲۱ پتانسیل لحظه‌ای قطع جریان	۸
۳-۲۲ پوشش حفاظتی	۹
۳-۲۳ پیل الکتریکی	۹
۳-۲۴ پیل اتصال زمین	۹
۳-۲۵ پیل قطبی	۹
۳-۲۶ پی - اچ (pH)	۹
۳-۲۶-۱ مقدار pH	۹
۳-۲۶-۲ اسید	۱۰
۳-۲۶-۳ باز (قلیا)	۱۰
۳-۲۶-۴ خنثی	۱۰

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۲۷ تاول‌زدگی لایه رنگ	۱۰
۳-۲۸ تخلیه	۱۰
۳-۲۸-۱ تخلیه الکتریکی	۱۰
۳-۲۸-۲ تخلیه اجباری	۱۰
۳-۲۸-۳ تخلیه الکتریکی قطبی (پولاریزه)	۱۰
۳-۲۸-۴ آزمایش‌های تخلیه جریان الکتریکی	۱۱
۳-۲۹ جدایش کاتدی	۱۱
۳-۳۰ جریان اعمال شده	۱۱
۳-۳۱ جریان حفاظتی	۱۱
۳-۳۲ جریان سرگردان	۱۱
۳-۳۳ چگالی جریان	۱۱
۳-۳۴ حفاظت کاتدی	۱۱
۳-۳۵ خوردگی	۱۲
۳-۳۶ خوردگی متقابل	۱۲
۳-۳۷ سازه‌ها	۱۲
۳-۳۷-۱ سازه حفاظت شده	۱۲
۳-۳۷-۲ سازه حفاظت نشده	۱۲
۳-۳۷-۳ سازه اصلی (اولیه)	۱۲
۳-۳۷-۴ سازه فرعی (ثانویه)	۱۲
۳-۳۸ صابونی شدن	۱۲
۳-۳۹ ضریب بازدهی	۱۳
۳-۴۰ طرح حفاظت کاتدی مشترک	۱۳
۳-۴۱ غلاف عایق الکتریکی	۱۳
۳-۴۲ غیر فعال	۱۳
۳-۴۳ فلنج عایق	۱۳
۳-۴۴ قطبی شدن	۱۳
۳-۴۵ کاتد	۱۳

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۴۶ کربناته شدن	۱۳
۳-۴۷ ماده هادی	۱۴
۳-۴۸ محصول‌خوردگی	۱۴
۳-۴۹ منفذ	۱۴
۳-۵۰ ناحیه کاتدی	۱۴
۳-۵۱ نقطه تقاطع (ظاهری)	۱۴
۳-۵۲ واکنش (آندی ، کاتدی)	۱۴
۳-۵۳ واکنش گالوانیک	۱۴
۳-۵۴ هیدراته‌شدن (سیمان)	۱۴
۳-۵۵ یون	۱۴
۴- اصول کلی	۱۵
۴-۱ کلیات	۱۵
۴-۲ رفتار (واکنش) فلزات مدفون یا مستغرق با محیط اطراف خود، در غیاب حفاظت کاتدی	۱۵
۴-۲-۱ طبیعت خوردگی فلزات	۱۵
۴-۲-۲ قطبی شدن	۱۶
۴-۲-۳ تشکیل پیل	۱۷
۴-۲-۴ رویین شدن (غیر فعال شدن)	۱۸
۴-۲-۵ واکنش در ناحیه‌های کاتدی	۱۸
۴-۳ حفاظت کاتدی	۲۰
۴-۳-۱ مبانی حفاظت کاتدی	۲۰
۴-۳-۲ ضوابط حفاظت کاتدی	۲۲
۵- نکات مورد توجه در اعمال حفاظت کاتدی بیشتر سازه‌ها	۲۶
۵-۱ کلیات	۲۶
۵-۲ مبانی طراحی	۲۶
۵-۳ طراحی یا اصلاح سازه‌های تحت حفاظت	۲۹
۵-۳-۱ پیوستگی الکتریکی	۲۹
۵-۳-۲ پوشش‌های حفاظتی	۲۹

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۵-۳-۳ ایزوله کردن الکتریکی	۳۰
۵-۳-۴ تمهیدات لازم برای آزمایش	۳۱
۵-۴ سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده	۳۱
۵-۴-۱ کلیات	۳۱
۵-۴-۲ طراحی آندهای فدا شونده	۳۲
۵-۴-۳ جنس آند	۳۴
۵-۵ سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان	۳۸
۵-۵-۱ کلیات	۳۸
۵-۵-۲ آندها و بسترهای زمینی در سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان	۳۸
۵-۵-۳ منابع تأمین برق	۴۱
۵-۵-۴ دستگاه‌های مبدل یک‌سوکننده	۴۲
۵-۵-۵ تجهیزات کنترل	۴۲
۵-۵-۶ تأمین برق واحدهای مبدل یک‌سوکننده	۴۵
۵-۶ مقایسه سیستم‌های مختلف حفاظت کاتدی	۴۶
۵-۷ ملاحظات ویژه	۴۷
۵-۷-۱ آثار ثانویه حفاظت کاتدی	۴۷
۵-۷-۲ تأثیر جریان‌های سرگردان ناشی از سیستم حفاظت کاتدی	۴۸
۵-۷-۳ اجتناب از صدمات ناشی از ولتاژهای اضافی	۴۸
۵-۷-۴ آثار جریان متناوب (a.c) روی سیستم‌های حفاظت کاتدی	۵۲
۵-۸ آزمایش‌ها	۵۲
۶- حفاظت کاتدی سازه‌های مدفون	۵۳
۶-۱ کلیات	۵۳
۶-۱-۱ عوامل موثر در طراحی	۵۳
۶-۱-۲ سیستم آندهای فدا شونده	۵۴
۶-۱-۳ سیستم با اعمال جریان	۵۴
۶-۲ خطوط لوله	۵۵
۶-۲-۱ آماده‌سازی سازه	۵۵

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۶-۲-۲ کاربرد حفاظت کاتدی	۶۰
۶-۲-۳ ملاحظات ویژه	۶۲
۶-۳ کابل‌ها	۶۴
۶-۳-۱ کلیات	۶۴
۶-۳-۲ آماده‌سازی سازه	۶۵
۶-۳-۳ کاربرد حفاظت کاتدی	۶۵
۶-۴ کف مخازن فلزی و سازه‌های مشابه	۶۶
۶-۴-۱ کلیات	۶۶
۶-۴-۲ آماده‌سازی سازه	۶۶
۶-۴-۳ اجرای حفاظت کاتدی	۶۶
۶-۴-۴ ملاحظات ویژه	۶۷
۶-۵ سازه‌های مدفون در مجاورت سیستم‌های ریلی با برق یک‌سو	۶۷
۷- سازه‌های غوطه‌ور (غیر از کاربردهای دریایی)	۷۱
۷-۱ کلیات	۷۱
۷-۱-۱ آماده سازی سازه	۷۱
۷-۱-۲ کاربرد حفاظت کاتدی	۷۲
۷-۱-۳ آثار تداخلی سازه با کشتی‌ها	۷۵
۸- حفاظت سطوح داخلی تجهیزات صنعتی حاوی الکترولیت	۷۶
۸-۱ کلیات	۷۶
۸-۱-۱ عوامل مؤثر در طراحی	۷۶
۸-۱-۲ آندهای فدا شونده	۷۶
۸-۱-۳ سیستم‌های با اعمال جریان	۷۷
۸-۱-۴ ارزیابی میزان حفاظت	۷۷
۸-۲ مخازن	۷۸
۸-۲-۱ مخازن آب	۷۸
۸-۲-۲ مخازن ذخیره مواد شیمیایی	۷۸

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۸-۳ سیستم‌های آب چرخشی	۷۹
۸-۳-۱ کلیات	۷۹
۸-۳-۲ مبدل‌های حرارتی (لوله و پوسته)	۸۰
۸-۳-۳ خنک‌کننده‌های جعبه‌ای	۸۲
۸-۴ سایر تجهیزات صنعتی	۸۳
۹- آزمایش‌ها و رفع تداخل حفاظت کاتدی	۸۴
۹-۱ کلیات	۸۴
۹-۲ سازه‌های مدفون	۸۴
۹-۲-۱ آزمایش‌های خوردگی تداخلی	۸۴
۹-۲-۲ معیارهای محدود سازی خوردگی تداخلی	۸۷
۹-۲-۳ طراحی سیستم حفاظت کاتدی برای به‌حداقل رساندن خوردگی تداخلی	۸۸
۹-۲-۴ تمهیدات لازم برای کاهش خوردگی تداخلی	۹۰
۹-۲-۵ ملاحظات ویژه	۹۲
۹-۳ اسکله‌ها و کشتی‌ها: خوردگی تداخلی در پایانه‌های دریایی و رودخانه‌ای	۹۳
۱۰- اندازه‌گیری‌های الکتریکی	۹۴
۱۰-۱ کلیات	۹۴
۱۰-۲ اندازه‌گیری پتانسیل : دستگاه‌های اندازه‌گیری	۹۴
۱۰-۲-۱ الکترودهای مرجع	۹۴
۱۰-۲-۲ پتانسیل‌های الکترود مرجع	۹۷
۱۰-۲-۳ ولت‌مترها	۹۷
۱۰-۲-۴ پتانسیومترها	۹۸
۱۰-۲-۵ ثبت کننده‌ها و دستگاه‌های ذخیره داده‌ها	۱۰۰
۱۰-۳ روش‌های اندازه‌گیری پتانسیل	۱۰۰
۱۰-۳-۱ کلیات	۱۰۰
۱۰-۳-۲ سازه‌های مدفون	۱۰۰
۱۰-۳-۳ سازه‌های غوطه‌ور	۱۰۳

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱۰-۴ اندازه‌گیری جریان مستقیم	۱۰۴
۱۰-۴-۱ کلیات	۱۰۴
۱۰-۴-۲ اندازه‌گیری جریان مستقیم در سیستم با اعمال جریان	۱۰۴
۱۰-۴-۳ اندازه‌گیری جریان مستقیم در مدارهای با ولتاژ بسیار پایین (سیستم آند فدا شونده)	۱۰۴
۱۰-۴-۴ مدار آمپرمتر بامقاومت صفر	۱۰۵
۱۰-۴-۵ اندازه‌گیری جریان الکتریکی خط لوله	۱۰۶
۱۰-۴-۶ آمپرمترهای حلقوی	۱۰۷
۱۰-۵ اندازه‌گیری مقاومت	۱۰۸
۱۰-۵-۱ اندازه‌گیری مقاومت الکترود زمینی و مقاومت خاک	۱۰۸
۱۰-۵-۲ تعیین مقاومت مورد نیاز برای یک اتصال	۱۰۹
۱۰-۵-۳ پیوستگی الکتریکی سازه	۱۰۹
۱۰-۶ آزمایش‌های لازم برای طراحی حفاظت کاتدی برای سازه‌های مدفون یا غوطه‌ور	۱۱۰
۱۰-۶-۱ نمونه‌های خاک و آب	۱۱۰
۱۰-۶-۲ مقاومت الکتریکی خاک	۱۱۰
۱۰-۶-۳ بررسی‌های پتانسیل طبیعی سازه به الکترولیت	۱۱۱
۱۰-۶-۴ جریان‌های الکتریکی سرگردان	۱۱۲
۱۰-۶-۵ آزمایش‌های پیوستگی الکتریکی	۱۱۲
۱۰-۷ بررسی‌های ویژه	۱۱۲
۱۰-۷-۱ کلیات	۱۱۲
۱۰-۷-۲ روش پیرسون	۱۱۲
۱۰-۷-۳ روش تضعیف جریان	۱۱۳
۱۰-۷-۴ اندازه‌گیری پتانسیل در فواصل کوتاه	۱۱۳
۱۱- راه‌اندازی، بهره‌برداری و نگهداری	۱۱۴
۱۱-۱ کلیات	۱۱۴
۱۱-۲ آزمایش‌های هنگام راه‌اندازی	۱۱۴
۱۱-۲-۱ کلیات	۱۱۴
۱۱-۲-۲ سازه‌های مدفون	۱۱۵

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱۱-۲-۳ سازه‌های غوطه‌ور ثابت	۱۱۵
۱۱-۲-۴ حفاظت داخلی تأسیسات	۱۱۶
۱۱-۳ بهره‌برداری و نگهداری	۱۱۶
۱۱-۳-۱ کلیات	۱۱۶
۱۱-۳-۲ نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده	۱۱۶
۱۱-۳-۳ نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان	۱۱۷
۱۱-۴ بهره‌برداری و نگهداری سازه‌های مدفون	۱۲۰
۱۱-۴-۱ سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده	۱۲۰
۱۱-۴-۲ سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان	۱۲۰
۱۱-۵ بهره‌برداری و نگهداری سازه‌های غوطه‌ور	۱۲۱
۱۱-۵-۱ سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده	۱۲۱
۱۱-۵-۲ سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان	۱۲۲
۱۱-۶ بهره‌برداری و نگهداری از سیستم حفاظت داخلی تأسیسات	۱۲۳
۱۱-۶-۱ سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده	۱۲۳
۱۱-۶-۲ سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان	۱۲۳
۱۲- ایمنی	۱۲۵
۱۲-۱ کلیات	۱۲۵
۱۲-۲ استانداردها و آیین‌نامه‌های قابل اجرا	۱۲۵
۱۲-۳ خطرات ناشی از شوک‌های الکتریکی	۱۲۵
۱۲-۳-۱ کلیات	۱۲۵
۱۲-۳-۲ سیستم حفاظت کاتدی بر روی سازه‌های مدفون	۱۲۶
۱۲-۳-۳ ملاحظات ایمنی سازه‌های غوطه‌ور	۱۲۶
۱۲-۳-۴ ملاحظات ایمنی برای حفاظت داخلی	۱۲۷
۱۲-۴ معایب سیستم الکتریکی در رابطه با اتصالات غیر عمدی یا اصلاحی	۱۲۷
۱۲-۵ ولتاژ و جریان‌های متناوب القایی	۱۲۷
۱۲-۶ تصاعد گازهای خطرناک	۱۲۸
۱۲-۶-۱ تصاعد هیدروژن	۱۲۸
۱۲-۶-۲ تصاعد گاز کلر	۱۲۹

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱۲-۷ نصب سیستم حفاظت کاتدی در مناطق خطرناک	۱۲۹
۱۲-۷-۱ کلیات	۱۲۹
۱۲-۷-۲ پیوستگی الکتریکی	۱۳۰
۱۲-۷-۳ اتصالات جداکننده (اتصالات عایقی)	۱۳۰
۱۲-۷-۴ اتصال کوتاه برقی بین نقاط با پتانسیل‌های مختلف	۱۳۰
۱۲-۷-۵ قطع اتصال الکتریکی، جدا شدن یا شکست لوله‌های حفاظت شده	۱۳۰
۱۲-۷-۶ تجهیزات برقی	۱۳۱
۱۲-۷-۷ وسایل آزمایش	۱۳۱
۱۲-۷-۸ آندهای داخل تجهیزات	۱۳۱
۱۲-۷-۹ آندهای فدا شونده	۱۳۱
۱۲-۷-۱۰ نصب راهنما جهت پرسنل	۱۳۱
پیوست - تعیین اندازه pH و پتانسیل احیا	۱۳۲
۱- تعیین اندازه pH	۱۳۲
۲- پتانسیل احیا	۱۳۲
منابع و مراجع	۱۳۴

مقدمه

فلزات در طبیعت عموماً به صورت ترکیب با عناصر غیرفلزی نظیر اکسیدها و نمک‌های فلزی که در آنها فلز به‌صورت پایدار و غیرفعال، است وجود دارند و فلز خالص را از طریق احیای این ترکیبات فلزی به‌ویژه اکسیدهای فلزی تولید می‌نمایند.

در این فرآیند فلز از حالت پایدار طبیعی خود خارج شده به حالت فعال و ناپایدار درمی‌آید، از این‌رو فلزات پیوسته تمایل دارند با عناصر دیگر ترکیب شده و مجدداً به حالت پایدار خود درآیند. این فرآیند بازگشت فلز به حالت طبیعی و پایدار که از طریق واکنش‌های شیمیایی و یا الکتروشیمیایی فلز با محیط اطراف آن انجام می‌شود زنگ‌زدگی و یا اصطلاحاً خوردگی فلز[1] نامیده می‌شود و چنانچه از انجام واکنش‌های خوردگی جلوگیری نشود فلز با سرعت خورده شده و از دست می‌رود.

محیط‌های اطراف فلزات و از جمله فولادها که کاربرد وسیعی در زندگی امروز دارند و به عنوان محیط‌های خورنده شناخته می‌شوند عموماً عبارتند از :

- هوا
- آب
- خاک
- مواد شیمیایی
- محیط‌های مختلط که مشتمل بر حضور دو یا چند یا همه محیط‌های فوق می‌باشد.

حفاظت فلزات به ویژه فلزات آهنی و مشتقات آنها نظیر فولادهای کربنی معمولاً با روش‌های زیر انجام می‌گیرد:

محیط خورنده	روش حفاظت
هوا	رنگ‌آمیزی
آب	حفاظت کاتدی و یا پوشش + حفاظت کاتدی
خاک	پوشش + حفاظت کاتدی
مواد شیمیایی	پوشش‌های مقاوم – حفاظت کاتدی یا آندی – آلیاژهای مقاوم

از آنجا که حفاظت کاتدی یکی از ارکان اصلی سیستم‌های حفاظتی است لازم است که به‌طور مستقل مورد بررسی قرار گرفته و ضوابط و معیارهای موردنیاز برای طراحی، اجرا و بهره‌برداری از آن مشخص گردد تا از پراکندگی و اعمال سلیقه‌های بعضاً نادرست در به‌کارگیری این فن که می‌تواند ضمن اتلاف سرمایه و انرژی در بعضی موارد موجب ضرر و زیان غیرقابل جبران شود جلوگیری به‌عمل آید.

همان‌طور که از نام آن پیداست، حفاظت کاتدی عبارت است از حفاظت کردن فلز از طریق تشکیل یک پیل الکتریکی و یا ایجاد سیستم الکترولیز که سازه مورد نظر در آنها قطب منفی یا کاتد[2] باشد. زیرا در هر دو سیستم آند خورده شده و کاتد سالم باقی می‌ماند بنابراین حفاظت کاتدی را به دو صورت زیر می‌توان انجام داد:

۱- از طریق تشکیل یک پیل الکتروشیمیایی به‌وسیله نصب یک آند از جنس فلز فعال نظیر منیزیم (Mg) در الکترولیت مجاور (چندمتری) سازه (کاتد) و اتصال آند به سازه از طریق یک سیم رابط. این روش را حفاظت کاتدی با آند فداشونده[3] نامیده‌اند.

---

1 - Metallic Corrosion
2 - Cathode
3 - Galvanic

۲- از طریق تشکیل یک سیم الکترولیز که در آن آند و کاتد (سازه) توسط یک مولد الکتریکی جریان مستقیم (DC) ایجاد می‌شود بدین‌صورت که در مجاورت (چندین متری) سازه یک یا چند آند مثلاً از جنس چدن نصب کرده و سازه و آند به ترتیب به قطب منفی و مثبت مولد وصل می‌نمایند. این روش را حفاظت کاتدی به روش تزریق جریان یا سیستم القایی[1] نامیده‌اند.

کاربرد توأم پوشش و حفاظت کاتدی برای حفاظت سازه‌های مدفون در خاک و یا در تماس با آب با صرفه‌ترین و مطمئن‌ترین روش مقابله با زنگ‌زدگی (خوردگی) اکثر سازه‌های فولادی است مشروط بر این‌که در طراحی، نصب و بهره‌برداری از این سیستم ضوابط و اصول مقرر به‌طور کامل و دقیق رعایت گردد.

در این مجموعه ضوابط و مقررات استاندارد برای استفاده از سیستم حفاظت کاتدی برای سازه‌های فولادی مدفون در خاک و یا در تماس با آب اعم از پوشش‌دار یا بدون پوشش برای استفاده‌کنندگان اعم از مشاوران، پیمانکاران، کارفرمایان و طراحان بیان گردیده است. عدم رعایت این ضوابط و مقررات نه تنها کارآیی سیستم را کاهش خواهد داد بلکه می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیر نیز ببار آورد.

این استاندارد در برگیرنده برخی تعاریف، اصول کلی کاربرد، مشکلات خاص حفاظت سازه‌های فولادی مدفون، ایمنی سازه‌های مجاور سازه حفاظت شده، اندازه‌گیری‌ها و ابزار اندازه‌گیری، راه‌اندازی، بهره‌برداری و نگهداری و نکات ایمنی سیستم‌های حفاظت کاتدی می‌باشد.

1 - Impressed Current

۱- هدف

این استاندارد به‌منظور هدایت کاربران حفاظت کاتدی در جهت استفاده بهینه از این روش اقتصادی برای حفاظت سازه‌های فولادی مدفون در خاک و یا در تماس با آب در برابر خوردگی تهیه شده و اصول و ضوابط کلی لازم‌الاجرا در به‌کارگیری این روش را بیان نموده است تا از این طریق ضمن جلوگیری از پراکندگی و اعمال سلیقه‌های نادرست و خارج از ضابطه حداکثر بهره‌وری از کاربرد این سیستم حاصل شود.

۲- دامنه کاربرد

این استاندارد عمدتاً برای حفاظت کاتدی خطوط لوله و سازه‌های فولادی مدفون در خاک و نیز سازه‌های فولادی در تماس با آب نظیر سطوح داخلی تجهیزات صنعتی حاوی الکترولیت مانند مخازن ذخیره آب، سیستم‌های آب چرخشی و تجهیزات مشابه تهیه شده لکن اصول و ضوابط و معیارهای عمومی حفاظت کاتدی بیان شده در استاندارد می‌تواند در سایر موارد مربوط به حفاظت کاتدی نیز کاربرد داشته باشد.

۳- تعاریف

تعاریف زیر در این استاندارد به‌کار رفته است .

۳-۱ آند

آند الکترودی است که جریان مستقیم را وارد الکترولیت می‌نماید.

توضیح : در یک پیل الکتروشیمیایی، آند، الکترودی است که در آن عمل اکسیداسیون (واکنش خوردگی) صورت گرفته و به واسطه آن، یون‌های فلز وارد الکترولیت می‌شوند.

۳-۱-۱ آند کنسولی[1]

آند شکل داده شده و تقویت شده‌ای است که به‌صورت کنسول نگهداشته می‌شود.

توضیح : این نوع آند برای حفاظت کاتدی سطوح داخلی ظروف محتوی مایعات (الکترولیت)، به ویژه به روش اعمال جریان استفاده می‌گردد.

۳-۱-۲ آند پیوسته[2]

آندی با طول زیاد که قابل انعطاف است.

---

1 - Cantilever Anode
2 - Continuous Anode

۳-۱-۳ آند فدا شونده[1] (آند گالوانیک)

آندی است که با واکنش گالوانیکی، سازه را حفاظت می‌کند.

توضیح: در یک پیل گالوانیک، فلز فعال‌تر اکسید شده و جریان مستقیم تولید می‌نماید تا باعث حفاظت فلز نجیب‌تر[2] در همان پیل گردد؛ این فلز، آند فدا شونده نامیده می‌شود.

۳-۱-۴ مواد پرکننده اطراف آند[3]

موادی با مقاومت الکتریکی پایین و نگهدارنده رطوبت که در اطراف آند مدفون می‌ریزند تا مقاومت مؤثر بین آند و خاک اطراف کاهش یابد.

۳-۱-۵ ناحیه آندی

بخشی از سطح فلز که به‌صورت آند عمل می‌کند.

۳-۲ آزمایش واکنش متقابل[4]

آزمایش تعیین شدت خوردگی متقابل بین دو سازه مدفون یا مستغرق است.

۳-۳ اتصال‌های[5] الکتریکی

۳-۳-۱ اتصال الکتریکی

باریکه‌ای از فلز هادی سخت یا قابل انعطاف (معمولاً مس) که اتصال الکتریکی دو نقطه روی یک سازه و یا چند سازه مختلف را میسر می‌سازد، تا از تغییرات قابل ملاحظه در پتانسیل بین دو نقطه جلوگیری به عمل آید.

۳-۳-۲ اتصال برای پیوستگی[6]

این نوع اتصال، برای اطمینان از تداوم جریان الکتریکی در سازه طراحی و نصب می‌شود.

توجه : این پیوستگی می‌تواند موقت یا دائمی باشد؛ اتصال موقت برای آن است که بتوان دو بخش از سازه را در مواقع تعمیرات و یا اصلاح سیستم از نظر الکتریکی از یکدیگر جدا نمود.

---

1 - Sacrificial Anode
2 - Noble
3 - Anode Back Fill
4 - Interaction Test
5 - Bonds
6 - Continuity Bond

۳-۳-۳ اتصال تخلیه[1]

اتصالی است به منظور تخلیه الکتریکی.

۳-۳-۴ اتصال اصلاحی[2]

اتصالی که بین سازه اولیه و سازه ثانویه، برای حذف یا کاهش واکنش خوردگی متقابل نصب می‌شود.

۳-۳-۵ اتصال مقاومتی[3]

اتصالی که با استفاده از مقاومت متغیر یا با مقاومت کافی برای محدود نمودن عبور جریان نصب می‌شود.

۳-۳-۶ اتصال ایمنی

اتصالی که سازه فلزی یا بدنه دستگاه الکتریکی را به زمین متصل می‌نماید تا بالا رفتن پتانسیل را محدود نموده و خطر شوک الکتریکی را به افرادی که با دستگاه تماس پیدا می‌کنند، کاهش دهد.

۳-۳-۷ مقاومت اتصال

مقاومت اهمی اتصال، که شامل مقاومت نقاط تماس و ضمائم نیز می‌باشد.

۳-۴ اتصال زمین

اتصال عمدی یا تصادفی بین هادی و زمین است.

۳-۵ قطع اتصال[4]

۳-۵-۱ اتصالی عایقی[5]

قطعه عایقی است که بین دو قسمت لوله تعبیه می‌گردد تا بین دو قسمت لوله جریان الکتریکی برقرار نشود.

۳-۵-۲ فلنج عایق

مفصلی فلنجی است که بین دو قطعه خط لوله را، از نظر الکتریکی از هم جدا می‌نماید.

---

1 - Drainage Bond
2 - Remedial Bond
3 - Resistance Bond
4 - Joints
5 - Isolating Joint

۳-۶ اختلاف پتانسیل بین سازه و الکترولیت[1]

اختلاف پتانسیل بین سازه و الکترولیت، توسط یک الکترود مرجع مشخص می‌شود. این الکترود مرجع در نقطه‌ای به اندازه کافی نزدیک به سازه (اما بدون تماس با سازه) با الکترولیت در تماس قرار می‌گیرد تا موجب خطا (بر اثر افت ولتاژ عبور جریان در الکترولیت) نشود.

۳-۷ الکترود

هادی فلزی یا غیر فلزی (کربن) که جریان الکتریکی از آن به الکترولیت وارد و یا توسط آن از الکترولیت خارج می‌شود.

۳-۸ الکترولیت

مایع یا مخلوط مایع و موادی مرکب مانند خاک می‌باشد که جریان الکتریکی از طریق حرکت یون‌ها در آن جریان می‌یابد.

۳-۹ الکترودهای[2] مرجع

۳-۹-۱ الکترود مرجع (نیمه پیل)

الکترودی است که ایجاد پتانسیل معین در آن قابل تکرار است و به‌عنوان پایه مقایسه، برای اندازه‌گیری پتانسیل دیگر الکترودها به‌کار می‌رود.

۳-۹-۲ الکترود مرجع جیوه - کلرور جیوه[3]

این الکترود مرجع متشکل از جیوه و کلرور جیوه در یک محلول استاندارد از کلرور پتاسیم می‌باشد.

۳-۹-۳ الکترود مرجع مس - سولفات مس[4]

الکترود مرجع متشکل از مس در محلول اشباع شده سولفات مس می‌باشد.

۳-۹-۴ الکترود مرجع نقره - کلرور نقره[5]

این الکترود مرجع متشکل از نقره که با کلرور نقره پوشانده شده در الکترولیت حاوی یون‌های کلرور می‌باشد.

---

1 - Structure Electrolyte Potential

2 - Reference Electrodes

توضیح: بسته به مورد، می‌توان به‌جای واژه سازه، از کلمه‌های فلز و لوله و به جای واژه الکترولیت از کلمه‌های خاک و آب استفاده نمود.

3 - Calomel Reference Electrode

4 - Copper – Copper Sulphate Reference Electrode

5 - Silver – Silver Chloride Reference Electrode

۳-۹-۵ الکترود هیدروژن استاندارد[1]

این الکترود مرجع از فلز الکتروپوزیتیو[2] مانند پلاتین در الکترولیتی که با گاز هیدروژن در فشار ۱ اتمسفر اشباع شده و دارای یون‌های هیدروژن با فعالیت واحد[3] می‌باشد، تشکیل شده است.

۳-۹-۶ الکترود حساس[4]

الکترود مرجعی که در یک سیستم اتوماتیک به‌طور ثابت نصب می‌گردد و پتانسیل سازه به الکترولیت را به‌طور دائم اندازه‌گیری می‌نماید، از این طریق شدت جریان حفاظتی کنترل می‌گردد.

۳-۱۰ الکترو نگاتیو[5]

حالت الکترود فلزی، وقتی که پتانسیل آن نسبت به یک الکترود دیگر در سیستم منفی باشد.

۳-۱۱ الکترو پازیتیو[6]

حالت الکترود فلزی، وقتی که پتانسیل آن نسبت به یک الکترود دیگر در سیستم مثبت باشد.

۳-۱۲ الکترو اسمز

عبارت است از عبور مایعات از سطوح متخلخل ناشی از اختلاف پتانسیل بین دو طرف سطح متخلخل.

۳-۱۳ اختلاف تماس با هوا

هنگامی پدید می‌آید که اگر میزان تماس هوا با قسمت‌های مختلف سطح فلز نابرابر باشد. این پدیده موجب تشدید خوردگی در سطوحی می‌شود که مقدار تماس هوای آن محدود باشد.

۳-۱۴ بادکردگی[7] (لایه رنگ)

باد کردگی‌های کوچک لایه رنگ بدون ترک خوردن است که در اثر رطوبت، گاز و یا زنگ‌زدگی بین فلز و لایه رنگ ایجاد می‌شود.

---

1 - Standard Hydrogen Electrode
2 - Electro Positive
3 - Unit Activity
4 - Sensing Electrode
5 - Electronegative
6 - Electropositive
7 - Blistering (Of Paint Film)

۳-۱۵ باکتری‌های احیاکننده سولفات[1]

گروهی از باکتری‌ها است که در بیشتر خاک‌ها وآب‌های طبیعی یافت می‌شوند و فقط در شرایطی نزدیک به خنثی و کمبود اکسیژن واکنش داشته و موجب احیا سولفات‌های محیط اطرافشان شده و تولید سولفید می‌نمایند.

۳-۱۶ بستر زمین[2] (بستر آندی)

مجموعه‌ای از الکترودهای مدفون یا مستغرق است که به خروجی مثبت یک منبع مستقل جریان مستقیم وصل می‌شود تا جریان مورد نیاز سیستم حفاظت کاتدی سازه فلزی مدفون یا مستغرق را به زمین انتقال دهد.

۳-۱۷ بی‌هوازی[3]

فقدان اکسیژن آزاد در الکترولیت مجاور سازه.

۳-۱۸ پتانسیل اکسیداسیون و احیا[4]

پتانسیل اندازه‌گیری شده به‌وسیله الکترود پلاتین نسبت به الکترود مرجع .

۳-۱۹ پتانسیل حفاظتی[5]

پتانسیل سازه فلزی، باید نسبت به الکترود مرجع مشخص شده در محیط الکترولیتی به سطح منفی مورد نیاز کاهش یابد تا سازه حفاظت کاتدی شود. این پتانسیل مورد نیاز، پتانسیل حفاظتی نامیده می‌شود.

۳-۲۰ پتانسیل محرک[6] (سیستم آند فدا شونده)

اختلاف بین پتانسیل سازه – الکترولیت و پتانسیل آند به الکترولیت.

۳-۲۱ پتانسیل لحظه‌ای قطع جریان[7]

پتانسیل سازه به الکترولیت که بلافاصله پس از خاموش شدن همزمان تمام منابع جریان حفاظت کاتدی، اندازه‌گیری می‌شود.

---

1 - Sulphate – Reducing Bacteria
2 - Ground Bed
3 - Anaerobic
4 - Redox Potential
5 - Protection Potential
6 - Driving Potential
7 - Instantaneous Off Potential

۳-۲۲ پوشش حفاظتی[1]

پوشش حفاظتی، عایق الکتریکی است که به سطح سازه چسبانده می‌شود تا آنرا از محیط اطراف جدا ساخته و از خوردگی آن جلوگیری نماید.

۳-۲۳ پیل[2] الکتریکی

پیل الکتریکی، یک سیستم الکتروشیمیایی متشکل از: کاتد، آند و الکترولیت می‌باشد که در آن، جریان الکتریکی بین آند و کاتد از طریق الکترولیت و سیم رابط برقرار می‌گردد.

۳-۲۴ پیل اتصال زمین[3]

پیل اتصال زمین متشکل از دو الکترود از فلز روی[4] یا مواد فدا شونده دیگر است. این الکترودها با عایق از یکدیگر جدا شده و در داخل مواد پرکننده کم مقاومت قرار گرفته‌اند.

این پیل‌ها مسیری با مقاومت الکتریکی کم را بین اجزای سازه و سازه با زمین برای تخلیه جریان‌های متناوب القا شده در سازه و جریان‌های شدید القایی و ناگهانی[5] فراهم می‌نمایند و فقط مقدار کمی از جریان مستقیم حفاظت کاتدی را به زمین تخلیه می‌کنند.

۳-۲۵ پیل قطبی[6]

وسیله‌ای است که در مسیر اتصال زمین یک سازه قرار می‌گیرد، تا فقط جریان کمی از منبع حفاظت کاتدی سازه را تخلیه نماید. این وسیله، با این حال برای جریان‌های مستقیم با ولتاژ بالا و تمام ولتاژهای جریان متناوبی که سازه حمل می‌کند، یک مسیر با مقاومت کم ایجاد می‌کند.

۳-۲۶ پی - اچ (pH)

۳-۲۶-۱ مقدار pH

شاخص لگاریتمی است که بیانگر غلظت یون هیدروژن در الکترولیت می‌باشد.

---

1 - Protective Coating
2 - Cell
3 - Grounding Cell
4 - Zinc
5 - Surge
6 - Polarization Cell

۳-۲۶-۲ اسید[1]

محلولی است که در آن، یون‌های هیدروژن (H+) بیشتر از یون‌های هیدروکسیل (OH-) وجود دارد.

۳-۲۶-۳ باز[2] (قلیا)

محلولی است که در آن، یون‌های هیدروکسیل (OH-) بیش از یون‌های هیدروژن (H+) باشد.

۳-۲۶-۴ خنثی[3]

محلولی است که در آن غلظت یون‌های هیدروکسیل و هیدروژن برابر باشد.

۳-۲۷ تاول‌زدگی لایه رنگ

تاول‌زدگی لایه رنگ، ناشی از جمع‌شدن رطوبت، گاز یا محصولات خوردگی، بین سطح فلز و لایه سالم رنگ می‌باشد. (بند ۲-۱۴)

۳-۲۸ تخلیه

۳-۲۸-۱ تخلیه الکتریکی

تخلیه الکتریکی، برای حفاظت سازه‌های فلزی زیرزمینی یا زیرآبی، در مقابل خوردگی الکتروشیمیایی به‌کار می‌رود، که با ایجاد اتصال الکتریکی بین سازه و مدار برگشت منفی (ریل، تغذیه کننده، شینه[4]و ...) سیستم‌های ریلی با جریان یک‌سو انجام می‌شود.

۳-۲۸-۲ تخلیه اجباری[5]

نوعی تخلیه الکتریکی است که از اتصال بین سازه محافظت شده و سیستم ریلی[6] دارای منبع جریان یک‌سوی مستقل به‌وجود آمده باشد.

۳-۲۸-۳ تخلیه الکتریکی قطبی[7] (پولاریزه)

نوعی تخلیه الکتریکی ناشی از اتصال بین سازه محافظت شده و سیستم ریلی است که دارای وسیله یا وسایل یک‌طرفه‌کننده‌ای مانند یک‌سوکننده[8] یا رله[9] و کنتاکتور[10] باشد.

---

1 - Acid
2 - Alkaline
3 - Neutral
4 - Basbar
5 - Forced Drainage
6 - Traction System
7 - Polarized Electric Drainage
8 - Rectifier
9 - Relay
10 - Contactor

۳-۲۸-۴ آزمایش‌های تخلیه[1] جریان الکتریکی

آزمایش‌هایی است که در آن، جریان الکتریکی برای مدت کوتاهی اعمال می‌گردد تا جریان دائم مورد نیاز برای محافظت در مقابل خوردگی الکتروشیمیایی ارزیابی شود. این کار معمولاً با آندها و منبع‌های انرژی موقت انجام می‌شود.

۳-۲۹ جدایش کاتدی[2]

از بین رفتن چسبندگی پوشش به سطح فلز، به شرایط حفاظت کاتدی بستگی مستقیم داشته (به‌طور مثال افزایشpH و تصاعد هیدروژن) و اغلب به دلیل اشکال در پوشش مانند اجرای ناقص، صدمات اتفاقی یا قابل نفوذ بودن بیش از اندازه پوشش شروع می‌شود.

۳-۳۰ جریان اعمال شده[3]

جریان اعمال شده، عبارت از جریانی است که به‌وسیله یک‌سوکننده یا منبع جریان مستقیم دیگر (به غیر از آند فدا شونده) به سیستم وارد می‌شود تا پتانسیل حفاظتی لازم برای حفاظت سازه تأمین گردد.

۳-۳۱ جریان حفاظتی[4]

جریانی که از محیط الکترولیت به سازه فلزی وارد می‌شود تا سازه راحفاظت کاتدی نماید.

۳-۳۲ جریان سرگردان[5]

جریان یک‌سوی منتشر شده به محیط خاک یا آب از یک سازه است که عمدتاً ناشی از سیستم حفاظت کاتدی، سیستم برق‌رسانی یا سیستم‌های ریلی است. این جریان می‌تواند از محیط به سازه و یا برعکس برقرار شود.

توضیح: در مورد جریان متناوب سرگردان، به بند ۵-۷-۴ مراجعه شود.

۳-۳۳ چگالی جریان[6]

مقدار جریان بر واحد سطح هندسی سازه محافظت شده، با پوشش یا بدون پوشش است که در تماس با الکترولیت باشد.

۳-۳۴ حفاظت کاتدی

روش جلوگیری از خوردگی سازه فلزی با کاتد قرار دادن آن که با برقرار کردن جریان مستقیم از محیط الکترولیتی اطراف سازه به سطح آن به‌دست می‌آید.

---

1 - Drainage Tests
2 - Cathodic Disbonding
3 - Impressed Current
4 - Protection Current
5 - Stray Current
6 - Current Density

۳-۳۵ خوردگی

واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی فلز با محیط اطراف آن است که موجب دگرگونی یا از بین رفتن آن می‌شود.

توضیح: این استاندارد فقط به خوردگی مربوط به واکنش الکتروشیمیایی می‌پردازد.

۳-۳۶ خوردگی متقابل[1]

عبارت است از افزایش یا کاهش میزان خوردگی یا تمایل به خوردگی به یک سازه مدفون یا مستغرق در اثر جریان‌های ناشی از سیستم‌های حفاظت کاتدی اعمال شده به سازه مدفون یا مستغرق دیگر و یا جریان منتشر شده از هر منبعی.

۳-۳۷ سازه‌ها

۳-۳۷-۱ سازه حفاظت شده[2]

سازه‌ای که حفاظت کاتدی به آن اعمال شده است.

۳-۳۷-۲ سازه حفاظت نشده[3]

سازه‌ای که حفاظت کاتدی به آن اعمال نشده است.

۳-۳۷-۳ سازه اصلی[4] (اولیه)

سازه اصلی سازه مدفون یا مستغرقی است که مورد حفاظت کاتدی قرار گرفته است. سیستم حفاظت کاتدی این سازه ممکن است عامل خوردگی برای سازه فرعی (ثانویه) باشد.

۳-۳۷-۴ سازه فرعی[5] (ثانویه)

سازه فرعی سازه مدفون یا مستغرقی است که ممکن است تحت تأثیر خوردگی ناشی از سیستم حفاظت کاتدی سازه اصلی (اولیه) قرار گیرد.

۳-۳۸ صابونی شدن[6]

عبارت است از فرایند شیمیایی صابونی شدن به ویژه تجزیه، تخریب یا نرم شدن قشر رنگ به دلیل واکنش مواد قلیایی روی اسیدهای چرب موجود در رنگ.

---

1 - Corrosion Interaction
2 - Protected Structure
3 - Unprotected Structure
4 - Primary Structure
5 - Secondary Structure
6 - Saponification

۳-۳۹ ضریب بازدهی[1]

بخشی از آند که مصرف می‌شود، قبل از آنکه آند، دیگر نتواند جریان مورد نظر را تأمین نماید.

۳-۴۰ طرح حفاظت کاتدی مشترک[2]

طرحی که در آن، سازه‌های مجزا را که معمولاً مالکین مختلفی دارند به یکدیگر متصل می‌نمایند و با تجهیزاتی مشترک، تحت حفاظت کاتدی قرار می‌گیرند.

۳-۴۱ غلاف عایق[3] الکتریکی

پوششی است از مواد عایق که در محل نصب آند به سازه رنگ شده، اعمال می‌گردد تا از پوسته شدن رنگ جلوگیری شود. پوسته شدن رنگ، ناشی از اثر مواد قلیایی است که به علت جریان با چگالی بالا در سطح فولاد نزدیک به آند ایجاد می‌شود.

توضیح : از این پوشش‌ها بیشتر در بدنه کشتی‌ها استفاده می‌شود.

۳-۴۲ غیر فعال[4]

حالتی است که در آن فلز یا آلیاژ رفتار الکتروشیمیایی کمتری از خود نشان داده و شدت خوردگی آن کاهش می‌یابد.

توضیح : عموماً این حالت در نتیجه تشکیل یک لایه حفاظتی نازک پدید می‌آید.

۳-۴۳ فلنج عایق[5]

مفصل فلنجی بین دو قسمت مجاور لوله است که در آن پیچ و مهره‌ها از سوی یک فلنج یا از سوی هر دو فلنج، عایق الکتریکی گردیده و واشر نیز هادی جریان نمی‌باشد. بنابراین جریان بین دو لوله در آن نقطه قطع می‌شود.

۳-۴۴ قطبی شدن[6]

تغییر پتانسیل الکترود در نتیجه برقرار شدن جریان الکتریکی.

۳-۴۵ کاتد

کاتد، الکترودی است که جریان مستقیم را از الکترولیت دریافت می‌کند.

توضیح : در یک پیل الکتروشیمیایی، کاتد، الکترودی است که در آن واکنش احیا صورت می‌گیرد.

۳-۴۶ کربناته شدن[7]

انجام واکنش شیمیایی بین دی‌اکسیدکربن موجود در هوا و هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان پرتلند.

---

1 - Utilization Factor
2 - Joint Cathodic Protection Scheme
3 - Dielectric Shield
4 - Passivity
5 - Insulated Flange
6 - Polarization
7 - Carbonation

۳-۴۷ ماده هادی

موادی (اغلب فلز یا کربن) که از آن، جریان الکتریکی به‌وسیله حرکت الکترون‌ها عبور می‌نماید.

۳-۴۸ محصول‌خوردگی[1]

ترکیب یا ترکیبات شیمیایی تولید شده از انجام واکنش فلز با محیط اطراف خود.

۳-۴۹ منفذ[2]

منفذ عبارت است از نقصی در پوشش حفاظتی که در آن، سطح فلز به‌طور کامل پوشانده نشده یا ضخامت در آن نقطه کمتر از حد لازم برای ولتاژ آزمایش عیب‌یابی باشد. توضیح آنکه گاهی اوقات این منفذ ممکن است سوراخی به‌کوچکی سرسوزن باشد.

۳-۵۰ ناحیه کاتدی

بخشی از سطح فلز که به‌عنوان کاتد عمل می‌نماید.

۳-۵۱ نقطه تقاطع (ظاهری)

نقطه‌ای که دو خط لوله مدفون یا مستغرق همدیگر را در پلان قطع می‌نمایند.

۳-۵۲ واکنش[3] (آندی ، کاتدی)

واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی که خصوصاً در الکترودها یا نزدیک آنها در یک پیل انجام می‌پذیرد.

۳-۵۳ واکنش گالوانیک

واکنش گالوانیک، واکنش شیمیایی لحظه‌ای است که در بین سیستم، دارای کاتد، آند، اتصال الکتریکی بین آنها والکترولیت اتفاق افتاده و موجب خوردگی آند می‌شود.

۳-۵۴ هیدراته‌شدن (سیمان)

عبارت است از انجام واکنش شیمیایی و فیزیکی بین سیمان و آب که موجب استحکام آن می‌شود.

۳-۵۵ یون[4]

اتم یا مجموعه اتم‌ها که حامل بار الکتریکی مثبت یا منفی باشد.

---

1 - Corrosion Product
2 - Holiday
3 - Reaction (Anodic, Cathodic)
4 - Ion

۴- اصول کلی

۴-۱ کلیات

این فصل شامل جنبه‌های الکتروشیمیایی خوردگی و حفاظت کاتدی بوده و برای کمک به درک بهتر این استاندارد می‌باشد.

۴-۲ رفتار (واکنش) فلزات مدفون یا مستغرق با محیط اطراف خود، در غیاب حفاظت کاتدی

۴-۲-۱ طبیعت خوردگی فلزات

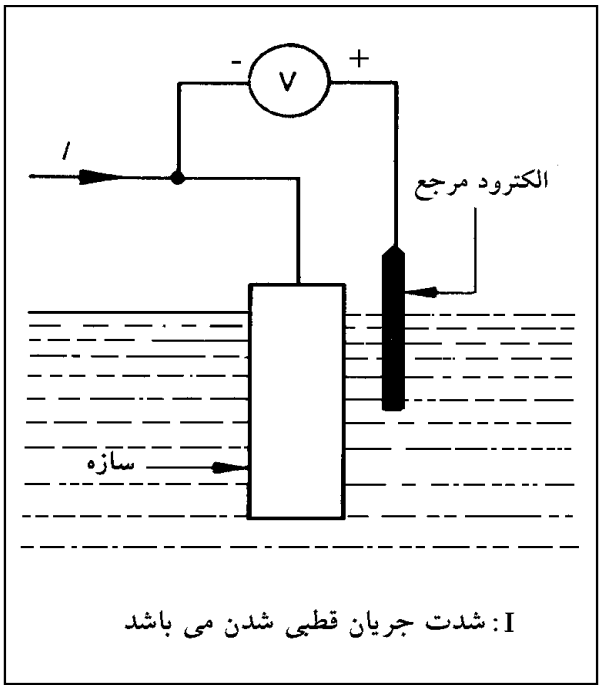
هنگامی‌که خوردگی فلزی در تماس با یک الکترولیت رخ می‌دهد، اتم‌های خنثی آن فلز به صورت یون‌های با بار مثبت وارد محلول می‌گردد و الکترون‌های مازاد در فلز باقی می‌ماند. این فرایند در مورد آهن به‌صورت معادله (۱) نشان داده می‌شود.

$$Fe \rightarrow Fe^{++} + ۲e^{-} \qquad (۱)$$

بنابراین پدیده خوردگی، با برقرار شدن جریان الکتریکی از فلز به الکترولیت، در اثر حرکت یون‌های مثبت به‌داخل الکترولیت و حرکت الکترون‌ها به داخل فلز، همراه می‌باشد. به هر ناحیه‌ای از سطح فلز که جریان الکتریکی در جهت آن باشد، "ناحیه آندی" می‌گویند. یون‌های مثبت فلز ممکن است با یون‌های منفی داخل الکترولیت ایجاد واکنش کرده و تشکیل مواد غیرمحلول ناشی از خوردگی بدهد (مثلاً تولید زنگ در مورد فولاد)؛ این‌گونه مواد اصولاً تأثیری در فرآیند خوردگی نداشته بلکه در برخی موارد، خود عامل کندی خوردگی می‌شوند (به بند ۴-۲-۴ رجوع شود). حالت خنثی برای کل سیستم باید برقرار باشد، بنابراین برای ادامه واکنش خوردگی، حرکت الکترون‌ها به داخل فلز و حرکت یون‌های مثبت به داخل الکترولیت در ناحیه آندی باید با عبور جریان الکتریکی از محلول به فلز و مصرف الکترون‌ها در ناحیه دیگری که به نام «ناحیه کاتدی» موسوم است، جبران گردد. واکنش‌های گوناگونی می‌تواند در ناحیه کاتدی اتفاق بیفتد (به بند ۴-۲-۵ رجوع شود). این واکنش‌ها را واکنش‌های کاتدی می‌نامند. بنابراین هنگام فرآیند خوردگی، وقتی الکترون‌ها از یک ناحیه از سطح فلز به ناحیه دیگر منتقل شود به آن انتقال "هدایت الکترونی"، و هنگامی که یون‌های مثبت از طریق الکترولیت جابه‌جا گردند به آن انتقال "هدایت الکترولیتی" می‌گویند. جریان الکتریکی عبوری از این مدار با سرعت خوردگی متناسب می‌باشد. مثلاً در مورد آهن و فولاد، همان‌طور که در معادله (۱) نشان داده شد، به‌ازای هر اتم که وارد محلول می‌شود، دو الکترون آزاد می‌گردد و به ازای شدت جریان ۱ آمپر، ۹ کیلوگرم فلز آهن در سال خورده می‌شود.

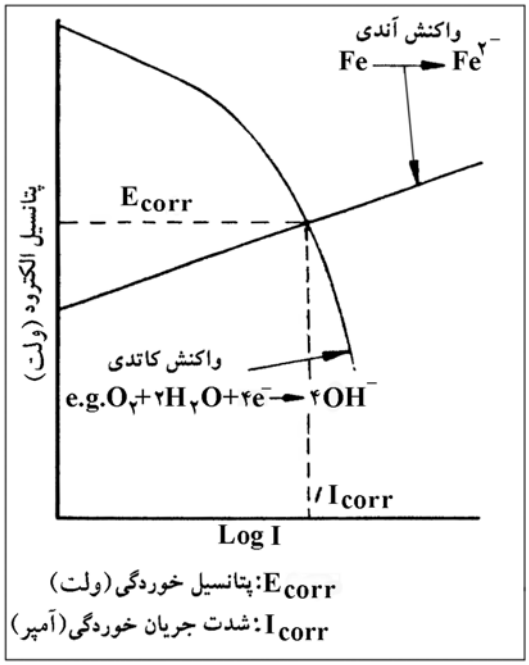
۴-۲-۲ قطبی شدن[1]

اختلاف پتانسیل بین فلز و الکترولیت اطراف آن با تغییر در چگالی و جهت جریانی که سطح تماس بین آنها را قطع می‌کند تغییر می‌نماید؛ به این تغییر در اختلاف پتانسیل، "قطبی شدن" می‌گویند. این اختلاف پتانسیل به نوع واکنش‌های شیمیایی که در سطح فلز رخ می‌دهد نیز بستگی دارد. همان‌طورکه در شکل ۱ نشان داده شده، اختلاف پتانسیل بین فلز و الکترولیت را می‌توان با استفاده از یک الکترود اندازه‌گیری کرد. چون اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده به این روش، به نوع الکترود نیز بستگی دارد (بند ۱۰-۲-۱)، بنابراین باید در این مورد نوع الکترود مرجع نیز بیان شود. قطبی شدن یک سطح فلزی را می‌توان به راحتی با ترسیم منحنی پتانسیل در برابر لگاریتم شدت جریان عبوری (ورودی و خروجی) از سطح فلز نشان داد؛ یعنی درجه قطبی شدن ناشی از واکنش‌های کاتدی وآندی. نمودار شماتیک این موضوع، در شکل (۲) نشان داده شده است. هر چند که جریان ناشی از واکنش‌های کاتدی در جهت منفی می‌باشد، در این نمودار، به خاطر راحتی، در جهت مثبت نشان داده شده است. به راحتی می‌توان دید که در پتانسیل خوردگی (Ecorr)، جریان‌های آندی و کاتدی با هم برابرند و در جهت‌های مخالف هستند (مثبت و منفی). بنابراین کلیه الکترون‌های تولید شده در واکنش‌های آندی، در واکنش‌های کاتدی مصرف می‌گردند. این حالت، شرایط سطوح فلزی مانند حالت خوردگی بدون هرگونه حفاظتی می‌باشد. Icorr، شدت جریان در پتانسیل خوردگی (Ecorr) است. از روی شکل (۲) می‌توان دید که اگر پتانسیل فلز را به‌طریقی کاهش دهیم، سرعت واکنش‌های آندی (خوردگی) کاهش یافته و سرعت واکنش‌های کاتدی افزایش خواهد یافت، و برعکس می‌توان با مثبت‌تر کردن پتانسیل فلز، سرعت خوردگی را افزایش داد.



شکل ۱- روش اندازه‌گیری پتانسیل سازه - الکترولیت

1 - Polarization



شکل ۲- منحنی‌های شماتیک قطبی‌شدن

۴-۲-۳ تشکیل پیل

اگر پتانسیل دو فلز مختلف را نسبت به یک الکترولیت به طریقه ارائه شده در شکل (۳) اندازه‌گیری کنیم و فلز علامت‌گذاری شده با A دارای پتانسیل منفی‌تر باشد، هنگامی‌که مدار بسته می‌شود، جریان الکتریکی در جهت فلش‌های نشان داده شده برقرار خواهد شد. در این حالت، فلز A آند بوده و خورده می‌شود، در حالی‌که فلز C به‌صورت کاتد عمل می‌کند. فلزات و مواد هادی معمولی متعارف در قسمت زیر، به ترتیب نقش آندی فهرست شده‌اند:

الف – منیزیم (الکترونگاتیوترین مواد فهرست شده در این قسمت)

ب – روی

ج – آلومینیم (برخی آلیاژهای آلومینیوم می‌توانند الکترونگاتیوتر باشند)

د – آهن و فولاد

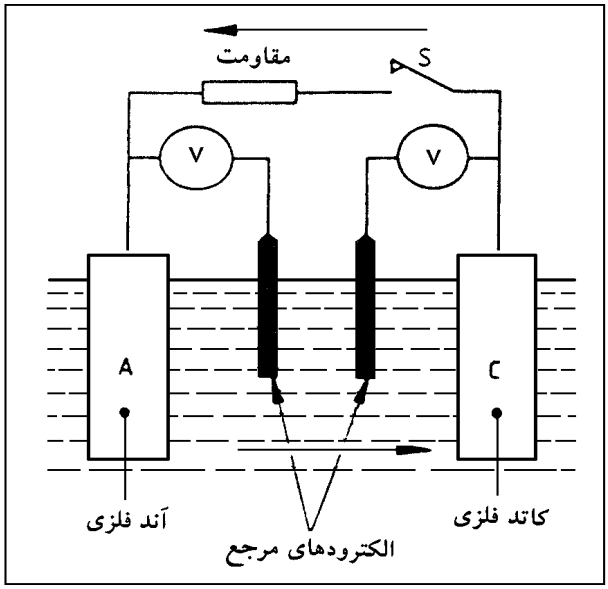
هـ– سرب

و– برنج

ز – مس

ح – گرافیت ، کک و غیره (الکتروپوزیتیوترین مواد فهرست شده در این قسمت)

بنابراین برای مثال، در اتصال آهن به منیزیم، پیلی به‌دست می‌آید که در آن منیزیم نقش آند و آهن نقش‌کاتد را دارد.



شکل ۳- تشکیل یک پیل

پیل‌هایی نیز در اثر تغییر در خواص الکترولیت در تماس با سطح یک فلز در نقاط مختلف به‌وجود می‌آید. اگر غلظت اکسیژن یک الکترولیت افزایش یابد، موجب مثبت‌تر شدن پتانسیل آن فلز می‌گردد. بنابراین تغییر در چگالی خاک و تخلخل آن، یکی از دلایل معمولی ایجاد پیل‌های خوردگی است. ترتیباتی که به ایجاد چنین پیل‌هایی منجر می‌گردد، در شکل (۴) نشان داده شده است. اندازه پیل‌ها نیز می‌تواند خیلی تغییر کند. مثلاً در شکل (۴- ج) سطح آندی می‌تواند خیلی‌کوچک باشد. خوردگی حفره‌ای ناشی از خوردگی سطح آندی به نفوذ (سوراخ شدن) سریع در فلز منجر می‌گردد.

۴-۲-۴ رویین شدن (غیر فعال شدن)

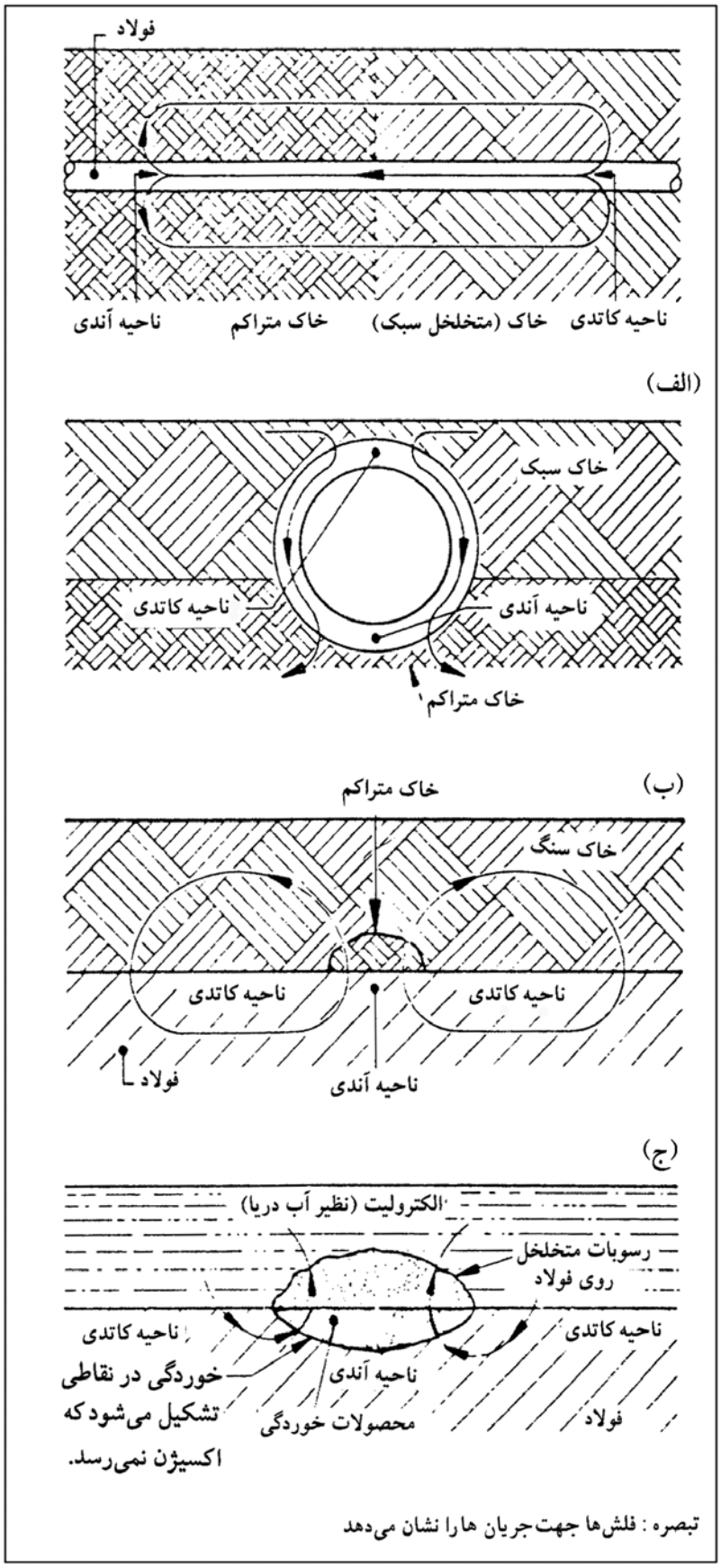
اگر مواد تولید شده در اثر خوردگی، به ایجاد یک قشر چسبنده به سطح فلز منجر گردد، ممکن است از ادامه خوردگی پیشگیری شود. برای مثال، مقاومت فولاد زنگ نزن (ضد زنگ) در مقابل خوردگی، ناشی از اثر حفاظتی قشرهای اکسید محافظ می‌باشد. فلزاتی مانند آلومینیوم، تیتانیوم و تانتالوم نیز با تشکیل قشرهای مقاوم و چسبنده اکسیدی موجب می‌شوند که سرعت عبور یون‌های فلزی به محلول، محدود گردد.

۴-۲-۵ واکنش در ناحیه‌های کاتدی

معادله‌های (۲) و (۳) معمول‌ترین واکنش‌هایی را که در ناحیه‌های کاتدی اتفاق می‌افتد نشان می‌دهد.

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \qquad (2)$$

گاز هیدروژن $\rightarrow$ الکترون‌ها + یون‌های هیدروژن



شکل ۴- سلول‌های ناشی از اختلاف هوادهی

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \quad (3)$$

اکسیژن + آب + الکترون‌ها $\rightarrow$ یون‌های هیدروکسیل

واکنش (۲) بیشتر در محیط‌های اسیدی (در محیط‌هایی با یون‌های هیدروژن اضافی) و واکنش (۳) بیشتر در مجاورت اکسیژن محلول در آب و در شرایط نزدیک به خنثی رخ می‌دهد. تمایل هر دو واکنش به‌سوی افزایش خاصیت قلیایی در الکترولیت نزدیک به کاتد می‌باشد (برای فزونی یون‌های هیدروکسیل نسبت به یون‌های هیدروژن، به ضمیمه الف مراجعه شود). در واکنش‌های کاتدی، بر عکس واکنش‌های آندی (برای مثال معادله ۱) اتم‌های فلزی وارد محلول نمی‌شوند. بنابراین غالباً در نواحی کاتدی، خوردگی رخ نمی‌دهد. در شرایط هوادهی (اکسیژن رسانی) و نزدیک به‌حالت خنثی، یون‌های آهن ایجاد شده در آند با یون‌های هیدروکسیل ایجاد شده در ناحیه‌های کاتدی، به آن ترکیب نزدیک شده و تولید هیدرو اکسیدآهن (فرو) می‌نماید. به هر حال، هیدرواکسیدآهن (فرو) در حضور اکسیژن به سرعت‌تبدیل به زنگ آهن می‌گردد و بنابراین واکنش کلی که در نهایت پس از چند مرحله اتفاق می‌افتد به صورت معادله (۴) بیان می‌شود که زنگ یا هیدرواکسید آهن آبدار می‌باشد.

$$4Fe + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe_2O_3.H_2O \quad (4)$$

در عمل، اغلب سرعت خوردگی را می‌توان با حفظ میزان واکنش کاتدی تعیین کرد. مثلاً اگر واکنش (۳) مورد نظر باشد، میزان تأمین اکسیژن می‌تواند فاکتور کنترل کننده خوردگی باشد.

در خاک‌های بی‌هوازی نزدیک به حالت خنثی، باکتری‌های احیاکننده سولفات‌ها موجب تشدید نوعی واکنش کاتدی می‌گردند و اغلب چنین خاک‌هایی خصوصاً نسبت به آهن و فولاد، مهاجم و خورنده هستند. با اندازه‌گیری pH و پتانسیل اکسیداسیون و احیا، می‌توان ارزیابی کرد که آیا شرایط برای فعال‌شدن باکتری‌های احیا کننده سولفات‌ها فراهم می‌باشد یا خیر.

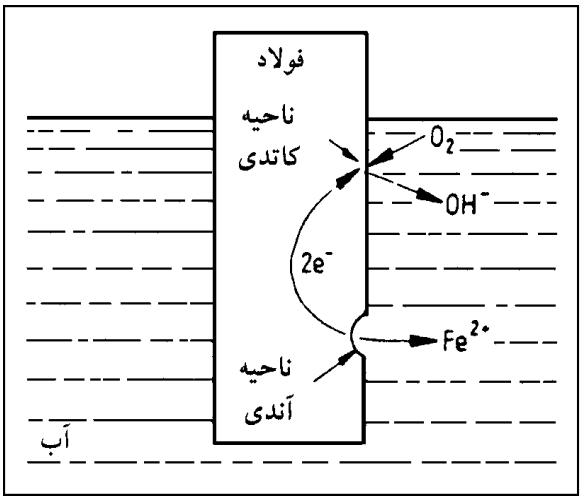
واکنش‌هایی که در ناحیه کاتدی اتفاق می‌افتد، مستقیماً به خوردگی منجر نمی‌گردد. ولی باید توجه داشت که در ناحیه کاتدی، محیط اطراف فلز تغییر می‌کند و برای مثال قلیایی‌تر می‌شود (به بندهای قبلی رجوع شود). در مورد آلومینیوم و گاهی اوقات سرب، این تغییر می‌تواند موجب خوردگی شود. قلیایی بودن، خود می‌تواند موجب فساد رنگ و پوشش‌های محافظ دیگر فلز شود (در اثر صابونی شدن). تأثیرات واکنش‌های کاتدی که در اثر اعمال حفاظت کاتدی رخ می‌دهد، در بند ۵-۷-۱ درج شده است.

۴-۳ حفاظت کاتدی

۴-۳-۱ مبانی حفاظت کاتدی

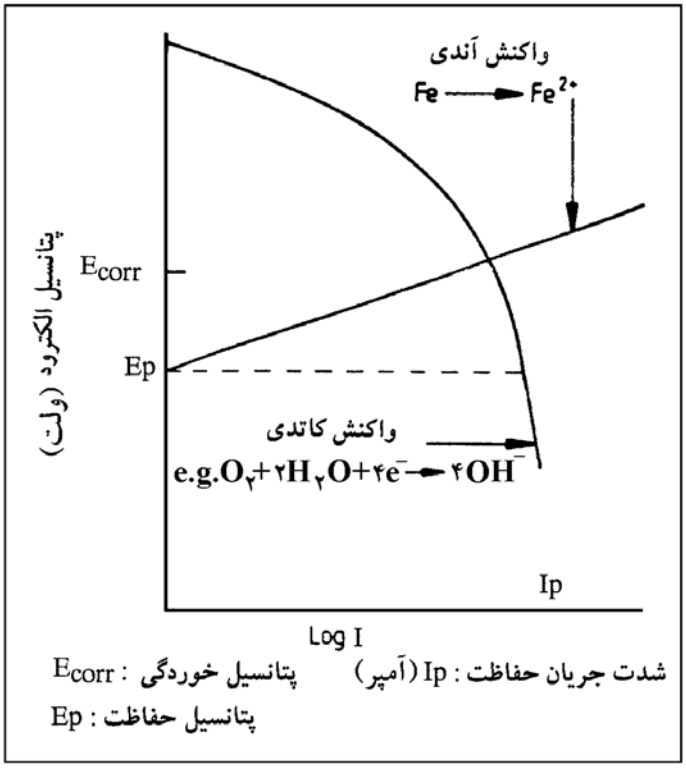
خوردگی به وجود نواحی آندی و کاتدی نیاز دارد. شکل (۵) فرآیند خوردگی در آب‌های هوادهی شده را نشان می‌دهد. اگر الکترون از منبع خارجی وارد سازه شود، در آن صورت یون‌های مثبت از سطح فلز، با سرعت کمتری خارج می‌شوند، ولی فرایند کاتدی افزایش می‌یابد. این اصول را می‌توان با استفاده از منحنی‌های قطبی شدن (پولاریزاسیون) همان‌طورکه در شکل (۶)

نشان داده شده نیز توضیح داد. اگر با تأمین الکترون خارجی پتانسیل فلز از مقدار Ecorr (پتانسیل خوردگی) به مقدار Ep (پتانسیل حفاظت کاتدی) کاهش داده شود، جریان آندی و بنابراین شدت خوردگی کاهش یافته و بدین ترتیب حفاظت کاتدی به‌دست می‌آید. Ep پتانسیل حفاظت نامیده می‌شود. برای حفاظت کاتدی، باید توسط منبع خارجی شدت جریان Ip در پتانسیل حفاظت Ep را تأمین و حفظ کرد. این کار را می‌توان با اتصال سازه به آند کمکی انجام داد. این آند کمکی، تأمین کننده چگالی جریان لازم برای کلیه قسمت‌های سطح فلزی سازه می‌باشد که در این‌صورت سازه به کاتد تبدیل می‌شود. اگر آند از جنس منیزیم باشد، جریان الکتریکی در اثر اختلاف پتانسیل ایجاد شده در پیل‌های تشکیل شده برقرار گشته و آند کمکی خورده می‌شود. این نوع آند را "آندهای فدا شونده[1]" می‌نامند. هم‌چنین این اختلاف پتانسیل را می‌توان توسط یک منبع ولتاژ خارجی جریان مستقیم نیز تأمین نمود. در این صورت به آن، "سیستم با اعمال[2] جریان" می‌گویند. این سیستم به ما اجازه استفاده از آندهای کمکی متنوعی را می‌دهد. جنس این آندها معمولاً طوری انتخاب می‌شود که با سرعت خیلی کمی‌خورده شوند. ارقام نمونه (تیپ) برای متوسط چگالی جریان لازم در پتانسیل حفاظتی در کاربردهای خاص در بخش‌های مربوطه این استاندارد بیان شده است. در اینجا تأکید می‌شود که این ارقام متوسط، فقط برای راهنمایی کلی ارائه می‌گردند.



شکل ۵- واکنش‌های آندی و کاتدی در سطوح فولادی

1 - Socrificial Anode
2 - Impressed Current



شکل ۶- رابطه بین قطبی‌شدن و حفاظت کاتدی

۴-۳-۲ ضوابط حفاظت کاتدی

۴-۳-۲-۱ کلیات

معمولاً اختلاف پتانسیل بین یک فلز با الکترولیت (خاک یا آب) به‌عنوان عامل مهم و معیاری برای به‌دست آوردن حفاظت کاتدی مطلوب به‌کار می‌رود. در جدول (۱) حداقل مقادیر پتانسیلی که باید به‌دست آید (پتانسیل‌های حفاظتی) درج شده است. اگر پتانسیل از این مقادیر مثبت‌تر باشد، موجب خوردگی خواهد شد. این مقادیر حداقل پتانسیل حفاظتی، تابع الکترود مرجع به‌کار رفته می‌باشد. چون در عمل مقدار پتانسیل در نواحی مختلف سطح فلز متغیر می‌باشد، بسیار مهم است که در ارزیابی حفاظت کاتدی لوله مدفون، اختلاف پتانسیل منفی حداقل بین فلز و خاک مشخص و تعیین موقعیت شود. این کار با اندازه‌گیری نقاط متعدد و کافی در امتداد لوله میسر می‌شود. در این مورد، باید نکات منعکس شده (بند مربوط به سازه‌های مدفون) مورد ملاحظه قرار گیرد.

اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بین سطح فلز و الکترولیت، تحت تأثیر افت پتانسیل ناشی از جریان حفاظتی عبوری از الکترولیت به سازه قرار می‌گیرد مگر آنکه الکترود مرجع، به سطح فلز، خیلی نزدیک باشد. این پدیده که اغلب به «افت IR[1]» موسوم است، موجب می‌شود که پتانسیل اندازه‌گیری شده، منفی‌تر از پتانسیل واقعی در سطح فلز- الکترولیت باشد؛ مگر آنکه

1 - IR drop

روش اندازه‌گیری مناسبی به‌کار گرفته شود که تأثیر افت IR را به اندازه کافی کاهش داده و یا آنرا حذف نماید. تنظیم شدت جریان سیستم حفاظت کاتدی، با توجه به مقادیر مربوط به پتانسیل حفاظتی نشان داده شده در جدول (۱)، ممکن است باعث حفاظت کاتدی نگردد. افت IR به مقاومت الکترولیت بستگی دارد و این افت، مخصوصاً در مورد سازه‌های مدفون درست است. در مورد سازه‌های پوشش شده مقاومت پوشش نیز مؤثر می‌باشد. روش پتانسیل قطع لحظه‌ای به‌عنوان شیوه‌ای برای به حداقل رساندن خطای افت IR مورد قبول قرار گرفته و اصولاً هر تکنیکی که بتواند باعث کاهش خطای افت IR تا سطح قابل قبول باشد، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به ملاحظات بالا، حفاظت کاتدی فلز با رساندن پتانسیل آن به حداقل‌های مندرج در جدول (۱) و یا مقادیر منفی‌تر از آن به‌دست می‌آید.

در مورد بعضی فلزات خاص، توصیه‌های لازم در بندهای ۴-۳-۲-۲ تا ۴-۳-۲-۶ ارائه شده است.

۴-۳-۲-۲ آهن و فولاد

همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده است، اگر آهن و فولاد در محیط بی‌هوازی مانند خاک رس قرار گرفته باشند، به‌دلیل تأثیرات باکتری‌های احیا کننده، سولفات پتانسیل منفی‌تری برای آهن و فولاد توصیه می‌شود.

جدول ۱- حداقل پتانسیل‌های حفاظت کاتدی

فلز یا آلیاژ	الکترود مرجع (شرایط کاربرد)			
	مس- سولفات مس درخاک‌وآب شیرین	نقره - کلرور نقره اشباع شده کلرور پتاسیم (در هر الکترولیت)	نقره - کلرور نقره (در آب دریا)	روی - آب دریا
	ولت	ولت	ولت	ولت
آهن و فولاد	- ۰/۸۵	- ۰/۷۵	- ۰/۸	+ ۰/۲۵
- محیط هوازی	- ۰/۹۵	- ۰/۸۵	- ۰/۹	+ ۰/۱۵
- محیط بی‌هوازی	- ۰/۶	- ۰/۵	- ۰/۵۵	+ ۰/۵
سرب	- ۰/۶۵ — تا ۰/۵ -	- ۰/۵۵ — تا ۰/۴ -	- ۰/۶ — تا ۰/۴۵ -	- ۰/۴۵ — تا ۰/۶ -
آلیاژهای مس آلومینیوم	- ۰/۹۵	- ۰/۸۵	- ۰/۹	+ ۰/۱۵
- حد مثبت	- ۱/۲	- ۱/۱	- ۱/۱۵	- ۰/۱
- حد منفی				

تبصره ۱- برای استفاده در آب دریای تمیز - رقیق نشده و هوادهی شده که آب دریا در تماس مستقیم با الکترود فلزی می‌باشد.

تبصره ۲- کلیه ارقام به نزدیک‌ترین رقم ۰/۰۵V گرد شده است.

۴-۳-۲-۳ فولادهای ضد زنگ

پتانسیل‌های خیلی منفی ناشی از قطبی شدن فولادهای ضد زنگ، ممکن است باعث به‌وجود آمدن هیدروژن و در نهایت موجب تاول‌زدن فولاد گشته و مقاومت مکانیکی آنرا کاهش دهد.

فولاد ضد زنگ در بسیاری از محیط‌ها به حفاظت نیاز ندارد. در بعضی موارد، از حفاظت آندی استفاده می‌شود. غالباً فولادهای ضد زنگ تحت تأثیر خوردگی شکافی قرار می‌گیرند؛ برای مثال ممکن است شکافی در درزهای پرچ شده یا پیچ شده در محل تماس سطوح فلزی با سطوح غیرفلزی مانند واشرها به‌وجود آید. خوردگی شکافی نوعی خاص از خوردگی ناشی از هوادهی متفاوت است که معمولاً در محیط‌های دریایی اتفاق می‌افتد. بنا به تجربیات موجود، حفاظت کاتدی، وقوع و شدت این نوع خوردگی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. برای حفاظت کاتدی فولاد ضد زنگ، قطبی شدن تا پتانسیل مندرج در جدول (۱) برای آهن و فولاد لازم است. باید دانست که اگر فولاد ضد زنگ برای مدتی حفاظت کاتدی شود. ولی پس از مدتی، سیستم حفاظت کاتدی آن قطع گردد، این فولاد ضد زنگ، تحت تأثیر خوردگی شکافی بیشتری قرار می‌گیرد.

تجربه نشان می‌دهد که حفاظت کاتدی فولاد ضد زنگ، در خوردگی حفره‌ای تصادفی (نامنظم) تأثیر ندارد؛ هر چند برخی مطالعات آزمایشگاهی شواهدی برخلاف آنرا نشان داده‌اند.

۴-۳-۲-۴ آلومینیم

اگر پتانسیل آلومینیم خیلی زیاد منفی شود، ممکن است خوردگی پیدا کند. بنابراین، معمولاً برای حفاظت آنها از حفاظت کاتدی استفاده نمی‌شود. تجربه نشان داده است که اگر بتوان پتانسیل را بین حدود اعلام شده در جدول (۱) نگهداشت، می‌توان از خوردگی آلومینیم پیشگیری نمود.

۴-۳-۲-۵ سرب

اگر پتانسیل، در محیط‌های قلیایی خیلی منفی باشد، گاهی ممکن است سرب خورده شود.

۴-۳-۲-۶ سازه‌های پوششدار

به دلیل آسیب‌دیدگی احتمالی پوشش در اثر حفاظت کاتدی، اعمال حفاظت کاتدی به سازه‌های دارای پوشش، از محدودیت خاصی برخوردار می‌باشد، به‌طوری‌که در این‌گونه سازه‌ها، پتانسیل منفی سازه نسبت به الکترولیت نباید از حد معینی تجاوز نماید. پوشش‌های مختلف متداول در رابطه با حفاظت کاتدی، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند و از این‌رو، حداکثر پتانسیل منفی سازه نسبت به الکترولیت برای پوشش‌های مختلف متفاوت می‌باشد.

جدول (۲) حداکثر پتانسیل منفی سازه پوششدار نسبت به الکترولیت در حالت خاموش لحظه‌ای[1] را در مورد پوشش‌های مختلف نسبت به الکترود مرجع مس – سولفات مس نشان می‌دهد.

1 - Instant Off Potential

جدول ۲- حداکثر پتانسیل منفی سازه پوششدار نسبت به الکترولیت

ردیف	نوع پوشش	پتانسیل خاموش لحظه‌ای (ولت) نسبت به الکترود مس – سولفات مس
۱	پوشش اپوکسی پودری	۱-
۲	پوشش انامل قیری ذغال سنگی یا نفتی	۱/۵ -
۳	پوشش نوار پلاستیکی چسب‌دار	۱/۱ -
۴	پوشش اپوکسی کولتار	۱/۲ -
۵	پوشش پلی‌اتیلن کارخانه‌ای	۱/۲ -

۵- نکات مورد توجه در اعمال حفاظت کاتدی بیشتر سازه‌ها

۵-۱ کلیات

همان‌طور که قبلاً گفته شد حفاظت کاتدی را می‌توان در مورد هر سازه یا تأسیسات فلزی که در تماس با آب و خاک باشد، به‌کاربرد. کاربرد حفاظت کاتدی برای سطوح فلزی که به صورت متناوب در آب قرار می‌گیرد نیز مفید است. (مانند تأسیساتی که تحت اثر جزر و مد در آب فرو می‌روند).

در بعضی موارد، کاربرد حفاظت کاتدی به دلیل ملاحظات اقتصادی محدود می‌گردد. مثلاً ممکن است حفاظت کاتدی برای برخی از سازه‌های موجود، به خاطر هزینه بالای آماده‌سازی آنها اقتصادی نباشد. نقش و عملکرد سازه یا تأسیسات مورد حفاظت، تعیین کننده منافع حاصل از حفاظت کاتدی برای جلوگیری از خوردگی می‌باشد. اگر پیامدهای حاصل از سوراخ شدن لوله‌ها و تجهیزات در اثر خوردگی مهم باشد (مانند خطرات ناشی از نشت گازهای سمی یا قابل اشتعال یا قطع بهره‌برداری از تأسیسات بزرگ و یا سوراخ شدن کشتی‌ها)، در این صورت، اعمال حفاظت کاتدی کامل مطابق مشخصات مندرج در جدول (۱) بدون در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، به‌دلیل اهمیت ایمنی طرح الزامی است. به هرحال، باید توجه کرد که کاهش پتانسیل در مرحله اول در مقایسه با کاهش پتانسیل در مراحل بعدی، تأثیر بیشتری در کاهش شدت خوردگی دارد. به‌عنوان مثال، در بعضی موارد مثلاً برای سازه حاوی سیالات غیرخطرناک یا سازه‌ای که خوردگی در آن کم اهمیت‌تر است، می‌توان از پتانسیل‌های منفی، کمتر از آنچه در جدول (۱) درج شده، استفاده کرد؛ این امر قابل قبول و اقتصادی می‌باشد.

۵-۲ مبانی طراحی

همان‌گونه که در بخش دوم توضیح داده شد، حفاظت کاتدی یک سازه با برقرار نمودن جریان الکتریکی از الکترولیت (محیط اطراف) به تمام نقاط سطح سازه به‌دست می‌آید. ضابطه مشخص کننده برای حصول حفاظت کاتدی، این است که پتانسیل فلز (سازه) نسبت به الکترولیت مجاور آن در تمام نقاط منفی‌تر از پتانسیل حفاظتی ارائه شده در جدول (۱) باشد. شدت جریان لازم برای رسیدن به این ضابطه، به نوع سازه و شرایط محیط اطراف آن بستگی دارد که در بخش ۵ تا ۹ مورد بحث قرار گرفته است. در شکل (۷- الف) اجزای سیستم حفاظت کاتدی به صورت شماتیک نشان داده شده که متشکل است از آند مدفون یا مستغرق و سیم رابط آند به سازه مورد حفاظت و در سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان یک منبع جریان الکتریکی یک‌سو.

جریان الکتریکی در قسمت‌های فلزی مدار، در مسیر نشان داده شده حرکت کرده و از طریق الکترولیت (خاک و یا آب) به سازه حفاظت شده برمی‌گردد. اگر افت ولتاژ در اثر عبور جریان از الکترولیت یا سازه و یا هر دو با هم زیاد (قابل ملاحظه) باشد، تغییرات پتانسیل به دلیل حفاظت کاتدی به‌صورت غیر یکنواخت خواهد بود (شکل ۷- ب). عوامل زیر باعث افزایش غیر یکنواختی حفاظت کاتدی می‌شود:

الف – فاصله کم بین آند و سازه (مخصوصاً اگر مقاومت الکترولیت زیاد باشد)،

ب – مقاومت زیاد خاک یا آب (مخصوصاً اگر آندها نزدیک به سازه باشند)،

ج – برای حفاظت سازه، جریان با چگالی بالا لازم باشد،

تبصره ۱- چگالی جریان لازم برای حفاظت سازه، تابع شرایط و کیفیت پوشش (اگر سازه پوشش شده باشد)، وجود اکسیژن در مجاورت سطح فلز و فعالیت باکتری‌های احیا کننده سولفات می‌باشد.

د- مقاومت الکتریکی زیاد بین قسمت‌های مختلف سازه، و

هـ- غیر یکنواختی کیفیت پوشش.

تبصره ۲- اختلاف پتانسیل بین فلز و محیط اطراف در محل نقاط معیوب پوشش، می‌تواند کمتر از سایر نقاط باشد.

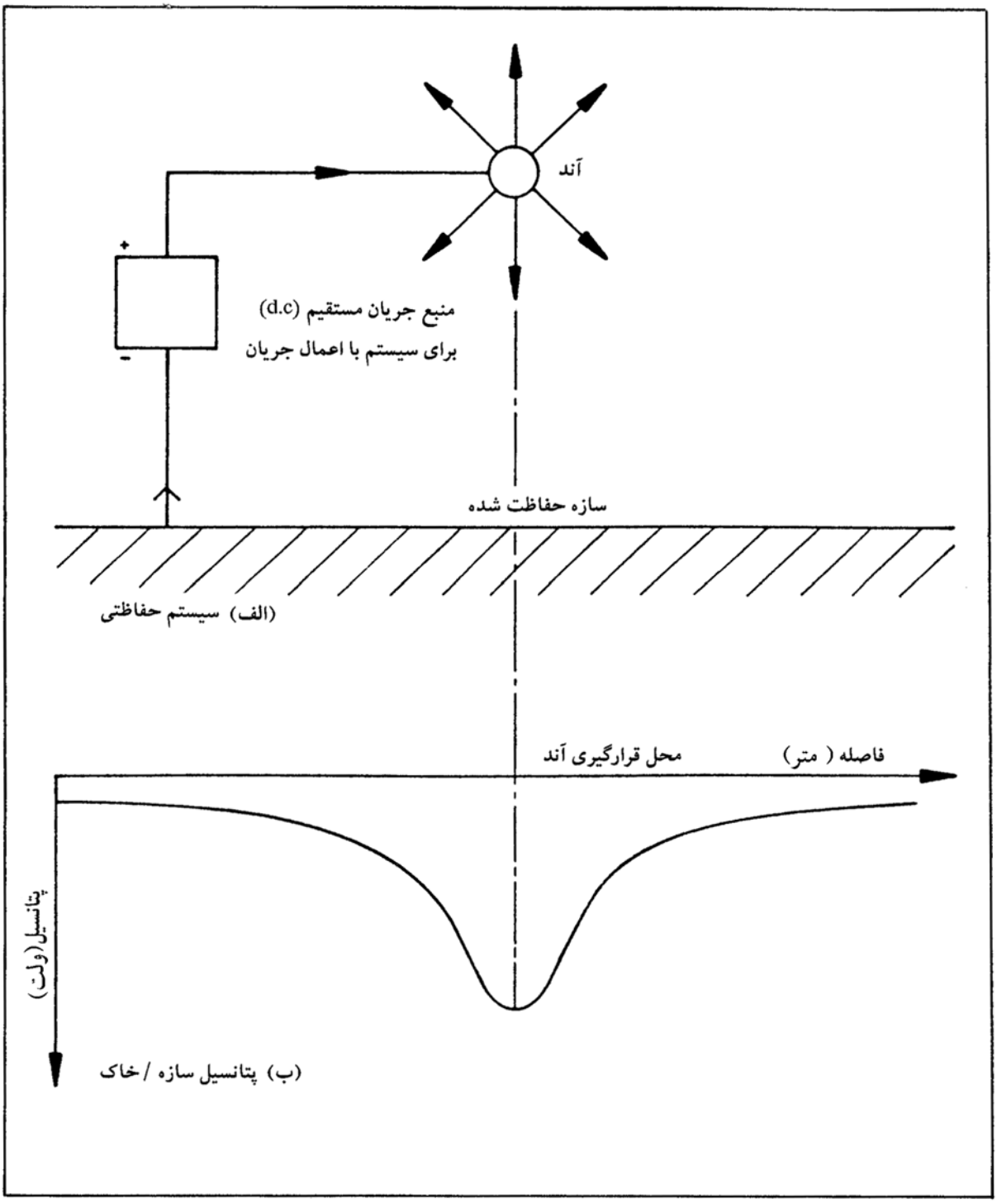
در مواردی، چگالی جریان بالا در نزدیکی‌های آند می‌تواند مزایایی در بر داشته باشد، زیرا در نقطه‌ای که بیشترین نیاز به چگالی جریان بالا می‌باشد، می‌توان آنرا متمرکز نمود. برای مثال، در حالتی که خوردگی آهن (فولاد) به علت مجاورت با فلزی الکتروپوزیتیوتر رخ می‌دهد، حملات خوردگی معمولاً موضعی شده که در این صورت فقط سطح کمی از فلز نیاز به حفاظت دارد. معمولاً همه سطح فلز سازه مورد حفاظت قرار می‌گیرد، بنابراین بعضی از قسمت‌های سطح فلز برای رسیدن به پتانسیل حفاظت، جریان بیشتر از حد لازم دریافت می‌کنند که پدپده غیریکنواختی مطابق شکل (۷- ب) به‌وجود می‌آورد و این امر موجب غیراقتصادی شدن حفاظت کاتدی می‌گردد.

چون پتانسیل سطح فلز براساس بند ۵-۷-۱ نباید خیلی منفی‌تر از حد نیاز شود، نمی‌توان ضعف طراحی اولیه را با افزایش شدت جریان حفاظت کاتدی جبران کرد، در این صورت آندهای بیشتری موردنیاز می‌باشد که در مورد سازه‌های وسیع و طویل اگر از سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان استفاده شده باشد، ممکن است منبع جریان الکتریکی دیگری نیز موردنیاز باشد. اگر قرار است به سازه‌ای حفاظت کاتدی اعمال گردد، اولین گام این است که ملاحظه شود آیا می‌توان سازه یا دستگاه را به شکلی طراحی یا تغییر داد (در مورد سازه‌های موجود) که سیستم حفاظت کاتدی آن اقتصادی‌تر باشد این موارد در بند ۵-۳ درج شده است. در مورد چگونگی جاگذاری درست آندها، هم از نظر فاصله از سازه و هم از نظر توزیع آندها در سطح، باید ملاحظات جدی دیگری مورد توجه قرار گیرد. اگر سازه‌ای، مانند خط لوله، قرار است با اعمال جریان تحت حفاظت کاتدی قرار گیرد، دسترسی به خط انتقال برق که در طرح تأثیر به‌سزایی دارد، باید بررسی شود.

سیستم‌های حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده و با اعمال جریان در بندهای ۵-۴ و ۵-۵ تشریح شده و در بند ۵-۶ مشخصه‌های این دو سیستم با یکدیگر مقایسه شده است. در بعضی موارد، می‌توان از جریان برق که در زمین و در اثر سیستم‌های ریلی جریان دارد، استفاده کرد (به بند ۶-۵ مراجعه شود). در برخی موارد، سازه‌ها را با ترکیبی از دو سیستم حفاظت کاتدی، آندهای فدا شونده و با اعمال جریان، حفاظت می‌کنند. این‌گونه حفاظت را سیستم دو گانه[1] می‌نامند.

طراحی اقتصادی یک سازه و سیستم حفاظت کاتدی مربوط به آن مستلزم به‌دست آوردن حداکثر تعادل بهینه بین عوامل مؤثر در هزینه‌های اولیه (مؤثر بودن پوشش سازه، هدایت الکتریکی بین قطعات مختلف سازه و یا دستگاه، تعداد و چگونگی استقرار آندها، تعداد واحدهای مجزا و...) و هزینه‌های جاری (مصرف برق لازم و تعویض آندها) می‌باشد. علاوه بر موارد بالا، ملاحظات خاصی وجود دارد که مربوط به نوع سازه‌ها است (به بندهای ۶ تا ۱۰ مراجعه شود)، مثلاً در حفاظت کاتدی بدنه کشتی‌ها یا تلمبه‌ها، باید به نیروی پسا[2] ناشی از نصب آندها توجه نمود. در مورد سازه‌های مدفون، احتمال تأثیر جریان برق مستقیم منتشره در محیط اطراف سازه و نیز سازه‌های مجاور می‌تواند در اقتصاد طرح تأثیر به‌سزایی داشته باشد. همچنین در طرح‌های حفاظت کاتدی، آثار ثانویه باید مورد ملاحظه و ارزیابی قرار گیرد (به بند ۵-۷-۱ مراجعه شود).

1 - Hybrid
2 - Hydraulic drag



شکل ۷- سیستم حفاظت کاتدی و توزیع پتانسیل سازه - الکترولیت

۵-۳ طراحی یا اصلاح سازه‌های تحت حفاظت

۵-۳-۱ پیوستگی الکتریکی

ممکن است نصب اتصال پیوستگی بین قطعات مختلف سازه تحت حفاظت، قبل از اعمال حفاظت کاتدی ضروری باشد. مقاومت این اتصال‌ها باید خیلی کم باشد تا افت پتانسیل ناشی از عبور جریان حفاظتی از سازه کم گردد. در تأسیسات تحت حفاظت کاتدی با اعمال جریان، ممکن است بهبود اتصالات بین قسمت‌های مختلف سازه اقتصادی باشد؛ هرچند که اتصال فلزی بین قطعات مختلف برقرار باشد، این کار به خاطر کاهش مقاومت کلی انجام می‌گیرد.

باید توجه داشت که اگر سازه دارای ارتباط پیوسته فلزی نباشد، قسمتی از جریان حفاظتی که از داخل الکترولیت به‌سمت یک قطعه حفاظت شده جریان می‌یابد، ممکن است از قسمت‌های ایزوله شده سازه عبور کند. خوردگی ممکن است در نقاطی که این جریان‌ها از فلز تخلیه می‌شوند و به داخل الکترولیت برمی‌گردند تشدید شود. این خوردگی تشدید شده در مواردی‌که سیالات هادی توسط خطوط لوله منتقل می‌شوند، می‌تواند داخلی باشد.

۵-۳-۲ پوشش‌های حفاظتی

کاربرد پوشش به منظور کاهش تماس سطح فلز با الکترولیت (زمین و یا آب) مجاور آن می‌باشد. با اجرای پوشش روی سطح فلز، می‌توان تا حد زیادی چگالی جریان لازم برای حفاظت کاتدی را کاهش داد و چون جریان به‌طور یکنواخت توزیع می‌شود، نقاط کمتری برای اعمال حفاظت کاتدی لازم می‌باشد (به بند ۵-۲ مراجعه شود).

پوشش ایده‌آل باید دارای مشخصه‌های زیر باشد:

- مقاومت الکتریکی بالا
- پیوستگی (دارای منفذ کم)
- مقاوم در مقابل هرگونه مواد شیمیایی و باکتری‌ها
- مقاوم در مقابل هرگونه تغییرات دمایی
- عدم وجود بادکردگی[1]
- چسبندگی کامل به سطح فلز
- مقاوم در مقابل پیری[2]
- مقاومت مکانیکی کافی
- در برخی موارد، مقاومت پوشش در مقابل سایش نیز مهم می‌باشد.

پوشش می‌تواند به‌صورت رنگ از نوع اپوکسی یا رزین‌های مشابه، مواد ترموپلاستیک مانند پلی‌اتیلن (PE) و یا پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) باشد که به‌صورت ذوبی یا تزریقی روی سطح فلز اجرا می‌گردد. انامل‌های نوع قطران ذغال‌سنگ یا قیر

1 - Blister
2 - Aging

نفتی که با الیاف غیر آلی تقویت شده باشند نیز، در مورد پوشش‌ها کاربرد دارند. با توجه به نوع سازه و محیط اطراف، مناسب‌ترین پوشش انتخاب می‌گردد. در این خصوص، اطلاعات مربوط در بخش ۶ ارائه گردیده است.

در انتخاب نوع پوشش، هزینه کل طرح باید مورد توجه قرار گیرد که شامل هزینه اولیه سازه حفاظت شده به‌علاوه هزینه‌های اولیه و جاری سیستم‌های حفاظتی آن می‌باشد. عمر مفید سازه مورد حفاظت و هزینه تعمیرات پوشش (اگر مورد نیاز باشد) نیز باید مورد توجه کافی قرار گیرد.

در مورد سازه‌های مدفون، نقش مهم دیگر پوشش، کاهش شدت جریان بین فلز و الکترولیت است که سبب کاهش گرادیان پتانسیل در خاک اطراف گشته و در نتیجه به کاهش اثر متقابل سازه‌های مدفون مجاور منجر می‌شود.

در صورتی‌که از پتانسیل‌های حفاظتی خیلی منفی استفاده شود، جریان‌های حفاظتی باعث ایجاد مواد قلیایی برای تخریب پوشش می‌شود. در برخی موارد، کاربرد پوشش‌های مقاوم در مقابل مواد قلیایی توصیه می‌شود. این موضوع در بند ۵-۷-۱ مورد بحث قرار گرفته و موارد کاربرد آن نیز در بخش ۶ بیان شده است.

در این استاندارد، در مورد پوشش‌ها فقط اطلاعات عمومی ارائه شده است. در عمل باید خواص پوشش با انجام آزمایش‌های لازم تعیین شود[1].

از بتن به عنوان پوشش عایق کننده نمی‌توان استفاده کرد و هرجا که لازم است باید پوشش عایق کننده را تعبیه نمود. اطلاعات مفیدی از پوشش‌های سازه‌های آهنی و فولادی را می‌توان در استانداردهای معتبر[2] به‌دست آورد. هم‌چنین استانداردهای مربوط به «پوشش جدار لوله‌های فولادی با ملات ماسه سیمان» به شماره ۱۷۳، «پوشش جدارلوله‌های فولادی با مواد پایه قیرنفتی و قطران ذغال‌سنگی» به شماره ۲۱۰ و «پوشش پلی‌اتیلنی لوله‌ها واتصالات فولادی» به شماره ۲۰۴ در دفتر استانداردها و معیارهای فنی تهیه شده و توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور چاپ و ابلاغ گردیده است.

۵-۳-۳ ایزوله کردن الکتریکی[3]

مواردی وجود دارد که در آن، یک سازه، به‌طور کامل پوشش شده و می‌توان آنرا به روش اقتصادی حفاظت کاتدی کرد. چنانچه این سازه به یک سازه گسترده با پوشش ضعیف متصل شده باشد که سازه اخیر نیازی به حفاظت کاتدی نداشته و یا اینکه حفاظت کاتدی آن غیراقتصادی می‌باشد، در چنین مواردی باید سازه با پوشش کامل را قبل از اعمال حفاظت کاتدی از سازه دیگر ایزوله نمود. برای مثال، در مورد خطوط لوله، معمولاً تعبیه یک مفصل جداکننده الکتریکی در پایانه تأسیسات ضرورت دارد.

کاربرد دیگر جداکننده الکتریکی، در هنگامی است که بخواهیم قسمتی از یک سازه را عایق کنیم تا تأثیرات ناشی از اثر متقابل آنرا روی سازه‌های مجاور کاهش دهیم. اگر قسمت جدا شده در جایی باشد که موجب قطع پیوستگی الکتریکی مورد نیاز سازه گردد، در صورت نیاز باید با استفاده از یک کابل عایق شده اتصال الکتریکی قطع شده را برقرار کرد.

---

1 - BS 3900 Part F10 and Part F11
2 - BS 5493
3 - Electrical Isolation

گاهی اوقات به‌منظور تنظیم مقدار جریان برق، می‌توان یک مقاومت متغیر را به‌طور موازی به طرفین مفصل جداکننده الکتریکی وصل کرد. برای مثال، با انتخاب مقدار مناسبی برای مقاومت می‌توان جریان عبوری را به شکلی تنظیم کرد که برای حفاظت قسمت مورد نظر کافی بوده ولی به اندازه‌ای نباشد که موجب اثر متقابل نامطلوب در سازه‌های مجاور گردد.

گاهی اوقات در اسکله‌های نفتی (پایانه‌ها) برای تدابیر ایمنی، از مفصل‌های جداکننده الکتریکی استفاده می‌شود. این مفصل‌های جداکننده الکتریکی در محل‌هایی که احتمال تجمع گازهای قابل اشتعال یا بخار می‌باشد، نباید بیرون از زمین نصب شود.

اگر فقط قسمتی از سازه حفاظت شود، ممکن است موجب تشدید خوردگی بخش‌های عایق‌شده، گردد (به توضیحات بند ۵-۳-۱ مراجعه شود). به این دلیل، توصیه می‌شود که قسمت‌های حفاظت‌شده سازه را که در مجاورت وسایل و تجهیزات حفاظت نشده قرار می‌گیرند، با مواد عایق‌کننده پوشش شوند و یا برای جلوگیری از ایجاد خسارت تدابیر مناسب دیگری اتخاذ گردد. در مورد تجهیزاتی که حاوی الکترولیت هستند، خوردگی می‌تواند در سطوح داخلی قسمت حفاظت نشده، به‌صورت مشابه بالا اتفاق افتد. اگر سیال مورد نظر دارای مقاومت کم (مانندآب شور[1]) باشد، خوردگی می‌تواند خیلی سریع اتفاق بیفتد. بنابراین کاربرد مفصل جداکننده الکتریکی در مورد لوله‌های انتقال آب دریا و یا آب نمک با غلظت بالا توصیه نمی‌شود. البته می‌توان بخشی از لوله را که پوشش داخلی شده توسط یک مفصل جداکننده الکتریکی از انتهای حفاظت نشده لوله جدا کرد.

۵-۳-۴ تمهیدات لازم برای آزمایش

اگر از تأسیسات حفاظت کاتدی به‌شکل درست نگهداری نشود، کارایی مؤثر خود را از دست می‌دهد، بدین منظور جزییات آزمایش‌های مورد نیاز در این استاندارد درج شده است، دارای اهمیت می‌باشد که در مرحله طراحی، تسهیلات لازم برای آزمایش منظور شده باشد تا بتوان آزمایش‌ها را از شروع راه‌اندازی به راحتی انجام داد. توصیه‌های مربوط به تدابیر لازم برای تسهیلات مورد نیاز انجام آزمایش‌ها برای انواع مختلف سازه‌ها و دستگاه‌ها در بخش ۵ ارائه شده است.

۵-۴ سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده

۵-۴-۱ کلیات

همان‌طورکه در بندهای ۴-۳ گفته شد، برای حفاظت کاتدی سازه فلزی، آندی را در الکترولیت اطراف سازه نصب کرده و توسط سیم هادی به سازه متصل می‌کنند؛ این آند از فلز سازه تحت حفاظت باید الکترونگاتیوتر باشد. نمونه آرایش اجزا و سیستم اتصال در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. جریان حاصله از قرار گرفتن آند در الکترولیت، محدود، به شکل و اندازه آند (به بند ۵-۴-۲ مراجعه شود) و پتانسیل نسبتاً کم ایجاد شده (به جدول ۳ مراجعه شود) در سیستم می‌باشد. استفاده از این روش حفاظت کاتدی، به دلیل محدودیت جریان منحصر به سطوح کوچک فلزی است. مگر آنکه سازه به‌طور کامل پوشش شده باشد. ولی در الکترولیت‌های با مقاومت خیلی کم (مانند آب دریا)، سازه‌های بدون پوشش نیز به روش آندهای فدا شونده

1 - Brine

حفاظت می‌شوند. در مواردی‌که سازه‌های بدون پوشش به روش آندهای فدا شونده مورد حفاظت قرار می‌گیرند، ممکن است لازم شود، تعدادی آند در طول یا سطح سازه مورد حفاظت توزیع شود. آندها را می‌توان یا در فاصله‌ای از سازه به‌صورت مدفون یا مستغرق قرار داد و با یک سیم هادی عایق شده به سازه متصل کرد (به شکل ۸ مراجعه شود) و یا اینکه آنها را مستقیماً به سطح سازه متصل کرد (به شکل ۹ مراجعه شود). اگر آندها در فاصله‌ای از سازه نصب شوند، جریان برق موجود، به‌علت توزیع یکنواخت آن به‌شکل مؤثرتری عمل می‌کند. اگر سازه دارای پوشش باشد یا اینکه الکترولیت دارای مقاومت بالایی باشد، منظور کردن فاصله کافی و مناسب بین آند و سازه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. تماس‌مستقیم بین آند و سازه در حالتی مناسب است که مقاومت الکترولیت پایین باشد و یا در مواردی‌که تماس مستقیم آند به سازه راحت‌تر است.

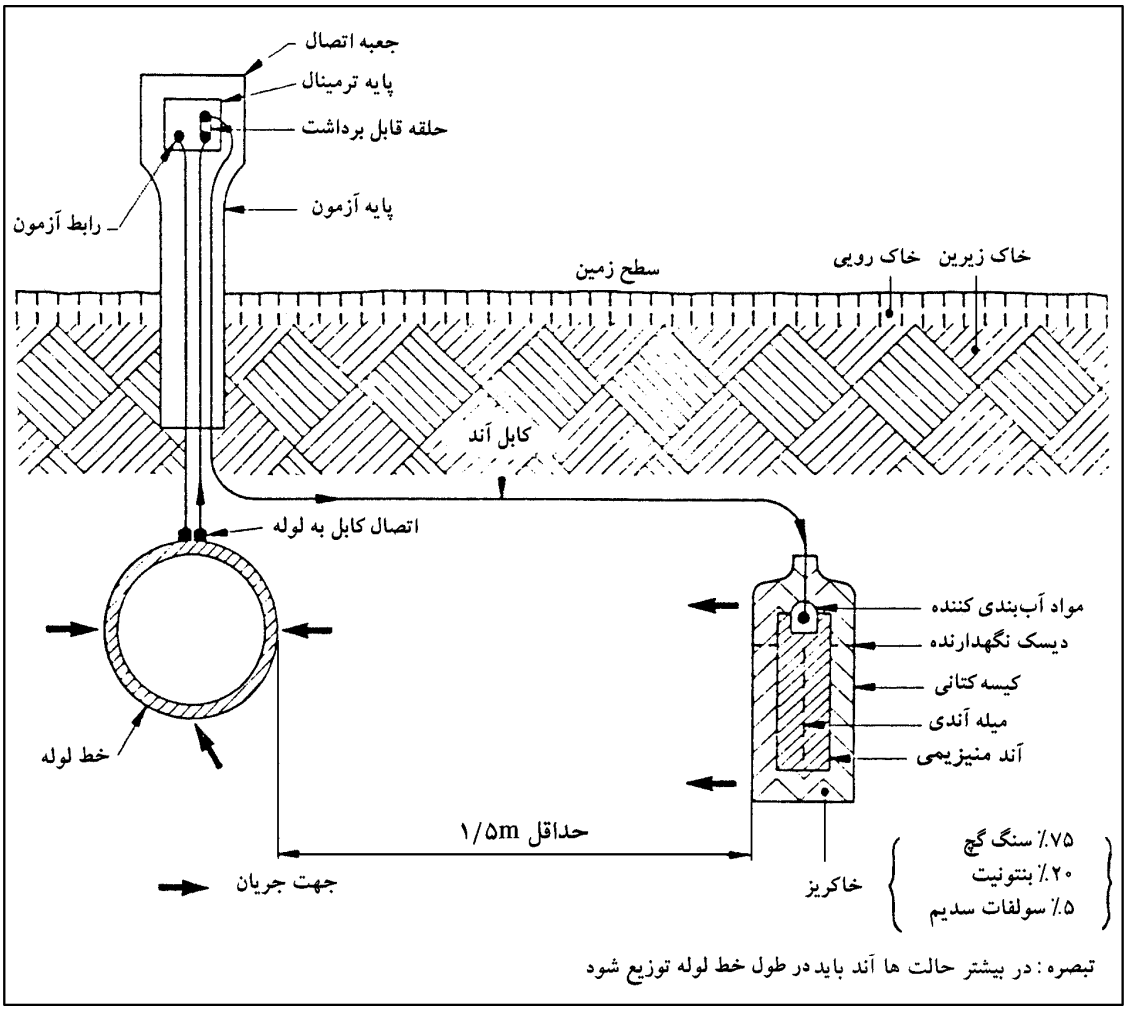
جدول ۳- اطلاعات نمونه از مواد آندهای فدا شونده

آلیاژ	شرایط محیط عادی	پتانسیل مدار باز (برای الکترودهای مرجع)	ظرفیت	مقدار مصرف
منیزیم		ولت	آمپر در ساعت کیلوگرم	کیلو آمپر در سال
٪ ۱/۵ Mn	خاک همراه با آب تمیز	− ۱/۷ (Cu – CuSo۴)	۱۲۰۰	۷/۵
٪۳ Zn ،٪۶ Al	خاک همراه با آب تمیز	− ۱/۵ (Cu – CuSo۴)	۱۲۰۰	۷/۵
روی				
٪۰/۱ Cd ،٪۰/۵ Al	آب دریا	− ۱/۰۵ (Ag-AgCl – آب دریا)	۷۸۰	۱۱/۲۵
آلومینیوم				
٪۰/۰۴ Hg ،٪۰/۴ Zn	آب دریا	− ۱/۰۵ (Ag-AgCl – آب دریا)	۲۸۰۰ <	۳/۱۵
٪۰/۰۴ Hg ،٪۵ Zn	دریا – بستر گل‌آلود	− ۱/۰۵ (Ag-AgCl – آب دریا)	۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰	۴/۳۸ تا ۴/۸۶
٪۳ Zn تا ٪۵	آب دریا	− ۱/۱ (Ag-AgCl – آب دریا)	۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰	۴/۳۸ تا ۴/۸۶
٪۰/۰۱ In تا ٪۰/۰۳	دریا – بستر گل‌آلود			

۵-۴-۲ طراحی آندهای فدا شونده

مقاومت الکتریکی بین آند و الکترولیت اطراف آن، به مقاومت الکترولیت، شکل و اندازه آند بستگی دارد. اگر مقدار معینی از یک آند با جنس مشخص و استوانه‌ای شکل را درنظر بگیریم، هرچه طول آند افزایش یابد، مقاومت الکتریکی بین آند و الکترولیت کاهش می‌یابد و تغییرات قطر تأثیر کمتری در مقاومت آن دارد. چنانچه مقاومت الکترولیت بالا باشد (غالب خاک‌ها)،

مناسب‌ترین شکل آند به‌صورت میله و یا شمش نازک است و اگر محیط اطراف، دارای مقاومت خیلی بالایی باشد، مناسب‌ترین شکل آند به‌صورت تسمه‌ای و نواری است. برای الکترولیت‌های با مقاومت پایین‌تر، ممکن است آندهای ضخیم‌تر (به‌شکل میله یا شمش) و یا حتی کروی شکل برای داشتن عمرکافی ضروری باشد. به منظور کاهش مقاومت، آندهای مدفون را با موادی که مقاومت آن کمتر از مقاومت خاک است، می‌پوشانند (شکل ۸). بازدهی سیستم، به پتانسیل محرک و جنس آند نیز بستگی دارد (بند ۵-۴-۳). در داخل آندهای فدا شونده، معمولاً میله‌هایی کار گذاشته می‌شود که جنس آنها کمتر الکترونگاتیو می‌باشد (مانند فولاد)، تا پیوستگی و مقاومت مکانیکی آند تا پایان عمر آن تأمین شود. شکل و جاگذاری میله‌ها باید به شکلی باشد تا اتصال محکم و مطمئنی با آند برقرار کند.



شکل ۸- حفاظت کاتدی تیپ برای لوله‌های مدفون با آندهای فدا شونده پیش‌ساخته

معمولاً آندهای فدا شونده، به روش ریخته‌گری مواد آند در اطراف میله داخلی و یا هسته فولادی ساخته می‌شوند، این میله یا هسته فولادی، به‌صورت مستقیم یا غیر مستقیم به سازه مورد حفاظت متصل می‌گردد. بعضی از آندها را می‌توان به روش تزریقی (اکستروژن) با هسته فولادی یا بدون آن تولید نمود. معمولاً هسته‌های فولادی را قبل از ریخته‌گری فلز آند آماده‌سازی سطحی می‌نمایند، تا حداکثر تماس الکتریکی بین آلیاژ آند و هسته برقرار شود. معمولاً قسمتی از هسته بیرون از فلز آند قرار می‌گیرد، تا امکان اتصال آند به سازه به روش جوشکاری یا اتصال پیچی فراهم شود (شکل ۹). اتصال جوشی، از نظر تماس الکتریکی مطمئن‌تر است، اگرچه مشکلات تعویض آند را به‌همراه دارد.

در مواردی‌که اتصال آند به سازه با استفاده از کابل صورت می‌گیرد، باید محل اتصال کابل با آند طوری باشد که در شرایط نصب و بهره‌برداری، استحکام کافی را داشته و تا پایان عمر آند دوام آورد.

در مورد آندهای فدا شونده، معمولاً قسمتی از وزن آند به مصرف حفاظت می‌رسد و قسمتی دیگر تلف می‌گردد. بنابراین در طراحی آندهای فدا شونده، ضریب بازدهی مشخصی در نظر گرفته می‌شود.

در سیستم‌های حفاظت کاتدی معمولاً برای قطع و وصل و اندازه‌گیری جریان از یک جعبه اتصال استفاده می‌شود. این قبیل اتصالات، از جمله اتصال به سازه، باید کاملاً محکم بوده و مقاومت الکتریکی پایینی داشته باشد.

۵-۴-۳ جنس آند

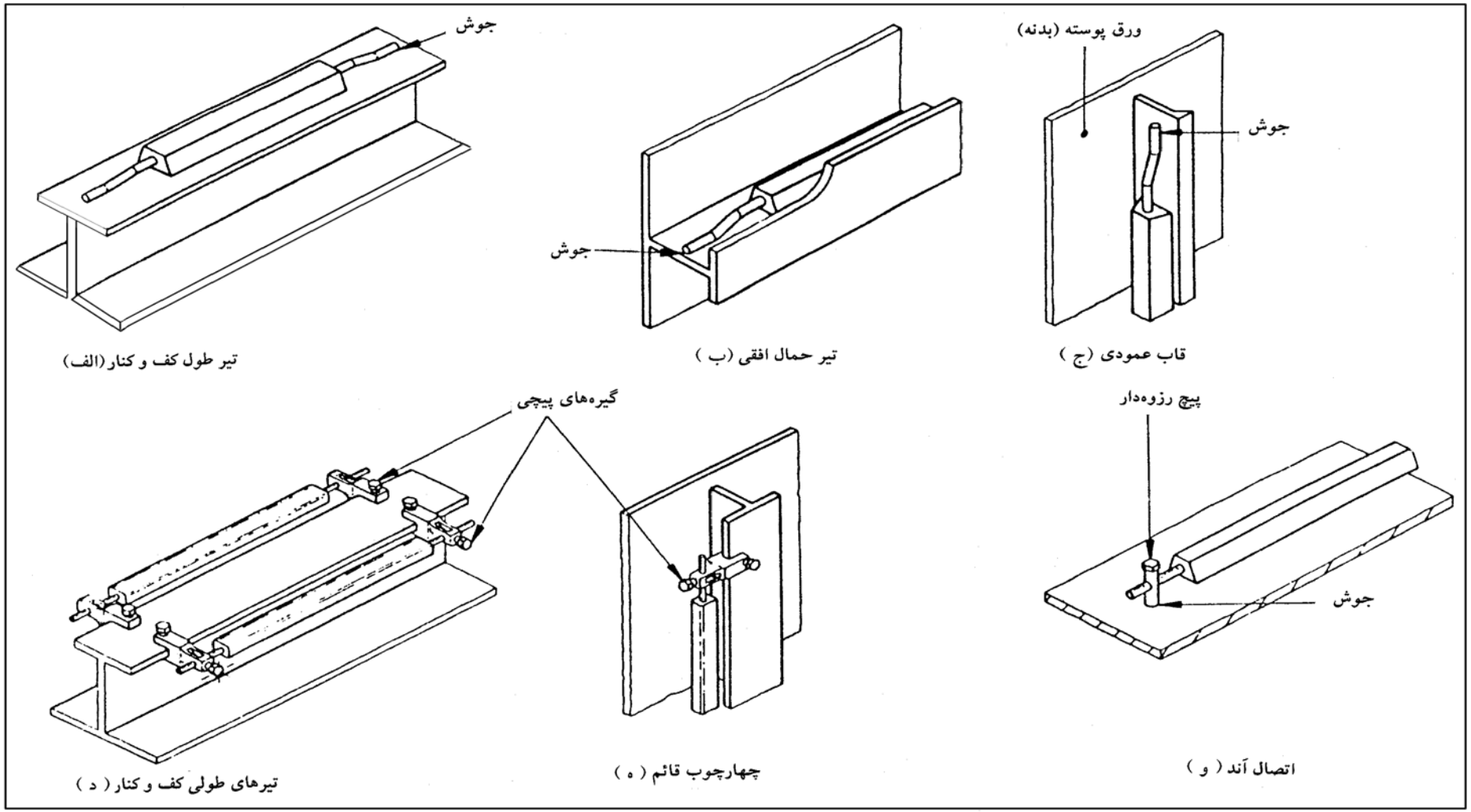
۵-۴-۳-۱ کلیات

آندهای فدا شونده معمولاً از آلیاژهایی با پایه منیزیم، روی یا آلومینیوم ساخته می‌شوند. کارکرد یک آلیاژ برای کار مشخصی به عوامل زیر بستگی دارد:

- ترکیب شیمیایی آند و الکترولیت،
- دمای بهره‌برداری، و
- چگالی جریان آند.

در جدول ۳ چند آلیاژ نمونه از آندهای فدا شونده نشان داده شده است؛ البته در این ترکیب‌ها گونه‌های دیگری از این آلیاژها نیز وجود دارد.

تبصره: برخی از آلیاژها ممکن است مواد سمی تولید کنند، بنابراین با توجه به شرایط مورد نظر، باید مجاز بودن نوع آلیاژ مصرفی قبلاً مطالعه و ارزیابی شود.



شکل ۹- حفاظت کاتدی تیپ برای سطوح داخلی تانک‌های ذخیره با آندهای فدا شونده و ترتیب قرارگیری آنها

۵-۴-۳-۲ آلیاژهای منیزیم (Mg)

به‌طور کلی، دو گروه از آلیاژهای منیزیمی وجود دارد که در سیستم حفاظت کاتدی به‌عنوان آند مورد استفاده قرار می‌گیرد:

گروه اول، آلیاژهای منیزیم حاوی حدود ۱/۵ درصد منگنز (Mn) و گروه دوم، آلیاژهای منیزیم حاوی حدود ۶ درصد آلومینیوم (Al)، ۳ درصد روی (Zn) و ۰/۱۵ درصد منگنز است در موارد بالا، از آنجایی که در منیزیم ممکن است ناخالصی‌های دیگری نیز وجود داشته باشد، برای محدود کردن پدیده قطبی‌شدن و خودخوردگی[1] منیزیم، باید قبلاً ناخالصی‌ها کنترل شده باشد.

افزودن منگنز، برای مهار ناخالصی‌های آهنی موجود در آلیاژ بوده و موجب می‌شود که پتانسیل آند، کمی منفی‌ترشود. آلیاژهای گروه اول که دارای منگنز بالایی است، نسبت به آلیاژهای گروه دوم دارای پتانسیل محرک بالاتری بوده و در مواردی‌که الکترولیت دارای مقاومت بالاتری باشد، مناسب‌تر است. در مواقعی که پتانسیل محرک بالایی مورد نیاز باشد، به‌طور مثال در خاک‌ها و آب‌های شیرین و شور، اغلب از آلیاژهای منیزیم استفاده می‌شود. چون ترکیبات حاصله از خوردگی آلیاژهای منیزیم سمی نیست، می‌توان از آنها در آب آشامیدنی استفاده کرد. چگالی پایین و پتانسیل محرک بالای آلیاژهای منیزیم باعث شده که از آنها به‌عنوان آندهای معلق و هم‌چنین کاربرد در حفاظت‌های موقت که تعداد آندها محدودیت دارد، استفاده شود (به‌طور مثال، کشتی‌های منتقل شده به خشکی جهت تعمیر و...). از طرف دیگر، باید توجه داشت که آندهای منیزیم می‌تواند به اندازه‌ای پتانسیل‌های منفی ایجاد کند که به تخریب رنگ منجر شود. بنابراین استفاده از این آندها در تعدادی از کاربردها باید با دقت زیادی انجام گیرد (بند ۵-۷-۱). به‌علاوه، در اطراف آندهای منیزیم، هیدروژن تشکیل می‌شود که ممکن است جرقه‌های حاصله از برخورد منیزیم به فولاد زنگ‌زده به انفجار و آتش‌سوزی منجر شود (به بند ۱۲-۶-۱ مراجعه شود) در چنین مواقعی، باید تمهیدات لازم برای جلوگیری از انفجار و آتش‌سوزی در نظر گرفته شود.

۵-۴-۳-۳ آلیاژهای روی (Zn)

از فلز روی خالص تجارتی، به‌ندرت به عنوان آند استفاده می‌شود، زیرا به علت وجود ناخالصی آهن، دارای خاصیت قطبی شدن زیادی می‌باشد. آندهای ریختگی از جنس روی بسیار خالص[2]، با ناخالصی آهن کمتر از ۰/۰۰۱۴ درصد کارکرد مطلوبی دارد. آلیاژهای روی با ناخالصی بیشتر نیز ساخته شده‌اند که در آنها اثر مخرب آهن با افزایش آلومینیوم جبران می‌شود. در این آلیاژها، تأثیر ناخالصی آهن توسط ترکیبات خنثی بین فلزی مهار شده و یا با افزایش سیلیسیم، می‌توان آهن را به صورت سرباره در هنگام ذوب و ریخته‌گری آند جدا نمود. ضمناً افزودن کادمیوم به‌افزایش تشکیل محصولات خوردگی نرم و غیرچسبنده در سطح آند کمک می‌نماید. این نوع آلیاژها حاوی ۰/۵ درصد آلومینیوم و تا ۰/۱ درصد سیلیسیم و یا کادمیوم می‌باشند. ضمناً آلیاژهای حاوی مقدار کمی جیوه، ایندیوم، کلسیم و لیتیوم نیز برای استفاده در شرایطی که به پتانسیل محرک بالایی نیاز باشد، مطرح شده است ولی هیچ‌کدام کاربرد تجاری نیافته‌اند.

---

1 - Self - Corrosion

۲- نوع Zn ۱ مطابق استاندارد BS ۳۴۳۶

آند روی، ممکن است در دمای بالاتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد دارای پتانسیل محرک پایین‌تری باشد و تحت تأثیر خوردگی مرز دانه‌ای[1] قرار گرفته و ظرفیت آن کاهش یابد. آلیاژهایی از روی ساخته شده‌اند که حملات خوردگی مرز دانه‌ای در آنها به حداقل ممکن کاهش یافته است. از آندهای روی، به خصوص در آب دریا استفاده می‌گردد، (مثلاً برای حفاظت بدنه کشتی‌ها) زیرا در این شرایط، پتانسیل محرک پایین آن در مقابل فولاد، برای تخریب اکثر رنگ‌ها کافی نیست و جریان خروجی با توجه به نیاز تغییر می‌یابد. بنابراین تا حدود زیادی دارای خاصیت خود تنظیمی[2] است. آندهای روی، معمولاً تولید هیدروژن نمی‌کند و خطر جرقه و آتش‌گیری در آنها وجود ندارد.

۵-۴-۳-۴ آلومینیوم (Al)

هنگامی که از آلومینیوم خالص به‌عنوان آند استفاده می‌شود، آلومینیوم خورده شده و قشر نازک و چسبنده‌ای از اکسید آلومینیوم روی آن تشکیل می‌شود که موجب قطبی شدن سریع آن می‌گردد. در الکترولیت‌های حاوی کلرور، این قشر نازک شکسته شده و موجب خوردگی غیریکنواخت و حفره‌ای می‌شود. به منظور استفاده از آلومینیوم به‌عنوان آند، لازم است عناصری به آلومینیوم اضافه شود که موجب شکسته شدن قشر نازک اکسید گردد. این عمل را اصطلاحاً «فعال‌سازی[3]» می‌گویند.

در سیستم حفاظت کاتدی سه گروه عمده آلیاژ آلومینیوم به‌عنوان آند استفاده می‌شود، که تمام آنها دارای مقادیر متفاوتی روی بوده و با عناصر قلع، جیوه و ایندیوم به‌عنوان عناصر فعال‌کننده[4] همراه می‌باشند.

سازندگان آند، در آلیاژهای خود از عناصر دیگری مانند سیلیسیم، بیسموت، منگنز، منیزیم و تیتانیوم نیز استفاده می‌کنند.

در آلیاژهای گروه آلومینیم – روی – قلع، عملیات حرارتی به‌منظور فعال‌سازی مؤثر، مورد نیاز است. برای کنترل کیفی مطمئن، علاوه بر آنالیزهای شیمیایی باید آزمایش‌های الکتروشیمیایی نیز انجام شود. اغلب به‌جای آلیاژهای آلومینیوم – روی – قلع، از آلیاژهای آلومینیوم – روی – جیوه و یا آلیاژهای آلومینیوم – روی – ایندیوم استفاده می‌شود، زیرا ظرفیت الکتروشیمیایی بالاتری دارند.

توجه : بعضی از عناصر آلیاژی مانند جیوه و ایندیوم سمی بوده و آزاد شدن آنها در محیط می‌تواند مضر باشد. بنابراین استفاده از آندهای حاوی جیوه و ایندیوم در مواردی‌که به آلودگی منجر می‌گردد، توصیه نمی‌شود.

کاربرد آندهای آلومینیومی، به آب دریا و گل بستر دریا منحصر می‌باشد و کاربرد انواع آلیاژهای آلومینیومی به شرایط محیطی بستگی دارد. به‌طور کلی، همه انواع آلیاژهای آلومینیومی برای دماهای بالا مناسب نیستند، مخصوصاً اگر انتقال حرارت وجود داشته باشد. بعضی از آلیاژهای آلومینیوم (به‌خصوص آلیاژ آلومینیوم حاوی روی و قلع) در دماهای پایین (۵ درجه سانتی‌گراد و کمتر) دچار خوردگی مرز دانه‌ای می‌گردد و به کندی فعال شده و ظرفیت آنها کاهش می‌یابد.

اگرچه تولید هیدروژن در اطراف آندهای از جنس آلیاژهای آلومینیوم بسیار کم[5] است، ولی باید توجه داشت که خطر انفجار ناشی از جرقه حاصل از ضربه آلیاژهای سبک با فولاد زنگ زده وجود دارد.

---

1 - Intergranular
2 - Self - Controlling
3 - Activation
4 - Activator
5 - Slight

۵-۵ سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان

۵-۵-۱ کلیات

در شکل (۱۰) یک سیستم متداول حفاظت کاتدی، با اعمال جریان برای خطوط لوله نشان داده شده است. مبانی طراحی آن در بند ۴-۳ بیان شده است. انتخاب نوع آند و طراحی منبع قدرت در بندهای ۵-۵-۲ تا ۵-۵-۶ مورد بحث قرار گرفته است.

۵-۵-۲ آندها و بسترهای زمینی[1] در سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان

۵-۵-۲-۱ جنس آند

مهم‌ترین مشخصه یک آند، رابطه بین میزان مصرف ماده آند و جریان عبوری است؛ برای مثال، در مورد آند فولادی به ازای مصرف هر کیلوگرم آند، ۰/۱۱ آمپر سال جریان لازم است. یعنی برای تأمین ۱ آمپر در سال، حدود ۹ کیلوگرم فولاد نیاز است. چدن در مقایسه با فولاد، عمر مؤثر طولانی‌تری دارد، زیرا گرافیت آزاد شده بعد از خورده شدن آهن، می‌تواند زمان عملکرد آند را نسبتاً افزایش دهد. مواد دیگری نیز وجود دارد که میزان مصرف نسبی آنها کمتر بوده ولی عموماً گران‌تر می‌باشد. اهمیت نسبی هزینه و میزان خوردگی باتوجه به شرایط تغییر می‌کند. مثلاً اگر مقاومت الکترولیت زیاد باشد، به تأسیسات آندی گسترده نیاز می‌باشد، در این‌صورت از مواد ارزان‌تر استفاده می‌گردد تا مصرف بیشتر آن از نظر هزینه، مشکل‌آفرین نباشد. در الکترولیت‌های با مقاومت کم، مانند آب دریا، آندهایی به‌کار می‌رود که می‌تواند با چگالی جریان بیشتر کار کند، در این صورت، آند زیادی مورد نیاز نیست و در این مواقع، استفاده از آندهای‌کم حجم[2] مقرون به صرفه است.

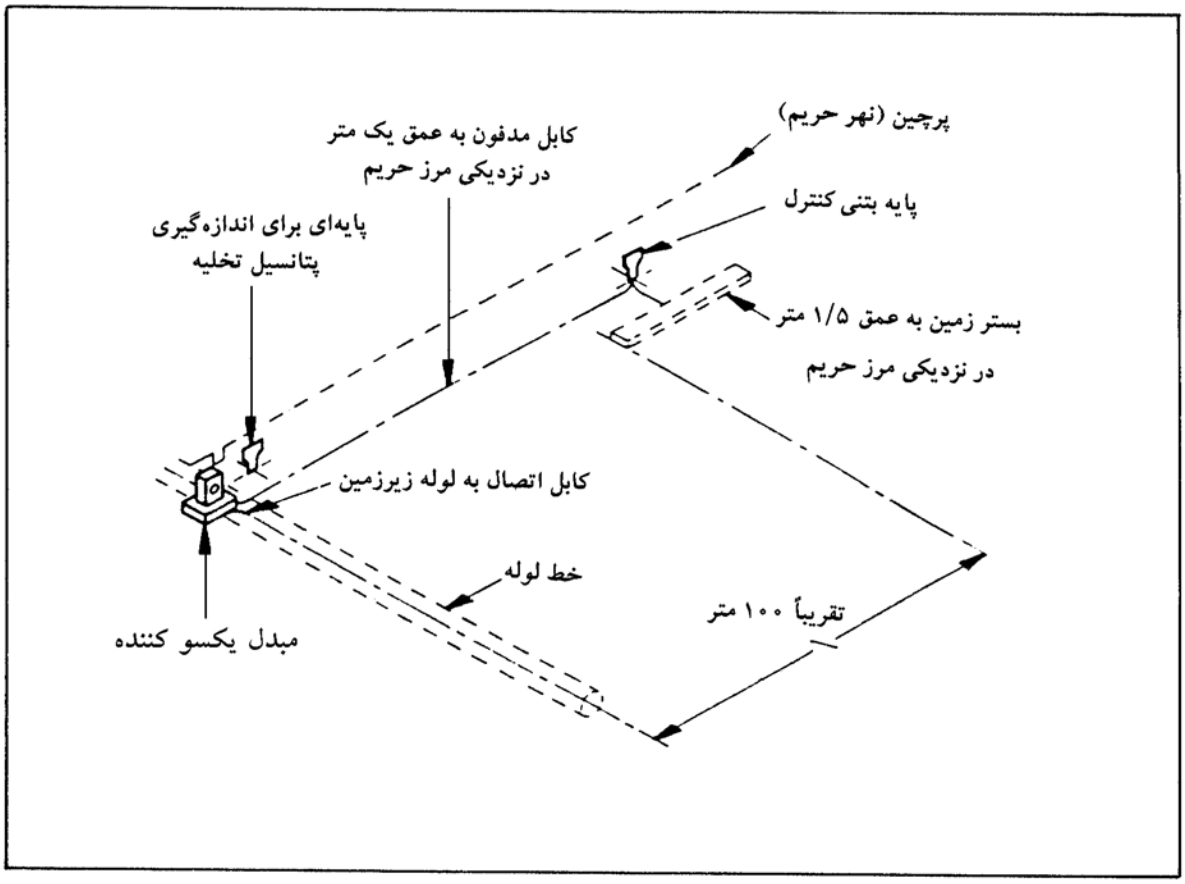
در چنین مواردی، کم حجم بودن این مزیت را دارد که تداخل با جریان آب را به حداقل می‌رساند. در این موارد، مقاومت مکانیکی جنس آند و مقاومت آنها در مقابل سایش[3] توسط مواد معلق جامد نیز مهم است.

در چگالی جریان‌های ۲/۵ تا ۱۰ آمپر بر متر مربع، از گرافیت، به‌عنوان آند استفاده می‌شود. معمولاً گرافیت را با موم[4] یا رزین‌های صنعتی دیگر آغشته می‌کنند تا منافذ آن پر شود؛ در این‌صورت میزان مصرف آن بسیار کمتر از آهن و فولاد می‌باشد. کلر حاصل از الکترولیز در آب‌های شور، آندهای گرافیتی را مورد تهاجم قرار می‌دهد.

آلیاژهای آهنی دیگری نیز وجود دارد که اگر چگالی جریان سطحی بالا نباشد، میزان مصرف آنها کمتر از فولاد است. در این موارد، یک قشر اکسید ناشی از خوردگی تشکیل می‌شود که هادی جریان می‌باشد. مثلاً آندهای چدنی پر سیلیس را در چگالی جریان‌های حدود ۵ تا ۵۰ آمپر بر متر مربع می‌توان مورد استفاده قرار داد. میزان مصرف این‌آندها بسته به شکل و شرایط، در حدود ۰/۲ تا ۱ کیلوگرم بر آمپرسال می‌باشد. این آندها برای شرایط مدفون و مستغرق مناسب است.

---

1 - Groundbeds
2 - Compact
3 - Abrasion
4 - Wax



شکل ۱۰- طرح تیپ از یک سیستم حفاظت کاتدی خطوط لوله مدفون با استفاده از سیستم با اعمال جریان

در آب دریا، آندهای حاوی ۴/۵ درصد کرم کاربرد دارد[1] و آلیاژهای حاوی ۳ درصد مولیبدنیوم نتایج رضایت‌بخشی در بردارد. مانیتیت (Fe_3O_4) که ماده معدنی طبیعی است، با تمهیدات خاصی به‌عنوان آند در سیستم‌های حفاظت کاتدی استفاده می‌شود. معمولاً این آندها، به‌صورت استوانه‌های توخالی تهیه و عرضه می‌شود. این استوانه دارای پوشش فلزی داخلی است که کابلی به آن متصل و آب‌بندی[2] شده است. آندهای از جنس مانیتیت دارای میزان مصرف بسیار کم (حدود ۵ گرم به ازای هر آمپر سال) می‌باشد. از این آندها، می‌توان در خاک‌ها، آب‌های شیرین و آب دریا استفاده نمود. البته آندهای با استفاده از این ماده، شکننده بوده و در حمل و نقل نیاز به مراقبت بیشتری دارد.

در کاربرد آندهای فوق‌الذکر به‌صورت مدفون، اطراف آندها را با مواد کربنی پر می‌کنند. این عمل موجب کاهش مقاومت الکتریکی بین آند و خاک (زمین) می‌گردد، که در نتیجه مصرف اولیه آند نیز کاهش می‌یابد. پرکننده‌های کربنی معمولاً از انواع کک، شامل ذغال سنگی و نفتی، و دانه‌های گرافیتی تهیه می‌شود که باید حاوی حداقل ۹۵ درصد کربن باشد. از این مواد،

1 - BS 1591
2 - Sealed

به‌صورت متراکم در اطراف آند استفاده می‌گردد که با کاهش مقاومت الکتریکی بین آند و خاک، میزان مصرف آند کاهش یافته و محصولات گازی به راحتی آزاد می‌گردد.

در آب دریا، از آلیاژهای مختلف سربی استفاده می‌شود، اما کاربرد این آلیاژها در محیط‌هایی که به تشکیل رسوب منجر می‌شود، مناسب نمی‌باشد. در این نوع آند، یک لایه اکسید سرب روی سطح آن تشکیل می‌شود. این لایه هادی بوده و به سرعت تخریب نمی‌شود. برای مثال، آلیاژ سرب با قلع و نقره می‌تواند در چگالی جریان تا ۳۰۰ آمپر بر متر مربع به‌کار رود. آند نوع دیگر آلیاژ سرب حاوی نقره و تلوریوم است. عمق زیاد آب و آب‌های حاوی اکسیژن کم، در بازدهی این نوع آندها تأثیر منفی دارند.

سیم‌های نازک پلاتین را می‌توان در سطح آلیاژ سرب جاگذاری کرد تا یک الکترود دوگانه ایجاد شود؛ که می‌تواند در تشکیل لایه اولیه دی اکسید سرب کمک کند. این مکانیزم در چگالی جریان بیشتر از ۲۵۰ آمپر بر مترمربع تا چگالی جریان ۲۰۰۰ آمپر بر مترمربع کار می‌کند. آلیاژهای دیگری نیز از سرب وجود دارند که در شرایط دیگر بهره‌برداری‌کار می‌کنند.

پلاتین و آلیاژهای آن مانند آلیاژ پلاتین – ایریدیوم، به‌علت گرانی، کمتر به‌صورت آند به‌کار می‌روند و فقط در شرایط خاص به‌عنوان آند کاربرد دارند. معمولاً این آلیاژ روی پایه‌های تیتانیوم، نیوبیوم و تانتالوم به‌صورت قشر نازکی به‌ضخامت ۰/۰۰۲۵ میلی‌متر قرار می‌گیرند.

دلیل استفاده از این فلزات به عنوان فلز پایه، آنست که در شرایط آندی، قشر محافظی از اکسید چسبنده، خنثی و غیرهادی روی آنها تشکیل می‌شود. این قشر، فلز را در نقاطی که روکش پلاتینیوم دارای منفذ یا ترک باشد، در مقابل خوردگی محافظت می‌کند. کاربرد پلاتین یا آلیاژهای پلاتین، محدود به نقاطی است که انتقال جریان از آن نقاط ضروری می‌باشد.

آندهایی که با این مواد ساخته می‌شوند، می‌توانند در چگالی جریان‌های تا ۱۰۰۰ آمپر بر متر مربع (در سطوح پلاتینی شده) به‌طور رضایت‌بخشی عمل نمایند. البته در اغلب طراحی‌ها، به علت محدودیت ولتاژ بهره‌برداری، چگالی جریان‌های کمتری در نظر گرفته می‌شود. در الکترولیت‌های حاوی کلرور (Cl^-) در صورتی که ولتاژ از ۸ ولت تجاوز کند، قشر اکسید تیتانیوم ممکن است شکسته شود ولی در مورد نیوبیوم و تانتالوم تا ۴۰ ولت مجاز می‌باشد. استفاده از ولتاژهای بالا، زمانی مجاز است که یا آندها دارای روکش کامل پلاتینی بوده یا محیط الکترولیت بدون املاح کلرور باشد. عمر روکش پلاتینی آند در سیستم‌های حفاظت کاتدی به بزرگی و فرکانس تغییرات موجی منبع برق یک‌سو بستگی دارد.

از جریان‌های با تواتر موجک[1] کمتر از ۱۰۰ هرتز باید اجتناب گردد، بنابراین پتانسیل بین الکترولیت و آند باید به‌شکل مناسبی محدود گردد. سیستم یک‌سوسازی تمام موج بر سیستم یک‌سوسازی نیم‌موج برتری دارد و عمر لایه پوشش پلاتین آند، همچنین به مقاومت الکتریکی الکترولیت بستگی داشته و با افزایش مقاومت، میزان مصرف افزایش می‌یابد.

در طرح‌های جدید، از مخلوطی از اکسید فلزات کمیاب مانند روتنیوم و ایریدیوم همراه با اکسیدهای دیگر بر روی پایه تیتانیوم استفاده می‌گردد. این آندها دارای خاصیت مشابه با آندهای پلاتینی بوده و معمولاً در مقابل تغییر جهت جریان مقاوم هستند. ماده دیگری که در این مورد استفاده می‌شود، عبارت است از یک نوع پلیمر هادی که به‌صورت غلافی روی یک سیم مسی روکش شده است.

---

1 - Ripple Frequency

در جدول (۴) مشخصه‌های مواد اصلی آند به‌طور خلاصه گفته شده است. این جدول، براساس بها و میزان مصرف آندها طبقه‌بندی شده و فقط به‌عنوان مثال بیان گردیده است.

۵-۵-۲-۲ طرح و نصب آند و بسترهای زمین

آندهای به‌کار رفته به صورت مدفون یا مستغرق، باید دارای وزن (جرم) کافی برای دوام چندین ساله باشند. آندها و اتصالات متشکله آنها نیز باید طوری طراحی شوند که قبل از آنکه پیوستگی آند قطع شود تقریباً تمام مواد آند مصرف گردد؛ یعنی دارای ضریب بازدهی بالا باشند (به بند ۵-۴-۲ مراجعه شود).

اغلب، فراهم آوردن مقاومت کم بین زمین و آند با نصب فقط یک آند به‌طوری‌که آند به آسانی قابل حمل باشد، میسر نمی‌شود. در این حالت، از نصب چند آند و اتصال آنها به یکدیگر به‌صورت موازی استفاده می‌شود. به این مجموعه، «بستر آندی» یا «بستر زمینی» می‌گویند.

آندهای مستغرق باید به اندازه کافی محکم باشند تا در مقابل تنش‌های ناشی از جریان مایع مقاومت کنند. آندهایی که در داخل خط لوله یا مکان‌های مشابه نصب می‌شوند، نباید موجب افزایش بیش از اندازه مقاومت در مقابل جریان مایع شوند. باید در طرح و نحوه نصب آندها دقت شود که ارتعاش آنها به حداقل رسیده و امکان گسیختگی ناشی از خستگی به حداقل برسد.

یکپارچگی پوشش عایق کابل‌های ارتباطی تا محل آند بسیار ضروری است، زیرا فلزها در معرض خاک و آب (الکترولیت) به سرعت خورده می‌شوند.

محل آندها یا بسترهای آندی نسبت به سازه مورد حفاظت باید به‌دقت برای همه حالت‌ها مورد مطالعه قرار گیرد، زیرا اگر فاصله خیلی کم باشد، ممکن است باعث پدیده حفاظت اضافی[1] موضعی گردد که در نتیجه، به پوشش‌ها و رنگ‌ها صدمه وارد می‌گردد و توزیع جریان حفاظتی ضعیف خواهد بود؛ از طرف دیگر اگر فاصله زیاد انتخاب گردد، موجب افزایش طول کابل‌ها و هزینه برق خواهد بود.

گاز حاصل از واکنش‌های آندی، معمولاً اکسیژن است، اما در الکترولیت‌های حاوی کلرور (محلول‌های کلروردار) در محل آندهای مصرف شده، گاز کلر تولید می‌شود. باید جنس موادی که برای نصب آندها و عایق کابل‌ها انتخاب می‌گردد در مقابل کلر مقاوم باشد. تولید کلر ممکن است موجب مزاحمت شده و در محل‌های سربسته باعث خطر گردد، بنابراین باید برای تهویه طبیعی وسایلی فراهم نمود.

۵-۵-۳ منابع تأمین برق

معمولاً منبع تأمین برق در حفاظت کاتدی عبارت است از یک مجموعه مبدل یک‌سوکننده[2] که به خط برق‌رسانی متصل است. اگر خطوط برق‌رسانی در محل وجود نداشته باشد، می‌توان از مولدهای دیگر مانند مولدهای دیزلی، خورشیدی، بادی، ترموپیل و توربینی با توجه به جنبه‌های عملی و اقتصادی استفاده کرد.

---

1 - Overprotection
2 - Transformer/ Rectifier

۵-۵-۴ دستگاه‌های مبدل یک‌سوکننده

دستگاه‌های مبدل یک‌سوکننده باید توسط هوا یا روغن خنک شوند، و دارای قدرت مشخصه‌ای برای کار دائم در یک مجموعه بوده و برای شرایط کاری مورد نظر مناسب باشند. این واحد باید در یک محفظه یا جعبه محکم سوار شده تا بتوان آنرا روی تیر برق، دیوار یا کف اطاق (بر حسب مورد) نصب نمود. این محفظه باید دارای در مجهز به قفل به سمت جلو بوده و در مقابل شرایط محیطی کار مطابق با استانداردهای معتبر[1] محافظت شده باشد. برای استفاده از این دستگاه در محیط‌های خطرناک، به اخذ تأییدیه مناسب نیاز می‌باشد.

کابل برق متناوب ورودی به دستگاه باید به کلیدفیوز و یا کلید مینیاتوری مجهز باشد (مطابق استانداردهای معتبر[2] و سفارش سازندگان).

مبدل مورد استفاده باید دارای سیم‌پیچی دوبل، مطابق استانداردهای معتبر[3] بوده و برای خروجی یکنواخت[4] طراحی شده و برای اتصال به خط برق‌رسانی مناسب باشد.

دستگاه مبدل باید به اتصال زمین[5] بین سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه مجهز باشد. دستگاه یک‌سوکننده برای یک‌سوسازی موج کامل، باید دارای اتصال پل یک‌سوکننده بوده و در حداکثر شدت جریان و تمام دامنه ولتاژها باید جریان یک‌سوی خروجی یکنواخت داشته و دارای دستگاه‌های حفاظت در مقابل جریان‌های ناشی از ازدیاد ناگهانی[6] ولتاژ باشد. در دستگاه‌های استاندارد با ولتاژ ثابت، باید امکانات تنظیم زیر بار در آن تأمین گردد. این امکانات عبارتند از انشعابات دارای کلید[7] روی مبدل، مبدل اتوماتیک در طرف ثانویه مبدل اصلی و یا وسایل الکترونیکی کنترل ولتاژ. دستگاه‌های تنظیم‌کننده باید قدرت تنظیم ولتاژ d.c را به میزان ۵ تا ۱۰۰ درصد ولتاژ اسمی داشته باشند. دستگاه‌ها باید به کنترل اتوماتیک مطابق بند ۵-۵-۵ مجهز باشند.

۵-۵-۵ تجهیزات کنترل

لازم است جریان حفاظتی قابل تنظیم باشد، به‌طوری‌که بتوان پتانسیل حفاظتی مناسب را برقرار نموده و آنرا ثابت نگهداشت. اگر شرایط کاری به‌طور معقولی پایدار باشد، مانند بیشتر سازه‌های مدفون، می‌توان با کارگذاشتن یک مقاومت متغیر در مدار هر آند، خروجی یک‌سوکننده را تنظیم نمود. اگر از یک یک‌سوکننده، چند کاتد تغذیه شده باشد، می‌توان در مسیر هر کدام از این کاتدها از مقاومت متغیر مجزا استفاده کرد. پتانسیل بین الکترولیت و سازه به‌طور دوره‌ای اندازه‌گیری شده و درصورت لزوم تنظیم می‌شود.

وسایل لازم برای اندازه‌گیری، کنترل دائمی و بهره‌برداری صحیح، اندازه‌گیری پتانسیل بین الکترولیت و سازه عبارتست از ولت‌متر برای نشان دادن ولتاژ برق یک‌سوی خروجی و آمپرمتر برای نشان دادن جریان کل خروجی و جریان هر مدار آند یا کاتد، اگر سیستم دارای چند مدار و الکترود مرجع باشد.

---

1 - BS 5426
2 - BS 4293
3 - BS 171
4 - Continuously Rated
5 - Earth Screen
6 - Surge
7 - Switched Tappings

جدول ۴- مشخصه‌های مواد اصلی آند

جنس	چگالی	حداکثر چگالی جریان بهره‌برداری	مقدار مصرف	حداکثر ولتاژ بهره‌برداری	ضریب بازدهی	ملاحظات
	سانتی‌مترمکعب/گرم	مترمربع/ آمپر	آمپر سال/ جرم	V	٪	
فولاد	۷/۸۵	۵	۹kg	۵۰	۳۰ تا ۵۰	کاربرد همراه با پشت‌کوب کربن
گرافیت آغشته	۱/۱	۱۰	۰/۵Kg	۵۰	۵۰	
چدن پرسیلیس	۷	۵۰	۰/۲kg تا ۱ kg	۵۰	۵۰ تا ۹۰	در محیط‌های حاوی کلرور، مقدار مصرف افزایش می‌یابد مگر آنکه مقدار کرومیوم یا مولیبدنیوم به آن اضافه گردد.
پشت‌کوب کربن	۰/۷ تا ۱/۱	۵	۱Kg تا ۲ kg	۵۰	۵۰	فقط به همراه مواد آندی دیگر استفاده شود.
مانیتیت (Fe_3O_4)	۵/۸	۱۰۰	<۵g	۵۰	۶۰	
آلیاژهای سرب	۱۱/۳	۳۰۰	۲۵g	۲۵	۸۰	
پلاتین[1] بر روی‌تیتانیوم، نیوبیوم یا تانتالیوم[2]	۲۱/۵	۱۰۰۰	۱۰mg	۸[1] ۴۰[2]	۹۰	در مقابل تغییر جهت جریان‌ها مقاوم نیستند. چگالی جریان بهره‌برداری در شرایط آزاد شدن اکسیژن نباید از ۲۰۰ آمپر بر متر مربع تجاوز نماید میزان فرسایش آندهای پلاتینی شده (پلاتینیوم - ایریدیوم) با کاهش میزان کلرور افزایش می‌یابد.

۱- پلاتینیوم روی تیتانیوم
۲- پلاتینیوم روی نیوبیوم و پلاتینیوم روی تانتالیوم

در مواردی که شرایط به‌طور مکرر تغییر می‌نماید مانند :

- تغییر شوری آب دریا در خورها،
- تغییر میزان بده جریان مایع در تأسیسات، و
- تغییر سرعت کشتی.

اگر امکان نظارت لازم در اختیار باشد، کنترل دستی قابل توجیه است، ولی غالباً کنترل اتوماتیک در روش‌های زیر ترجیح داده می‌شود:

- مواردی که جنبه اقتصادی مد نظر می‌باشد؛ زیرا می‌توان میزان پتانسیل حفاظتی را در حداقل ممکن نگهداشت.
- در مورد سازه‌های پوشش شده که شرایط به‌طور قابل توجهی متغیر بوده و اغلب نیاز به تنظیم دارد، لازم است پتانسیل حفاظت را بین حداقل پتانسیل مورد نیاز حفاظت و حداکثر پتانسیلی که موجب تخریب پوشش می‌شود، نگهداری نمود.

برای نصب دائمی در آب دریا، مناسب‌ترین الکترود مرجع، الکترودی است که قسمت فلزی آن در تماس مستقیم با آب دریا باشد، مانند الکترودهای نقره – کلرور نقره یا الکترودهای روی. ممکن است، در خورها[1] لازم باشد تأثیر شوری آب دریا بر پتانسیل اندازه‌گیری شده نیز به حساب آورده شود. معمولاً برای کنترل جریان خروجی یک آند از یک الکترود مرجع استفاده می‌شود که موقعیت قرار گرفتن آن اهمیت زیادی دارد. در مورد سازه‌های بدون پوشش، بهتر است الکترود مرجع دورتر از آندها و در محلی که تأثیر حفاظت کاتدی حداقل است قرار داده شود. بدین‌ترتیب، از ایجاد پتانسیل منفی حفاظتی بین الکترولیت و سازه به میزان کافی اطمینان حاصل خواهد شد. در مورد سطوح فلزی پوشش شده یا رنگ شده، باید دقت کرد که پتانسیل حفاظتی بین فلز و الکترولیت به میزان زیاد منفی نشود، زیرا چسبندگی یا اتصال پوشش با سطوح فلزات آسیب می‌بیند. بنابراین توصیه می‌شود، الکترودها در فواصل کمتری نسبت به سازه قرار داده شود. با نصب موقت تجهیزات، آزمایش‌هایی باید انجام شود تا از شرایط قابل قبول در تمام شرایط بهره‌برداری اطمینان به‌دست آید. در این آزمایش‌ها، می‌توان پتانسیل حفاظتی مناسبی بین فلز و الکترولیت به‌دست آورد.

شرح مفصل سیستم‌های کنترل اتوماتیک، خارج از دامنه کار این استاندارد می‌باشد؛ در این مورد دو روش عمده زیر اشاره می‌شود :

الف – کنترل دو وضعیتی

اگر تغییرات عمده‌ای بین دو تراز مشخص از جریان الکتریکی مورد نیاز اتفاق بیفتد، (مثلاً به علت تغییر از حالت سکون به متحرک)، در این صورت فقط دو وضعیت تنظیم جریان الکتریکی لازم می‌باشد. با به‌کار گرفتن یک سوییچ اتوماتیک برای انتقال از یک حالت به حالت دیگر، به‌طور مثال می‌توان با اتصال به یک شیر کنترل‌کننده جریان آب انجام داد. برای تنظیم اولیه هر دو وضعیت دلخواه تمهیداتی لازم است و در صورت لزوم، به صورت دوره‌ای، تنظیم مجدد انجام می‌گیرد.

1 - Estuaries

ب - کنترل تمام خودکار[1]

سیستم‌های تغذیه خودکار در انواع مختلفی وجود دارد. برای مثال راکتورهای قابل اشباع، تریستورها و ترانزیستورها. این دستگاه‌ها جریان‌های خروجی را براساس پتانسیل بین فلز و الکترولیت تا مقدار تنظیم شده تغییر می‌دهند. همان‌طورکه در بالا گفته شد، وضعیت تنظیم شده به موقعیت الکترودها بستگی دارد. برای استفاده در سازه‌های با شکل هندسی پیچیده، دستگاه‌هایی ساخته شده که هشدارهایی از چند الکترود مرجع را دریافت نموده و هشدارهایی‌که خارج از دامنه کاری الکترود سالم باشند را حذف می‌نماید و جریان خروجی را در کمترین مقادیر منفی تنظیم می‌کند.

از یک واحد کنترل می‌توان چند آند را تغذیه کرد، حتی اگر در قسمت‌های مختلف تأسیسات نصب شده باشند. این نوع آرایش تا زمانی که شرایط عملیاتی در قسمت‌های مختلف تأسیسات مشابه یکدیگر باشد مطلوب است. در روش دیگر می‌توان در هر مدار آندی از یک واحد کنترل مستقل مجهز به الکترود مرجعی که در محل مناسبی نصب شده استفاده کرد.

۵-۵-۶ تأمین برق واحدهای مبدل یک‌سوکننده

در مناطق روستایی، معمولاً واحدهای مبدل یک‌سوکننده، از طریق خط انتقال برق منطقه‌ای تغذیه می‌شود. در طراحی بستر آندی و برنامه‌های توسعه آتی باید دقت نمود تا سیم‌های حایل تیرهای برق، در محدوده بسترهای آندی قرار نگیرد.

اگر برای تغذیه واحدهای مبدل یک‌سوکننده از کابل زیرزمینی استفاده گردد، باید توجه داشت که کابل‌های با حفاظ فلزی در تماس با خاک، موجب افزایش تداخل با شبکه کابل زیرزمینی نگردند. در این موارد توصیه می‌شود از کابل‌های با حفاظ غیر فلزی عایق مقاوم در مقابل خوردگی مانند PVC (پلی‌وینیل‌کلرید) و PE (پلی‌اتیلن) استفاده گردد تا تداخل جریان را کاهش دهد.

اتصال زمین تأسیسات برقی، جزء مسئولیت‌های مصرف کننده است ولی معمولاً سازمان‌های برق نیز اگر از آنها خواسته شود و امکانات لازم را دارا باشند، در نقطه تأمین برق یک اتصال زمین نیز در اختیار می‌گذارند. به هر حال اگر قسمت‌های فلزی دستگاه مبدل یک‌سوکننده به این اتصال زمین وصل شود، باید تدابیری اندیشید تا امکان اتصال فلزی بین سیستم اتصال زمین و بستر آندی تأسیسات حفاظت کاتدی (حتی به مدت کوتاه) وجود نداشته باشد.

در برخی کشورها، سازمان‌های برق می‌توانند اتصال زمین مناسب برای انواع سیستم‌های تغذیه برق را که در آیین‌نامه‌های معتبر بیان شده تأمین نمایند. بنابراین اهمیت دارد که از سازمان برق مربوط در مورد نوع سیستم تأمین برق و نیازهای اتصال زمین سؤال شود تا ایزولاسیون و حفاظت در مقابل عیوب احتمالی اتصال زمین همراه با الکترودهای اتصال در صورت نیاز و مطابق دستورالعمل‌های مربوط توسط مشترک تهیه و تأمین گردد.

برای جداسازی دستگاه مبدل یک‌سوکننده از منبع تغذیه، باید تمهیداتی فراهم گردد.

---

1 - Automatic

۵-۶ مقایسه سیستم‌های مختلف حفاظت کاتدی

مزایا و معایب روش حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده و روش حفاظت کاتدی با اعمال جریان در جدول (۵) درج شده است. روش دیگری با عنوان تخلیه الکتریکی وجود دارد که در بند ۶-۵ شرح داده می‌شود. این روش، فقط در مورد سازه‌هایی که تحت تأثیر جریان‌های سرگردان می‌باشند، قابل اجرا بوده و ممکن است در شرایط مناسب، مزایایی در برداشته باشد.

جدول ۵- مقایسه سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده و سیستم با اعمال جریان

سیستم آندهای فدا شونده	سیستم با اعمال جریان
۱- نیاز به منبع جریان برق ندارد.	۱- به برق شبکه یا منبع دیگر تولید برق نیاز دارد.
۲- کاربرد این سیستم عموماً منحصر به حفاظت سازه‌های پوشش شده یا تأمین حفاظت‌های موضعی است، زیرا در این سیستم به‌طور اقتصادی جریان‌های محدود در دسترس است.	۲- در مورد انواع گوناگون سازه‌ها قابل استفاده می‌باشد، در صورت لزوم شامل سازه‌های بزرگ و سازه‌های بدون پوشش می‌شود.
۳- کاربرد این سیستم به‌جز در خاک‌ها یا آب‌های با مقاومت پایین، ممکن است عملی نباشد.	۳- مقاومت خاک یا آب در کاربرد این سیستم محدودیت کمتری ایجاد می‌کند.
۴- نصب این سیستم نسبتاً ساده بوده و توسعه و افزایش آن تا حصول نتیجه موردنظر، قابل‌اجرا است.	۴- نیاز به طراحی دقیقی دارد. ولی راحتی تنظیم خروجی سیستم اجازه می‌دهد که برای شرایط متغیر و غیرقابل پیش‌بینی، تدارک لازم دیده شود.
۵- بازرسی، مستلزم اندازه‌گیری در هر آند یا بین دو آند مجاور است که به وسیله دستگاه قابل حمل صورت می‌گیرد.	۵- به بازرسی ادواری در چندین نقطه نیاز دارد. در روش کنترل غیردستی ابزار دقیق اندازه‌گیری در نقاط تغذیه جریان به شکلی که قابل دسترسی باشد، نصب می‌گردد.
۶- در نقاط بسیار زیادی، ممکن است به نصب آند نیاز باشد. عمر مفید آنها به شرایط محیطی بستگی دارد، به‌طوری‌که تعویض آندها در قسمت‌های مختلف سیستم در فواصل زمانی مختلف لازم می‌باشد.	۶- عموماً نیازمند تعداد آند کمتری می‌باشد.
۷- از آنجایی که جریان سیستم در هر نقطه پایین است، بنابراین روی تأسیسات مجاور تأثیر ضعیفی دارد.	۷- آثار این سیستم حفاظت کاتدی باید روی سازه‌هایی که در نزدیکی بسترهای آندی قرار دارند، مورد بررسی قرار گیرد تا واکنش‌های متقابل قابل تشخیص شده و امکان تصحیح آنها فراهم گردد.

سیستم آندهای فدا شونده	سیستم با اعمال جریان
۸- جریان حاصله از آندها قابل کنترل نمی‌باشد، ولی تمایل به خود تنظیمی جریان حاصله وجود دارد. وقتی شرایط طوری تغییر کند که فلز موردحفاظت، کمتر منفی شود، در این صورت e.m.f[1] محرک و در نتیجه جریان افزایش می‌یابد. با انتخاب مواد مناسب می‌توان مطمئن شد که فلز به پتانسیل منفی لازم برای آسیب‌رساندن به رنگ نرسد.	۸- این سیستم، به کنترل نسبتاً ساده خودکار نیاز دارد تا بتواند پتانسیل‌ها را در محدوده نزدیکی علی‌رغم دامنه وسیع تغییرات نگهدارد، چون e.m.f. مورد استفاده در این سیستم، معمولاً بیشتر از e.m.f. مورد مصرف آندهای فدا شونده می‌باشد. بنابراین تأثیرات محتمل کنترل‌های ناموثر و یا تنظیم‌های ناصحیح روی رنگ‌ها و پوشش‌ها بیشتر است.
۹- به علت بزرگی حجم آندها، محدودیت‌هایی در جریان آب به وجود می‌آید که ممکن است یا موجب ایجاد جریان‌های اغتشاشی یا باعث موانعی در گردش جریان گردد. در مورد بدنه کشتی‌ها نیروی پسا[1] نیز به‌وجود می‌آورد.	۹- به علت امکان استفاده از مواد مناسب می‌توان از آندهای متراکم‌تری استفاده نمود، بدین ترتیب نیروی پسا قابل اغماض می‌باشد.
۱۰- آندها را می‌توان با اتصالات پیچی یا جوش روی سطوح مورد حفاظت نصب نمود، بنابراین نیازی به سوراخ کردن دستگاه‌ها و بدنه کشتی‌ها ندارد.	۱۰- به منظور نصب اتصالات عایق، در تمام موارد روی بدنه کشتی‌ها و دستگاه‌ها و غیره باید سوراخ‌هایی را ایجاد نمود.
۱۱- اتصالات آندها نیز تحت حفاظت کاتدی قرار می‌گیرند.	۱۱- عایقکاری اتصالات به قسمت مثبت یک‌سوکننده که در تماس با خاک یا آب قرار دارد باید با دقت و اطمینان کامل صورت گیرد، چون در غیر این صورت اتصالات شدیداً خورده می‌شوند.
۱۲- امکان اتصال اشتباه وجود ندارد که موجب برعکس شدن پلاریته شود.	۱۲- لازم است پلاریته در هنگام راه‌اندازی سیستم به دقت بررسی شود زیرا اتصالات اشتباه، موجب برعکس شدن پلاریته و تشدید خوردگی می‌شود.
نیروی محرکه برقی	1- Electro Motive Force

۵-۷ ملاحظات ویژه

۵-۷-۱ آثار ثانویه حفاظت کاتدی

اعمال و اجرای حفاظت کاتدی ممکن است به بروز آثار ثانویه مانند ایجاد قلیاییت یا تولید هیدروژن در سطوح حفاظت شده منجر گردد که آثار حاصله به قرار زیر می‌باشد:

الف- قلیاییت حاصله ممکن است به‌علت پدیده صابونی شدن موجب تخریب بعضی رنگ‌ها شود. این اثر را با اجتناب از اعمال پتانسیل‌های خیلی منفی و با استفاده از رنگ‌هایی که حساسیت کمتری دارند می‌توان به‌حداقل ممکن کاهش داد.

---

1 - Drag مقاومت در مقابل حرکت یک جسم در داخل یک سیال

ب – در محیط‌های آب دریا یا محلول‌های مشابه، قلیاییت، موجب ایجاد رسوب سفید آهکی می‌شود، که نتایج مفیدی در بردارد، زیرا سبب کاهش چگالی جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی می‌گردد. به‌هرحال، اگر میزان این رسوبات از حدی تجاوز کند، از عبور آب جلوگیری نموده و یا مانع حرکت قطعات متحرک خواهد شد.

ج– آلومینیوم در محیط‌های قلیایی خورده می‌شود، بنابراین اعمال حفاظت کاتدی برای آن، فقط در شرایطی که پتانسیل در حدود معینی تنظیم شود، صورت می‌گیرد (به ۴-۳-۲-۴ رجوع شود).

د– سرب، به‌طور استثنا موقعی که در محیط قلیایی حفاظت کاتدی شود ممکن است خورده شود (مانند کابل‌ها در داخل لوله‌هایی از جنس آزبست – سیمان).

هـ– هیدروژن تولید شده در پتانسیل‌های خیلی منفی، ممکن است در فضای بسته سبب انفجار گردد.

و – در فولادهای تحت کشش بالا یا فولادهای ضد زنگ، تردی هیدروژنی از خطرات احتمالی می‌باشد.

ز – پوشش‌ها ممکن است در نتیجه حفاظت کاتدی از سطح فلز جدا شوند.

ح – در مراحل اولیه بهره‌برداری حفاظت کاتدی، گاهی لایه‌های زنگ و رسوبات حاصله از سطح فلز، کنده شده و موجب انسداد لوله‌ها و مانع عبور آب شده یا به صورت کوتاه‌مدت مشکلات دیگری را به وجود می‌آورد. هنگامی که آهن و فولاد شدیداً خورده شده‌اند، زنگ‌هایی که منافذ را پر و مسدود کرده‌اند کنار رفته و ممکن است موجب بروز نشتی در مراحل اولیه بهره‌برداری حفاظت کاتدی گردد.

ط– در سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان، اگر الکترولیت حاوی ترکیبات کلرور (Cl^-) باشد، ممکن است در سطوح آندها، گاز کلر به‌وجود آید که در این صورت موجب ایجاد مشکلات یا خسارت‌های جانبی دیگری می‌گردد.

۵-۷-۲ تأثیر جریان‌های سرگردان ناشی از سیستم حفاظت کاتدی

در شرایطی که سازه حفاظت‌شده‌ای یا آندها و بسترهای آندی در مجاورت دیگر سازه‌های فلزی مدفون یا مستغرق که کاملاً نسبت به زمین عایق نشده است، قرار گرفته باشد، ممکن است در برخی نقاط، سازه حفاظت نشده قسمتی از جریان‌های حفاظتی را به علت گرادیان‌های پتانسیل موجود در خاک یا آب، جذب خود نموده و سپس در نقاطی دیگر جریان را به زمین تخلیه نماید. در این‌صورت، سازه حفاظت نشده در نقاط تخلیه خورده می‌شود.

۵-۷-۳ اجتناب از صدمات ناشی از ولتاژهای اضافی

۵-۷-۳-۱ کلیات

ولتاژهای اضافی ناشی از نقایص و خطاهای منابع تغذیه الکتریکی یا صاعقه، ممکن است صدمات شدیدی به وسایل و دستگاه‌های مربوط به حفاظت کاتدی وارد سازد. در صورتی که سازه مورد حفاظت کاتدی، حاوی مواد و ترکیباتی با نقطه

اشتعال پایین بوده و اتصالات جداکننده[1] در سازه‌ها نصب شده باشد، خطر اشتعال و انفجار وجود دارد. در این مورد، لازم است پیشنهادها و توصیه‌های زیر همراه با سایر آیین‌نامه‌های کاربردی، مقررات و نتایج تجربیات مد نظر قرار گیرد.

۵-۷-۳-۲ آسیب‌های ناشی از ولتاژ اضافی بر تأسیسات حفاظت کاتدی

بستر آندی (زمین) سیستم حفاظت کاتدی، به دلیل عوامل مؤثر در طراحی آن، معمولاً نسبت به زمین مقاومت پایین‌تری در مقایسه با سیستم اتصال زمین (ارت) دارد. بستر زمینی، هم‌چنین از نظر الکتریکی از سیستم حفاظتی اتصال زمین مجزا می‌باشد (مراجعه شود به ۴-۶-۶). در نتیجه ممکن است دستگاه‌ها و وسایل مربوط، در معرض ولتاژ اضافی یا جریان‌های بیش از حد قرار گیرند؛ این جریان‌ها که به علت نواقص و معایب موجود در وسایل تأمین‌کننده برق یا صاعقه ایجاد می‌شود، به شرح زیر می‌باشد:

الف- معایب تجهیزات تأمین‌کننده برق ناشی از اتصال زمین دستگاه‌ها (ارت):

در مناطق با مقاومت‌های بالا که به‌دست آوردن اتصال زمین مناسب مشکل است، اغلب از یک سیستم اتصال زمین استفاده می‌شود. این سیستم، شامل اتصال زمین واحدها به یکدیگر و یا اتصال همه ترمینال‌های نول به یکدیگر می‌باشد، به‌طوری که همه آنها در یک پتانسیل باشند، اگرچه این پتانسیل ممکن است به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از پتانسیل حقیقی زمین باشد.

توجه: در چنین حالاتی، استفاده از فلز مس در حجم زیاد (به دلیل تشکیل پیل گالوانی و افزایش میزان جریان حفاظت کاتدی) توصیه نمی‌شود.

ب - صاعقه :

برق حاصله از برخورد صاعقه با سازه حفاظت شده یا سازه‌های مرتبط با آن، از طریق بستر آندی به زمین جریان می‌یابد. این جریان، موجب وارد شدن صدماتی به وسایل ابزار دقیق مبدل یک‌سوکننده و نیز به خود یک‌سوکننده می‌گردد.

در هر یک از دو حالت بالا، ولتاژهای اضافی می‌تواند در ترمینال‌های دستگاه‌ها بروز کند و لازم است در مسیر ترمینال‌های خروجی کلیه تجهیزات مبدل یک‌سوکننده، دستگاه‌هایی به منظور جلوگیری از تغییرات شدید ولتاژ و ایجاد جرقه نصب گردد. برای توضیحات بیشتر در مورد محافظت در برابر صاعقه، باید به استانداردهای معتبر[2] مراجعه شود.

۵-۷-۳-۳ جداسازی الکتریکی سازه‌های مدفون که دارای سیستم حفاظت در برابر صاعقه می‌باشد

در مواردی که اتصالات جداکننده الکتریکی باید روی سازه‌های مدفون (که طبق استانداردهای معتبر[2] دارای سیستم حفاظت در برابر صاعقه می‌باشد) نصب شوند، باید مراقبت‌های خاص به عمل آید. لازم است که غلاف‌های فلزی کابل‌ها، لوله‌های فلزی و نظایر آنها در محل ورودی ساختمان‌ها به‌طور مستقیم به سیستم حفاظت از صاعقه متصل گردند. این اتصال، برای جلوگیری از تخلیه الکتریکی و احتمال بروز آسیب در لوله‌ها و کابل‌ها ضروری می‌باشد.

---

1 - Isolating Joints
2 - BS 6651 …

نصب اتصالات جداکننده الکتریکی به منظور حفاظت کاتدی سازه‌های مدفون که نزدیک پایانه‌ها یا تأسیسات دیگر قرار دارند، برخلاف توصیه‌های به عمل آمده می‌باشد. زیرا جداسازی الکتریکی تجهیزات فلزی از سایر اجزای متصل به زمین، از جمله ترمینال زمین سیستم حفاظت از صاعقه باعث می‌شود که در صورت وقوع صاعقه، جریان الکتریکی قطع، یا تخلیه الکتریکی در اتصال جداکننده الکتریکی، همراه با بروز صدمات احتمالی و انفجار باشد.

بنابراین دو طرف اتصالات جداکننده الکتریکی می‌توانند با رعایت فاصله تخلیه[1] از نظر الکتریکی به هم مرتبط شوند تا در طی تخلیه جریان صاعقه، بین دو سیستم اتصال زمین اتصال مناسب برقرار نماید. ولتاژ شکست این فواصل باید پایین‌تر از ولتاژ شکست اتصالات جدا کننده الکتریکی باشد. فواصل باید بتوانند جریان‌های صاعقه را بدون ایجاد خسارت تخلیه نمایند. برای محفوظ ماندن در برابر رطوبت، این فواصل باید کاملاً پوشانده شود. همچنین می‌توان به عنوان یک روش دیگر، پیل‌های قطبی را در دو طرف اتصال جداکننده الکتریکی نصب و یا به الکترود اتصال زمین وصل نمود.

۵-۷-۳-۴ سازه‌های مدفون در نزدیکی سیستم حفاظت از صاعقه

اگر سازه‌ای که باید حفاظت کاتدی شود، از نزدیکی یک سیستم حفاظت از صاعقه گذشته باشد، ولی به آن اتصال نداشته باشد، ممکن است لازم باشد که اتصال سازه به سیستم حفاظت از صاعقه مورد توجه قرار گیرد. این موضوع، به فاصله سازه با الکترودهای اتصال زمین سیستم حفاظت از صاعقه و هم‌چنین به میزان آسیب‌پذیری سازه در برابر لطمات ناشی از عبور صاعقه از داخل خاک بستگی دارد.

ضربه‌های وارده بر زمین در اثر صاعقه، که از سیستم حفاظت از صاعقه عبور می‌کند، موجب فروریختن خاک اطراف الکترودها می‌شود. اگر سازه‌ای مدفون، در ناحیه فروریخته قرار داشته باشد، ممکن است به پوشش یا فلز سازه، صدماتی وارد کرده و مواردی که سازه حاوی مواد آتش‌گیر باشد، سبب آتش‌سوزی گردد. این خطر، تنها به فواصل نزدیک سیستم حفاظت از صاعقه محدود نمی‌شود، بلکه حتی در فضاهای باز، ضربات صاعقه می‌تواند در فاصله نزدیک سازه آثار تخریبی مشابه‌ای ایجاد نماید. در مواردی، درخت‌ها یا ساختمان‌های بلند حفاظت نشده در برابر صاعقه، می‌توانند ضربات صاعقه را متمرکز و تشدید نمایند. به هر حال ممکن است سیستم حفاظت از صاعقه، احتمال وارد شدن صدمه به سازه را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. این صدمات، در نزدیکی تأسیسات مجهز به سیستم حفاظت از صاعقه، ممکن است موجب زیان‌های بیشتری شود. جزییات و ارزیابی خطرات ناشی از صاعقه در استانداردهای معتبر[2] ارائه شده است.

اتصال سازه به سیستم حفاظت از صاعقه، انتقال جریان صاعقه به سمت سازه و سپس به زمین را بدون فروریختگی خاک امکان‌پذیر می‌سازد. به هر حال ممکن است تأثیر معکوس صاعقه روی عملکرد سیستم حفاظت کاتدی قابل توجه باشد. طبق توصیه استانداردهای معتبر، مقاومت سیستم حفاظت از صاعقه نسبت به خاک نباید از ۱۰Ω تجاوز نماید. تأثیر معکوس روی سیستم حفاظت کاتدی را می‌توان با اتصال وسیله‌ای که عبور جریان صاعقه را بدون آسیب‌رسانی به سازه امکان‌پذیر می‌سازد و جریان برق حفاظت کاتدی را محدودتر می‌کند، خنثی نمود.

---

1 - Discharge gap
2 - BS 6651

فاصله منطقه‌ای که سازه در خارج از محدوده فروپاشی خاک[1] در اثر صاعقه قرار می‌گیرد، قابل محاسبه است. به‌عنوان مثال، یک سیستم حفاظت از صاعقه شامل یک الکترود کوچک را می‌توان در نظر گرفت؛ هنگامی که جریان برق صاعقه به زمین جریان می‌یابد، بخشی از خاک به شکل نیمکره با شعاع S (متر) تحت تأثیر صاعقه قرار می‌گیرد (فروپاشی خاک)، به طوری که مقدار تنش در سطح نیمکره برابر است با تنش فروپاشی خاک E (برحسب کیلوولت بر متر)، بنابراین با تقسیم جریان i (برحسب کیلو آمپر) بر مساحت نیمکره، چگالی جریان به‌دست می‌آید و با ضرب آن در مقاومت مخصوص ρ (اهم متر)، مقدار تنش محاسبه می‌گردد:

$$E = \frac{i\rho}{۲\pi S^{۲}} = \frac{i}{S} \times \frac{\rho}{۲\pi S} = \frac{i}{S} \times R \qquad (۵)$$

که در آن، R مقاومت الکتریکی خاک در ناحیه فروپاشی تا ناحیه خارج از آن می‌باشد، بنابراین:

$$S = iR/E \qquad (۶)$$

یا

$$S = \frac{i\rho}{۲\pi E} \qquad (۷)$$

مقاومت فروپاشی خاک در اثر صاعقه در حدود ۲۰۰ – ۵۰۰ کیلوولت بر متر برآورد می‌شود؛ شدت صاعقه‌های بسیار شدید در حالت خاص نیز حدود ۲۰۰ کیلو آمپر می‌باشد؛ و مقاومت الکترود نسبت به زمین نیز مطابق استانداردهای معتبر نباید از ۱۰ اهم تجاوز نماید. حال با قرار دادن کمترین مقدار فروپاشی خاک (۲۰۰ کیلوولت بر متر) و بیشترین شدت صاعقه (۲۰۰ کیلو آمپر) و با در نظر گرفتن بالاترین مقاومت الکترود نسبت به زمین (۱۰ اهم)، فاصله‌ای در حدود ۱۰ متر به‌دست می‌آید؛ بنابراین این مقدار حداکثر فاصله است. در صورت معلوم بودن مقاومت مخصوص خاک(ρ) می‌توان از معادله (۷) که دارای دقت بیشتری است، استفاده نمود.

سیستم حفاظت از صاعقه در تأسیسات بزرگ، شامل تعدادی الکترود است که معمولاً به‌صورت میله در زمین کوبیده شده و به هم متصل شده‌اند. می‌توان فرض کرد که جریان برق، تقریباً به‌طور مساوی بین این الکترودها توزیع می‌شود، با این فرض فاصله بین الکترودهای مورد نیاز کاهش می‌یابد. اگر فاصله محاسبه شده کمتر از طول یک الکترود (میله ارت) باشد، نتیجه حاصله دست بالا خواهد بود، زیرا وقتی فاصله محاسبه شده نسبت به طول یک الکترود کوچک می‌شود، مدل فیزیکی اصلی، دقت خود را از دست خواهد داد. در محاسبات، جریانی را که از تمام طول الکترود خارج می‌شود باید به حساب آورد و نباید فرض شود که کل جریان در مرکز نیمکره متمرکز شده است.

۱– وقتی زمین خاکی تحت تأثیر صاعقه قرار می‌گیرد، انرژی برق باعث دگرگونی انسجام مقاومت خاک می‌گردد که به آن، تأثیر صاعقه یا فروپاشی (Break down) خاک گفته می‌شود.

۵-۷-۴ آثار جریان متناوب (a.c.) روی سیستم‌های حفاظت کاتدی

در خصوص تأثیر جریان‌های متناوب روی سیستم‌های حفاظت کاتدی، نظرات مختلفی ارائه شده است. جمع‌بندی نظرات اخیر بر این است که جریان متناوب در برخی موارد، بر عملکرد عادی تأسیسات حفاظت کاتدی تداخل ایجاد می‌کند. عموماً تأثیر جریان متناوب قابل ملاحظه نیست ولی ممکن است به کاهش جزیی طول عمر آندهای فدا شونده منجر گردیده و در سیستم‌های حفاظت کاتدی، با اعمال جریان به افزایش جزیی جریان خروجی سیستم تغذیه الکتریکی منجر شود.

به ندرت ممکن است وجود جریان‌های متناوب موجب افزایش کارآیی سیستم حفاظت کاتدی گردد. به هر حال، در برخی موارد، وجود جریان متناوب ممکن است سبب اختلال در عملکرد سیستم حفاظت کاتدی شود. بنابراین کارکنان بهره‌برداری، در صورت احتمال جریان‌های متناوب، باید موارد بالا را مدنظر قرار دهند.

۵-۸ آزمایش‌ها

آزمایش‌هایی که باید در زمان طراحی و راه‌اندازی سیستم حفاظت کاتدی انجام شود و همچنین روش‌های آزمایش‌ها، در بخش‌های بعدی خواهد آمد. آزمایش‌ها بلافاصله بعد از راه‌اندازی سیستم به ترتیب باید شروع شود. باید توجه کرد که ممکن است در اثر اتصال غیرصحیح سیستم به‌منبع تغذیه برق یک‌سو (d.c.) صدمات جدی خوردگی بر روی سازه مورد حفاظت ایجاد گردد. به همین دلیل باید قبل یا بلافاصله بعد از راه‌اندازی سیستم، مطمئن شد که اتصالات منفی و مثبت، صحیح بسته شده‌اند (بند ۱۲ از جدول ۵).

۶- حفاظت کاتدی سازه‌های مدفون

۶-۱ کلیات

این بخش که در ارتباط با بخش چهارم مورد استفاده قرار می‌گیرد، در برگیرنده اطلاعات مربوط به کاربرد حفاظت کاتدی سازه‌های مدفون می‌باشد و به‌ویژه در مورد خطوط لوله (که بیشترین کاربرد را دارد)، کابل‌ها و مخازن فلزی بحث می‌نماید. حفاظت کاتدی لوله‌های مستغرق در طول‌های کوتاه، مانند عبور از رودخانه‌ها در بند ۶-۲-۳-۵ آمده است.

۶-۱-۱ عوامل موثر در طراحی

در طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی، عوامل زیر در انتخاب و کاربرد مبانی که در بخش ۵ بیان شده، مؤثر می‌باشد:

الف- محیط اطراف: مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی محیط اطراف و میزان تغییرات روزانه یا فصلی آنها باید برای محاسبه توان الکتریکی موردنیاز، توسط طراح مد نظر قرار گیرد.

ب - نوع پوشش: در نظر گرفتن پتانسیل به‌عنوان تنها ضابطه، می‌تواند گمراه کننده باشد، زیرا افت پتانسیل (IR) به ضخامت پوشش و مقاومت الکتریکی آن بستگی دارد. برای احتراز از جدایش[1] احتمالی پوشش، جریان حفاظتی اعمال شده باید کنترل شود، به‌طوری که اندازه پتانسیل بین سازه و خاک، بیشتر از آنچه توسط سازنده پوشش توصیه شده منفی نگردد. در هر حال، به‌عنوان یک راهنمای کلی، پتانسیل لحظه‌ای قطع نباید بیش از ۱/۱- ولت منفی‌تر گردد.

برای پوشش‌های ضخیم مانند انامل قیر یا قطران مسلح شده و در خاک‌های با مقاومت الکتریکی زیاد، پتانسیل حفاظت تا حدود ۳- ولت قابل قبول می‌باشد. در حالی که پتانسیل منفی‌تر از ۲- ولت در پوشش‌ها با ضخامت نازک مانند پودر اپوکسی و در خاک‌های با مقاومت الکتریکی پایین باعث گسیختگی[2] پوشش می‌گردد. پوشش‌های دیگر ممکن است در مقابل حفاظت بیش از اندازه، کم و بیش حساس باشند و امکان دارد لازم شود پتانسیل سازه به خاک به مقادیر دیگری محدود گردد (به بند ۵-۷-۱ مراجعه شود).

ج- حد قطبی‌شدن[3]: معیار حفاظت برای سازه‌های فلزی، معمولاً ۰/۸۵- ولت (براساس پیل مس - سولفات مس) نسبت به خاک مجاور آن می‌باشد. در شرایط غیرهوازی و در صورتی که باکتری‌های احیا کننده سولفات وجود داشته باشد، باید معیار حفاظت را تا حدود ۰/۹۵- ولت انتخاب نمود (به بند ۴-۳-۲-۲ جدول ۱ رجوع شود).

د- مقاومت الکتریکی خطی: پیوستگی الکتریکی سازه[4] و مقدار مقاومت الکتریکی خطی آن در میزان تقلیل پتانسیل اعمال شده، به‌ویژه در خط لوله مؤثر می‌باشد.

هـ- محدوده سازه‌های مجاور: در مواردی که سازه نزدیک به سایر سازه‌ها قرار دارد، ضروری است از تداخل جلوگیری شود.

و- دسترسی به انرژی: در دسترس بودن انرژی برق متناوب در انتخاب محل تأسیسات حفاظت کاتدی، مؤثر می‌باشد.

---

1 - Disbondment
2 - Disruption
3 - Polarization Level
4 - Continuity of Structure

ز- جریان‌های سرگردان: در مورد سازه‌های مجاور ریل قطارهای برقی با جریان یک‌سو، می‌توان از تخلیه الکتریکی استفاده کرد. در جاهایی که جریان‌های سرگردان دارای نوسان باشد، احتمال نیاز به کنترل اتوماتیک وجود دارد.

ح- غلاف پلی‌اتیلن: در مواردی که از غلاف پلی‌اتیلن به‌صورت آزاد (نچسبیده) برای اتصالات و متعلقات لوله‌ها به‌عنوان حفاظت اولیه استفاده شود، نمی‌توان انتظار داشت که حفاظت کاتدی موثر باشد.

۶-۱-۲ سیستم آندهای فدا شونده

در این سیستم، آندهای منیزیم (بند ۵-۴-۳-۲) کاربرد وسیعی دارند، البته در بعضی موارد در خاک‌های با مقاومت الکتریکی خیلی کم، مثلاً زیر ۱۰ اهم‌متر، آندهایی از جنس روی نیز به‌کار گرفته می‌شوند. اگرچه آندهای منیزیم دارای پتانسیل محرک بیشتری[1] هستند، اما کاربرد آنها معمولاً به خاک‌های با مقاومت الکتریکی زیر ۵۰ اهم متر محدود می‌گردد که می‌تواند با استفاده از آندهای نواری، این دامنه گسترده‌تر شود. در مراجع مختلف، فرمول‌هایی وجود دارد که با استفاده از آنها می‌توان راندمان آند با شکل‌های مختلف را برآورد نمود.

معمولاً برای پر کردن اطراف آند از مواد مخصوص استفاده می‌شود تا مقاومت بین آند فدا شونده و خاک کاهش یابد. این پر کننده باید یک نوع الکترولیت با مقاومت مناسب بوده و نسبت به جنس آند خورنده نباشد. یک نوع معمول پرکننده شامل ۷۰ درصد پودر گچ، ۲۵ درصد دانه بنتونیت و ۵ درصد سولفات سدیم است.

توجه : در این مورد هرگز نباید از مواد پر کننده کربنی استفاده شود.

سیستم آندهای منیزیم معمولاً برای عمر مفید بیشتر از ۱۰ سال طراحی می‌شوند. معمولاً عملکرد این سیستم با اندازه‌گیری پتانسیل و جریان در فواصل زمانی مشخص به‌طور منظم کنترل می‌شود، به‌طوری‌که بتوان آنها را در صورت نیاز تعمیر یا جایگزین نمود. نقاط مناسب برای اندازه‌گیری‌ها باید قبلاً پیش‌بینی شود (به بند ۱۲-۴ مراجعه شود).

در سیستم آندهای فدا شونده، تأثیر متقابل (تداخل) جزیی می‌باشد و صدمه ناشی از حفاظت اضافی به پوشش‌ها بعید است.

۶-۱-۳ سیستم با اعمال جریان

آند مدفون را می‌توان به‌وسیله مواد کربنی مانند کک پوشاند. این مواد، مقاومت محیط اطراف آند را نسبت به زمین کم نموده و ممکن است مصرف مواد آند را کاهش دهد. توصیه می‌شود برای پر کردن قسمت بالای آند، از شن درشت‌دانه استفاده گردد تا اجازه فرار گازها داده شود. این گازها معمولاً اکسیژن می‌باشد اما در محلول‌های حاوی کلراید، واکنش در آندهای مصرف نشدنی[2] به تولید گاز کلر منجر می‌شود؛ بنابراین لازم است برای کابل‌های اتصال که در مجاورت آند قرار دارند، از مواد عایق مقاوم در مقابل کلر که مورد تأیید باشد استفاده گردد.

یکپارچگی کامل عایق کابل‌های اتصال ضروری است، زیرا هر قطعه فلز که در تماس با الکترولیت (خاک یا آب) قرار گیرد به سرعت خورده می‌شود.

---

1 - Driving Potential
2 - Non Consumable

غالباً با نصب یک آند که به راحتی قابل حمل باشد، نمی‌توان مقاومت پایین و مناسب نسبت به خاک را فراهم آورد. در چنین شرایطی می‌توان از یک بستر زمین حاوی گروه‌هایی از آندها (که به صورت موازی وصل شده‌اند)، استفاده کرد. افزایش فاصله بین آندهای منفرد، مقاومت نسبت به زمین را کاهش می‌دهد. به‌هرحال، این مزیت که بدین طریق به‌دست می‌آید، با افزایش فاصله آندها کاهش می‌یابد. بنابراین باید با مقایسه بین تعداد آندهای منفرد، در نظر گرفتن هزینه کابل‌های اتصال و محوطه بزرگ‌تر مورد نیاز از یک‌طرف و خطرات و هزینه بهره‌برداری به‌کار بردن منبع تغذیه با ولتاژ بالاتر از طرف دیگر به‌عمل آید و نقطه تعادل اقتصادی تعیین گردد.

فرمول‌هایی وجود دارد که با کمک آنها می‌توان مقاومت نسبت به خاک را برای انواع آرایش[1] آندها برآورد نمود.

محوطه (محل) آندها یا بسترهای زمینی[2] باید در محلی قرار گیرند که مقاومت خاک تا حد امکان پایین بوده و نیز موقعیت آنها (آندها یا بسترهای زمینی) نسبت به سازه مورد حفاظت مناسب باشد. اگر خاک به‌طور طبیعی مرطوب نباشد، ممکن است از یک جریان قطره‌ای استفاده شود. انتخاب محل آندها باید با درنظر گرفتن موقعیت سایر سازه‌های زیرزمینی، دسترسی به محل برای بهره‌برداری و نگهداری و نیز در دسترس بودن انرژی برق انجام پذیرد.

اگر محل مناسبی برای نصب آندها موجود نباشد، می‌توان چاهک‌های حفر شده در لایه‌های زیرین با مقاومت الکتریکی کم و یا آب‌های زیرزمینی را مورد توجه قرار داد.

بسترهای زمینی معمولاً باید در فاصله حداقل ۱۰۰ متری سازه قرار گیرند تا حفاظت به‌صورت گسترده انجام گرفته و توزیع جریان یکنواخت حاصل گردد. البته در بعضی سازه‌های پیچیده مدفون، ممکن است از تعدادی بسترهای کوچک مجزا که در طول سازه توزیع شده‌اند و در فاصله بسیار کمتری نسبت به سازه قرار دارند استفاده شود.

۶-۲ خطوط لوله

۶-۲-۱ آماده‌سازی سازه

۶-۲-۱-۱ پیوستگی جریان

همان‌طور که قبلاً در بند ۵-۳-۱ اشاره شده، هر سازه حفاظت کاتدی شده باید از نظر اتصال پیوسته بوده تا جریان الکتریکی را عبور داده و دارای مقاومت الکتریکی کم باشد.

خطوط لوله فلزی با اتصال جوشی، از نظر الکتریکی پیوسته می‌باشد در حالی که خط لوله با اتصال مکانیکی ممکن است پیوستگی الکتریکی نداشته باشد. این پیوستگی را می‌توان با جوش دادن یا لحیم کردن یک قطعه مانند تسمه فلزی یا کابل با سطح مقطع مناسب که دو طرف محل اتصال را به یکدیگر وصل می‌کند، تأمین نمود. به‌هرحال باید در تمام طول خط لوله

1 - Configuration
2 - Ground Beds

پیوستگی جریان الکتریکی برقرار بوده و تمام قسمت‌های میانی به‌هم متصل باشند. مقاومت الکتریکی عامل اتصال[1]، باید پایین بوده و برای مثال در خطوط لوله مقاومت آن از مقاومت یک لوله بیشتر نباشد.

عامل اتصال باید مشابه سازه حفاظت شده عایق شود. اگر جنس فلز با فلز سازه متفاوت باشد، حوالی محل اتصال باید پوشش شود تا امکان تأثیرات الکترولیتی در درزهای محل اتصال بین قطعه و سازه از بین برود. عامل اتصال باید در مقابل آثار خاکریزی و غیره مقاومت مکانیکی داشته و دارای ظرفیت انتقال جریان در حد مناسب باشد تا در مقابل جریان‌های احتمالی گذرا که از منابع خارجی وارد می‌شود صدمه نبیند.

۶-۲-۱-۲ پوشش حفاظتی

اصلی‌ترین اقدام در حفاظت خطوط لوله مدفون در مقابل خوردگی، استفاده از پوشش است. این پوشش، چگالی جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی را نیز کاهش داده و گستره حفاظت را افزایش می‌دهد؛ بنابراین در تأسیسات مورد نظر، تعداد نقاطی که در آنها تزریق جریان حفاظت کاتدی لازم است، کاهش می‌یابد (به بند ۵-۳-۲ مراجعه شود).

انواع پوشش‌های مناسب عبارتند از:

الف- انامل قیری یا قطران ذغال‌سنگ به روش گرم که معمولاً با الیاف غیر آلی مسلح می‌گردد.

ب- نوار پلاستیکی که به‌صورت خودچسب یا با استفاده از چسب آستر انجام می‌شود و معمولاً با پایه پی- وی- سی یا پلی‌اتیلن بوده که گاهی اوقات با لایه‌هایی از ترکیبات لاستیکی همراه می‌باشد.

ج - رزین‌های یورتان[2] که با برس یا اسپری اجرا می‌شود.

د - پوشش پلی‌اتیلن که به‌صورت پودری یا تزریقی اجرا می‌شود.

هـ - رزین اپوکسی که معمولاً به‌صورت پودر به سطح لوله گرم پاشیده می‌شود.

مقاومت الکتریکی پوشش خط لوله، در حفاظت کاتدی دارای اهمیت بوده و با اجرای پوشش می‌توان مقاومت الکتریکی اولیه را تا بیش از $۱۰۰۰۰\,\Omega.m^۲$ به‌دست آورد. چگالی جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی، به میزان صدمات وارده به پوشش لوله‌ها در هنگام پایین بردن لوله در ترانشه و خاکریزی روی لوله بستگی دارد و اگر دقت لازم به‌عمل آید، با چگالی جریان معادل ۰/۰۵ میلی‌آمپر بر مترمربع یا کمتر از آن، می‌توان حفاظت کاتدی اولیه را تأمین نمود.

در مواردی که ایستگاه‌های حفاظت کاتدی در فواصل زیاد قرار دارند و یا در نظر است آثار متقابل به حداقل رسانده شود، پوشش با کیفیت بالا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (به فصل ۹ مراجعه شود).

در صورت امکان لوله باید با خاک نرم بدون سنگ و مواد کربن‌دار مانند کک با ضخامت حداقل ۱۵ سانتی‌متر پوشیده شود. اگر خاک محل مورد نظر برای خاکریزی مناسب نباشد، باید پیش‌بینی‌های لازم برای آوردن مصالح مناسب و یا اجرای انواع محافظت‌های مکانیکی (مانند توری پلاستیکی که اثر آن روی حفاظت کاتدی حداقل می‌باشد) به‌عمل آید.

در محل عبور از نهر یا رودخانه، ممکن است حفاظت بیشتری به صورت استفاده از غلاف بتنی در اطراف و روی لوله پوشش شده، لازم شود.

---

1 - Bond
2 - Urethane

با فرسودگی تدریجی پوشش، به چگالی جریان بالاتری برای انجام حفاظت کاتدی نیاز می‌باشد. این امر در طراحی سیستم حفاظت کاتدی باید پیش‌بینی گردد. عواملی که به فرسوده شدن پوشش کمک می‌کند شامل باکتری‌های خاک، تنش خاک، حرکت لوله، آثار دمای سیال داخل لوله، جذب آب، صدمات فیزیکی وارده، حفاظت کاتدی بیش ازحد و یا جدایش کاتدی[1] می‌باشد.

تجربه‌های به‌دست آمده روی یک پوشش خاص، بهترین راهنما در تعیین عملکرد پوشش مورد نظر در شرایط مشابه می‌باشد. اما در انتخاب پوشش، باید عوامل مربوط به چگونگی اجرا و شرایط بهره‌برداری، مانند دمای بهره‌برداری، خم‌شدن لوله در کارگاه و تنش‌های وارده از خاک در نظر گرفته شود.

۶-۲-۱-۳ اتصالی‌های جداکننده الکتریکی

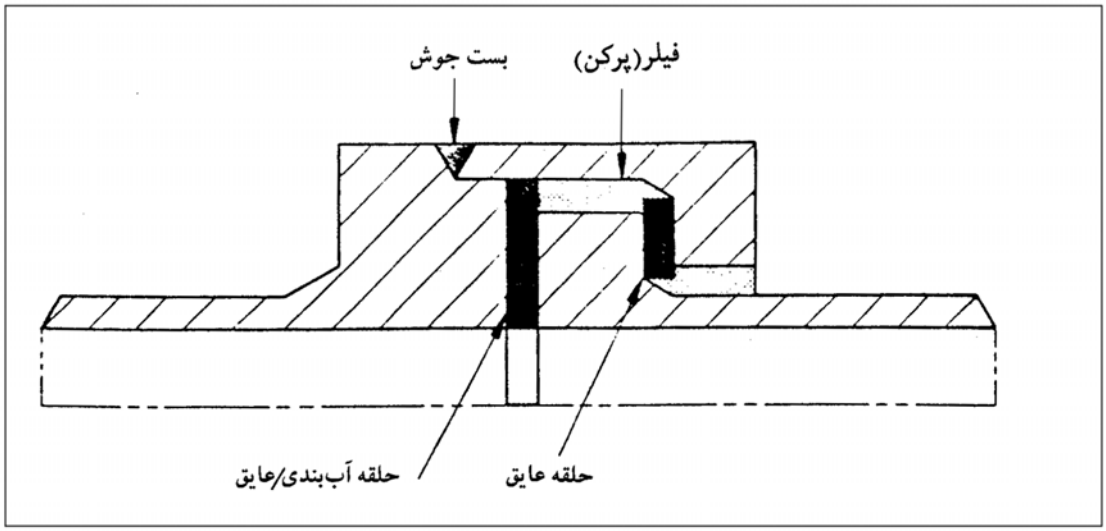
در سیستم حفاظت کاتدی لوله‌های پوشش شده، اگر لوله‌ها به تأسیساتی مانند تلمبه‌خانه، مخزن ذخیره پوشش نشده یا با پوشش ضعیف و یا اتصال زمین[2] که می‌تواند موجب تخلیه الکتریکی زیادی گردد، متصل شده باشد، بخش زیادی از مزایا و نقش پوشش (به بند ۶-۲-۱-۲ رجوع شود) هدر می‌رود، مگر آنکه تأسیسات پوشش نشده یا با پوشش ضعیف از شبکه لوله‌های پوشش شده، از نظر الکتریکی عایق شده باشد، تا حفاظت کاتدی به لوله‌های پوشش شده محدود گردد. ممکن است جداسازی الکتریکی بین دو فلز غیرهمجنس و نیز بین دو نوع روش (سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان و با آندهای فدا شونده) لازم گردد تا اثر متقابل یا جریان‌های سرگردان را محدود نماید. در مواردی که جداسازی الکتریکی انجام می‌شود، سازه جدا شده به‌عنوان سازه ثانویه به حساب آمده و آزمایش‌های توصیه شده و اقدامات اصلاحی باید به‌عمل آید. چگونگی ارزیابی و جلوگیری از اثر متقابل در فصل ۹ توضیح داده شده است.

اتصالی‌های جداکننده الکتریکی خط لوله، باید با شرایط بهره‌برداری، مانند: فشار، دما و خصوصیات سیال درون لوله سازگار باشد. از بین رفتن عایق الکتریکی، از معمول‌ترین دلایل از کار افتادن سیستم حفاظت کاتدی است. بنابراین در انتخاب محل و روش عایق کردن الکتریکی و راحتی تعمیر و تعویض باید دقت و توجه خاص به‌کار برد.

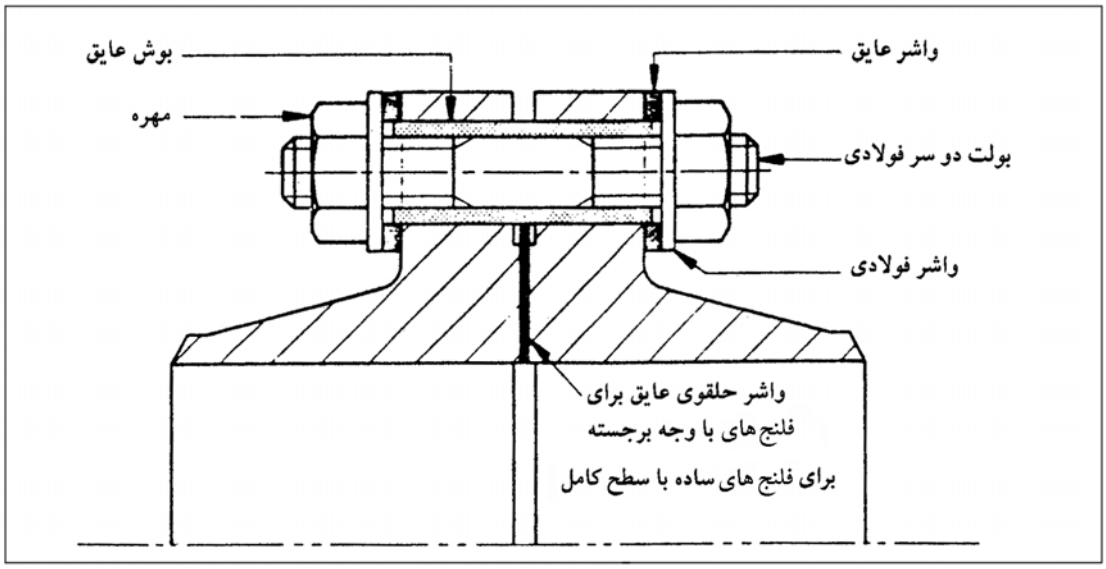
برای محل‌هایی که تعمیر یا تعویض بسیار مشکل است، (مانند لوله‌های انتقال با فشار بالا)، توصیه می‌شود از اتصالی‌های جداکننده پیش‌ساخته یکپارچه[3] استفاده شود (به شکل ۱۱- الف مراجعه شود). این اتصالی‌ها را قبل از نصب می‌توان، از نظر هیدرواستاتیکی و الکتریکی آزمایش نمود. احتمال از کار افتادن یا بروز اختلال در عایق‌سازی الکتریکی در این اتصالی‌ها بسیار کم است. در شرایط هوای آزاد و خشک، قبل از نصب، مقاومت الکتریکی عایق اتصالی باید بیشتر از ۲ مگا اهم باشد. این مقاومت با استفاده از دستگاه آزمایش‌کننده عایق ۵۰۰ ولتی اندازه‌گیری می‌شود. در مواردی که استفاده از اتصالی‌های جداکننده الکتریکی یکپارچه، عملی یا اقتصادی نباشد، از فلنج‌های استاندارد با واشر عایق که بین دو فلنج قرار می‌گیرند غلاف عایق روی پیچ و نیز واشر زیر مهره به‌عنوان اتصالی جدا کننده الکتریکی می‌توان استفاده نمود. برای جلوگیری از صدمه، واشر

1 - Cathodic Disbondment
2 - Electrical Earth
3 - Monobloc

فولادی بین واشر عایق کننده و مهره قرار می‌گیرد تا هنگام سفت کردن مهره، واشر عایق صدمه نبیند (به شکل ۱۱- ب مراجعه شود). لازم است فلنج‌ها به‌طور صحیح در امتداد یک محور قرار گیرند تا از صدمه غلاف عایق روی پیچ‌ها جلوگیری شود.



الف - اتصال جداکننده یکپارچه نمونه(فشار قوی)



۱- در این شکل،تدابیر لازم برای جلوگیری از ورود رطوبت نشان داده نشده است.

۲- می‌توان از بوش واشر عایق یکپارچه استفاده کرد.

۳- می‌توان از واشر عایق در یک طرف استفاده کرد.

ب - فلنج های جداکننده نمونه

شکل ۱۱- اتصالات جداکننده تیپ برای خطوط لوله

در انتخاب واشر باید دقت لازم به‌عمل آید، به‌طوری که واشر تمام سطح فلنج را بپوشاند تا از ایجاد شکاف بین دو فلنج جلوگیری شود، زیرا جمع شدن مواد در شکاف می‌تواند حالت عایقی را از بین ببرد. سطح خارجی فلنج‌ها باید عایق شود تا از نفوذ گرد و غبار و رطوبت، که می‌تواند بین فلنج‌ها اتصال کوتاه[1] برقرار کند، جلوگیری شود.

اگر اتصالی‌های جدا کننده الکتریکی در خاک مدفون باشند، باید این اتصالی‌ها مطابق استاندارد پوشش حفاظتی خط لوله، به‌طور کامل پوشش شده و سیم‌های آزمایش[2] متصل به دو طرف پیش‌بینی شود. چون اتصالی‌ها فقط از یک‌طرف حفاظت کاتدی می‌شوند، باید توجه نمود که هر لوله مدفون متصل به فلنج حفاظت نشده، می‌تواند تحت تأثیر پدیده آثار متقابل قرار گیرد.

در خطوط حاوی الکترولیت، این خطر وجود دارد که در سطح داخلی لوله طرف حفاظت شده در مجاورت اتصالی جداکننده الکتریکی، خوردگی به‌وجود آید. در مورد الکترولیت‌های با هدایت الکتریکی پایین مانند آب آشامیدنی، باید در سمت لوله حفاظت شده، طولی معادل چهار برابر قطر لوله از داخل پوشش داده شود و یا در همین طول از لوله (در سمت لوله حفاظت شده) لوله‌ای غیرفلزی جهت عایق‌سازی نصب گردد.

در الکترولیت با هدایت الکتریکی بالا مانند آب دریا یا محلول‌های نمکی، پوشش کردن لوله یا جایگزین نمودن لوله غیرفلزی برای جلوگیری از خطر خوردگی در سطح داخلی و مجاور اتصالی جدا کننده الکتریکی قابل توجیه نمی‌باشد. در صورت استفاده از اتصالی جدا کننده الکتریکی، بهتر است در طرف دیگر اتصالی جدا کننده الکتریکی که لوله، حفاظت کاتدی نشده است، برای جبران خوردگی لوله‌ای با ضخامت جدار بیشتری در نظر گرفته شود. در این‌صورت، به بازرسی فنی دوره‌ای و تعویض احتمالی آن نیاز خواهد بود.

آزمایش نهایی اتصالی جداکننده الکتریکی پس از نصب آن ضروری است. این آزمایش معمولاً در هنگام راه‌اندازی سیستم حفاظت کاتدی با اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در دو طرف اتصالی جدا کننده الکتریکی انجام می‌شود.

۶-۲-۱-۴ نقاط آزمایش

کابل‌های روکشدار که از یک سو به خط لوله متصل شده‌اند به جعبه ترمینال‌های روزمینی یا ایستگاه‌های اندازه‌گیری وصل می‌شوند. نقاط وصل شده به لوله (نقاط آزمایش) باید در فواصل مناسب در طول خط لوله پیش‌بینی شود (معمولاً در هر کیلومتر طول خط لوله یک نقطه آزمایش نصب می‌شود) تا بتوان میزان پتانسیل لوله نسبت به زمین را کنترل نمود. نقاط آزمایش اضافی در مناطق بحرانی مانند غلاف‌های لوله و یا محل‌هایی که خورندگی خاک شدید باشد، ممکن است لازم گردد. در محل‌هایی که خط لوله نزدیک سازه دیگری قرار می‌گیرد، لازم است نقاط آزمایش اضافی پیش‌بینی شود تا برای اندازه‌گیری تأثیر متقابل دو سازه نسبت به هم کمک نماید.

نقاط اتصال به خط لوله باید عایق و به خوبی پوشش شود. روش اتصال کابل به لوله با توجه به شرایط، متفاوت می‌باشد، اما در هر روشی که انتخاب می‌شود باید توجه کرد که اتصال الکتریکی مطمئنی برقرار گردد. برحسب شرایط موجود می‌توان از

1 - Short Circuit
2 - Test Leads

جوشکاری، جوش برنجی یا لحیم‌کاری استفاده نمود. اتصال با جوش حرارتی[1] و چسب هادی[2]، بر اتصال‌های از نوع پیچ مهره‌ای یا بستی[3] ترجیح دارد. در اتصال کابل به خطوط لوله فولاد تحت کشش زیاد، ملاحظات ویژه‌ای باید معمول گردد. معمولاً اتصال در نقطه‌ای به فاصله بیشتر از ۱۵۰ میلی‌متری درزجوش طولی و یا درز جوش اتصال لوله‌ها به یکدیگر انجام می‌شود. فرآیند جوشکاری باید به ترتیبی باشد که آثار منفی متالورژیکی در برنداشته باشد.

در مواردی که استفاده از جوشکاری قابل توصیه نمی‌باشد، کاربرد رزین‌های اپوکسی رسانا می‌تواند مد نظر قرار گیرد. موقعیت نقاط آزمایش در خطوط لوله سراسری باید به‌طوری انتخاب شود که در دسترس بوده و مصون از صدمات احتمالی باشد. (مرز زمین‌ها) در محل‌هایی که به‌صورت منفرد نصب می‌گردد، باید به آسانی قابل شناسایی باشد. جعبه ترمینال‌های روزمینی باید در مقابل ضربه و عوامل جوی مقاوم بوده و طوری جاسازی شود که به آسانی مورد دستبرد قرار نگیرد.

نقاط آزمایش را که برای اندازه‌گیری مقدار جریان در خط لوله مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان با اتصال دو کابل عایق شده به خط لوله تأمین نمود. فاصله نقاط اتصال کابل‌ها از یکدیگر روی لوله باید به اندازه‌ای باشد که بتوان افت ولتاژ را به راحتی اندازه‌گیری کرد. انتهای هر دو کابل باید در داخل جعبه ترمینال قابل دسترسی باشد.

۶-۲-۲ کاربرد حفاظت کاتدی

۶-۲-۲-۱ کلیات

استفاده از سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده، به خطوط لوله‌ای محدود می‌شود که دارای پوشش خوبی بوده و در خاک‌های با مقاومت پایین یا متوسط نصب شده باشند (به بند ۶-۱-۲ مراجعه شود). استفاده از سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان با دامنه وسیع‌تری از مقاومت خاک امکان‌پذیر می‌باشد و می‌تواند به شکلی طراحی شود که با پوشش‌های با کیفیت متفاوت مورد بهره‌برداری قرار گیرد. انتخاب بین این دو سیستم گفته شده برای هر پروژه به ارزیابی دقیق عوامل فنی و اقتصادی آن بستگی دارد (به بند ۵-۷ مراجعه شود).

۶-۲-۲-۲ آندهای فدا شونده

آندها باید در طول خط لوله و در فواصلی مناسب و معین از یکدیگر نصب شوند، به‌طوری‌که تمام سطح خط لوله بین دو آند کاملاً حفاظت شود. تا حد امکان آندها باید در محلی نصب شوند که:

- خاک آن دارای مقاومت پایین باشد،
- در فاصله حداقل ۱/۵ متری خط لوله باشد،
- عمق نصب آن کمتر از عمق خط لوله نباشد،
- عمق نصب آن باید به اندازه‌ای پیش‌بینی شود که خاک دارای رطوبت دائمی باشد،

---

1 - Thermit (Cad) Weld
2 - Conductive Adhesive
3 - Clamp

- حداقل در فاصله ۲ متری از سازه ثانویه زیرزمینی قرار گیرد تا اثر متقابل بر سازه‌های ثانویه کاهش یابد، و
- سازه ثانویه بین خط لوله و آند واقع نشود.

در برخی شرایط، ترجیح داده می‌شود که تعدادی آند به‌صورت مجموعه در نقطه‌ای دورتر از خط لوله در نظر گرفته شود. ملاحظات طراحی، با فاصله و موارد دیگر مانند آنچه درباره بسترهای زمینی (به بند ۶-۱-۳ مراجعه شود) آمده است، در ارتباط می‌باشد.

آندهای فدا شونده را ممکن است برای حفاظت موقتی بخش‌هایی از خط لوله که با اعمال جریان حفاظت خواهد شد، مورد استفاده قرار داد. همچنین آندهای فدا شونده ممکن است برای تأمین حفاظت موضعی در نقاطی که خوردگی در آن مناطق شدید است، نصب گردند.

۶-۲-۲-۳ سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان

با به‌کارگیری سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان، می‌توان طول قابل‌توجهی از خط لوله را توسط یک ایستگاه حفاظت نمود. لوله‌های بدون پوشش معمولاً در فاصله ۲ یا ۳ کیلومتری نیاز به یک ایستگاه دارند. با استفاده از پوشش‌های حفاظتی با کیفیت بالا می‌توان فاصله ایستگاه‌ها را تا ده برابر یا بیشتر افزایش داد که این فاصله به عوامل زیر بستگی دارد:

۱- مقاومت الکتریکی پوشش،

۲- مقاومت الکتریکی طولی خط لوله، و

۳- حداکثر پتانسیل منفی بین خاک و لوله (به بند ۶-۱-۱- ب مراجعه شود).

منبع تولید جریان یک‌سو، معمولاً یک مبدل یک‌سوکننده است که از برق شبکه تغذیه می‌شود (به بند ۵-۵-۴ مراجعه شود). در مواردی که شبکه برق در دسترس نباشد، می‌توان از منابع دیگری مانند مولدهای برق، انرژی خورشیدی یا پیل‌های ترموالکتریک استفاده نمود.

بستر زمینی (به بند ۶-۱-۳ مراجعه شود) باید در فاصله مناسب از خط لوله (معمولاً حدود ۱۰۰ متر یا بیشتر) قرار گیرد. اگر یک خط لوله زیرزمینی (مدفون) در نزدیکی سیستم ریلی[1] با جریان یک‌سو قرار گرفته باشد، می‌توان تخلیه الکتریکی بین ریل و خط لوله را به‌کار گرفت (به بند ۶-۵ مراجعه شود). در حالتی که آثار جریان‌های زمینی از سیستم ریلی با جریان یک‌سو را نتوان با تخلیه الکتریکی خنثی نمود یا کاهش داد، می‌توان از کنترل اتوماتیک استفاده نمود (به بند ۵-۵-۵ مراجعه شود) که درآن. مقدار جریان خروجی یک‌سو و قطبی شدن آن به میزان جذب یا تخلیه[2] جریان‌های زمینی ارتباط داده می‌شود. این امر، به‌وسیله یک الکترود مرجع که به‌طور دائم نصب شده است، انجام می‌شود.

همیشه کنترل‌های دوره‌ای سیستم ضروری است و در مناطقی که عوامل ناشی از تغییر فصل موجب تغییرات عمده در مقاومت الکتریکی بسترهای زمینی می‌شود، می‌توان از یک مولد جریان یک‌سو که دارای جریان خروجی ثابتی بوده و یا دارای کنترل کننده (پتانسیل ثابت) باشد، استفاده کرد (به بند ۵-۵-۵ رجوع شود).

---

1 - Traction System
2 - Pickup Discharge

ضروری است که آثار متقابل به‌طور کامل مورد توجه قرار گرفته و در مرحله اولیه پیشگیری‌های مناسب اتخاذ گردد. در مواردی ممکن است براساس توافق، از یک سیستم حفاظت کاتدی موجود به‌طور مشترک استفاده گردد و برای حفاظت سازه‌های در تملک سازمان‌های مختلف یک سیستم مشترک طراحی شود. این طرح‌ها به عنوان "طرح‌های مشترک[1]" نامیده می‌شوند.

۶-۲-۳ ملاحظات ویژه

۶-۲-۳-۱ غلاف لوله

در مواردی که لوله اصلی از داخل غلاف عبور داده می‌شود، می‌توان با جوش دادن دو سر غلاف به لوله از نفوذ رطوبت به فضای بین لوله و غلاف جلوگیری نمود. این فضا را می‌توان با یک گاز خشک بی‌اثر و تحت فشار مانند ازت پرکرد. اگر غلاف مطابق استاندارد پوشش خارجی خط لوله پوشش شده باشد، ضوابط سیستم حفاظت کاتدی تغییر نمی‌کند.

اگر غلاف دارای این شرایط نباشد، حفاظت کاتدی خط انتقال نامطمئن بوده و در این‌گونه موارد باید از به‌کار بردن غلاف تا حد امکان خودداری شود و به‌جای آن از لوله با ضخامت جدار بیشتر مطابق ضوابط موردنیاز استفاده گردد. در مواردی که استفاده از غلاف اجباری باشد، توصیه‌های زیر باید رعایت گردد:

به غیر از شرایط بالا، لوله داخل غلاف باید حداقل مطابق استاندارد سایر قسمت‌های خط لوله پوشش حفاظتی شود. خط لوله باید روی وادارهای[2] (فاصله نگهدارها) غیرفلزی قرار گیرد. این وادارها باید به‌طوری طراحی شوند که در هنگام نصب لوله، از آسیب به پوشش جلوگیری شود. لازم است غلاف و خط لوله به‌طور کامل از همدیگر جدا باشد. این جداسازی باید در مرحله احداث خط لوله مورد تأیید قرار گیرد. سطح خارجی غلاف فلزی نیز باید دارای پوشش حفاظتی باشد. اگر غلاف به کمک جک (جکینگ[3]) نصب شود، پوشش حفاظتی خارجی باید از نوع مناسب انتخاب و تمهیدات لازم اتخاذ گردد تا خطر آسیب به پوشش در هنگام نصب به حداقل ممکن کاهش یابد.

با نصب آندهای فدا شونده به صورت نوار از جنس روی یا منیزیم در فضای بین لوله و غلاف و اتصال آند به لوله انتقال، نتایج مفیدی به‌دست می‌آید اما تأیید این که حفاظت کاتدی در تمام نقاط تأمین گردیده امکان‌پذیر نمی‌باشد و مؤثر بودن این روش، به میزان پراکندگی رطوبت بستگی دارد.

در مورد غلاف‌های فلزی مواردی به شرح زیر مطرح می‌باشد:

الف - اتصال الکتریکی بین لوله و غلاف

سطح خارجی غلاف باید پوشش داده شود و کیفیت این پوشش باید حداقل مطابق استاندارد پوشش حفاظتی لوله انتقال باشد؛ در غیر این صورت، جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی افزایش می‌یابد. سیستم حفاظت کاتدی در داخل غلاف مؤثر نخواهد

1 - Joint Schemes
2 - Spacers
3 - Trust Boring or Jacking

بود زیرا غلاف به عنوان سپر محافظ عمل می‌کند. برای انتقال لوله به داخل غلاف، باید تمهیدات ویژه‌ای به عمل آورد تا پوشش خارجی لوله صدمه نبیند، زیرا این پوشش تنها محافظ در مقابل خوردگی است. سطح داخل غلاف نیز می‌تواند پوشش شود. اما در انتخاب ضخامت جدار غلاف مقداری از ضخامت دیواره غلاف به عنوان سهم خوردگی پیش‌بینی می‌شود.

ب - اتصال مقاومتی

اتصال مقاومتی بین غلاف و لوله انتقال، اگرچه موجب رسیدن مقداری از جریان به لوله می‌گردد ولی ممکن است برای حفاظت کاتدی کامل، کافی نباشد.

ج - غلاف و لوله بدون اتصال الکتریکی

وقتی غلاف و لوله بدون اتصال الکتریکی باشند، جریان حفاظت کاتدی به طرف سطح خارجی غلاف جریان یافته و سپس در صورت وجود الکترولیت از مقطع حلقوی حد فاصل بین غلاف و لوله عبور کرده و به‌سمت لوله جریان می‌یابد. تأثیر جهت جریان طوری است که میزان خوردگی لوله و سطح خارجی غلاف کاهش یافته، اما میزان خوردگی سطح داخلی غلاف تشدید می‌گردد. قطبی شدن کاتدی که در اثر عبور جریان به‌سمت غلاف و لوله به‌وجود می‌آید، به کیفیت پوشش، قطر لوله و طبیعت الکترولیت در تماس با سطح خارجی غلاف و الکترولیت در تماس با لوله بستگی دارد. در انتخاب ضخامت جداره غلاف، میزان خوردگی سطح داخل غلاف باید منظور گردد.

استفاده از سیستم حفاظت کاتدی جداگانه برای سطح خارجی غلاف امکان‌پذیر می‌باشد، اما باید در به‌کارگیری آن دقت لازم به‌عمل آید، زیرا خطر بروز آثار متقابل روی لوله و داخل غلاف در نقاط غیرقابل دسترسی (برای اندازه‌گیری و بازرسی) وجود دارد. این آثار به موقعیت آند، طبیعت الکترولیت موجود در فضای حلقوی بین لوله و غلاف و کیفیت نسبی پوشش غلاف و لوله بستگی دارد.

با توجه به موارد یاد شده (الف)، (ب) و (ج) معمولاً ترجیح داده می‌شود که غلاف ساخته شده، از خط لوله جدا باشد و مفاد مندرج در این بند در مورد آن اجرا شود، زیرا این روش عمدتاً نتایج قابل قبولی داشته و برای غلاف بتنی نیز قابل استفاده می‌باشد.

تذکر: در تمام موارد، نقاط آزمایش که به لوله و غلاف فلزی به‌طور جداگانه متصل می‌باشند باید پیش‌بینی گردد (به بند ۶-۳-۱-۴ رجوع شود) تا راه‌اندازی سیستم و عیب‌یابی آنرا آسان نماید.

۶-۲-۳-۲ لوله با غلاف بتنی

لوله‌هایی که قرار است در بتن کار گذارده شوند مانند عبور از رودخانه‌ها، حوضچه شیرآلات و غیره، باید ابتدا مطابق استاندارد پوشش سایر قسمت‌های لوله، پوشش شوند.

۶-۲-۳-۳ حفاظت خطوط لوله موجود

به‌منظور حفاظت و طولانی کردن عمر لوله‌های موجود (قدیمی)، معمولاً از سیستم حفاظت کاتدی با روش اعمال جریان استفاده می‌شود، حتی اگر این لوله بدون پوشش بوده یا دارای پوشش‌های فرسوده باشند، که در این صورت چگالی جریان زیاد مورد نیاز است. جریان مورد نیاز اولیه را می‌توان به وسیله آزمایش تخلیه الکتریکی تعیین کرد. این آزمایش پس از جداسازی الکتریکی خط لوله، تا حداکثر فاصله ممکن نسبت به سایر سازه‌های در تماس با خاک صورت می‌گیرد. میزان جریان مورد نیاز در زمان کارکرد عادی سیستم به دلیل آثار قطبی شدن معمولاً به مراتب کمتر است.

۶-۲-۳-۴ کنده شدن رسوبات

پس از راه‌اندازی سیستم حفاظت کاتدی در خط لوله موجود، ممکن است تعداد نقاط نشتی لوله به طور موقت افزایش یابد، که به دلیل کنده شدن رسوبات در نقاطی از خط لوله که به شدت زنگ زده و جدار آن قبلاً ضعیف یا سوراخ شده است، می‌باشد. این نشتی‌ها اغلب در یکی دو سال اولیه راه‌اندازی سیستم حفاظت کاتدی آشکار می‌شود.

۶-۲-۳-۵ عبور از رودخانه

در مواردی که بخش کوتاهی از خط لوله از رودخانه‌ها یا خورها[1] عبور می‌کند، سیستم حفاظت کاتدی پیش‌بینی شده برای قسمت مدفون در خاک، معمولاً قسمت‌های مزبور را نیز شامل می‌شود. در این موارد، از هر یک از دو سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان یا آندهای فدا شونده می‌توان استفاده نمود. به منظور اطمینان از پیوستگی الکتریکی و در نتیجه توزیع یکنواخت پتانسیل، تأمین اتصال الکتریکی خط لوله در محل اتصال، به‌جز در مواردی که لوله‌ها به یکدیگر جوش می‌شوند، دارای اهمیت می‌باشد. در عبور از رودخانه‌ها پیش‌بینی پوشش مناسب برای خط لوله ضروری است. در صورت امکان، این پوشش با غلاف بتنی[2] تکمیل می‌گردد تا هم در مقابل نیروی غوطه‌وری مقاومت کرده و هم پوشش لوله را در مقابل صدمات مکانیکی حفاظت نماید. در مواردی که در قسمت عبور ازرودخانه، جریان الکتریکی زیاد نیاز باشد، در دو طرف قسمت عبور از رودخانه می‌توان از فلنج‌های عایق استفاده کرد و برای این قسمت سیستم حفاظت کاتدی جداگانه و مستقلی پیش‌بینی نمود. خطوط لوله طولانی زیر دریایی غوطه‌ور، باید به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرند. اطلاعات لازم در مورد حفاظت کاتدی این‌گونه خطوط در استانداردهای معتبر[3] وجود دارد.

۶-۳ کابل‌ها

۶-۳-۱ کلیات

اصول اولیه حفاظت کاتدی زره یا غلاف خارجی فلزی کابل‌های مدفون، مشابه خطوط لوله می‌باشد (۶-۲). توصیه‌های ویژه در مورد کابل‌ها در بندهای (۶-۳-۲) و (۶-۳-۳) آورده شده است.

---

1 - Estuary
2 - Concrete Encasement
3 - BS 7361

۶-۳-۲ آماده‌سازی سازه

۶-۳-۲-۱ پیوستگی الکتریکی

اگر اتصالات از نوع اتصال مکانیکی باشد، باید مطمئن شد که اتصال کافی فلزی (اتصال الکتریکی) بین قطعات زره وجود دارد. در مورد کابل‌های زره‌دار باید توجه شود که در یک یا چند نقطه از هر طول کابل و بین نقاط اتصال آنها، اتصال مطمئن بین زره و غلاف سربی وجود داشته باشد. در غیر این‌صورت استفاده از حفاظت کاتدی احتمالاً موجب تشدید خوردگی سطوح داخل زره خواهد شد.

۶-۳-۲-۲ پوشش‌ها

پوشش کابل‌ها با کاغذهای قیراندود و لایه‌های کنفی برای اعمال حفاظت کاتدی مناسب می‌باشد. کابل‌های با روکش سربی لخت در کانال‌های مرطوب را نیز می‌توان حفاظت نمود. در هر دو حالت اخیر، بدون استفاده از پتانسیل‌های خیلی منفی، می‌توان تا حدود ۲ km طول کابل از نقطه تزریق جریان را حفاظت نمود.

اعمال حفاظت کاتدی برای کابل‌های با غلاف پلاستیکی تزریقی و کاملاً سالم، معمولاً مورد نیاز نمی‌باشد، ولی در شرایطی که احتمال آسیب‌دیدگی در غلاف‌ها وجود داشته باشد، اعمال حفاظت کاتدی به‌صورت اقتصادی میسر است.

۶-۳-۲-۳ جداسازی

کاربرد حفاظت کاتدی برای غلاف‌های فلزی یا زره کابل‌های برق یا لوله‌های فولادی حاوی این کابل‌ها، ممکن است غیراقتصادی باشد، مگر اینکه فلز مورد حفاظت از سیستم اتصال زمین جدا شده باشد. در این‌صورت باید مسیر دفع جریان‌های مزاحم توسط اتصال غلاف به سیستم‌های اتصال زمینی در دو انتها به کمک یک پیل قطبی‌شدن دوباره برقرار شود. این پیل‌ها در هنگام بهره‌برداری عادی سیستم حفاظت کاتدی، فقط اجازه عبور برق یک‌سوی کمی را می‌دهند، به طوری‌که روی بهره‌برداری اغلب سیستم‌ها تأثیر نمی‌گذارد. در هر حال، سیستم می‌تواند تمامی جریان‌های متناوب را که در شرایط نامناسب ایجاد می‌شود با امپدانس کم عبور دهد. در صورتی‌که جداسازی و نصب اتصال زمین مجزا مورد نیاز باشد، می‌توان اتصالات ویژه برای قطع پیوستگی زره کابل را طراحی نمود.

۶-۳-۲-۴ نقاط آزمایش

نقاط اندازه‌گیری مانند خطوط لوله لازم می‌باشد (به بند ۶-۲-۱-۴ مراجعه شود).

۶-۳-۳ کاربرد حفاظت کاتدی

در مورد کابل‌های با غلاف سربی و زره فولادی، روش‌های گفته شده در بند ۶-۲-۲ عموماً قابل اجرا است و برای رفع مشکل مربوط به کاربرد حفاظت کاتدی به سازه‌های آلومینیوم، به بند ۴-۳-۲-۴ مراجعه شود. در مورد کابل‌های تلفن باید توجه داشت که موج‌های کوچک ناشی از جریان‌های یک‌سو شده، ممکن است پارازیت‌هایی را ایجاد نمایند که به حذف پارازیت‌ها نیاز باشد. البته در جریان‌های حفاظتی تا ۵ آمپر مشکلی بروز نمی‌کند.

۶-۴ کف مخازن فلزی و سازه‌های مشابه

۶-۴-۱ کلیات

مخازن بزرگ مانند مخازنی که در صنایع نفت استفاده می‌شود، اغلب روی پی خاکی برجسته نصب می‌شود. در این موارد، سطح پی را آسفالت (مخلوط قیر و ماسه) نموده و یا سطح خارجی کف (زیرین) مخزن را پوشش می‌نمایند.

در طول زمان بهره‌برداری، کف مخزن در معرض نشست و خمش قرار می‌گیرد، بنابراین لایه آسفالت آسیب می‌بیند و در نتیجه قسمت‌هایی از سطح خارجی کف مخزن با خاک تماس پیدا می‌کند. همچنین پوشش سطح خارجی کف مخزن در اثر عملیات جوشکاری ورق‌های کف مخزن آسیب می‌بیند و قسمت‌های آسیب دیده، با خاک تماس پیدا می‌کند. اگر مخزن روی خاک شور نصب شده باشد، در شرایطی که آب به کف مخزن برسد یا پی زیر مخزن با آب شور (آب دریا) در تماس باشد، در این حالت‌ها کف مخزن در تماس با محیط خورنده قرار خواهد گرفت، که برای تکمیل حفاظت سطح خارجی کف مخازن در محیط‌های خورنده، علاوه بر استفاده از آسفالت یا پوشش سطح خارجی کف مخازن، می‌توان از سیستم‌های حفاظت کاتدی استفاده نمود.

۶-۴-۲ آماده‌سازی سازه

عملیات احداث پی زیر مخازن باید به صورتی انجام گیرد که جریان‌های حفاظتی در کلیه نقاط سطح خارجی کف مخزن به طور یکنواخت توزیع شود. این بدان معنی است که در سطح پی نباید از قلوه سنگ یا سنگ ریزه استفاده کرد و سطح پی زیر مخزن باید به ضخامت حداقل ۱۵۰ میلی‌متر با خاک ریزدانه کوبیده شود. کف مخازن عموماً از ورق‌های فولادی و با جوشکاری لب به لب ساخته می‌شود که از نظر اتصال الکتریکی، یکنواختی لازم را دارد.

در مواردی که تعدادی مخزن با هم در سیستم حفاظت کاتدی قرار می‌گیرند، باید پیش‌بینی‌های لازم برای اتصال آنها به همدیگر صورت گرفته باشد. اگر طراحی به صورتی است که جریان‌های حفاظتی فقط محدود به مخازن باشد، باید در کلیه لوله‌کشی‌ها و اتصالات مرتبط به مخازن، حتی در اتصالات برقی و ابزار دقیق، از اتصالات عایق استفاده کرد. در صورت وجود مواد و مایعات قابل اشتعال در مخازن، اتصالات عایق باید در خارج از حریم[1] مخزن باشند (به فصل ۱۲-۷ رجوع شود). الکترودهای اتصال زمین مخازن باید از جنس روی، فولاد گالوانیزه یا فولاد ضدزنگ باشد.

۶-۴-۳ اجرای حفاظت کاتدی

در مورد مخازنی که سطح خارجی کف آنها بدون پوشش بوده و فقط روی لایه آسفالت کار گذاشته شده باشند، معمولاً شدت جریانی در حدود ۱۰ میلی‌آمپر بر مترمربع لازم است، که با توجه به مساحت زیاد کف مخزن، سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان ترجیح دارد. البته در مورد مخازن کوچک مجزا که روی خاک‌هایی با مقاومت الکتریکی پایین قرار گرفته باشند می‌توان از سیستم آندهای فدا شونده نیز استفاده نمود (مراجعه شود به ۶-۲-۱).

---

1 - Bund

بسترهای آندی تا حد امکان به صورت قرینه دور تا دور یک یا چند مخزن قرار داده می‌شود. با توجه به فضای موجود در اطراف مخازن، فاصله بسترهای آندی از پیرامون مخزن نباید کمتر از قطر یک مخزن قرار داده شود، تا توزیع جریان برای حفاظت کاتدی کف مخزن بهینه گردد. اگر فضای کافی موجود نباشد، باید تعدادی از آندها یا بسترهای آندی به‌طور یکنواخت در دور تا دور محیط توزیع شود و یا از بسترهای عمودی (چاهی) استفاده گردد (به ۶-۱-۳ مراجعه شود). در این‌صورت، به‌منظور توزیع مناسب جریان باید بالاترین آند داخل چاه، حداقل در عمق ۱۰ متری قرار داشته باشد.

در صورتی‌که در مخازن مواد و مایعات قابل اشتعال وجود داشته باشد، بهتر است بسترهای آندی در محوطه خارج از دیواره حریم مخازن قرار گیرد و اگر این کار امکان‌پذیر نبود، بسترهای آندی و کلیه اتصالات یا باید کلاً مدفون باشد یا اگر بالاتر از سطح زمین است مقررات مربوط به مناطق خطرناک در طبقه‌بندی کارهای برقی رعایت شود، که این عمل در مورد نقاط اتصال تخلیه منفی به مخزن نیز باید مراعات شود. اگر از بسترهای آندی چاهی استفاده شود، باید تمام لوله‌های فولادی جداره چاه، پایین‌تر از سطح زمین خاتمه یابد تا اطمینان به‌دست آید که امکان بروز خطرات ناشی از جرقه بین لوله جداره و سازه فلزی مورد حفاظت وجود ندارد.

۶-۴-۴ ملاحظات ویژه

معمولاً پتانسیل‌های سازه به خاک در نقاط مختلف سطح زیر مخزن حفاظت شده متفاوت بوده و لازم است پتانسیل‌های لبه مخزن از ۰/۸۵ – ولت (Off) نسبت به الکترود مس – سولفات مس بیشتر باشد، تا اطمینان به‌دست آید، که در نقاط مرکزی کف مخزن، پتانسیل لازم (۰/۸۵-) حاصل شده است. در سازه‌هایی که تازه بنا شده‌اند، در نقاط تعیین شده روی خاک خاکریز زیر مخزن، الکترودهای مرجع نصب می‌شوند. این الکترودها باید طوری کار گذاشته شوند که به مدتی‌طولانی در شرایط خوب عمل نموده و ضمناً مقادیر پتانسیل‌ها در پیرامون مخزن را در مقایسه با شرایط حفاظت کامل مرکز کف مخزن را بتوان تعیین نمود. در صورتی‌که الکترودهای مرجع نصب نشده باشند، باید میزان پتانسیل در لبه مخزن را در محدوده ۱/۱۰- تا ۱/۲۰- ولت (Off)نسبت به الکترود مس – سولفات مس که به‌طور تجربی پذیرفته شده است، در نظر گرفت. مخازنی که به مدت طولانی خالی می‌مانند، معمولاً تحت حفاظت کاتدی کامل قرار نمی‌گیرند زیرا زمانی که مخزن خالی است، کف آن به‌طور کامل در تماس با خاک نمی‌باشد.

در صورت تعویض کف مخازن، باید کف قدیمی را کاملاً جدا و خارج نمود و سطح خاکریز زیر مخزن را طبق بند ۶-۴-۲ اصلاح کرد.

۶-۵ سازه‌های مدفون در مجاورت سیستم‌های ریلی با برق یک‌سو

در اغلب سیستم‌های ریلی با برق یک‌سو، قطب منفی جریان dc به ریل‌ها وصل می‌شود که ممکن است این ریل‌ها با زمین اتصال داشته باشند. در این‌صورت، زمین به‌طور موازی با ریل‌ها مسیر دیگری برای برگشت جریان به منبع تغذیه برق می‌شود. در مورد لوله‌های فلزی یا کابل‌های دارای زره یا غلاف فلزی که در زمین مجاور ریل کار گذاشته شده‌اند، قسمتی از جریان

جاری در زمین ممکن است توسط لوله‌ها یا کابل‌ها در یک نقطه جذب و در نقطه دیگر تخلیه شود که در این نقطه به تشدید خوردگی منجر خواهد شد. نشتی جریان از یک سیستم ریلی با برق dc را می‌توان به دو روش زیر به حداقل رساند:

الف- بسترسازی ریل‌ها با یک عایق الکتریکی مناسب برای جداسازی ریل‌ها از زمین اطراف، و

ب - تأمین هدایت الکتریکی مناسب برای ریل‌ها با تأمین اتصال‌های کامل بین قطعات ریل‌ها و ارتباط عرضی مکرر بین ریل‌ها.

در سیستم‌های مجهز به ریل مجزا و عایق شده برای هدایت برگشت جریان، نشتی جریان قابل ملاحظه‌ای اتفاق نمی‌افتد.

با اتصال خط لوله یا غلاف و زره کابل به ریل برگشتی در نقاط منفی‌تر ریل، یعنی در نزدیکی ایستگاه‌های مبدل یا در محلی که سیم‌های منفی به ریل متصل شده‌اند، خوردگی را می‌توان کاهش داد. کابل اتصال، بخشی از جریان نشتی را که به ریل و سپس به نقطه ورودی جریان برمی‌گردد تخلیه می‌نماید. بدین ترتیب اطمینان به‌دست می‌آید که سازه یا به‌طور کامل و یا به‌طور نسبی حفاظت کاتدی می‌گردد. این نوع حفاظت کاتدی را تخلیه الکتریکی مستقیم می‌نامند. تخلیه الکتریکی مستقیم به علت احتمال معکوس شدن جریان در محل اتصال تخلیه در کلیه موارد کاربرد ندارد. برای این منظور، معمولاً از یک‌سوکننده (یا هر وسیله یک‌سوکننده دیگر) استفاده می‌کنند (مطابق شکل‌های ۱۲- الف و ۱۲- ب) این روش را تخلیه الکتریکی یک‌طرفه می‌نامند.

در برخی شرایط، ولتاژ ریل ممکن است به مقادیر نسبتاً زیادی برسد که در این‌صورت حفاظت یک‌سوکننده و مدار در برابر جریان‌های اضافی توسط کلید مینیاتوری یا فیوز ضروری می‌گردد. در هر حال با اضافه نمودن فیوز، بازرسی‌های بیشتری مورد نیاز می‌باشد که در این‌صورت، ممکن است نصب یک هشدار دهنده (آلارم) برای تشخیص خرابی فیوز ضروری گردد. همچنین ممکن است یک جرقه‌گیر (اسپارک‌گپ) نیز در مدار نصب شود. البته در صورتی که در نقاطی دیگر در سیستم‌های قطار برقی، جرقه‌گیرهایی وجود داشته باشد، نیاز به اضافه کردن آن نیست.

- ممکن است برای محدود کردن تخلیه جریان، تعبیه یک مقاومت[1] یا چوک[2] به‌صورت سری با یک‌سوکننده ضرورت داشته باشد. میزان مقاومت مورد نیاز در شرایط محلی برای به‌دست آوردن حفاظت کاتدی بهینه، با توجه به ولتاژ آستانه‌ای[3] که یک‌سوکننده می‌تواند هدایت کند، تعیین گردد.
- میزان حفاظت کاتدی اعمال شده به سازه‌های مدفون در مجاورت سیستم‌های ریلی برقی را می‌توان با قرار دادن یک اتصال تخلیه برقی قوی[4] در سیستم اتصال تخلیه یک‌سوکننده‌های حفاظت کاتدی متصل مستقل سیستم حفاظت کاتدی افزایش داد (شکل ۱۲- ج).

ممکن است برای محدود کردن خروجی[5] این یک‌سوکننده‌ها، از وسایلی مانند مبدل یا دستگاه‌های مشابه استفاده کرد. برای مشخص کردن[6] موقعیت قطار در مسیر حرکت روی تابلوهای مرکز کنترل، معمولاً بین ریل‌ها یک رله و یک منبع تغذیه برق

1 - Resistance
2 - Choke
3 - Threshold Voltage
4 - Forced
5 - Output
6 - Signalling

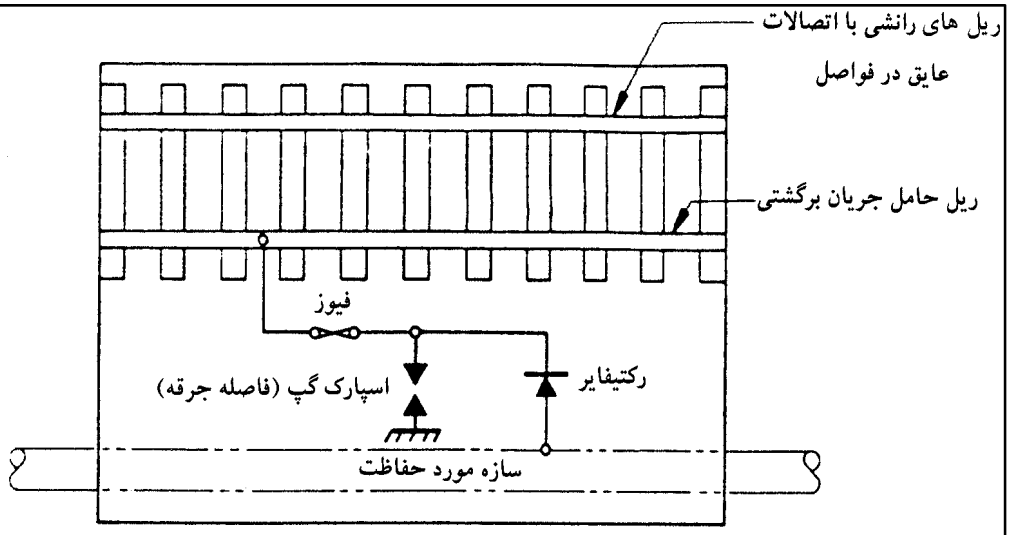
متصل شده است. این مجموعه را "مدار مسیر[1]" می‌گویند که دارای دو حالت مدار سیگنال دو ریلی و مدار سیگنال تک‌ریلی می‌باشد. در نوع مدار سیگنال تک‌ریلی، در یکی از ریل‌ها از اتصالات عایق شده در دو انتهای هر قطعه سیگنال استفاده شده و برگشت جریان از طریق ریل دیگر هدایت می‌گردد. در مدار سیگنال دو ریلی، از اتصال امپدانسی متصل به دو سر مدار مسیر استفاده می‌شود تا از عبور جریان سیگنال در بین ریل‌ها جلوگیری شود. در این حالت، برگشت جریان در هر دو ریل جریان دارد، مانند حالتی که در آن مدار مسیر وجود نداشته باشد.

بدون توجه به نوع سیستم تخلیه به‌کار رفته، اگر مدار مسیری وجود نداشته باشد، اتصال تخلیه به یک یا هر دو ریل وصل می‌گردد. اگر مدار مسیر تک ریلی به‌کار رفته باشد، اتصال تخلیه فقط به ریل برگشت جریان وصل می‌گردد و اگر مدار مسیر دو ریلی به‌کار رفته باشد، اتصال تخلیه به نقطه انشعاب مرکزی اتصال امپدانسی متصل می‌گردد.

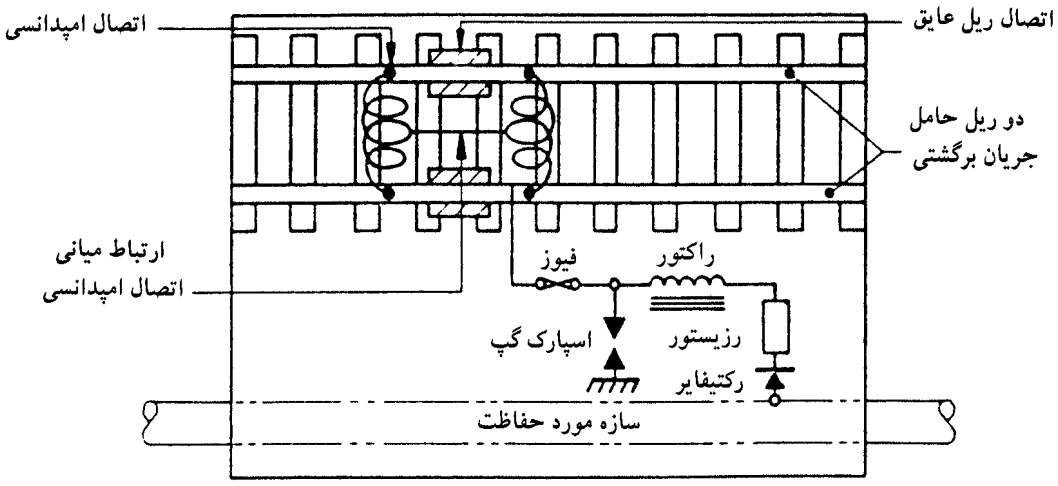
بدیهی است که برای استفاده از اتصالات بالا، باید با مسئولین راه‌آهن هماهنگی لازم به عمل آید. در شکل (۱۲– الف) چگونگی اتصال در حالت مدار مسیر یک ریلی نشان داده شده است و در شکل (۱۲– ب) چگونگی اتصال در حالت مدار مسیر دو ریلی و در شکل (۱۲– ج) چگونگی اتصال در حالت بدون مدار مسیر نشان داده شده است.

برای جلوگیری از تداخل در سیستم‌های کنترل از راه دور و سیستم‌های هشدار دهنده قطارها، نباید در هیچ شرایطی، بدون مشورت و دریافت مجوز کتبی مسئولین راه‌آهن، اتصالی را به ریل انجام داد.

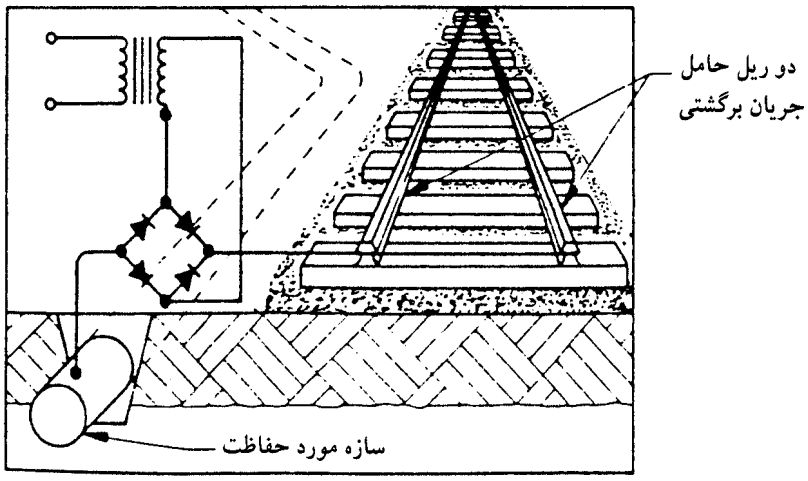
1 - Track Circult



الف - تخلیه یک سو بارزیستور در مدار سیستم ریلی برقی dc مجهز به مدار مسیر تک ریلی



ب - تخلیه یک سو بارزیستور وراکتوردر مدار سیستم ریلی برقی dc مجهز به مدار مسیر دو ریلی



ج - جریان تخلیه اجباری بر روی سیستم ریلی برقی dc بدون مدار مسیر و مجهز به رکتیفایر مکمل

شکل ۱۲- سیستم تخلیه الکتریکی تیپ برای سیستم ریلی dc

۷- سازه‌های غوطه‌ور (غیر از کاربردهای دریایی[1])

۷-۱ کلیات

این بخش با بخش ۵ در ارتباط بوده و به حفاظت کاتدی سازه‌های غوطه‌ور از قبیل: اسکله‌های با شمع‌های فولادی[2]، لنگرگاه‌ها[3] و مهاربندهای پهلوگیری کشتی[4]، سپرکوبی فولادی[5] و راهنمای شناورها[6] می‌پردازد.

۷-۱-۱ آماده سازی سازه

۷-۱-۱-۱ پیوستگی الکتریکی

به دلایلی که در بند ۵-۳-۱ بیان شد، سازه‌های مورد حفاظت باید دارای پیوستگی الکتریکی باشند. اتصال الکتریکی[7] شمع‌های فولادی در صورت امکان با کل سازه، باید به‌صورت یکپارچه طراحی گردد. سیستم اتصال الکتریکی ممکن است شامل میله‌های فولادی با اندازه‌های مناسب باشد تا در داخل دال بتنی عرشه[8] اسکله کار گذاشته شده و یا به صورت یک سیستم خارجی به‌کار رود. در مواردی که دو قسمت سازه دارای حرکت نسبی است (مانند ضربه گیرها[9] و اتصالات انبساطی[10])، اتصال‌های الکتریکی باید قابل ارتجاع باشند.

سازه‌های پرت و دور افتاده از سازه اصلی، مانند مهار بندهای پهلوگیر کشتی را می‌توان با استفاده از کابل‌های زیر دریایی با اندازه مناسب به سیستم اصلی متصل نمود.

۷-۱-۱-۲ پوشش‌های حفاظتی

در مورد پوشش‌ها و نقش آنها، در بخش ۵-۳-۲ توضیح داده شده است. هزینه پوشش‌هایی که روی شمع‌ها و سازه‌های مشابه اعمال می‌شود، با کاهش هزینه حفاظت کاتدی جبران می‌گردد. لازم به یادآوری است که هزینه اعمال سیستم‌های حفاظت کاتدی به سازه‌های لخت و بدون پوشش بسیار زیاد می‌باشد. مقایسه اقتصادی گزینه‌های مختلف پوشش‌ها، اقدام ارزشمندی است.

---

1 - Off- Shore Application
2 - Steel Pile Jetties
3 - Moorings
4 - Berthing Dolphins
5 - Sheet Steel Piling
6 - Buoys
7 - Bonding
8 - Deck Slabbing
9 - Fenders
10 - Expansion Joints

حفاظت کاتدی معمولاً از میانگین سطح جزر و مد به پایین مؤثر است، و در بالاتر از این، یعنی در محدوده متأثر از مد و پاشش آب، باید راه حل‌های دیگری برای کاهش خوردگی به کار گرفته شود. این راه حل‌ها ممکن است شامل استفاده از پوشش‌های خاص مقاوم یا اجرای روکش‌هایی[1] از فلزات مقاوم در برابر خوردگی روی این قسمت‌ها باشد.

۷-۱-۱-۳ جداسازی الکتریکی

جدا ساختن الکتریکی سازه‌هایی که قرار است تحت حفاظت کاتدی قرار گیرند، از سایر سازه‌های مجاور ممکن است ضروری‌تر باشد. اتصالات جدا کننده (عایق‌ساز) ممکن است در انتهای سمت ساحل کلیه خط لوله‌ها و در ابتدای اسکله قرار داده شود تا از برقراری جریان الکتریکی به تأسیسات ساحلی (کنار دریا) جلوگیری شود.

همان‌طورکه در بند ۵-۳-۳ آمده، برای جلوگیری از خوردگی سریع سازه‌هایی که در برنامه حفاظت کاتدی قرار ندارند باید تمهیداتی صورت پذیرد. همچنین ممکن است به دلایل ایمنی و برای قطع پیوستگی الکتریکی بازوهای بارگیری با سیم‌های فولادی داخل شلنگ‌های قابل انعطاف (لوله‌های خرطومی) روی اسکله‌ها، اتصالات جدا کننده (عایق ساز) مورد نیاز باشد (به بند ۱۲-۷ رجوع شود).

۷-۱-۲ کاربرد حفاظت کاتدی

۷-۱-۲-۱ چگالی جریان

سازه‌هایی از قبیل شمع‌های فولادی لخت (بدون پوشش) در آب‌های آزاد دریا که مقاومت الکتریکی ویژه آن در حدود ۲۵ اهم سانتی‌متر است، نیازمند چگالی جریان اولیه‌ای در حدود ۱۰۰ میلی‌آمپر بر متر مربع (برای سطوح فولادی لخت و کاملاً خیس) می‌باشد. این مقدار جریان احتمالاً در مدت زمان طولانی، به علت تشکیل رسوبات آهکی به مقادیری بین ۳۰-۷۰ میلی‌آمپر بر متر مربع کاهش می‌یابد (به بند ۵-۷-۱ ب رجوع شود). قسمت فرو رفته شمع‌ها در بستر دریا با توجه به محیط اطرافشان، معمولاً نیازمند جریانی بین ۱۰-۳۰ میلی‌آمپر بر متر مربع می‌باشد. عوامل اصلی که روی مقدار چگالی جریان مورد نیاز تأثیر می‌گذارند عبارتند از: سرعت حرکت آب، میزان شوری و دمای آب در خورها[2] یا مصب‌ها. به علت حرکت آب، ممکن است به چگالی جریان بیشتری نیاز باشد. رقیق شدن آب توسط جریان آب تازه ممکن است سبب ایجاد نوسانات گسترده‌ای در توان مورد نیاز شده و در این شرایط ممکن است استفاده از کنترل خودکار مورد نیاز باشد (به بند ۵-۵-۵ رجوع شود). این نوسانات به استفاده غیر اقتصادی از جریان حفاظتی منجر می‌شود، و در مواردی که از سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان استفاده می‌گردد، ممکن است به تحمیل بار اضافی[3] به یک‌سوکننده‌ها منجر شود؛ مگر اینکه تجهیزات به صورت مطلوب حفاظت شده باشد. این مشکل با لایه‌بندی آب‌ها با درجه‌های مختلف شوری که ممکن است توزیع جریان را تغییر دهد، شدت می‌یابد. اگر شمع‌های فولادی تا زیر تراز متوسط آب پوشش داشته باشد، جریان حفاظتی مورد نیاز به مقدار قابل

1 - Claddings
2 - Estuarine
3 - Overloading

توجهی کاهش می‌یابد، که مقدار آن به نوع پوشش اعمال شده و آسیب‌های وارده به پوشش در عملیات شمع کوبی بستگی دارد. مثلاً با اعمال پوشش اپوکسی قطران ذغال‌سنگ[1] به ضخامت ۰/۲ میلی‌متر روی شمع‌های فولادی استوانه‌ای‌شکل، می‌توان حفاظت کاتدی کاملی برای قسمت‌های خیس و مدفون با چگالی جریان حدود ۵ میلی‌آمپر بر متر مربع به‌دست آورد. در عمل، معمولاً پوشش‌های ضخیم‌تر به کار می‌روند، اما باید دانست که پوشش‌ها با گذشت زمان فرسوده شده و کارایی خود را از دست می‌دهند که این فرآیند، با فعالیت موجودات دریایی عموماً شدت می‌یابد. برای غلبه بر این شرایط باید حفاظت کاتدی با جریان بیشتری در نظر گرفته شود.

در صورت اتصال اجزای غیر آهنی غوطه‌ور مانند مس یا برنز به سازه فولادی، چگالی متوسط جریانی بیش از آنچه پیش‌بینی می‌شود مورد نیاز خواهد بود. در این حالت، برای اطمینان از رسیدن پتانسیل حفاظتی کافی به کلیه قسمت‌های فولادی، باید اندازه‌گیری پتانسیل در نقاط مختلف انجام گیرد.

۷-۱-۲-۲ به‌کارگیری انواع سیستم‌های حفاظت کاتدی

انتخاب نوع سیستم حفاظت کاتدی، عمدتاً با توجه به جریان کل مورد نیاز صورت می‌گیرد. در مورد تأسیسات ویژه ممکن است ملاحظات دیگری مد نظر باشد، ولی جریان‌های پایین را معمولاً به‌وسیله آندهای فدا شونده و جریان‌های بالا را توسط سیستم‌های با اعمال جریان می‌توان تأمین نمود. چنانچه منبع جریان متناوب (ac) در دسترس باشد، عموماً روش دوم مناسب‌تر است ولی در مورد تأسیسات کوچک اقتصادی نمی‌باشد.

۷-۱-۲-۳ سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده

آندهای فدا شونده، معمولاً برای سازه‌های پوششدار به کار می‌روند. اطلاعات مربوط به جنس آندهای فدا شونده در بند ۵-۴-۳ آمده است. آندهای روی و آلومینیوم را می‌توان مستقیماً به سازه متصل کرد، زیرا پتانسیل‌های محرک پایین آنها معمولاً باعث از بین رفتن پوشش نمی‌گردد (به بند ۵-۷-۱ رجوع شود).

مغزی اتصال آندها ممکن است قبل از غوطه‌ورسازی سازه، به وسیله پیچ، جوش یا ترکیبی از این دو به سازه متصل شود. جوشکاری نسبت به اتصال پیچی مطمئن‌تر است، اما اگر روش دوم به‌کار می‌رود، باید برای اطمینان از اتصال الکتریکی مناسب، دقت لازم به عمل آید. با به‌کار بردن بست‌های دو زبانه می‌توان مغزی آندها را به‌وسیله پیچ به سازه متصل نمود. در این روش، تعویض آندها به آسانی صورت گرفته و تمامی مواد فعال آند نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (به شکل ۹ قسمت هـ ، و- بند ۵-۴ رجوع شود).

آندهای منیزیم را معمولاً در فاصله معینی از سطح سازه قرار می‌دهند، زیرا در صورت اتصال مستقیم، پتانسیل‌های منفی زیادی ایجاد می‌شود که سبب از بین رفتن پوشش می‌گردد (به بند ۵-۷-۱ رجوع شود).

---

1 - Coal-tar epoxy

به طوری‌که در شکل (۸) نشان داده شده (به بند ۵-۴ رجوع شود)، ممکن است کابل اتصال از طریق یک جعبه اتصال[1] وصل شود. در صورتی‌که پتانسیل سازه - الکترولیت خیلی منفی باشد، می‌توان مقاومتی در مسیر قرار داد، تا عمر آند را طولانی نماید. آندهای منیزیم جریان خروجی بیشتری نسبت به سایرآندهای فدا شونده تولید می‌کنند ولی در ابعاد مساوی عمر آنها کمتر است.

برای اجتناب از انجام کارهای زیر آبی (غواصی) روی سازه‌های موجود، آندها را می‌توان به میله‌های فولادی جوش داده و در نقطه‌ای بالای سطح آب به سازه متصل نمود. این روش سبب تسهیل عملیات تعویض آندها در مواقع لازم، می‌گردد. اگر رابطی برای اندازه‌گیری جریان تعبیه نشده باشد، ضرورت تعویض آند معمولاً بر اساس اندازه‌گیری‌های پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت مشخص می‌گردد، در صورت نیاز به اطلاعات تکمیلی، بازرسی آندها توسط غواص انجام می‌شود.

۷-۱-۲-۴ سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان

در صورت دسترسی به جریان متناوب (ac)، همان‌طوری‌که در بند ۵-۵-۴ شرح داده شد، معمولاً از مبدل یک‌سوکننده (ترانسفورمر رکتیفایر) به عنوان منشاء جریان مستقیم استفاده می‌شود. در برخی موارد ممکن است کنترل خودکار (اتوماتیک) مورد نیاز باشد (به بند ۵-۵-۵ رجوع شود). مشخصات جنس آندهای مورد استفاده در سیستم‌های با اعمال جریان در بند ۵-۵-۲-۱ آمده است. معمولاً برای حفاظت سازه‌های غوطه‌ور که در محیط‌های با مقاومت الکترولیتی پایین قرار دارند، از آندهایی با توانایی کار در چگالی جریان بالا استفاده می‌شود، در بعضی موارد، ممکن است از بسترهای آندی مستقر در خشکی برای حفاظت سازه‌های غوطه‌ور استفاده شود (به بندهای ۵-۵-۲ و ۶-۱-۳ رجوع شود).

آندهای با اعمال جریان، معمولاً در فاصله‌ای از کف دریا قرار داده می‌شوند و توصیه می‌گردد که تمهیداتی برای بالا آوردن آسان آنها به منظور بازرسی و تعمیرات فراهم شود. لازم است که از خوردگی اتصالات بین کابل‌ها و آندها جلوگیری گردد، زیرا این پدیده می‌تواند باعث عدم کارایی سیستم حفاظت کاتدی شود. نقطه اتصال سیم کاتد به سازه مورد حفاظت ممکن است در اغلب موارد در مناطقی که متاثر از مد و پاشش آب است انتخاب شود؛ در این صورت این نقاط اتصال نیز به پوشش نیاز خواهند داشت. در مورد اسکله‌ها، اغلب به جای آنکه از یک یا دو بستر آندی بزرگ زمینی و دور از سازه استفاده شود، بهتر است از تعداد بیشتری آند که در فواصل میان شمع‌ها توزیع می‌شوند، استفاده گردد. سیستم‌های حفاظت کاتدی با آندهای توزیع شده، پتانسیل‌های یکنواخت‌تری در شمع‌های فولادی ایجاد می‌نمایند، و آثار تداخلی[2] کمتری با سازه‌های مجاور دارند.

حفاظت سپرهای فولادی معمولاً به بسترهای آندی زمینی با سیستم‌های آندی مجزا برای سطوح رو به خشکی و رو به دریا نیاز دارند. برای تعیین جریان کل حفاظتی باید مساحت کل سپرهای فولادی، میله‌های رابط و مهاربندها در نظر گرفته شود. آندها باید طوری توزیع شوند که از برقراری پتانسیل حفاظتی یکنواخت اطمینان حاصل شود. برای تنظیم جریان یکنواخت، در صورت لزوم، می‌توان از کار گذاشتن مقاومت‌های الکتریکی در نقاط مناسب، یا از کابل‌های آند و کاتد با اندازه‌های مختلف استفاده نمود.

---

1 - Link- Box
2 - Interaction

۷-۱-۳ آثار تداخلی سازه با کشتی‌ها

در بعضی موارد، برای کشتی‌هایی که به مدت طولانی در کنار یک سازه حفاظت کاتدی شده توقف می‌کنند، ممکن است اتصال الکتریکی قابل انعطاف ضروری باشد، تا بدنه آنها نیز حفاظت شده و از آثار تداخلی جلوگیری گردد (به بند ۱۱-۴ رجوع شود). در طراحی حفاظت کاتدی تأسیسات، باید این جریان اضافی را نیز در نظر گرفت. بیان این نکته ضروری است که تغییر مکان کشتی روی جریان حفاظتی مورد نیاز، تأثیر گذاشته و باید دقت شود که ترک کشتی از اسکله، به حفاظت اضافی[1] و وارد شدن خسارت به پوشش حفاظتی شمع‌های فولادی اسکله منجر نشود (به بند ۵-۷-۱ رجوع شود).

در مورد کشتی‌های با محموله‌های قابل احتراق و قابل انفجار، اتصال الکتریکی بین کشتی و تأسیسات ساحلی پیشنهاد نمی‌گردد (به بند ۱۲-۷ رجوع شود).

1 - Overprotection

۸- حفاظت سطوح داخلی تجهیزات صنعتی حاوی الکترولیت

۸-۱ کلیات

در این بخش، به ملاحظاتی چند در خصوص کاربرد حفاظت کاتدی برای سطوح داخلی تجهیزات صنعتی حاوی الکترولیت (محیط خورنده) پرداخته شده و نیز در مورد مخازن ذخیره (به بند ۸-۲ مراجعه شود)، سیستم‌های آب چرخشی[1] (به بند ۸-۳ مراجعه شود) و سایر تجهیزات واحدهای صنعتی توصیه‌هایی خاص ارائه گردیده است. این بخش در ارتباط با بخش ۵ می‌باشد.

۸-۱-۱ عوامل مؤثر در طراحی

در نصب سیستم حفاظت کاتدی در مکان‌های محدود، معمولاً فاصله کافی بین آند و سطوح مورد حفاظت برای اعمال توزیع یکنواخت جریان الکتریکی وجود ندارد. به همین دلیل و در مقایسه با سایر کاربردها، آندها بیشتر به صورت موضعی عمل می‌کنند. مورد بالا، خصوصاً در شرایطی که اجرای پوشش‌های حفاظتی غیر اقتصادی باشد (که غالباً نیز همین‌طور است) مطرح می‌شود، بنابراین تعیین محل و نصب دقیق آندها بسیار مهم است. آندها باید در نزدیکی نقاطی که خوردگی جدی یا احتمال وقوع آن وجود دارد تعبیه شوند. عوامل مؤثر در شروع واکنش‌های خوردگی و نیز چگالی جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی عبارتند از: ماهیت و شرایط الکترولیت (مانند اکسیژن موجود در محیط، دما، مقاومت الکتریکی، سرعت حرکت الکترولیت) و همچنین استفاده از فلزات غیر آهنی در ساخت تجهیزات و تأسیسات (به بند ۸-۳ مراجعه شود). در مواردی که شرایط متغیر باشد، از وسایل کنترل خودکار (اتوماتیک) استفاده می‌شود.

باید توجه شود که اغلب معیارهای تعیین شده در سایر بخش‌های این راهنما، مربوط به آب‌های تقریباً خالص و یا شور[2] در دماهای عادی است، و طبعاً ممکن است در بعضی از تأسیسات صنعتی کاربرد نداشته باشد.

در برخی موارد، به علت امکان تجمع گازهای هیدروژن یا کلر حاصل از واکنش‌های الکتروشیمیایی، ممکن است تمهیدات دیگری مورد نیاز باشد (به بند ۱۲-۶ رجوع شود).

۸-۱-۲ آندهای فدا شونده

مشخصات آندهای فدا شونده همراه با اشاراتی از اصول طراحی در بند ۵-۴ آمده است. در محیط‌های بدون یون کلر، فلز روی در دماهای بالاتر از ۶۰ °C میل ترکیبی کم‌تری[3] از فولاد دارد، به‌علاوه ممکن است در دماهای بالاتر از ۴۰ °C در برابر حملات مرز دانه‌ای[4] آسیب ببیند، بنابراین استفاده از روی در دماهای بالا مجاز نمی‌باشد.

---

1 - Water Circulation
2 - Saline Water
3 - More nabel
4 - Intergranular

آندها باید طوری طراحی شوند که با ابعاد و شکل هندسی تجهیزات مورد حفاظت تناسب داشته باشند. در شکل (۹) چند نوع آند فدا شونده مناسب برای بعضی تجهیزات نشان داده شده است (به بند ۵-۴ رجوع شود). آرایش و نصب این آندها در بخش‌های دیگر این راهنما تشریح شده است.

۸-۱-۳ سیستم‌های با اعمال جریان

مشخصات آندهایی که در سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان به کار می‌روند، در بند ۵-۵-۲-۱ آمده است. طرح و پیکربندی[1] آندها یکی از عوامل مؤثر در چگونگی نصب آنها است. در خصوص تجهیزات کاملاً بسته (به‌جز مخازن بدون سقف) معمول‌ترین آندها، آندهایی به شکل کنسول[2] و از جنس تیتانیوم با روکش پلاتین می‌باشند. مزیت آندهایی که به‌صورت کنسول نصب می‌شوند، سهولت جایگزینی آنهاست. چنانچه تیتانیوم فقط در طولی در نزدیکی نوک آند با پلاتین روکش شده باشد، می‌توان بین سطح مورد حفاظت و قسمت مؤثر آند جدا سازی فراهم ساخت.

تجهیزات مورد نیاز برای تأمین برق در بند ۵-۵-۴ تشریح شده است. کنترل جریان در هر مدار آندی باید صورت گیرد و در برخی شرایط ممکن است کنترل خودکار (اتوماتیک) نیز مورد نیاز باشد (به بند ۵-۵-۵ مراجعه شود). در مواردی که حفاظت کاتدی برای حفاظت سطوح داخلی تجهیزات عمل می‌نماید، امکان متأثر شدن سازه‌های مجاور در اثر تداخل خوردگی بعید می‌باشد، زیرا جریان‌های حفاظتی فقط در سطوح داخلی تجهیزات وجود دارد.

۸-۱-۴ ارزیابی میزان حفاظت

آندهای فدا شونده اصولاً توسط جوشکاری یا پیچ و مهره به سازه متصل می‌گردند، و معمولاً اندازه‌گیری جریان خروجی آنها مقدور نیست، ولی اندازه‌گیری پتانسیل به روش‌های زیر میسر خواهد بود. در مورد تجهیزات کوچک موجود در واحدهای صنعتی، میزان مؤثر بودن حفاظت کاتدی را می‌توان با انجام بازرسی سطوح داخلی و کاهش وزن آند برآورد نمود. همچنین با انجام بازرسی فنی باید کنترل شود که محصولات خوردگی[3] تجمع پیدا نکند زیرا این تجمع ممکن است در عبور جریان آب تأثیر گذارد و یا موجب تشدید خوردگی گردد. انجام بازرسی خصوصاً در مورد تجهیزات و تأسیساتی که مستمراً با آب شستشو[4] نمی‌شوند و معمولاً برای حفاظت آنها از آندهای منیزیمی استفاده می‌شود مطرح است. در سیستم‌های با اعمال جریان، برای استمرار عملکرد صحیح سیستم در طول دوره بهره‌برداری پیش‌بینی الکترودهای مرجع دارای اهمیت است (به بند ۱۲-۳-۴ رجوع شود). تعبیه الکترودهای مرجع دائمی برای کنترل خودکار (اتوماتیک) ضروری است (به بند ۵-۵-۵ مراجعه شود).

---

1 - Configuration
2 - Contilever
3 - Corrosion Product
4 - Flush

۸-۲ مخازن

۸-۲-۱ مخازن آب

سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان، معمولاً برای محافظت مخازن بزرگ آب مانند برج‌های مرتفع آب، مخازن ذخیره آب دریا در پالایشگاه‌ها، مخازن آب تغذیه دیگ‌های بخار و مخازن آب رودخانه در نیروگاه‌ها مورد استفاده می‌باشد. در مخازن بدون سقف، آندها از جنس آهن پر سیلیس، تیتانیوم پلاتینی شده یا سرب می‌باشد (البته در صورتی که سمی بودن سرب در این کاربردها دارای اهمیت نباشد). این آندها را به کمک تعداد کافی تکیه‌گاه به‌صورت معلق کار می‌گذارند. در روشی دیگر، می‌توان بدنه مخزن را سوراخ نموده آندها و الکترودهای مرجع را روی دیواره مخزن جاسازی کرد. آندها باید به طریقی توزیع شوند که بهترین موقعیت را برای توزیع یکنواخت جریان داشته باشند؛ یعنی در جاهایی که فاصله آن از کف و دیواره‌های مخزن تقریباً مساوی است نصب گردند تا از رسیدن جریان الکتریکی به گوشه‌ها اطمینان حاصل شود.

در مواردی خاص که مقاومت الکتریکی آب بسیار بالا باشد (مانند مخازن آب تغذیه دیگ‌های بخار)، استفاده از آندهای پیوسته (یکپارچه[1]) از جنس تیتانیوم پلاتینی شده با مغزی مسی مناسب‌تر است. در آب‌های با مقاومت بالا، لازم است از آندهای با طول بیشتر استفاده شود تا توزیع جریان مناسبی به وجود آورد. در مواردی که از آندهای فدا شونده استفاده می‌شود، معمولاً آنها را مستقیماً به سطح فلز مورد حفاظت می‌چسبانند. در حوالی تراز آب[2] که تحت تأثیر اختلاف دمش زیاد هوا[3] قرار دارد، معمولاً حداکثر میزان خوردگی وجود دارد. معمولاً آندها را ۶۰ سانتی‌متر پایین‌تر از حداقل تراز آب نصب می‌کنند. در مورد مخازن آب آشامیدنی خانگی، جریان الکتریکی مورد نیاز را فقط با یک آند منیزیمی می‌توان تأمین نمود.

۸-۲-۲ مخازن ذخیره مواد شیمیایی

در تأسیسات مورد حفاظت کاتدی، ممکن است مخازنی از قبیل: مخزن آب‌نمک، مخزن اسید یا مخازن مقاوم در برابر الکترولیت‌ها وجود داشته باشد. روش حفاظت کاتدی مخازن حاوی مواد شیمیایی، مشابه مخازن آب است. در مورد انتخاب جنس آند در این کاربردها باید دقت شود که با مواد شیمیایی داخل مخزن واکنش ایجاد ننماید. در این مخازن، معمولاً آندهای فدا شونده مناسب نمی‌باشند، و اغلب آندهایی از جنس تیتانیوم پلاتینی شده همراه با سیستم اعمال جریان استفاده می‌گردد. معیارهای[4] پتانسیل حفاظتی که در بند ۴-۳-۲ آمده لزوماً کاربرد ندارد.

توجه: گزینه دیگر برای حفاظت از تجهیزات شیمیایی، استفاده از سیستم‌های حفاظت آندی[5] است. در این روش، با مثبت‌تر کردن پتانسیل فلز- الکترولیت، یک لایه اکسیدی با ثبات روی سطح فلز مورد حفاظت ایجاد می‌گردد. کاربرد این روش، عمدتاً برای حفاظت تجهیزاتی از جنس تیتانیوم و فولادهای ضد زنگ است.

---

1 - Continous Anodes
2 - Water Line
3 - Differential Aeration
4 - Criteria
5 - Anodic Protection

۸-۳ سیستم‌های آب چرخشی[1]

۸-۳-۱ کلیات

تجهیزات سیستم‌های آب چرخشی، معمولاً از جنس چدن (به مطالب مندرج در تذکر این بند مراجعه شود) یا فولاد ساخته می‌شود و در مواردی که در شرایط سخت عملیاتی از جمله سایش[2] مکانیکی، خورندگی دماهای بالا، یا مواد خنک‌کننده شیمیایی با خاصیت خورندگی قوی قرار نداشته باشد، افزایش جزیی ضخامت جداره قطعات معمولاً عمر قابل قبولی را تأمین می‌کند. در مورد چدن، با توجه به تکنولوژی ریخته‌گری معمولاً ضخامت قطعات بالا است، بنابراین توجیه اقتصادی کمی برای حفاظت آنها وجود دارد.

در سیستم‌هایی که از چند نوع فلز مختلف ساخته شده‌اند، به علت واکنش‌های گالوانیک بین انواع فلزات یا آلیاژهای به‌کار رفته، ممکن است میزان خوردگی به صورت موضعی بالا باشد. معمولاً اجزای آهنی به‌عنوان آند عمل نموده و خورده می‌شوند. این فرایند، در صورتی که اکسیژن محلول در آب زیاد بوده و یا سرعت آب زیاد باشد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ در این موارد، حفاظت مبدل‌های حرارتی بزرگ یا خنک‌کننده‌ها[3] توجیه اقتصادی بیشتری دارند. جزییات بیشتر در بندهای ۸-۳-۲ و ۸-۳-۳ آمده است.

وجود برخی مشکلات در اعمال سیستم‌های حفاظت کاتدی، مانع از تعمیم مزایای نصب سیستم‌های مذکور در داخل سایر تجهیزات یک واحد می‌گردد، حتی در صورت وجود چند نوع فلز که سبب افزایش قابل توجه خوردگی می‌گردد، استفاده از حفاظت کاتدی برای جلوگیری از خوردگی عملی نیست و مبانی طراحی مطمئن برای این موارد نیز وجود ندارد. مثلاً در مورد تلمبه‌ها، حتی با استفاده از سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان، نصب آند کافی برای تأمین جریان حفاظتی نسبتاً بالای مورد نیاز مشکل می‌باشد، به ویژه نصب آند در نقاطی که واکنش گالوانیک ممکن است رخ دهد بدون آنکه بر جریان آب تأثیر گذاشته و اختلال ایجاد نماید. همچنین در خصوص شیرآلات، باید در مورد محل نصب آندها با توجه به اینکه در دوره بهره‌برداری، شیر به چه نسبتی در وضعیت باز یا بسته قرار دارد، دقت کافی به عمل آید تا اطمینان به‌دست آید که جریان حفاظتی به قسمت‌هایی از سطوح که در معرض خوردگی شدید می‌باشند برسد. چنانچه آب به مدتی طولانی راکد باشد، ضروری است که برای جلوگیری از تجمع گاز کلر آزاد شده در مجاورت آندها، در نقاطی از سیستم تمهیداتی صورت پذیرد.

تذکر: در چدن‌ها، خوردگی گرافیتی[4] رخ می‌دهد، به طوری‌که آهن موجود در آن خورده شده و گرافیت باقی می‌ماند. این موضوع در ماهیت حفاظت کاتدی تغییری به‌وجود نمی‌آورد ولی به‌دلیل الکتروپوزیتیو بودن لایه گرافیت ممکن است چگالی جریان مورد نیاز افزایش یابد.

---

1 - Water Circulating System
2 - Erosion
3 - Coolers
4 - Graphitic corrosion Graphitic corrosion

۸-۳-۲ مبدل‌های حرارتی (لوله و پوسته[1])

۸-۳-۲-۱ کلیات

مبدل‌های حرارتی، عموماً از یک محفظه آب[2] از جنس چدن، با صفحه نگهدارنده لوله‌ها[3] و تعدادی لوله از جنس آلیاژهای با پایه مسی[4] تشکیل شده‌اند. در چنین مواردی، قسمت‌های چدنی خورده می‌شوند. میزان خوردگی با افزایش فاصله از قسمت‌های مسی کاهش می‌یابد، حملات موضعی[5] شدید با نفوذ عمیق در بخش‌های چدنی مجاور صفحه نگهدارنده لوله‌ها ممکن است رخ دهد. صفحه‌های نگهدارنده غیرآهنی و لبه‌های لوله‌ها ممکن است در اثر جریان متلاطم آب[6] و خوردگی سایشی[7] مورد حمله قرار گیرند. حفاظت کاتدی می‌تواند میزان خوردگی را کاهش دهد. دیده شده است که پوشش‌کاری محفظه آب و یا جایگزینی آن با مواد غیر فلزی و حذف سیستم حفاظت کاتدی در این محفظه که قبلاً وجود داشته، به تسریع حملات در لبه‌های لوله‌ها منجر گردیده است. در این موارد، برای حفاظت صفحه نگهدارنده و لبه لوله‌ها باید گزینه دیگری مد نظر قرار گیرد، مثلاً با نصب آندهای فدا شونده (به بند ۸-۳-۲-۳ رجوع شود).

در سیستم آب چرخشی، سرعت جریان آب معمولاً بیشتر از سازه‌های غوطه‌ور است، و نیز حضور فلزات الکتروپوزیتیوتر از آهن، جریان الکتریکی مورد نیاز برای حفاظت را افزایش می‌دهد. برای راهنمایی کلی به‌منظور تعیین مقدار جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی مبدل‌های حرارتی (کندانسورها و خنک‌کننده‌ها)، بر حسب تجربه ۲ آمپر بر متر مربع به ازای سطح کلی صفحه نگه‌دارنده لوله‌ها لازم می‌باشد.

جریان حفاظتی را می‌توان توسط آندهای فدا شونده و یا سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان تأمین نمود. عوامل مؤثر در انتخاب سیستم مناسب که قبلاً اشاره شده است (به بند ۵-۶ رجوع شود) عبارتند از: مقدار جریان مورد نیاز، امکان دسترسی به منبع جریان، خطرات احتمالی و قابلیت دسترسی به قطعات جهت تعمیر و نگهداری، سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان، با توجه به اینکه مقدار جریان لازم جهت حفاظت کافی را می‌توان در تمام مدت به‌صورت دستی یا اتوماتیک تنظیم نمود ارجحیت دارد (فارغ از تغییر در مشخصات شیمیایی یا میزان جریان آب خنک‌کننده).

آندهای فدا شونده را معمولاً نمی‌توان کاملاً تنظیم نمود و نیز باید مرتباً جایگزین گردند. در کندانسورهای بزرگ نیروگاه‌ها، تعویض و جایگزینی آندها نه تنها مستلزم صرف هزینه است بلکه مشکلات جانبی نیز در پی دارد. به طور کلی، آندهای فدا شونده برای سیستم‌های کوچک‌تر مناسب‌تر است، به خصوص اگر خارج نمودن دوره‌ای این سیستم از سرویس[8] مجال انجام بازرسی فنی و تعویض آندها را فراهم سازد. آندهای فدا شونده همچنین در مواردی که خطرات محیطی وجود داشته باشد ارجحیت دارد (به بندهای و ۱۲-۶ و ۱۲-۷ رجوع شود)، چون سیستم‌های با اعمال جریان، به تجهیزات ضد حریق نیاز دارد. در

---

1 - Tube and shell
2 - Water box
3 - Tube plate
4 - Copper based alloys
5 - Local attack
6 - Water turbulence
7 - Corrosion-Erosion
8 - Periodic shut down

برخی مبدل‌های حرارتی جدید و پیشرفته، لوله‌های کندانسورها از جنس تیتانیوم است. در این موارد، پتانسیل مورد نیاز برای حفاظت کاتدی کامل موجب تصاعد[1] هیدروژن شده و خطر تشکیل هیدرید تیتانیوم[2] را به‌وجود می‌آورد. دقت شود که از حفاظت اضافی در این موارد اجتناب گردد زیرا هیدرید تیتانیوم می‌تواند به ایجاد تردی[3] در لبه‌های ورودی لوله‌ها منجر شود.

۸-۳-۲-۲ پوشش‌های حفاظتی محفظه آب

استفاده از پوشش‌های حفاظتی همراه با اجرای سیستم حفاظت کاتدی، ممکن است اقتصادی نباشد، زیرا حتی در صورتی‌که محفظه آب به خوبی پوشش شده باشد، مقدار جریان برقی که در سطوحی از مبدل حرارتی که قابل پوشش‌کاری نبوده اند جاری می‌شود، قابل ملاحظه است.

از پوشش‌های حفاظتی که از محیط‌های قلیایی متأثر می‌گردند، نباید در نزدیکی آندها استفاده شود، زیرا این نوع پوشش‌ها به‌صورت ورقه‌ای کنده شده و لوله‌ها را مسدود می‌سازد، مثلاً از کاربرد لاستیک‌ها و نئوپرن باید اجتناب شود. پوشش‌ها را بر اساس مقاومتشان در برابر جدایش کاتدیکی که در استانداردهای معتبر[4] توضیح داده شده است ارزیابی می‌کنند.

۸-۳-۲-۳ سیستم با آندهای فدا شونده

آندهای فدا شونده، معمولاً از آلیاژهای روی (Zn) یا منیزیم (Mg) ساخته می‌شوند. آلیاژهای روی، معمولاً برای آب‌های خنک کننده با مقاومت پایین مثلاً در آب دریا یا آب مصب رودخانه‌ها[5] (به‌دلیل داشتن عمر طولانی‌تر) مناسب‌تر می‌باشد. در آب‌های با مقاومت بالا، آندهای منیزیمی مناسب‌تر است، زیرا پتانسیل محرک آنها بالاتر بوده و می‌تواند نسبت به آندهای روی جریان الکتریکی بیشتری ایجاد نمایند. در برخی موارد، مثلاً در خصوص محفظه‌های آب پوششدار که از فلزات غیر آهنی ساخته شده باشند، می‌توان آندهایی از جنس آهن نرم[6]، برای حفاظت کاتدی صفحه نگهدارنده و لبه‌های لوله‌ها استفاده نمود.

توجه: تشکیل لایه‌ای از محصولات خوردگی آهن روی فلزات غیر آهنی مفید است، و در بعضی موارد حتی از تزریق سولفات آهن برای تشکیل لایه‌ای با خاصیت بازدارندگی از خوردگی استفاده می‌شود.

به طور کلی، در نصب آندهای فدا شونده، میزان کاهش وزن آند را با توجه به متوسط دما، سرعت حرکت سیال و مقاومت آب خنک‌کننده تعیین می‌نمایند. از آنجایی که این عوامل متغیر می‌باشند، معمولاً توصیه می‌گردد که میزان کاهش وزن آند با انجام آزمایش تعیین شود. حداکثر وزن آندی که در محفظه‌ای نصب می‌شود، تابع ابعاد فیزیکی محفظه است. آندها نباید باعث افزایش بیش از حد سرعت آب یا سبب ایجاد تلاطم گردند. در بسیاری از واحدهای صنعتی، فرصت‌های منظم و دوره‌ای برای انجام بازرسی فنی و تعویض آندها در هنگام خارج بودن از سرویس فراهم می‌شود. در مورد پالایشگاه‌ها، این فرصت‌ها در حدود ۲-۳ سال یک‌بار است، بنابراین وزن آندها باید به اندازه‌ای باشد که در طی این مدت، حفاظت ممتد تأمین شود. در برخی

---

1 - Evolution
2 - Titanium hydride
3 - Embrittlement
4 - BS 3900 part F-11 مثلاً
5 - Estuarine
6 - Soft iron

حالت‌ها این امر مستلزم اعمال اصلاحات روی محفظه آب است. برای مثال، درپوش بشقابی شناور[1] ممکن است گودتر ساخته شود تا فضای کافی برای نصب آندها فراهم آید، ضمن اینکه این فضای کافی، از بروز جریان متلاطم بی‌مورد نیز جلوگیری کند.

حداقل جرم آندهای روی، برای نصب روی درپوش محفظه آب پوشش داده شده کندانسورهایی که با آب دریا خنک می‌شود، برای عمر مفید ۵ ساله در نواحی معتدل از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$W = ۸۰ \cdot D^{۲} \qquad (۱)$$

که در آن:

W= وزن آند روی بر حسب کیلوگرم، و

D = قطر اسمی بخش خیس صفحه نگهدارنده لوله‌ها بر حسب متر است. در نواحی گرم و مرطوب، عمر آندها تقریباً نصف می‌گردد.

۸-۳-۲-۴ سیستم با اعمال جریان

پوشش حفاظتی با کیفیت بالا را معمولاً همراه با سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان استفاده نمی‌کنند. در این سیستم‌ها، معمولاً از آندهایی از جنس تیتانیوم پلاتینی شده که به شکل کنسول است استفاده می‌نمایند. این آندها در محفظه آب، طوری توزیع می‌گردند که جریان الکتریکی بتواند به خوبی توزیع شود. برای اندازه‌گیری میزان تأثیر حفاظت کاتدی باید از الکترودهای مرجع استفاده گردد. این الکترودها در نزدیکی نقاطی با حداکثر نفوذ گالوانیکی و دور از آندها نصب می‌شوند. اگر در این نقاط، جریان حفاظت کاتدی به مقدار کافی رسیده باشد می‌توان چنین فرض کرد که کلیه سطوح محفظه آب به اندازه کافی حفاظت شده است. معمولاً در عمل، خنک‌کننده‌هایی با قطر کمتر از ۵۰۰ میلی‌متر را حفاظت نمی‌کنند، ولی چنانچه به دلایل خاصی لازم شود که این نوع خنک‌کننده‌ها حفاظت کاتدی شوند، باید عوامل مربوط به کندانسورهای بزرگ در مورد آنها نیز اعمال گردد، البته به جز محل آندها که در این صورت می‌توان آنرا به صورت کنسول و در مرکز درپوش محفظه‌های آب نصب نمود.

۸-۳-۳ خنک‌کننده‌های جعبه‌ای[2]

این خنک‌کننده‌ها متشکل از یک دسته لوله‌های مارپیچ با قطرهای ۷۵ تا ۱۵۰ میلی‌متر در یک جعبه فولادی است که در داخل آن آب خنک‌کننده جریان دارد. لوله‌های مارپیچ که سیالات (هیدروکربورها و روغن‌ها) داغ[3] از داخل آنها عبور می‌کند، معمولاً به صورت دسته‌هایی از لوله به‌طور عمودی چیده می‌شود، و آندها در فضاهای محدود بین این ردیف‌ها نصب می‌شوند.

برای توزیع مناسب جریان حفاظتی در تمامی طول لوله‌ها و نیز در مسیر عمودی ردیف‌های لوله‌ها، یک‌سری آندهای افقی یا عمودی و یا ترکیبی از آنها نصب می‌نمایند.

---

1 - Dished Floating head cover
2 - Box coolers
3 - Hot oils

با توجه به شرایط موجود، از سیستم با اعمال جریان و آندهای سربی (Pb) یا تیتانیوم پلاتینی شده می‌توان استفاده نمود. در خنک‌کننده‌های جعبه‌ای، معمولاً برای تأمین طول عمر مفید خنک‌کننده‌ها نمی‌توان آندهای فدا شونده به اندازه و مقدار کافی جاسازی نمود.

باید توجه داشت که ممکن است از بالا تا پایین خنک‌کننده‌های جعبه‌ای، اختلاف دمای قابل توجهی وجود داشته باشد، که البته این گرادیان دما می‌تواند موجب شود که آندهای موجود در نزدیکی سطح آب، جریان بیشتری تولید نماید. این شرایط باعث می‌شود تا در سطوح فلزی نزدیک سطح آب حفاظت اضافی به‌وجود آید، در حالی که گوشه‌های ته مخزن با کمبود حفاظت روبه‌رو می‌شود. این مسئله باید هنگام طراحی و تعیین محل آندها مد نظر قرار گیرد.

به علت بازدهی زیاد آندهای موجود در نزدیکی سطح آب، آندهایی که به صورت عمودی از بالای سطح آب آویزان می‌شوند در مناطق نزدیک به سطح آب بیشتر حل شده و باریک می‌شوند، که این مشکل را می‌توان با شکل مناسب آند برطرف نمود؛ مثلاً آندها را به شکل مخروطی می‌سازند و یا در سطح آب، غلافی روی آند قرار می‌دهند.

۸-۴ سایر تجهیزات صنعتی

در اغلب موارد، ممکن است عواملی وجود داشته باشد که کاربرد روش‌های دیگر حفاظتی مانند اجرای پوشش‌های حفاظتی را غیر عملی سازد. در این موارد، می‌توان از حفاظت کاتدی استفاده نمود. به عنوان مثال می‌توان از کاربرد سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان در ماشین‌های شوینده بطری نام برد، چون در این موارد، بطری‌های شکسته سبب تخریب پوشش‌های حفاظتی می‌شود. نمونه دیگر کاربرد حفاظت کاتدی، در صنایع پاستوریزه سازی[1] است. در مخازن شیبدار حاوی مایعات هم می‌توان حفاظت کاتدی را اعمال نمود.

1 - Pasteurizers

۹- آزمایش‌ها و رفع تداخل حفاظت کاتدی

۹-۱ کلیات

در این بخش، آثار حفاظت کاتدی یک سازه روی سازه‌های مجاور توضیح داده شده و روش‌های اندازه‌گیری میزان تداخل و راه‌های رفع آن نیز بررسی می‌گردد.

در نتیجه اعمال حفاظت کاتدی روی سازه مدفون یا غوطه‌ور (به عنوان سازه اولیه) یک جریان برق مستقیم (dc) در محیط (آب یا خاک) انتشار می‌یابد. قسمتی از این جریان، جذب سازه‌های مجاور مانند لوله‌های مدفون یا غوطه‌ور، کابل‌ها، اسکله‌ها و سازه‌های مشابه و یا کشتی‌ها (به عنوان سازه ثانویه) می‌شود که ممکن است حفاظت نشده باشند. بنابراین در نقاط تخلیه جریان از این سازه‌ها به سمت سازه اولیه، خوردگی شدیدی ایجاد می‌گردد. این اثر، به‌عنوان خوردگی تداخلی[1] یا خوردگی ناشی از جریان‌های سرگردان[2] مطرح می‌شود.

با دقت در مراحل طراحی (توضیح به بند ۹-۲-۳ مراجعه شود) و با توجه به انجام آزمایشات و معیارهای ارائه شده در بندهای ۹-۳-۱-۱ و ۹-۳-۲ می‌توان خوردگی تداخلی را کاهش داد و در صورت نیاز با به‌کارگیری تمهیدات بند ۹-۳-۵ آنرا اصلاح نمود. در مورد تجهیزاتی که سطوح داخلی آنها حفاظت کاتدی می‌شوند، خوردگی تداخلی که بتواند سازه‌های مجاور را متأثر سازد بعید به‌نظر می‌رسند، زیرا جریان برق یک‌سو، فقط در سطوح داخلی آنها وجود دارد.

توصیه‌های ارائه شده در بند ۹-۲ اختصاصاً برای سازه‌هایی مانند خطوط لوله به‌کار می‌رود، اگر چه اصول اولیه به‌طور کلی در همه موارد درست است. ملاحظات ویژه در خصوص کشتی‌ها و اسکله‌ها، در بند ۹-۳ شرح داده شده است.

جریان‌های سرگردان ناشی از سیستم‌های حفاظت کاتدی، علاوه بر ایجاد خوردگی می‌تواند سبب اختلال در مدارهای مخابراتی و نیز تجهیزات سیگنال‌رسانی قطارهای برقی گردد (به بند ۹-۲-۵ رجوع شود).

تذکر: صاحبان سازه‌های تحت حفاظت کاتدی باید تمهیدات لازم را برای جلوگیری از وارد شدن زیان‌های احتمالی ناشی از تداخل به سازه‌های مجاور به‌عمل آورند.

۹-۲ سازه‌های مدفون

۹-۲-۱ آزمایش‌های خوردگی تداخلی

۹-۲-۱-۱ آزمایش‌های تشخیص خوردگی تداخلی

تغییرات پتانسیل سازه – الکترولیت ناشی از جریان تداخلی در طول سازه مجاور (ثانویه)، ممکن است متفاوت باشد. تغییر منفی پتانسیل در هر نقطه، نشان‌دهنده وجود تغییرات مثبت در قسمت دیگر سازه می‌باشد و در اغلب فلزات تغییرات مثبت پتانسیل موجب تشدید خوردگی می‌گردد (به بند ۴-۲-۲ رجوع شود).

بنابراین هدف از آزمایش‌های معمول در خوردگی تداخلی، پیدا کردن مناطقی است که تغییرات مثبت پتانسیل داشته و هدف از انجام آزمایش در چند نقطه، مشخص ساختن بالاترین تغییرات پتانسیل موضعی و نیز برآورد دقیق مقادیر حداکثر می‌باشد.

---

1 - Interaction Corrosion
2 - Stray Current Corrosion

در مورد سازه‌های مجزا مانند لوله‌هایی که به طور مکانیکی به‌هم اتصال دارند، انجام این آزمایش‌ها برای هر قسمت ضروری است و باید توجه نمود که هر قسمت به‌عنوان یک سازه مجزا منظور شود.

در بعضی موارد، تغییرات منفی پتانسیل بیش از حد مورد نیاز برای حفاظت کاتدی تأثیر نامطلوبی روی سازه یا پوشش آن دارد (به بند ۹-۲-۲-۴ رجوع شود).

جریان به‌کار رفته برای آزمایش‌های خوردگی تداخلی، باید بیشترین مقدار جریان مورد نیاز برای حفاظت سازه که در طی بهره‌برداری عادی به‌کار می‌رود باشد. جریان کمتر از جریان پیش‌بینی شده، ممکن است موجب حداکثر تغییرات پتانسیل در سازه ثانویه نشود. جزییات و مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده و روش اتصالات الکتریکی در وضعیت‌های مختلف، در بخش ۱۰ آمده است. معیار در این آزمایش‌ها مقدار تغییر پتانسیل در سازه ثانویه نسبت به الکترولیت خواهد بود (به مطالب گفته شده این بند رجوع شود). مقدار تغییرات پتانسیل در هنگام روشن کردن سیستم اعمال جریان و یا اتصال آندهای فدا شونده مشخص می‌شود. تغییرات پتانسیل هنگام روشن و خاموش کردن معمولاً از نظر مقدار مساوی بوده ولی از نظر علامت مخالف یکدیگرند.

همزمان ساختن اندازه‌گیری پتانسیل سازه – الکترولیت به هنگام روشن کردن سیستم بسیار اهمیت دارد. این عمل، توسط بی‌سیم و وسایل ارتباطی بین کسی که مدار را روشن می‌کند و کسانی که در واحد پتانسیل‌ها را اندازه‌گیری (قرائت) می‌کنند صورت می‌گیرد. روشن و خاموش کردن سیستم می‌تواند با اشاره دست نیز علامت داده شود. گزینه دیگر روشن و خاموش کردن سیستم حفاظت کاتدی استفاده از یک کلید تنظیم زمان[1] در فواصل زمانی تعیین شده می‌باشد. تغییرات پتانسیل سازه – الکترولیت ناشی از حفاظت کاتدی باید در چندین نقطه (به تعداد کافی) اندازه‌گیری گردد. این نقاط معمولاً از آند شروع شده و به‌تدریج دور می‌شود. این نقاط باید به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک باشند تا یک نمودار کلی از چگونگی توزیع تغییر پتانسیل سازه – الکترولیت را ارائه نماید. در این نمودار، جزییات بیشتری باید در خصوص نقاط تقاطع، نقاط نزدیک شدن به محدوده بین سازه اولیه و سازه ثانویه و مناطقی که تغییرات در جهت مثبت می‌باشد نشان داده شود.

در مواردی که بیش از یک سیستم حفاظت کاتدی روی یک سازه نصب شده باشد، تأثیر توام جریان‌های آنها باید با دقت بیشتری مورد توجه قرار گیرد. بهتر است ترتیبی داده شود که کلیه سیستم‌هایی که روی محل آزمایش تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارند، به صورت همزمان روشن و خاموش و یا وصل و قطع شوند.

تذکر: معمولاً وقتی اتصال مثبت ولت‌متر به الکترود مرجع وصل می‌شود، پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده سازه منفی بوده، و تغییرات در جهت مثبت به‌وسیله کاهش ولتاژ در ولت‌متر مشخص می‌شود. تغییرات پتانسیل ثبت شده باید آن تغییراتی باشد که به‌طور وضوح هنگام روشن کردن سیستم حفاظت کاتدی مشاهده می‌گردد. ثبت این تغییرات پتانسیل باید طی ۱۵ ثانیه اول انجام گیرد. در صورت وجود نوسان‌های پتانسیل به دلیل جریان سرگردان ناشی از دیگر منابع، فقط تغییرات پتانسیل زمان روشن کردن باید ثبت شود. در هر نقطه لازم است پتانسیل‌ها چندین بار اندازه‌گیری شده و نتایج با هم مقایسه گردند. در شرایط حدّی[2]، مقدار اندازه‌گیری‌ها (قرائت‌ها) باید بیشتر شود. این عمل، خصوصاً برای نقاطی از سازه ثانویه که تغییرات

1 - Time Switch
2 - Marginal cases

پتانسیل موضعی مثبت بوده و در حداکثر مقدار است باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد. موقعیت الکترود مرجع نیز که در بند ۱۰-۳-۲-۲ مورد مطالعه قرار گرفته بسیار مهم است.

۹-۲-۱-۲ اطلاعات مورد نیاز در هنگام و در زمان تکمیل آزمایش‌های خوردگی تداخلی

جریان حفاظتی اندازه‌گیری شده در هر مبدل یک‌سوکننده هنگام انجام آزمایش‌های تداخلی و جریان‌های توافقی برای رفع مشکل آثار تداخلی، در صورت لزوم به اطلاع کلیه سازمان‌هایی که سازه‌های آنها تحت تأثیر قرار می‌گیرند رسانده می‌شود تا آنها از آثار ناشی از جریان‌های تداخلی آگاه گردند.

۹-۲-۱-۳ آزمایش‌های بعد از اقدامات اصلاحی

ممکن است بعد از انجام اصلاحات (به بند ۹-۲-۴ رجوع شود)، آزمایش‌های بیشتری مورد نیاز باشد. اگر بعد از ایجاد اتصال الکتریکی بین دو سازه و یا نصب آندهای فدا شونده (به منظور کاهش آثار تداخلی) پتانسیل سازه ثانویه به‌طور محسوسی نسبت به پتانسیل آن در حالت خاموش کردن مبدل یک‌سوکننده در هنگام آزمایش منفی‌تر شود، می‌توان گفت که تا حدودی آثار تداخلی کاهش یافته است و این موضوع موفقیت روش‌های کاهش تداخلی را نشان می‌دهد. معیار رفع تداخل عبارت است از تغییر پتانسیل سازه ثانویه/ الکترولیت پس از خاموش شدن مبدل یک‌سوکننده نسبت به پتانسیل آن سازه – الکترولیت بعد از اعمال جریان حفاظت کاتدی. اتصال آندهای فدا شونده یا اتصال الکتریکی بین دو سازه و راه‌اندازی سیستم باید به سرعت انجام گیرد تا به‌طور موفقیت‌آمیزی آثار ناشی از نوسانات منابع جریان دیگر را کاهش دهد.

در بعضی موارد، ممکن است پتانسیل ابتدایی سازه – الکترولیت سازه ثانوی، خیلی منفی‌تر از سازه اولیه باشد. برای مثال، سازه فولاد گالوانیزه بدون سیستم حفاظت کاتدی، حتی وقتی پتانسیل آن در اثر نزدیک شدن به یک سیستم تحت حفاظت در جهت مثبت تغییر می‌کند، ممکن است از پتانسیل سازه‌ای از جنس سرب یا فولاد گالوانیزه نشده که حفاظت کاتدی شده است منفی‌تر باشد. در این شرایط، ایجاد یک اثر معکوس با برقراری اتصال بین دو سازه میسر نمی‌شود، زیرا به دلیل واکنش گالوانیک بین سازه‌های اولیه و ثانویه، پتانسیل سازه – الکترولیت سازه ثانویه مثبت‌تر خواهد شد و آثار آن از مزایای حفاظت کاتدی وسیع‌تر می‌گردد. در این حالت، ایجاد اتصال وقتی می‌تواند مؤثر باشد که پتانسیل سازه اولیه منفی‌تر گردد، مثلاً با افزایش جریان حفاظتی کل و یا انتقال یکی از بسترهای آندی به نزدیکی محل اتصال الکتریکی.

گزینه دیگر حفاظت کاتدی سازه ثانویه توسط یک سیستم مجزا می‌باشد؛ این عمل را می‌توان با نصب آند فدا شونده برای سازه ثانویه امکان‌پذیر ساخت.

در موارد استثنایی و در صورت توافق جداگانه بین مالکین دو سازه مبنی بر بالاتر بودن تغییر پتانسیل سازه ثانویه به الکترولیت نسبت به حالت معمول (۹-۲-۲) می‌توان از اقدامات اصلاحی اجتناب کرد.

۹-۲-۱-۴ تکرار آزمایش‌ها

وقتی سیستم حفاظت کاتدی در سرویس قرار گرفت، ترتیبی باید اتخاذ شود که هر دو سال یک‌بار و یا در فواصل توافق شده بر اساس مقدار تغییرات پتانسیل سازه – الکترولیت آزمایش‌ها تکرار شود. زمانی که هر نوع تغییر در سازه‌های اولیه و ثانویه و یا سیستم‌های حفاظت کاتدی داده می‌شود، نیاز به تکرار آزمایش‌ها باید بررسی گردد.

۹-۲-۲ معیارهای محدود سازی خوردگی تداخلی

۹-۲-۲-۱ کلیات

با توجه به توضیحات ارائه شده در فصل ۵، هرگونه جریان الکتریکی که باعث مثبت‌تر شدن پتانسیل سازه نسبت به محیط اطراف خود شود، آن سازه در معرض خوردگی سریع قرار خواهد گرفت. بنابراین پتانسیل سازه – الکترولیت به‌عنوان اساس تخمین خوردگی در نظر گرفته می‌شود. در این رابطه، تغییرات مثبت پتانسیل سازه – الکترولیت اهمیت زیادی خواهد داشت. یکی از مواردی که باید به آن توجه شود، فولاد درون بتن است، که دلیل این موضوع در بند ۹-۲-۲-۳ ارائه شده است. در اینجا، تغییرات منفی پتانسیل فولاد باید محدود گردد (به بند ۹-۲-۲-۴ رجوع شود).

۹-۲-۲-۲ حدود تغییرات مثبت پتانسیل سازه – الکترولیت برای تمام سازه‌ها به‌جز فولاد داخل بتن

حداکثر تغییر مثبت پتانسیل ناشی از جریان‌های تداخلی در هر قسمت از سازه ثانویه نباید از ۲۰ میلی‌ولت فراتر رود.

تجربه‌های به‌دست آمده نشان داده‌اند که با اعمال این محدودیت، تخریب‌های ناشی از خوردگی برای سازه‌ها به‌وجود نمی‌آید. به هر حال در بسیاری از موارد، اگر شرایطی برای اندازه‌گیری در قسمتی از سازه‌ها وجود داشته باشد می‌توان تغییرات پتانسیل بالاتر را پذیرفت.

برخی از سازه‌ها ذاتاً در برابر جریان‌های سرگردان مقاومت بیشتری دارند؛ به‌عنوان مثال کابل‌هایی که دارای غلاف پلاستیکی خوب می‌باشند، معیوب شدن پوشش کابلی که به منظور ایجاد اتصالات برای انجام آزمایش جریان تداخلی به‌کار می‌رود، بیش از خود جریان تداخلی ممکن است خطر آفرین باشد.

هرگونه تداخل در ارتباط با سیستم‌های کابلی، احتمال بیشتری دارد که در نزدیک‌ترین تجهیزات اتصال زمین آشکار شود. چنانچه سازه ثانویه دارای سیستم حفاظت مستقلی باشد، مالک سازه ثانویه ممکن است توافق نماید که تغییرات پتانسیل بالاتر را قبول نموده بسته به اینکه پتانسیل‌های آنها منفی‌تر از مقادیر مندرج در جدول (۱) (بند ۴-۳-۲) باقی بماند. در مورد تغییرات پتانسیل ناشی از نشت جریان از سیستم‌های ریلی با جریان برق یک‌سو که به دلیل حرکت قطار به طور مداوم صورت می‌گیرد، تغییرات مثبت پتانسیل بالاتری مورد قبول است.

۹-۲-۲-۳ حد تغییرات مثبت پتانسیل سازه – الکترولیت برای فولاد داخل بتن

حداکثر تغییرات مثبت پتانسیل توصیه شده در بند ۹-۲-۲-۲ برای فولاد کاملاً احاطه شده در داخل بتن کاربرد ندارد. در این حالت، فولاد رویین "غیر فعال" می‌شود و واکنش خوردگی صورت نمی‌گیرد. باید توجه نمود که اکسیژن در شرایطی که

پتانسیل مثبت فلز بیش از ۰/۵ ولت (نسبت به الکترود مس – سولفات مس) باشد آزادشدن رخ می‌دهد و ممکن است اثر تخریبی آزاد شدن اکسیژن عامل تعیین کننده باشد. به هر حال، رفتار فولاد ممکن است تحت تأثیر وجود یونهای کلرید Cl^- (ناشی از محیط) قرار بگیرد که مانع از رویین شدن فلز می‌شود، بنابراین ارائه توصیه‌های عمومی مقدور نمی‌باشد.

موضوع پیچیده دیگر، مشکل ارزیابی پتانسیل سازه – الکترولیت یا اندازه‌گیری تغییرات آن در محل فصل مشترک فولاد– بتن است. تغییرات پتانسیل فولاد– خاک توسط قرار دادن الکترود مرجع در داخل خاک نزدیک بتن به سادگی قابل اندازه‌گیری بوده و می‌توان آنرا با معیار ۲۰ میلی‌ولت ارائه شده در بند ۹–۲–۲–۲ مقایسه نمود. به هر حال تا زمانی که معیار دیگری که با شرایط موجود تناسب بیشتری داشته باشد تصویب نشود (مقرر نگردد) از معیار ۲۰ میلی‌ولت به‌عنوان اساس تصمیم‌گیری‌ها در مورد اینکه آیا اقدامات اصلاحی لازم است یا نه می‌توان استفاده نمود.

مطالب ارائه شده فقط برای فولادی که به‌طور کامل در داخل بتن متراکم[1] قرار گرفته کاربرد دارد. اگر فقط قسمتی از فولاد توسط بتن پوشانده شده باشد، برای هر بخش از سطح فولاد که مستقیماً با خاک در تماس است باید تمهیدات بند ۹–۲–۲–۲ اجرا شود. باید دقت شود که در این شرایط، ممکن است فولادی که در تماس با خاک است نقش آند را بازی کند. پتانسیل سازه– خاک مربوط به این فولاد مثبت‌تر از پتانسیل محل نزدیک بتن بوده، بنابراین ممکن است یک واکنش خوردگی جدا از خوردگی ناشی از جریان تداخلی نیز رخ دهد.

۹–۲–۲–۴ تغییرات منفی پتانسیل سازه – الکترولیت

اگر به توصیه‌های ارائه شده در بند ۹–۲–۳ عمل گردد، معمولاً از تغییرات منفی اضافی پتانسیل سازه – الکترولیت روی سازه ثانویه جلوگیری می‌شود. در صورت نزدیک شدن بستر آندی سازه اولیه به سازه ثانویه، تغییرات منفی زیادی ممکن است در سازه ثانویه به‌وجود آید که البته بعید است این موضوع به‌جز در مورد آلومینیوم (و سرب در محیط‌های قلیایی) باعث خوردگی در سازه ثانویه شود. دومین تأثیر اصلی منفی شدن بیش از اندازه پتانسیل سازه – الکترولیت، تخریب پوشش (به بند ۵–۷–۱ رجوع شود)، و نیز بروز نتایج مندرج در بند ۹–۲–۵ می‌باشد. در صورتی‌که ملاحظات خاصی مطرح نباشد، از میزان منفی بودن پتانسیل سازه – الکترولیت بیش از ۲– ولت برای سازه‌های مدفون با پوشش‌های قیری باید اجتناب شود. این میزان برای سایر پوشش‌ها نباید از ۱/۲– ولت تجاوز نماید.

۹–۲–۳ طراحی سیستم حفاظت کاتدی برای به‌حداقل رساندن خوردگی تداخلی

۹–۲–۳–۱ کلیات

تخمین دقیق میزان خوردگی تداخلی ناشی از سیستم حفاظت کاتدی، معمولاً غیر ممکن است. مقدار تغییرات مثبت پتانسیل سازه – الکترولیت روی سازه‌های ثانویه مجاور عمدتاً به موارد زیر بستگی دارد:

الف– **کیفیت پوشش روی سازه اولیه :** پوشش مناسب سبب کاهش جریان مورد نیاز برای حفاظت و همچنین کاهش آثار تداخلی می‌گردد.

---

1 - Sound Concrete

ب- **کیفیت پوشش سازه ثانویه:** وجود پوشش روی سازه ثانویه سبب افزایش تغییرات مثبت پتانسیل اندازه‌گیری شده سازه – الکترولیت می‌شود. ولی به هرحال تغییرات مثبت زیاد پتانسیل سازه – خاک بیانگر امکان بروز خوردگی ناشی از وجود عیوب موضعی در پوشش یا امکان گسترش آن در آینده می‌باشد.

ج- **مقدار تغییر پتانسیل سازه – الکترولیت بر روی سازه اولیه در نزدیکی سازه ثانویه:** از آنجایی‌که آثار تداخلی تقریباً متناسب با تغییر پتانسیل سازه – الکترولیت می‌باشد، پس باید این تغییر پتانسیل در حداقل مقدار لازم جهت تأمین حفاظت نقاط دورتر از محل تزریق نگهداشته شود. چنانچه طول سازه حفاظت شده از هر نقطه تزریق طولانی باشد، مقدار تغییر پتانسیل سازه – الکترولیت بیشتری در نقاط تزریق لازم خواهد شد. بنابراین با اعمال حفاظت در تعداد نقاطی بیشتر، می‌توان اثر تداخلی را کاهش داد، به‌طوری‌که تغییر پتانسیل سازه – الکترولیت روی سازه اولیه یکنواخت‌تر بوده و اثر تغییر پتانسیل‌های بالا روی سازه‌های دیگر جزیی می‌شود.

د- **فاصله بین سازه اولیه و سازه ثانویه:** در نقاط تقاطع یا در محل‌هایی که سازه‌ها بسیار به هم نزدیک هستند، اثر تداخلی بیشتر است. هر چه فاصله سازه‌ها از هم بیشتر باشد، آثار تداخلی به همان نسبت کمتر خواهد بود.

هـ – **فاصله بین بسترهای آندی یا آندها از سازه ثانویه:** سازه‌های نزدیک به سیستم آند ممکن است تحت تأثیر شیب پتانسیل[1] اطراف آند که باعث تغییر در پتانسیل سازه هم در نزدیکی سیستم بستر آندی و هم دورتر از آن می‌شود قرار گیرد، بنابراین آندها یا بسترهای آندی نباید نزدیک سازه‌ها قرار گیرد.

و- **مقاومت الکتریکی آب یا خاک:** شیب پتانسیل در هر نقطه از خاک منتج از مقاومت و چگالی جریان می‌باشد، بنابراین، عموماً با نصب بستر آندی در محل‌های با مقاومت پایین، آثار تداخلی به کمترین مقدار می‌رسد.

۹-۲-۳-۲ آندهای فدا شونده

جریان حاصله از یک آند فدا شونده با اندازه‌های معمولی در اغلب خاک‌ها در حدود ده‌ها میلی‌آمپر است، در حالی‌که این جریان، در سیستم آند با اعمال جریان، ده‌ها آمپر می‌باشد. اگر جریان کل مورد نیاز حفاظت کمتر از ۱۰۰ میلی‌آمپر باشد، آزمایش جریان تداخلی حذف می‌شود. در مواردی، اگر جریان بیش از ۱۰۰ میلی‌آمپر باشد باز هم خوردگی تداخلی بعید به‌نظر می‌رسد؛ خصوصاً اگر آندها در فاصله حداقل ۲ متری سازه ثانویه نصب شده باشد، و نیز سازه ثانویه بین آند و سازه اولیه قرار نگرفته باشد. اگر جریان خروجی از آند بیش از ۱۰۰ میلی‌آمپر باشد، یا یک دسته آند با هم نصب شده باشد و یا اینکه سازه فلزی ثانویه بین آندها و سازه اولیه قرار گرفته باشد، انجام آزمایش‌های تداخلی پیشنهاد می‌گردد. در خصوص ضرورت انجام آزمایش‌ها، ابتدا باید بین مالکین توافق به‌عمل آید زیرا برای تسهیل در قطع ارتباط آند با سازه، برای انجام آزمایش، نصب جعبه اتصال ضروری است. بدیهی است که جعبه اتصال مستقل از انجام یا عدم انجام آزمایش تداخلی همیشه مورد نیاز می‌باشد.

۹-۲-۳-۳ سیستم با اعمال جریان

در این رابطه، باید موارد احتیاطی زیر مد نظر قرار گیرد:

الف – پتانسیل‌های سازه – الکترولیت روی سازه اولیه باید در حداقل میزان لازم برای حفاظت نگهداشته شود.

---

1 - Potential Gradient

ب – برای به حداقل رساندن جریان مورد نیاز، باید روی سازه جدید مدفون و یا غوطه‌ور، خصوصاً در محل‌های تقاطع با سازه ثانویه، پوشش‌هایی با کیفیت بالا اجرا شود.

ج – سازه جدید باید تا حد امکان دور از سازه مجاور قرار گیرد. فاصله بین دو سازه در نقاط تقاطع در حداکثر مقدار ممکن باشد.

د – مقاومت الکتریکی طولی سازه مورد حفاظت تا حد امکان و به کمک اتصالات پیوستگی، اتصالات جوشی و یا روش‌های دیگر در حداقل مقدار ممکن نگهداشته شود.

هـ – بسترهای زمینی باید تا حد امکان دورتر از سازه مجاور قرار گیرد.

و – باید توجه نمود که نصب آندها در عمقی قابل ملاحظه قرار داده شود.

ز– مجموع جریان اعمالی به سازه باید توسط چندین ایستگاه انجام شود تا توزیع یکنواخت پتانسیل سازه – الکترولیت صورت پذیرید.

ح – با جداسازی سازه اصلی از سایر سازه‌ها، باید جریان کل را به سازه اصلی محدود نمود.

۹-۲-۴ تمهیدات لازم برای کاهش خوردگی تداخلی

۹-۲-۴-۱ انتخاب روش

علاوه بر احتیاط‌های مورد نظر در هنگام نصب سیستم حفاظت کاتدی و مطمئن‌شدن از حداقل جریان لازم برای تأمین حفاظت کاتدی قابل قبول، در زمانی که تغییرات مثبت از حداکثر میزان توصیه شده بیشتر باشد، باید به کمک یک یا چند روش زیر جهت کاهش خوردگی تداخلی در نقاط مختلف سازه ثانویه عمل شود. به هر حال روش قابل قبول آنکه پتانسیل سازه – خاک مربوط به سازه ثانویه به مقدار اصلی خود برگردد و یا پتانسیل آن منفی‌تر شود، ولی از حد مجاز فراتر نرود.

روش‌های قابل اجرا عبارتند از:

الف – طراحی یک سیستم حفاظت کاتدی کامل مشترک برای هر دو سازه،

ب – سازه‌ها را می‌توان توسط یک یا چند اتصال الکتریکی به هم متصل نمود. مقاومت الکتریکی این اتصالات باید به اندازه‌ای باشد که بتواند مقدار جریان را به حداقل مورد نیاز برای خوردگی تداخلی محدود نماید. این عمل یکی از موثرترین روش‌های کاهش خوردگی تداخلی است، اتصال ترجیحاً باید در محلی از سازه ثانویه که دارای حداکثر تغییرات مثبت پتانسیل سازه‌ای است ایجاد شود. اگر سازه‌ها در محل حداکثر تغییرات پتانسیل، فاصله زیادی از یکدیگر داشته باشند، بهتر است دو سازه در فاصله نه چندان دور از این نقطه به‌هم متصل گردند که نتایج رضایت‌بخشی حاصل شود. با توجه به دلایل ارائه شده در بند ۵-۳-۱ ضرورت دارد که هر سازه اساساً از نظر الکتریکی پیوستگی داشته باشد. چنانچه در خصوص پیوستگی الکتریکی، سازه ثانویه ابهام وجود داشته باشد باید هر قسمت قطع شده به‌طور جداگانه آزمایش شده و در صورت نیاز، اتصال اصلاحی نصب گردد. نصب هر گونه اتصال بین دو سازه و یا نصب مقاومت‌ها باید مطابق مشخصات مورد توافق مالکین انجام گیرد. سیستم اتصال باید از جنس مس با عایق مناسب باشد. سطح مقطع

هادی کابل اتصال نباید از ۱۶ میلی‌متر مربع کمتر باشد. اتصال دو سازه باید از طریق جعبه اتصال مناسب، برای انجام بازرسی منظم انجام گیرد. در صورتی‌که اتصال در زیرزمین باشد، حفاظت لازم در برابر عملیات کنده‌کاری باید در نظر گرفته شود. علامت‌گذاری این نقاط برای شناسایی مفید است. در مواردی‌که بروز خوردگی تداخلی قابل پیش‌بینی است، نقاط اندازه‌گیری، در محل‌های مناسبی نصب می‌شوند تا از هدر رفتن زمان در هنگام آزمایش (برای مشخص شدن محل‌های تحت تأثیر جریان تداخلی) اجتناب گردد. اندازه‌گیری جریان الکتریکی در محل اتصال، همواره ضروری نیست، ولی اگر نیاز به کنترل منظم جریان وجود داشته باشد، مثلاً در محلی که اتصال مقاومتی کنترل کننده جریان تعبیه شده است، باید درپوش مناسب، اتصال بازشو و یا اتصال پیچ و مهره‌ای در محلی قابل دسترس (برای صاحبان هر دو سازه) نصب شود. به منظور ایمنی سازه‌ها در مواردی می‌توان از اتصال سازه‌ها اجتناب نمود (به بند ۱۲-۴ رجوع شود)؛ به عنوان مثال از برقراری اتصال بین دکل‌های انتقال برق فشار قوی و لوله‌های مواد آتش‌گیر باید اجتناب شود. در چنین مواردی، تمهیدات دیگری برای حذف جریان‌های تداخلی مطابق بند ۹-۲-۳-۳ و بندهای ج و هـ زیر فراهم خواهد شد:

ج - نصب یک یا چند آند فدا شونده روی سازه ثانوی در محلی که تغییرات مثبت پتانسیل رخ می‌دهد، معمولاً در نواحی که دو سازه به‌هم نزدیک می‌شوند، انجام می‌گیرد.

د- افزایش مقاومت الکتریکی بین دو سازه در نقاطی که تغییرات مثبت پتانسیل رخ می‌دهد. این کار با اجرای پوشش مضاعف روی سازه اولیه و ثانویه و ایجاد لایه عایق بین دو سازه صورت می‌گیرد.

هـ - در خطوط لوله، بخشی از لوله را که در مجاورت سازه ثانویه قرار دارد، با استفاده از اتصالات جدا کننده می‌توان از نظر الکتریکی مجزا نمود. قسمت‌های دو طرف قطعه جدا شده را می‌توان توسط کابل با پوشش عایق به یکدیگر متصل نمود تا پیوستگی جریان الکتریکی در طول لوله اصلی برقرار گردد. معمولاً قسمت مجزا شده به‌وسیله آندهای فدا شونده حفاظت می‌شود. به عنوان گزینه‌ای دیگر برای حفاظت قطعه جدا شده، می‌توان با پل زدن[1] الکتریکی دو طرف یکی از اتصال‌های مجزا کننده از طریق یک مقاومت الکتریکی با مقاومت مناسب، بخشی از لوله مابین اتصال‌های مجزا کننده را محافظت نموده و ضمناً از تداخل اضافی جلوگیری نمود. این روش در تقاطع جاده‌ها و خیابان‌ها که تعداد سازه‌های ثانویه متعدد می‌باشد و نیز تقاطع با خطوط راه‌آهن جهت محدود ساختن آثار تداخلی روی تجهیزات هشدار دهنده و دیگر تجهیزات کاربرد دارد. قسمتی از لوله‌ها را که در میدان‌های الکتریکی قرار دارد می‌توان مجزا نمود تا آثار جریان‌های سرگردان ریلی روی خطوط لوله کاهش یابد. قسمت‌های حفاظت نشده طرفین اتصالات مجزا کننده باید به‌عنوان قطعه‌ای که تحت تأثیر تداخل قرار دارد، تلقی گردد و آزمایش‌های تداخل مطابق دستورالعمل روی آن انجام شود. این نکته بسیار مهم است که روش‌های به‌کار رفته در توسعه حفاظت کاتدی به سازه‌های دیگر طوری باشد که تغییرات منفی پتانسیل حاصله به نوبه خود موجب خوردگی تداخلی روی سازه سومی نشود.

1 - Shunt

۹-۲-۴-۲ بهره‌برداری موقت از سیستم حفاظت کاتدی

در صورت نیاز فوری به بهره‌برداری از سیستم حفاظت کاتدی که تکمیل گردیده ولی هماهنگی‌های لازم در خصوص کاهش تغییرات پتانسیل سازه – الکترولیت روی سازه‌های مجاور انجام نگرفته، و احتمال داده می‌شود که سازه ثانویه مورد صدمه قرار نگیرد، برای یک دوره محدود، سیستم حفاظت کاتدی می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد. با این کار می‌توان تا زمانی که کارهای تکمیلی انجام می‌گیرد، سازه را حفاظت نمود؛ البته کارهای تکمیلی باید سریع انجام گیرد. زمان مجاز برای کارکرد موقت سیستم به میزان افزایش تغییرات پتانسیل سازه – الکترولیت هر دو سازه از حد تعیین شده در بند ۹-۲-۲-۲ بستگی دارد. اگر هیچ‌گونه گزارشی از خوردگی سازه ثانویه در دوران تکمیل ارائه نشده باشد، می‌توان حدس زد که تمهیدات علاج‌بخش انجام شده باعث حذف تغییرات معکوس شده، و کارکرد موقتی می‌تواند تا سه ماه (نه بیشتر) ادامه یابد، که در این مدت، تغییرات پتانسل سازه – الکترولیت نباید از ۵۰+ میلی‌ولت بالاتر رود.

۹-۲-۵ ملاحظات ویژه

۹-۲-۵-۱ سیستم‌های حفاظت‌کاتدی نصب‌شده درمجاورت سرویس‌های مخابراتی: اختلالات الکتریکی

اگر کابل شبکه‌های مخابراتی به یک سیستم حفاظت کاتدی که از یک منبع جریان متناوب و توسط یک‌سوکننده تغذیه می‌شود متصل بوده و یا در مجاورت آن باشد، و یا اگر بستر آندی سیستم حفاظت کاتدی در نزدیکی اتصال زمین (ارت) سیستم مخابراتی باشد، ممکن است در مدارهای مخابراتی اختلال به‌وجود آید. این اختلالات، ناشی از جریان‌های همسو با فرکانس جریان متناوب تغذیه کننده یک‌سوکننده‌ها می‌باشد، که باعث ایجاد ولتاژهای صدادار ناخواسته[1] در مدار مخابراتی می‌شود.

جریان‌های خروجی از یک‌سوکننده‌ها در حدود ۵ آمپر و یا کمتر، اختلالاتی ایجاد نمی‌کند. برای جریان‌های بیشتر و یا در صورت وجود اختلال، باید ملاحظات دیگری برای پایین آوردن صداهای ناخواسته مد نظر قرار گیرد.

۹-۲-۵-۲ سیستم‌های حفاظت کاتدی در مجاورت تأسیسات علامت‌دهی راه‌آهن[2] و مدارهای ایمنی

علاوه بر انجام اقدامات ضروری، برای جلوگیری از خوردگی تداخلی سازه‌های مدفون، باید در زمان بهره‌برداری از سیستم حفاظت کاتدی نصب شده روی و یا در مجاورت تأسیسات راه‌آهن، تمهیداتی انجام گیرد تا هیچ‌گونه اختلالی در سیستم‌های علامت‌دهی ایجاد نشود.

راه‌اندازی سیستم حفاظت کاتدی و یا آزمایش‌های مورد نیاز در نزدیکی خطوط راه‌آهن، نباید بدون اخذ مجوز از مسئولین راه‌آهن صورت گیرد. موارد زیر، ممکن است سبب اختلال در بهره‌برداری از سیستم‌های علامت‌دهی گردد:

الف – جریان یک‌سوی منتشره از سیستم حفاظت کاتدی، می‌تواند موجب اختلال در کارکرد روی رله‌های مدار ریلی شود که با جریان مستقیم کار می‌کند.

---

1 - Noize Voltages
2 - Rail Way Signal

ب – جریان‌های متناوب که در سیستم حفاظت کاتدی به عنوان منبع انرژی مورد استفاده می‌باشد، می‌تواند موجب اختلال در کارکرد رله‌های مدار ریلی شود که با جریان متناوب کار می‌کند.

ج – جریان‌های القایی ناشی از سیستم حفاظت کاتدی، می‌تواند در سیستم کنترل از راه دور که با تجهیزات علامت‌دهی کار می‌کند ایجاد اختلال نماید. مسئولین راه‌آهن باید برای آگاهی از آزمایش‌ها حداقل یک‌ماه فرصت داشته باشند. هنگام انجام آزمایش‌های تداخل با همکاری مسئولین راه‌آهن ممکن است، مسئولین راه‌آهن به آزمایش‌های اضافی برای اطمینان از اینکه سیستم حفاظت کاتدی در مدارهای علامت‌دهی و مدارهای دیگر، اختلال ایجاد نمی‌نماید نیاز داشته باشند. چنانچه مسئولین راه‌آهن برای اتصال دادن سازه تحت حفاظت به ریل‌ها یا سازه‌هایی‌که با ریل‌ها تماس دارند، موافقت نمودند، ممکن است سیستم‌های علامت‌دهی نیاز به حفاظت و ایمنی خاص داشته باشند (به بند ۵–۶ مراجعه شود).

۹–۲–۵–۳ آثار تداخلی مربوط به سطح داخل سازه به‌علت عدم پیوستگی الکتریکی در سازه‌های تحت حفاظت

به‌طوری‌که در بندهای ۵–۳–۱، ۵–۳–۳ و ۶–۲–۱–۳ مشخص گردیده، اگر حفاظت کاتدی به یک خط لوله حامل الکترولیت هادی اعمال شود، تداخل در امتداد هر ناپیوستگی الکتریکی می‌تواند موجب خوردگی در سطوح داخلی لوله شود. با توجه به اهمیت موضوع، انجام آزمایش‌هایی برای مطمئن شدن از پیوستگی الکتریکی (بند ۱۰–۵–۳) و اتصال بین قسمت‌ها، ضروری خواهد بود.

همان‌طورکه در آزمایش‌های ارزیابی آثار تداخل در بند ۹–۲–۱–۱ شرح داده شده، در بسیاری از موارد ممکن است آزمایش‌ها عملی نباشد، چون به نصب نقاط آزمایش مطابق بند ۱۰–۳–۲ نیاز می‌باشد تا بتوان پتانسیل بین سطح داخلی لوله و الکترولیت را اندازه‌گیری نمود.

۹–۳ اسکله‌ها و کشتی‌ها: خوردگی تداخلی در پایانه‌های دریایی و رودخانه‌ای

خوردگی تداخلی ممکن است در اثر تماس کشتی حفاظت شده با اسکله و یا کشتی حفاظت نشده و یا اسکله تحت حفاظت با کشتی‌های حفاظت نشده ایجاد شود.

در هر یک از موارد گفته شده، آثار تداخل، با اتصال کشتی حفاظت نشده به کشتی و یا اسکله حفاظت شده ممکن است کاهش یابد. این عمل فقط در صورتی می‌تواند مؤثر باشد که مقاومت اتصال از مقاومت آب کمتر باشد. در بعضی موارد که کشتی کوچک بوده یا یدک‌کش به مدت بسیار کمی در کنار اسکله قرار می‌گیرد، از اتصال الکتریکی می‌توان صرف‌نظر نمود. در مورد کشتی‌های حامل مواد آتش‌گیر و یا قابل انفجار، اتصال کشتی به اسکله توصیه نمی‌شود.

آثار تداخلی را می‌توان با طراحی حفاظت کاتدی برای اسکله‌ها و با قرار دادن آندها در سمت ساحل یا در محیط پایه‌های اسکله به حداقل رساند. اتصال لنگر کشتی‌ها با کناره اسکله‌های حفاظت شده، سبب بالا رفتن جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی اسکله می‌شود، پس طراحی سیستم حفاظت کاتدی باید با رعایت این موضوع انجام شود.

۱۰- اندازه‌گیری‌های الکتریکی

۱۰-۱ کلیات

در این بخش، تجهیزات مورد نیاز و روش‌های اندازه‌گیری ولتاژ، جریان، مقاومت و آزمون‌های پیوستگی سازه‌ها به منظور حصول اطمینان از راه‌اندازی صحیح سیستم حفاظت کاتدی مشخص گردیده و برخی از روش‌های مذکور بررسی و توصیف گردیده‌اند.

مراحل انجام این‌گونه آزمون‌ها که برای تأسیسات خاص باید انجام شود، در قسمت‌های مربوطه بیان گردیده است.

آزمایش‌های مربوط به خوردگی تداخلی در بخش ۹ و آزمایش‌های مورد نیاز در طی دوره راه‌اندازی، بهره‌برداری و نگهداری در بخش ۱۱ مورد بحث قرار گرفته‌اند.

۱۰-۲ اندازه‌گیری پتانسیل : دستگاه‌های اندازه‌گیری

۱۰-۲-۱ الکترودهای مرجع

۱۰-۲-۱-۱ کلیات

الکترودهای مرجع، همان‌طور که در بندهای ۱۰-۲-۱-۲ تا ۱۰-۲-۱-۴ شرح داده شده، به‌طور معمول برای اندازه‌گیری پتانسیل سازه – الکترولیت مورد استفاده قرار گرفته و یا به‌عنوان الکترود حس‌گر[1] در سیستم‌های کنترلی به‌کار برده می‌شوند (به بند ۵-۵-۵ رجوع شود). الکترود مرجع مس – سولفات مس، مناسب‌ترین الکترود برای ایجاد تماس با خاک و آب تازه می‌باشد، در حالی‌که الکترود مرجع نقره – کلرور نقره، برای غوطه‌ور شدن در آب‌های شور مورد استفاده قرار می‌گیرد. الکترودهای روی را می‌توان در آب دریای تمیز استفاده نمود. الکترودهایی که به عنوان الکترودهای حس‌گر مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که در یک دوره طولانی در حالت پایدار باقی بمانند.

در الکترودهای مرجعی که در آنها یک الکترود فلزی در تماس با یک محلول نمک غلیظ (مثل سولفات مس یا کلرور پتاسیم) هستند، غلظت محلول نمک در آنها با اضافه نمودن نمک جامد، ثابت می‌ماند. تماس با الکترولیت (آب یا خاک) توسط یک توپی متخلخل[2] صورت می‌پذیرد، که نقش یک پل نمکی بین الکترولیت و محلول غلیظ شده نمک را داشته و از آلوده شدن محلول نمک جلوگیری می‌نماید. توپی متخلخل می‌تواند از چوب یا سرامیک ساخته شود. الکترودها فقط تا زمانی مناسب هستند که نمک محلول غلیظ از طریق توپی متخلخل، به بیرون تراوش و نفوذ نماید. الکترودها را زمانی‌که مورد استفاده قرار نمی‌گیرند، باید در محلول اشباع شده نمک مربوطه نگهداری نمود.

این‌گونه الکترودها باید به صورت دوره‌ای، و با یک الکترود نو و تازه‌ساخت مقایسه شوند و هر گاه اختلاف بین آنها از ۲۰ میلی‌ولت بیشتر باشد، باید از مواد تازه‌ای در ساختار آنها استفاده نمود.

---

1 - Sensing Electrode
2 - Porous Plug

برای آب دریای بدون آلودگی، الکترود نقره – کلرور نقره را می‌توان با حذف توپی متخلخل برای مدت زمان زیادی استفاده کرد. که در این صورت، فلز و کلرور نقره آن در تماس با آب دریا خواهند بود. همین وسیله (کلرور نقره روی نقره پوشش داده می‌شود) را در آب‌های لب شور نیز می‌توان استفاده نمود. البته باید به این نکته توجه نمود که تغییرات شوری در مقدار اندازه‌گیری‌ها تأثیر خواهند گذاشت (به بند ۱۰-۲-۱-۳ رجوع شود).

۱۰-۲-۱-۲ الکترود مرجع مس - سولفات مس

یک شکل عمومی از الکترود مرجع مس – سولفات مس که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، در شکل (۱۳) نشان داده شده است. ابعاد الکترود می‌تواند متناسب با روش کاربرد، ساخته شود. ولی در هر حال، سطح تماس الکترود مس با محلول سولفات مس باید به اندازه کافی باشد، که از قطبی‌شدن در طول مدت آزمایش جلوگیری به‌عمل آید.

الکترود فلزی باید از جنس مس با رسانایی بالا و با خلوص تعیین شده از استانداردهای معتبر[1] باشد. مس، ابتدا باید به‌گونه‌ای تمیز شده باشد که هیچ اثری از اکسید یا روغن روی آن نبوده و پس از تمیز شدن در محلول سولفات مس اشباع شده غوطه‌ور شود. استفاده از سولفات مس جامد اضافه، در محلول، برای پایداری حالت اشباع ضروری است. محلول سولفات مس باید از کریستال‌های مرغوب سولفات مس خالص آزمایشگاهی و آب مقطر یا آب یون زدایی شده که ترجیحاً در یک ظرف شیشه‌ای تمیز جوشانده شده باشد، ساخته شود. تماس الکتریکی با خاک فقط از طریق جزء متخلخل الکترود که از طریق تراوش محلول سولفات مس به بیرون مرطوب می‌ماند، صورت می‌گیرد. اگر قرار است این نوع الکترود برای مدت زیادی، بدون استفاده باقی بماند، بهتر است حتماً در محلول سولفات مس اشباع شده غوطه‌ور گردد.

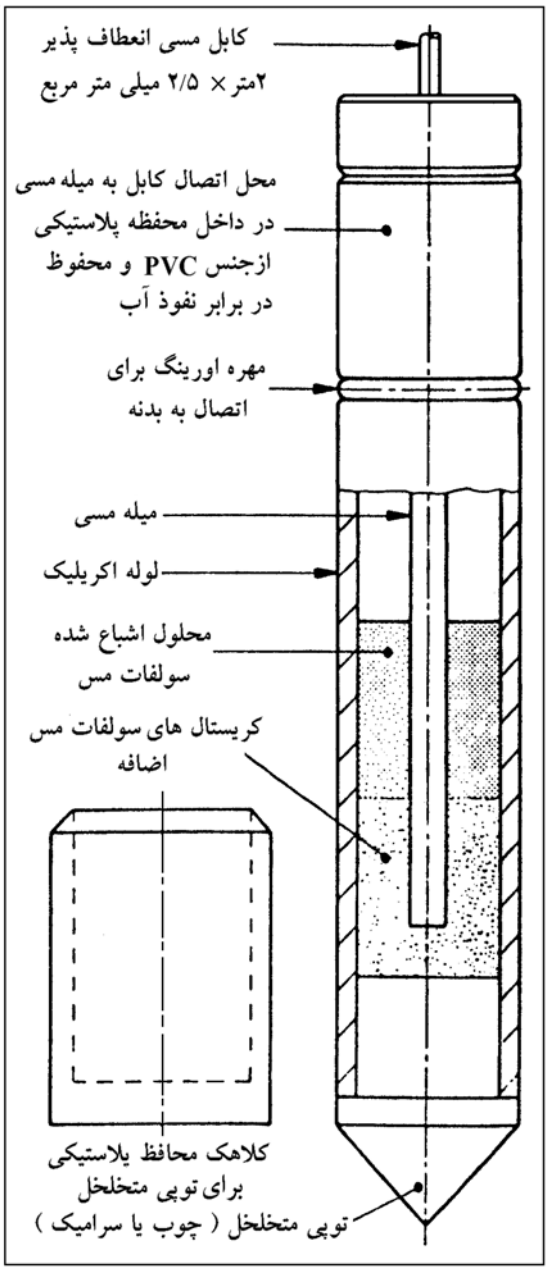
۱۰-۲-۱-۳ الکترودهای مرجع نقره - کلرور نقره

الکترودهای مرجع نقره – کلرور نقره، از جنس نقره می‌باشد که سطح آن با کلرور نقره به روش‌های حرارتی و یا الکترولیتی پوشش داده شده است. این الکترود، از پایداری بالایی برخوردار است. این الکترود را می‌توان به طور مستقیم در آب دریا یا آب‌های نمکی در مدخل رودخانه[2] (مصب) استفاده نمود. برای اندازه‌گیری پتانسیل فولاد در داخل بتن می‌توان از الکترود نقره – کلرور نقره – کلرور پتاسیم استفاده کرد. الکترودهای مورد استفاده در آب دریا به منظور حفاظت مکانیکی، داخل یک محفظه سوراخدار و قابل نفوذ آب قرار می‌گیرند، تا آب با الکترود در تماس باشد. آنها را باید تا چند ساعت قبل از مصرف در آب تازه دریا غوطه‌ور نمود. انتهای کابل باید عایق شود تا از ایجاد اتصال کوتاه در الکترود جلوگیری به عمل آید.

تغییرات شوری آب روی پتانسیل این الکترود تأثیر خواهد گذاشت. رقیق شدن آب دریا، که در مصب ورودی رودخانه‌ها به آب دریا اتفاق می‌افتد، الکترود را مثبت‌تر می‌کند، بنابراین اصولاً باید پتانسیل حفاظت مقداری منفی‌تر از پتانسیل حداقل بیان شده در جدول (۱) (به بند ۴-۳-۲ رجوع شود) برای الکترود نقره – کلرور نقره – آب دریا در نظر گرفته شود؛ هر چند تغییرات پتانسیل به ازای هر ده برابر تغییر در غلظت از مقدار ۶۰ میلی‌ولت بیشتر نخواهد شد. بنابراین در بسیاری از موارد، با قبول یک مقدار جزیی پتانسیل منفی‌تر، این اثر جبران می‌شود. ولی اگر تأثیر تغییرات شوری آب، روی اندازه‌گیری‌ها غیرقابل چشم‌پوشی باشد، الکترود باید در محلول اشباع کلرور پتاسیم درون محفظه بدون سوراخ غوطه‌ور گردد و توسط یک توپی متخلخل از محیط پیرامون خود جدا شود. الکترود در زمانی که استفاده نمی‌شود، باید درون محلول اشباع کلرور پتاسیم نگهداری شود.

---

1 - BS 2874 grade C 101
2 - Saline Estuarine Waters



شکل ۱۳- نمونه الکترود مرجع مس - سولفات مس

۱۰-۲-۱-۴ الکترودهای مرجع روی

اگر چه به‌طور متداول استفاده از یک الکترود مرجع فلزی در تماس مستقیم با الکترولیت اطراف سازه برای مقاصد اندازه‌گیری توصیه نمی‌شود، ولی الکترود از جنس روی در آب تمیز دریا، در خیلی از موارد، کاربرد دارد. ولی کاربرد آن به غیر از آب دریا توصیه نمی‌شود. ضروری است که الکترود روی، به اندازه کافی خالص (۹۹/۹ درصد روی با حداکثر آهن به میزان ۰/۰۰۱۴ درصد) باشد (به بند ۴-۵-۳-۳ رجوع شود).

برخی از آلیاژهای روی که در ساخت آندهای فدا شونده مصرف می‌شوند نیز، می‌توانند مفید باشند. الکترود فلزی می‌تواند به هر شکل مناسبی ساخته شود. الکترودهای از جنس روی به مراتب ارزان‌تر و با استحکام‌تر از الکترودهای نقره – کلرور نقره هستند و می‌توانند به جز مواقعی که پایداری بالایی مورد نیاز است استفاده شوند. تجربه استفاده از روی در آب دریا، نشان داده است که دقت آزمایش برای الکترودهای روی ۳۰ ± میلی‌ولت و برای الکترود نقره – کلرور نقره – آب دریا ۵ ± میلی‌ولت است.

۱۰-۲-۲ پتانسیل‌های الکترود مرجع

پتانسیل الکترودهای مرجع مختلف نسبت به الکترود هیدروژن استاندارد، در جدول (۶) آورده شده است. الکترود کالومل که مورد استفاده آن در آزمایشگاه برای کنترل الکترودهای مرجع است نیز در جدول آورده شده است. خاطر نشان می‌سازد، الکترود کالومل برای کاربردهای صحرایی به حد کافی استحکام ندارد.

جدول ۶- پتانسیل الکترودهای مرجع نسبت به الکترود هیدروژن استاندارد (در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد)

نوع الکترود	پتانسیل بر حسب ولت
مس – سولفات مس	+ ۰/۳۲
نقره – کلرور نقره – کلرور پتاسیم اشباع	+ ۰/۲۰
نقره – کلرور نقره – آب دریا	+ ۰/۲۵ (تقریبی)
کالومل (کلرور پتاسیم اشباع)	+۰/۲۵
روی – آب دریا	−۰/۷۸ (تقریبی)

توجه ۱: تأثیر درجه حرارت معمولاً در طی آزمایش صحرایی به حساب نمی‌آید.

توجه ۲: پتانسیل الکترودهای مرجع عموماً نسبت به الکترود هیدروژن استاندارد سنجیده می‌شود (این الکترود در عمل، برای اندازه‌گیری، به‌ندرت استفاده می‌شود). هدف از تشکیل این جدول، قابلیت تبدیل پتانسیل‌های سازه به الکترولیت اندازه‌گیری شده توسط یک الکترود به الکترودهای دیگر است. به عنوان مثال، مشاهده می‌گردد که الکترود روی– آب دریا ۱/۱ ولت نسبت به الکترود مس – سولفات مس مثبت‌تر است در نتیجه پتانسیلی که فرضاً با الکترود مس – سولفات مس اندازه‌گیری شده و مقدار ۰/۸۵– را نشان می‌دهد نسبت به الکترود روی / آب دریا ۱/۱ ولت مثبت‌تر خواهد بود (یعنی ۰/۲۵+ ولت). شکل (۱۴) مقیاس تبدیل پتانسیل الکترودهای مرجع رایج را به یکدیگر نمایش می‌دهد.

۱۰-۲-۳ ولت‌مترها

ولت‌مترهایی که برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بین سازه و الکترولیت مورد استفاده قرار می‌گیرند، ضرورتاً باید از مقاومت بالایی برخوردار باشند در غیر این‌صورت افت پتانسیل ناشی از مدار خارجی (در اثر وجود مقاومت الکترود مرجع و هم‌چنین مقاومت در اثر تماس بین الکترود مرجع و الکترولیت) موجب خطا می‌گردد. برای حصول اطمینان از حداقل شدن این خطا، باید

مقاومت ولت‌متر به مراتب از مقاومت مدار خارجی بزرگ‌تر باشد. برای اندازه‌گیری پتانسیل سازه به الکترولیت، معمولاً از ولت‌مترهایی با مقاومت داخلی بیش از ۱۰ مگا اهم استفاده می‌گردد. ولت‌مترهای ویژه‌ای با آمپدانس داخلی متغیر بین ۱ مگا اهم تا ۱۰۰ مگا اهم موجود می‌باشند. با این‌گونه ولت‌مترها می‌توان از درستی اندازه‌گیری‌ها مطمئن شد. از آنجایی که با اضافه کردن مقاومت داخلی ولت‌متر و به تبع آن حذف شدن اثر مقاومت بالای مدار خارجی تفاوت بین قرائت‌های مختلف از بین می‌رود.

ولت‌مترهای با مقاومت داخلی بالا (یعنی حدوداً بیشتر از ۱۰ مگا اهم) باید با احتیاط بیشتری مورد استفاده قرار گیرند. به‌عنوان مثال، اگر الکترود مرجع قطع شده باشد یا از مقاومت بالایی برخوردار گردد، با این حال قرائت‌های ظاهراً صحیحی از طریق مسیرهای غیر قابل انتظار به‌دست می‌آید.

ولت‌مترهایی‌که برای اندازه‌گیری پتانسیل به‌کار برده می‌شوند، باید به ولتاژهای متناوبی که با ولتاژ مورد اندازه‌گیری تداخل می‌نمایند و نیز به تغییرات میدان مغناطیسی حساس نباشند تا از اشتباهاتی که از این طریق به‌وجود می‌آید، در امان باشند.

هنگامی‌که اندازه‌گیری ولتاژ سازه به الکترولیت در آزمایش تداخل روی سازه مجاور مد نظر باشد، استفاده از ولت‌متری که بتواند تغییرات پتانسیل را تا مقادیر کمتر از ۲ میلی‌ولت نشان دهد ضروری خواهد بود.

ولت‌مترهایی که برای مقاصد دیگری همچون اندازه‌گیری ولتاژ خروجی یک‌سوکننده‌ها استفاده می‌شوند، باید با ویژگی‌های استانداردهای معتبر[1] تطبیق نماید.

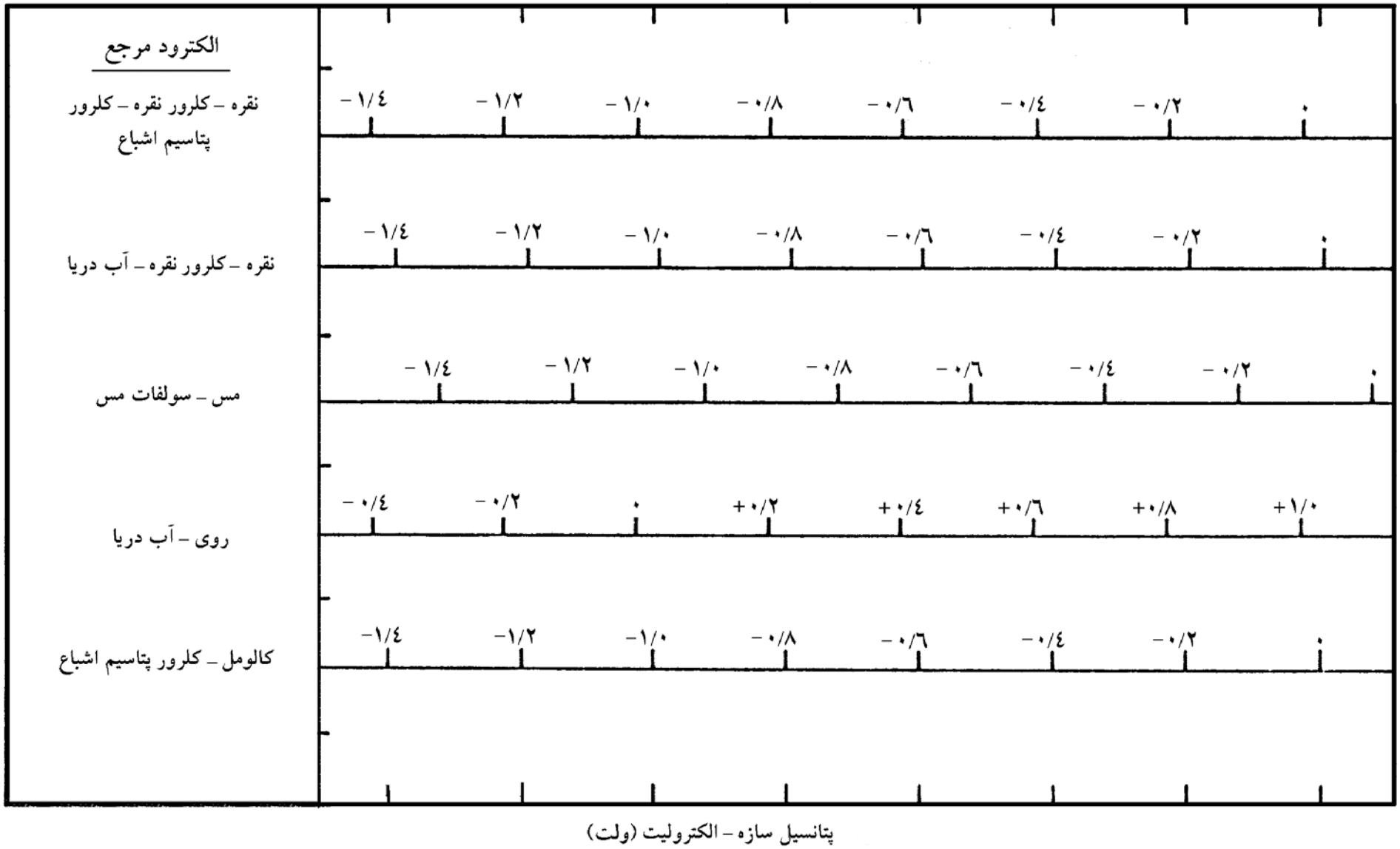
۱۰-۲-۴ پتانسیومترها

پتانسیومترهای قابل حمل و نقل که دارای آشکارسازهای حساس نقطه صفر[2] هستند، مقاومت را افزایش داده و از این‌رو می‌توانند در اندازه‌گیری جریان، تحمل زیادی داشته باشند زیرا در حالت تعادل، هیچ‌گونه جریان قابل ملاحظه‌ای را از مدار به خارج عبور نمی‌دهند.

در طول فرآیند به تعادل رسیدن، حداکثر جریان نباید به حدی باشد که الکترود مرجع را قطبی[3] کند و نیز نشانگر نقطه صفر باید حساسیت کافی در برابر رویارویی با بیشترین مقاومت خارجی احتمالی را داشته باشد، تا دقت لازم را از خود نشان دهد. علاوه بر پتانسیومترهایی که در آنها ولتاژ از طریق تنظیم مقاومت‌های کالیبره شده مشخص می‌گردد، وجود ولت‌متر پتانسیومتری غالبا یک ترکیب مفیدی از تجهیزات برقی را به‌وجود می‌آورد. ولت‌متر می‌تواند به‌طور مستقیم و یا به عنوان آشکارساز مدار پتانسیومتر به‌کار رود. مقاومت‌های پتانسیومتر، مدرج نشده هستند و بعد از تعادل، یک سوییچ، ولت‌متر را به منظور ارزیابی اختلاف پتانسیل، در دو سر مدار پتانسیومتر قرار می‌دهد. از زمان عرضه ولت‌مترهای دیجیتال با مقاومت بالا، استفاده از پتانسیومترها کاهش یافته است.

---

1 - BS 89
2 - Sensitive Null Point Detectors
3 - Polarized



شکل ۱۴– مقایسه پتانسیل‌های سازه به الکترولیت با الکترودهای مرجع متفاوت

۱۰-۲-۵ ثبت کننده‌ها و دستگاه‌های ذخیره داده‌ها

هر گاه نیاز به ثبت ولتاژ سازه به الکترولیت، به‌صورت پیوسته باشد، می‌توان از یک ثبت کننده ولتاژ با محدوده مناسب و با مقاومت ورودی استفاده نمود. هر گونه تغییر پتانسیلی، توسط این دستگاه قابل لمس است و تمامی انحراف‌های پتانسیل ناشی از محیط یا شرایط بهره‌برداری را نمایش می‌دهد. این وسیله بویژه در محل‌هایی مفیدتر واقع می‌شود که تغییرات پتانسیل اغلب اجتناب ناپذیرند، مثل زمانی که اثر جریان‌های نشتی سیستم قطار dc پایش می‌شود. بعضی از ثبت کنندهای الکترونیکی، ابتدا باید روی نقطه صفر تنظیم شوند، که در این صورت طراحی الکترود مرجع، کار مشکل و حساسی نخواهد بود. برخی دیگر از ثبت کننده‌ها امپدانس پایینی دارند، که در این حالت باید از طریق آزمایش، صحت الکترود مرجع تأیید شود و در صورت نیاز سطح تماس الکترود فلزی با آب یا خاک افزایش داده شود.

معمولاً از ثبت کننده‌های اطلاعات چند کاناله دیجیتالی، برای تأسیسات حفاظت کاتدی بزرگ استفاده می‌شود. این ولت‌مترها نوعاً دارای دقتی در حد ۰/۱ درصد هستند و امپدانس ورودی آنها بسته به محدوده عملکردشان از ۱ مگا اهم تا ۱۰۰۰ مگا اهم تغییر می‌کند. علاوه بر صفحه نمایش دیجیتال، قابلیت چاپ کردن و ذخیره اطلاعات روی دیسک یا نوار را نیز دارا می‌باشند. حتی می‌توانند به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شوند که فقط قرائت‌های غیرعادی را ثبت نمایند. در حال حاضر، در میکروپروسسورهای قابل حمل، برای جمع‌آوری، ذخیره و تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری‌های صحرایی، مخصوصاً زمانی‌که حجم زیادی از اطلاعات ثبت شده (داده‌ها) وجود دارد، استفاده می‌شود.

۱۰-۳ روش‌های اندازه‌گیری پتانسیل

۱۰-۳-۱ کلیات

اتصال به سازه، می‌تواند در هر قسمتی از سازه که در دسترس یا نزدیک به محل استقرار الکترود مرجع است صورت گیرد. ولی به‌هرحال وجود یک اتصال الکتریکی خوب فلز (سازه) به فلز (الکترود) ضروری است. همچنین وجود یک مدار فلزی پیوسته کم مقاومت، بین نقطه اتصال و آن بخشی از سازه که نزدیک به الکترود مرجع است نیز ضروری است. این اتصال نباید قبل از اتصالات مکانیکی، روی شیرفلکه‌ها، به لوله‌هایی که به پیوستگی فلزی آنها مشکوک هستیم، یا به کابلی که حامل جریان کاتدی است، صورت پذیرد.

۱۰-۳-۲ سازه‌های مدفون

۱۰-۳-۲-۱ اتصال الکترود مرجع با سازه‌ها

در محل‌هایی که احتمال انجام آزمایش در آینده وجود دارد و همچنین برای تأسیسات جدید، ترجیحاً نقاطی برای آزمایش آماده می‌شوند. در این نقاط، یک هادی عایق شده به‌طور محکم به سازه متصل شده و سر دیگر آن به یک محل قابل دسترس هدایت می‌شود (به بند ۶-۲-۱-۴ رجوع شود)؛ در غیر این‌صورت، خاک و پوشش محافظ باید به دقت از اطراف محل اتصال الکترود به سازه برداشته شود تا بتوان اتصال فلزی محکم مذکور را ایجاد نمود.

۱۰-۳-۲-۲ تعیین محل، برای قرار دادن الکترود مرجع

الکترود مرجع، هنگام آزمایش باید مستقیماً بالای سازه مورد اندازه‌گیری قرار گیرد. وقتی الکترود مرجع نزدیک سطح سازه قرار می‌گیرد، جابه‌جایی خاک می‌تواند روی گرادیان پتانسیل تغییر ایجاد نماید، بنابراین حفاری و خاکبرداری باید به مقدار حداقل صورت گیرد. در هر صورت، تماس کافی خاک با الکترود مرجع ضروری است. نوع تماس، روی مدار اندازه‌گیری تأثیر دارد.

بیان این نکته ضروری است که خطاهای ناشی از گرادیان پتانسیل خاک محسوس هستند و بسته به موقعیت قرارگیری سازه، می‌توانند به زیاد یا کم برآورد کردن تغییرات پتانسیل مثبت منتهی شوند.

مقاومت الکترود مرجع به زمین را می‌توان با خیس نمودن سطح تماس کاهش داد. در حالتی که کف زمین سنگ‌فرش شده باشد، می‌توان الکترود مرجع را زیر تپه‌ای از خاک یا شن خیس واقع روی شیارهای بین سنگ‌ها دفن نمود و با تغییر مقاومت دستگاه اندازه‌گیری، از درستی این تماس آگاه گردید. برای مثال، با تغییر دامنه اندازه‌گیری، کافی است از حساسیت دستگاه نسبت به خارج شدن از حالت تعادل مطمئن گردید. اگر افت پتانسیل درون خاک (افت ولتاژ IR) در اندازه‌گیری گنجانده شده باشد، در این صورت خطای اندازه‌گیری می‌تواند به حفاظت کم[1] منجر گردد. در واقع، پتانسیل اندازه گرفته شده نسبت به پتانسیل واقعی موجود بین سازه و الکترولیت منفی‌تر خواهد بود. الکترود مرجع تا حد امکان باید نزدیک به سازه قرار داده شود بدون آنکه تماسی با آن داشته باشد؛ حتی اگر این مسئله هم رعایت شود، در هر حال امکان خطای ناشی از افت ولتاژ (IR) از طریق هر نوع پوشش محافظتی وجود خواهد داشت. لازم به یادآوری است که برای آزمایش در هنگامی که افت ولتاژ (IR) به‌صورت یک مسئله مطرح می‌شود، روش‌هایی فراهم شده است (به بخش‌های ۱۰-۳-۲-۳ و ۱۰-۳-۲-۴ رجوع شود).

۱۰-۳-۲-۳ روش قطع آنی پتانسیل[2]

هنگامی که جریان عبوری از یک سطح قطبی شده قطع می‌گردد، اختلاف پتانسیل دو سر اتصال خیلی آهسته‌تر از افت‌های پتانسیل مقاومتی (یعنی افت IR) که خیلی سریع کم می‌شود، تغییر می‌کند. بنابراین اگر پتانسیل سازه به خاک سریعاً پس از قطع جریان حفاظت کاتدی اندازه‌گیری شود، قرائت حاصل، نشان‌دهنده پتانسیل سطح اتصال قطبی شده می‌باشد. این عمل، نشان می‌دهد که آیا حفاظت حاصل شده است یا خیر ؟

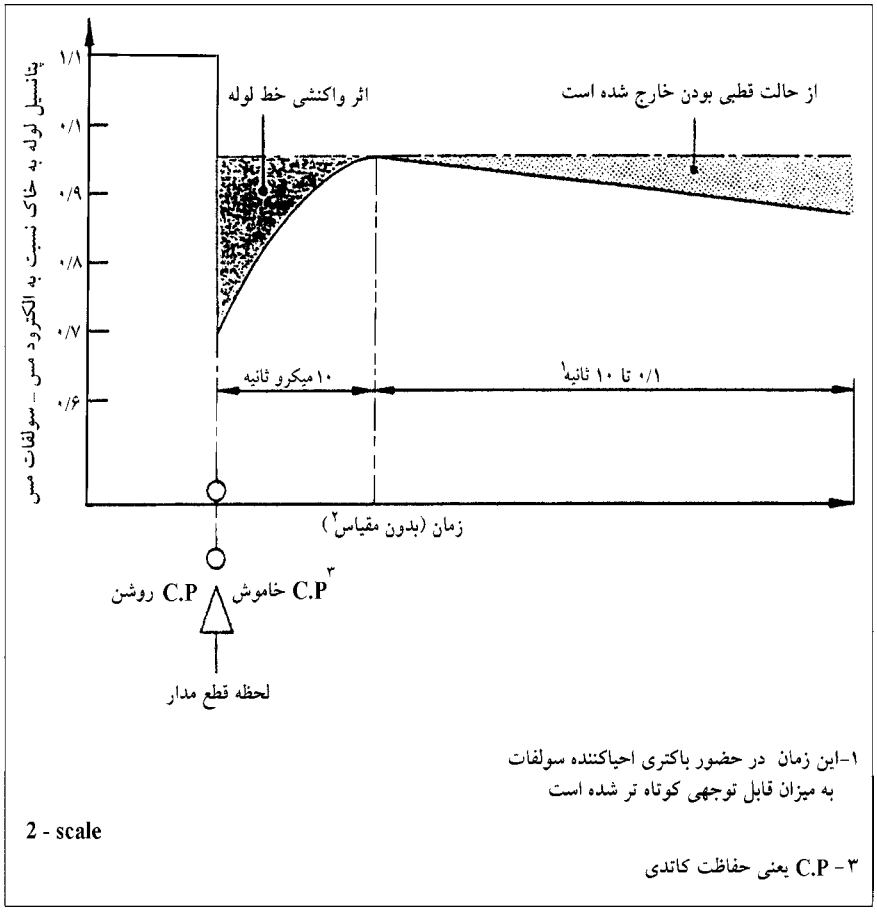
نرخ افت پتانسیل، به عواملی از قبیل طبیعت خاک و مدت زمانی‌که برای قطبی شدن سازه (یعنی مدت‌زمان روشن کردن مبدل ایستگاه حفاظت کاتدی) به‌کار گرفته شده، بستگی دارد. این عوامل، زمان موجود برای اندازه‌گیری پتانسیل را بعد از قطع سوییچ تعیین می‌کند. تأخیر بیش از حد در قرائت پتانسیل به دلیل کاهش قطبی‌شدن در سطح سازه، باعث پایین‌تر ارزیابی‌شدن سطح حفاظت از میزان واقعی خواهد شد. زمان پیشنهادی برای اندازه‌گیری در محدوده ۰/۱ تا ۳ ثانیه خواهد بود (شکل (۱۵) را ببینید). اندازه‌گیری‌ها باید در فواصل زمانی قطع و وصل جریان حفاظت کاتدی انجام شود. در بیشتر مواقع، رعایت نسبت ۱ به ۴ برای زمان خاموش به زمان روشن باعث کاهش قابل ملاحظه قطبی‌بودن نخواهد شد. در مواردی که بیش از یک منبع جریان وجود داشته باشد، هماهنگی بین منابع جریان ضروری خواهد بود.

---

1 - Under Protection
2 - Instantaneous-off Potential Method

اگر روی سطح پوشش سازه، منافذی[1] با ابعاد متفاوت باشد، این منافذ می‌توانند باعث تغییر در مقدار قطبی‌شدن سازه شوند. هرگاه روی سطح پوشش سازه، منافذی با اندازه‌های مختلف پدید آید در آن صورت نواحی لخت فلز با مقدار پتانسیل‌های متفاوتی قطبی خواهند شد. بنابراین بلافاصله بعد از قطع جریان حفاظتی جریان بین نواحی لخت فلز برقرار خواهد شد که دوباره باعث به‌وجود آمدن خطای افت ولتاژ (IR) می‌گردد. اگر این جریان چشمگیر باشد، پتانسیل مشخص شده برای منافذ نزدیک نقطه آزمایش، بین حد بالا و پایین پتانسیل فلز به خاک خواهد بود. بنابراین استفاده از این روش‌ها، به حفاظت کم منتهی خواهد گردید. در مجموع، این خطا در مقایسه با خطای افت ولتاژ (IR) ناشی از جریان حفاظت کاتدی، قابل چشم‌پوشی است. به هر حال، احتمال بروز این خطا توسط جریان‌های سرگردان dc بیشتر می‌باشد؛ البته با افزایش دامنه جریان، این خطا نیز افزایش می‌یابد. روش کوپن[2] می‌تواند از بروز این مسئله جلوگیری نماید (به بند ۱۰-۳-۲-۴ رجوع شود).

علی‌رغم احتمال وجود چنین منابع خطایی، بسیاری از مراجع، پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده توسط این روش را در تشخیص میزان حفاظت ایجاد شده، نسبت به روش‌های ساده‌تری که از افت ولتاژ (IR) چشم‌پوشی می‌کنند، مفیدتر می‌دانند.



شکل ۱۵- اندازه‌گیری پتانسیل قطع آنی یا قطبی شده خطوط لوله

1 - Haliday
2 - Coupon method

۱۰-۳-۲-۴ استفاده از نمونه آزمایشی (کوپن)[1]

جنس نمونه‌های آزمایشی باید از همان جنس فلز سازه و دارای پوشش مشابه سازه تحت آزمایش باشد؛ مگر در قسمت‌های مشخص شده که بدون پوشش باقی می‌ماند. نمونه‌ها باید تا حد امکان نزدیک به سازه و در ترازی که خاک آن از نظر ترکیب و رطوبت شبیه خاک اطراف سازه باشد دفن شوند. آنها از طریق یک اتصال آزمایش[2] قابل دسترس (جعبه اتصال) به سازه متصل می‌شوند.

فرض بر این است که، پتانسیل نمونه به خاک مجاورش، مشابه پتانسیل سازه به خاک در قسمت منفذدار پوشش می‌باشد. به همین علت، سطح بدون پوشش نمونه باید طوری انتخاب گردد که بتواند یکی از بزرگترین منافذ قابل ایجاد روی سطح سازه را شبیه‌سازی نماید. پتانسیل نمونه به خاک از طریق روش قطع آنی پتانسیل قابل اندازه‌گیری است. استفاده از این نمونه، باعث قطع کامل جریان عبوری از اتصال آزمایش را ممکن کرده و بدین‌ترتیب اثر برخورد جریان حفاظتی بین نواحی بدون پوشش و جریان‌های سرگردان را از بین خواهد برد. علاوه بر آن، به منظور آگاهی از چگالی جریان، می‌توان جریان گذرنده به سمت ناحیه بدون پوشش را اندازه‌گیری نمود. در صورتی‌که سازه حفاظت شده نزدیک به نمونه، جریان زیادی را مصرف نماید، امکان دارد اندازه‌گیری پتانسیل نمونه، گمراه‌کننده باشد.

۱۰-۳-۳ سازه‌های غوطه‌ور

۱۰-۳-۳-۱ سازه‌های غوطه‌ور به غیر از کشتی‌ها

در مواردی‌که دسترسی به سازه‌های فولادی از بالای اسکله مشکل باشد، از تعدادی نقطه مناسب روی سطح اسکله که بتوان اتصال لازم را ایجاد نمود، استفاده می‌شود.

معمولاً از الکترودهای مرجع ثابت، به دلیل مشکل تعمیر و نگهداری آنها استفاده نمی‌شود. (به‌جز الکترودهای حس‌گر به منظور کنترل اتوماتیک). استفاده از الکترودهای قابل حمل نیز به دلیل ناسازگاری آنها با قرار گرفتن در اطراف سازه مشکل می‌باشد. برای غلبه بر این مشکل، می‌توان از لوله‌های پلاستیکی سوراخدار (که به قسمت‌های مختلف سازه، در محل‌هایی که اندازه‌گیری در آنها ضروری است، ثابت شده‌اند)، استفاده کرد. الکترود مرجع از طریق این لوله در عمق از پیش تعیین شده فرستاده می‌شود. بدین ترتیب، الکترود مرجع، در موقعیت مورد لزوم اطراف سازه تحت حفاظت قرار می‌گیرد.

موقعیت و مکان قرارگیری الکترود مرجع، برای آزمایش از روی موقعیت آندها تعیین می‌گردد (به عنوان مثال، بسترهای آندی دور یا تعدادی از آندهای زیر آب). باید توجه داشت که اندازه‌گیری‌ها در فواصل دور از آند (به عنوان مثال در طرفی از پایه اسکله که آند وجود ندارد و نیز در طرفی از پایه اسکله که آند وجود دارد) و نیز نزدیک به آندها (به عنوان مثال برای پایش[3] حفاظت بیش از حد) سازه انجام شود.

---

1 - Coupon
2 - Test Link
3 - Monitoring

۱۰-۴ اندازه‌گیری جریان مستقیم

۱۰-۴-۱ کلیات

برای اندازه‌گیری جریان مستقیم، معمولاً از یک آمپرمتر که به‌صورت سری در مدار قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری جریان مستقیم، به یک دستگاه سیم پیچ متحرک و یا یک اندازه‌گیر دیجیتالی dc نیاز است. قرار دادن یک آمپرمتر در مدار، مقاومت کل مدار را بالا خواهد برد که در نهایت باعث کاهش جریان اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین خطایی در اندازه‌گیری به‌وجود می‌آورد؛ پس مقدار مقاومت آمپرمتر ضرورتاً نسبت به مقاومت مدار کل باید در حد کمی باشد. کارخانه سازنده، اصولاً مقدار این مقاومت را بر حسب میلی‌ولت در آخرین حد انحراف عقربه[1] بیان می‌کند. با استفاده از این مقدار، افت ولتاژ واقعی در مسیر آمپرمتر که در اثر جریان به‌وجود می‌آید قابل اندازه‌گیری و قابل مقایسه با نیروی محرکه (e.m.f) مدار خواهد بود. مقدار افت ولتاژ در داخل آمپرمتر به صورت درصدی از نیروی محرکه (e.m.f)، درصد خطای تقریبی آمپرمتر را بیان می‌کند.

۱۰-۴-۲ اندازه‌گیری جریان مستقیم در سیستم با اعمال جریان

برای اندازه‌گیری‌های جریان مستقیم در سیستم‌های با اعمال جریان، به عنوان مثال خروجی از مبدل یک‌سوکننده و جریان‌های آند، نیروی متحرکه، معمولاً چند ولت و یا بیشتر خواهد بود. میزان افت ولتاژ در مدار آمپرمتر معمولاً درصد کمی از نیروی محرکه (e.m.f) می‌باشد و در نتیجه مقدار خطای ناچیزی در اندازه‌گیری جریان را سبب می‌شود.

بیشتر مولتی‌مترها[2] محدوده‌هایی تا ۱۰ آمپر را فراهم می‌کنند. برای اندازه‌گیری جریان‌های بیشتر از آن، از یک مقاومت[3] مدرج شده همراه با قسمت میلی‌ولت یک مولتی‌متر استفاده می‌شود. افت میلی‌ولت دو سر یک شنت با مقاومت معلوم می‌تواند برای محاسبه جریان به‌کار رود. به عنوان مثال، یک مقاومت ۵۰ آمپر/ ۷۵ میلی‌ولتی، مقاومتی معادل ۰/۰۰۱۵ اهم یا هر ۱/۵ میلی‌ولتی معادل ۱ آمپر جریان می‌باشد. برای یک آمپرمتر، می‌توان مقیاس آنرا به‌گونه‌ای درجه‌بندی کرد که مستقیماً جریان را قرائت کند.

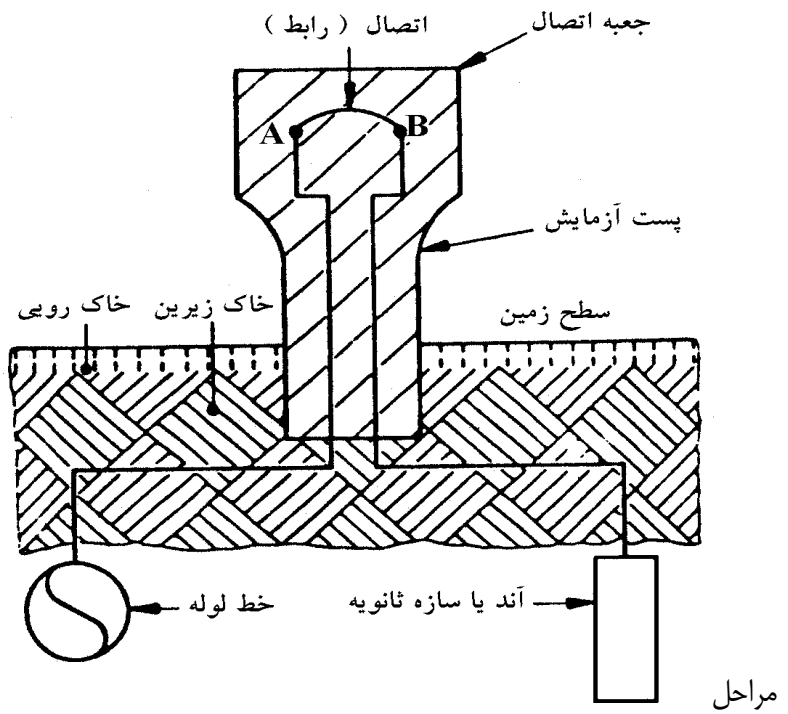
۱۰-۴-۳ اندازه‌گیری جریان مستقیم در مدارهای با ولتاژ بسیار پایین (سیستم آند فدا شونده)

ولتاژ محرکه در سیستم‌های آند فدا شونده، در حدود چندصد میلی‌ولت می‌باشد. و در مدارهایی که دو سازه متصل به‌هم وجود دارد، ولتاژ محرکه ممکن است از این مقدار نیز پایین‌تر باشد. قرار دادن آمپرمتر در این مدارها می‌تواند جریان واقعی مدار را تغییر دهد و خطای چشمگیری در جریان اندازه‌گیری شده، پدید آورد. در این حالت، ضرورتاً از محدوده خاصی از مولتی‌متر انتخاب می‌شود، که تأثیر قابل توجهی در مقاومت مدار ایجاد نکند. آمپرمترها و مقاومت‌های ویژه‌ای وجود دارند که کمتر از ۵۰ میلی‌ولت (به ازای آخرین حد انحراف عقربه)، افت ایجاد کرده و خطاهای اندازه‌گیری را به حداقل می‌رسانند.

---

1 - Full Scale Deflection
2 - Multimeters
3 - Shunt

اگر انتخاب چنین آمپرمتر یا مقاومتی امکان‌پذیر نباشد، می‌توان با اندازه‌گیری ولتاژ توسط یک ولت‌متر مقاومت بالای مجزا، مقدار صحیح جریان را محاسبه نمود (به شکل ۱۶ رجوع شود).



مراحل

الف- برداشتن رابط اتصال بین ترمینال‌های A و B .

ب- اندازه‌گیری پتانسیل دوسر AB توسط یک میلی‌ولت‌متر امپدانس بالا (V1)

ج- اندازه‌گیری جریان توسط قرار دادن آمپرمتر بین AB (I)

د- اندازه‌گیری پتانسیل دوسر AB وقتی که آمپرمتر متصل می‌باشد (V2)

مقدار صحیح جریان = $\frac{IV_1}{V_1-V_2}$

شکل۱۶- روش تعیین مقدار صحیح جریان گذرنده از مدارهای با ولتاژ خیلی کم

۱۰-۴-۴ مدار آمپرمتر بامقاومت صفر[1]

برای غلبه بر مشکلات بیان شده در بخش ۱۰-۴-۳، می‌توان از آمپرمتر با مقاومت صفر همان‌طور که در شکل (۱۷- الف) نمایش داده شده استفاده نمود. این مدار، از یک آمپرمتر به‌صورت سری با یک منبع ولتاژ dc قابل تغییر، تشکیل شده است که با تنظیم منبع، می‌توان ولتاژ دو سر گالوانومتر متصل به ترمینال‌های اندازه‌گیری را صفر نمود. در اینجا، آمپرمتر، مقدار واقعی

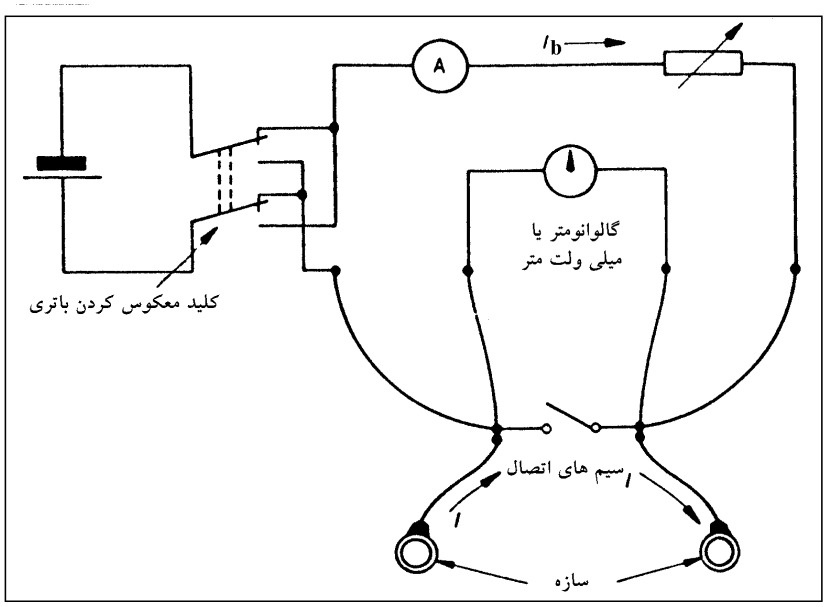
1- Zero Resistance Ammeter Circuit

جریان را نشان می‌دهد. با فراهم نمودن حساسیت بالا برای گالوانومتر، حتی می‌توان دستگاه را به‌صورت موازی به هادی حامل جریان متصل نمود (به شکل ۱۷- ب رجوع شود).

هنگامی که گالوانومتر روی نقطه صفر تنظیم و جریان از سمت آمپرمتر جاری شد، می‌توان مشابه مورد قبلی از دستگاه استفاده نمود. گزینه دیگر، تغییر در قرائت گالوانومتر به سبب معکوس کردن جریان اندازه‌گیری شده می‌باشد که یادآور این نکته است که ممکن است گالوانومتر کالیبره شده، به عنوان یک آمپرمتر که در آن قسمت اتصال یا سازه بین دو ترمینال گالوانومتر مثل یک شنت عمل می‌کنند، باشد. این روش، هنگامی مفید خواهد بود که جریان دارای نوسان باشد.

۱۰-۴-۵ اندازه‌گیری جریان الکتریکی خط لوله

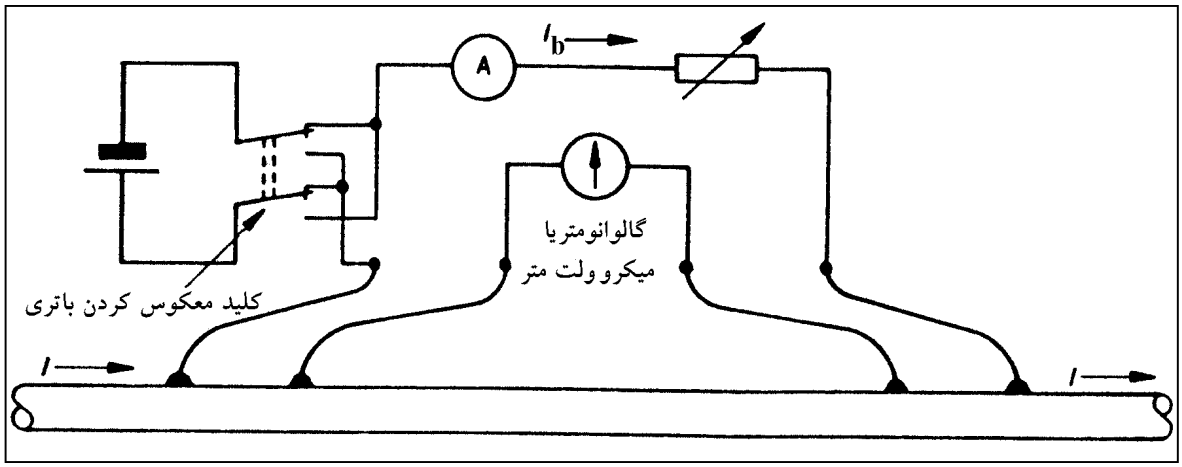
برای اندازه‌گیری جریان در خط لوله، می‌توان قسمتی از لوله را همچون یک شنت کالیبره شده، مطابق شکل (۱۷- ب) مورد استفاده قرار داد. افت ولتاژ آن قسمت از لوله را می‌توان توسط یک میکرو یا میلی‌ولت‌متر اندازه‌گیری نمود.



نکته۱- با تنظیم جریان I_b به‌نحوی که عقربه گالوانومتر انحرافی نداشته باشد، در آن صورت جریان I_b برابر با جریان اتصال خواهد بود.

الف- مدار آمپرمتر مقاومت صفر مورد استفاده برای اندازه‌گیری جریان گذرنده از یک اتصال (اندازه‌گیری هنگام قطع اتصال).

شکل ۱۷- الف- آمپرمترهای با مقاومت صفر



نکته ۲- با تنظیم جریان I_b به‌نحوی که عقربه گالوانومتر انحرافی نداشته باشد، در آن صورت $I_b = I$

اگر D_1 و D_2 انحراف عقربه به ازای معکوس شدن جریان I_b باشند، در آن صورت جریان مربوط به انحراف عقربه D، برابر خواهد بود با: $2/D(D_1 + D_2)$. اگر ولت‌متر اندازه ولتاژ را نشان دهد، در آن‌صورت مقدار مقاومت بین جفت نقاط داخلی متصل به لوله برابر خواهد بود با : $R = (V_1 + V_2)2I$ که در آن V_1 و V_2 انحرافات عقربه به ازای معکوس کردن جریان I_b هستند. معکوس کردن جریان، اثر هر گونه نوسان در جریان مانای[1] گذرنده از هادی تحت آزمایش را حذف می‌نماید. فرض بر این است که مقاومت بین جفت نقاط داخلی متصل به لوله از مقاومت آمپرمتر خیلی کمتر است.

ب- آمپرمتر با مقاومت صفر متصل شده در امتداد طول لوله.

شکل ۱۷- ب- آمپرمترهای با مقاومت صفر

مقاومت لوله را می‌توان یا از روی ابعاد لوله محاسبه نمود یا با عبور دادن یک جریان معلوم از آن قسمت از لوله و اندازه‌گیری افت ولتاژ ناشی از آن جریان، به‌دست آورد؛ در مرحله بعد، باید جریان الکتریکی عبوری از لوله را از طریق قانون اهم محاسبه نمود.

اگر به اندازه‌گیری‌های منظم جریان عبوری از لوله نیاز باشد، می‌توان یک اتصال عایق در بین خط لوله قرار داد. برای اندازه‌گیری جریان، می‌توان توسط یک اتصال رابط با قابلیت جابه‌جایی یا یک مقاومت، دو سر اتصال عایق مزبور را پل زد.

۱۰-۴-۶ آمپرمترهای حلقوی[2]

برای اندازه‌گیری‌های جریان هادی بیشتر از ۱۰ آمپر، می‌توان از یک آمپرمتر حلقه‌ای یا گیره‌ای استفاده نمود. این دستگاه‌های حس‌گر با حلقه زدن در اطراف هادی حامل جریان، بدون نیاز به قطع مدار، عمل می‌کنند. در مورد مدارهای حامل جریان کمتر

1 - Steady
2 - Clip-On

از ۱۰ آمپر، باید در استفاده از این آمپرمترها، با احتیاط عمل نمود (زیرا معمولاً حساسیت این دستگاه‌ها در آمپر پایین، کم است) اما برای مطمئن‌شدن از وجود جریان در مدار، مفید خواهد بود.

۱۰-۵ اندازه‌گیری مقاومت

۱۰-۵-۱ اندازه‌گیری مقاومت الکترود زمینی و مقاومت خاک

از الکترودهای جداگانه به‌صورت میله‌های فولادی[1] برای تزریق جریان به زمین و اندازه‌گیری افت پتانسیل ناشی از جریان آزمایش استفاده می‌گردد. برای جلوگیری از قطبی‌شدن در الکترود اندازه‌گیر ولتاژ، از جریان متناوب و با فرکانسی به‌غیر از فرکانس خطوط اصلی برق، به منظور جلوگیری از تداخل استفاده می‌گردد. برای اطلاع از روش‌های آزمایش به استانداردهای معتبر[2] رجوع شود.

دستگاه‌ها معمولاً مقدار مقاومت را به‌طور مستقیم نشان می‌دهند. در سیستم اندازه‌گیری مقاومت با الکترود زمینی، مقاومت به‌دست آمده عبارت است از مقاومت بین میله و خاک در فاصله‌ای برابر با فاصله بین میله اندازه‌گیر پتانسیل و الکترود. از آنجایی که معمولاً مقاومت الکترود زمین، نسبت به زمین دور محاسبه می‌گردد، بنابراین فاصله بین میله‌های فولادی باید به اندازه کافی بزرگ باشد. در مواردی‌که آزمایش روی بسترهای آندی انجام می‌شود، این فاصله باید از بزرگترین ابعاد الکترودهای تحت آزمایش بیشتر باشد.

مقاومت خاک معمولاً توسط روش چهار الکترودی ونر[3] اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، به چهار الکترود واقع در یک امتداد و به فواصل مساوی نیاز است. جریان الکتریکی از طریق دو الکترود بیرونی برقرار می‌شود، و دو الکترود داخلی برای اندازه‌گیری افت پتانسیل، ناشی از این جریان، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

میله‌های فولادی که به عنوان الکترود استفاده می‌شود، باید با خاک کاملاً تماس حاصل نماید ولی این میله‌ها نباید بیشتر از یک‌دهم فاصله بین الکترودها در عمق زمین فرو روند. البته $\frac{۱}{۲۰}$ این فاصله ترجیح داده می‌شود. برای اطمینان از تماس کافی الکترود با خاک، می‌توان پای الکترودها آب ریخت. مقاومت به‌دست آمده نسبت تغییر اختلاف پتانسیل بین جفت الکترود داخلی به میزان جریان آزمایش می‌باشد. مقاومت خاک بر حسب اهم متر، برابر با $۲\pi aR$ خواهد بود که در آن: R مقاومت، (به اهم) و a فاصله بین الکترود (به متر) می‌باشند. حاصل این اندازه‌گیری، مقدار میانگین تقریبی مقاومت خاک به عمقی برابر فاصله بین الکترودها خواهد بود.

در مورد خاک‌های خیلی خشک یا با مقاومت بالا یا جایی که برای طراحی بسترهای چاهی عمیق نیاز به اندازه‌گیری با عمق قابل توجهی می‌باشد، مقاومت خاک را می‌توان از طریق روش‌های القای الکترومغناطیسی به‌دست آورد.

---

1 - Steel Spike
2 - BS-CP1013
3 - Wenner four-electrode method

۱۰-۵-۲ تعیین مقاومت مورد نیاز برای یک اتصال

در مواردی‌که به تعیین مقدار مقاومتی نیاز باشد که باید به‌صورت سری با یک اتصال، (برای تنظیم پتانسیل سازه به الکترولیت) قرار داده شود، می‌توان با قرار دادن مقاومت‌های کالیبره شده ثابتی، به این مقدار پتانسیل رسید و یا از یک مقاومت متغیر استفاده نمود و سپس مقاومت مطلوب را اندازه‌گیری کرد. روش دیگر اینکه اگر گالوانومتر نشان داده شده در شکل (۲۲- الف) برای نمایش ولتاژ کالیبره شود، با تنظیم مقاومت موجود در مدار می‌توان به مقدار پتانسیل مطلوب رسید که مقدار مقاومت لازم از نسبت ولتاژ به جریان تعیین می‌گردد. این شیوه نیاز به مقاومت‌های پایین را مرتفع می‌سازد.

از این روش می‌توان برای اندازه‌گیری مقاومت اتصال بین بدنه و سکان و دیگر اجزا در کشتی استفاده نمود. میلی اهم‌مترهای ویژه‌ای نیز برای اندازه‌گیری مقاومت‌های خیلی کم مربوط به اتصال وجود دارند.

۱۰-۵-۳ پیوستگی الکتریکی سازه

هرگونه قطع اتصال یا وجود اتصالات با مقاومت بالا، می‌تواند با اندازه‌گیری‌های متعدد پتانسیل سازه به الکترولیت در امتداد طولی سازه بعد از برقراری حفاظت کاتدی و مشاهده اختلاف زیاد بین پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده، نمایان گردد.

در مواردی‌که این روش برای یافتن اتصالات با مقاومت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای به‌وجود آوردن پتانسیل بالای سازه به الکترولیت در نقطه اتصال کابل منفی به سازه (به عنوان مثال ۱- تا ۱/۵- ولت) باید از جریان کافی استفاده نمود.

در مواردی که در آن، افت شدید پتانسیل سازه به الکترولیت دیده می‌شود، یک اتصال مقاومتی و یا اتصالی به یک سازه فلزی مدفون بین نقطه آزمایش و نقطه اتصال کابل منفی وجود دارد؛ هر تغییری در محل قرار دادن الکترود مرجع، باید با تغییر متناسب در موقعیت اتصال به سازه همراه باشد. حتی شاید لازم باشد اتصال کامل بین زره[1] و غلاف[2] کابل مدفون مورد بررسی قرار گیرد. هر گونه اختلاف پتانسیل چشمگیری بین زره و غلاف یک کابل در زمان برقراری حفاظت کاتدی توسط اتصال به غلاف، نشانه یک اتصال ضعیف می‌باشد.

روش دیگر، تعیین موقعیت قطعی اتصال‌ها، در کابل‌ها و لوله‌های مدفون، تزریق جریان با فرکانس صوتی به سازه و ثبت سیگنال برگشتی با استفاده از یک سیم‌پیچ ردیاب و گوشی می‌باشد. نقاط ناپیوسته الکتریکی، از روی افت ناگهانی طول سیگنال قابل شناسایی هستند. استفاده از این روش، در مناطق شهری که تأسیسات الکتریکی نیز در زیر خاک موجود است غالباً به نتایج گمراه کننده‌ای منتهی خواهد شد.

در مورد سازه‌هایی همچون لوله‌های مدفون، می‌توان یک ولتاژ ثابت (تا۱۲ولت) را بین دو نقطه دور از هم روی لوله اعمال نمود. ناپیوستگی‌ها با تغییر در گرادیان پتانسیل، یعنی افت ناگهانی ولتاژ مشخص می‌شود. محل دقیق این نقاط توسط اتصال دو گیرنده[3] به لوله و قرار دادن یک ولت‌متر حساس بین آن دو امکان‌پذیر می‌باشد.

---

1 - Armor
2 - Sheath
3 - Prob

مقاومت نسبی طولی اتصالات لوله از طریق اندازه‌گیری افت پتانسیل دو سر یک اتصال با تزریق یک جریان معلوم بین ۱۰ تا ۲۰ آمپر قابل تشخیص است. این وسیله می‌تواند مانند شکل (۱۷- ب) باشد که در آن، گالوانومتر کالیبره شده به عنوان میلی‌ولت‌متر به‌کار برده می‌شود. چهار اتصال لازم به لوله را می‌توان با استفاده از گیرنده‌های[1] با نوک سخت شده[2] برقرار ساخت.

گیرنده‌های متصل به میلی‌ولت‌متر باید عایق باشند. جریان باید معکوس و پتانسیل مجدداً اندازه‌گیری گردد تا مشخص شود که افت پتانسیل نقطه، ناشی از جریان اعمال شده بوده است یا خیر؟

هشدار: اتصال گیرنده‌ها نباید قبل از مشورت صاحبان سازه‌های مجاور صورت بگیرد تا از عدم وارد آوردن خسارت به سرویس‌های مدفون اطمینان به‌دست آید. اتصال گیرنده‌ها به پوشش لوله آسیب می‌رساند.

۱۰-۶ آزمایش‌های لازم برای طراحی حفاظت کاتدی برای سازه‌های مدفون یا غوطه‌ور

۱۰-۶-۱ نمونه‌های خاک و آب

برای انجام آزمایش‌ها، نمونه‌هایی از انواع مختلف خاک در امتداد طول مسیر مورد نیاز است. وزن این نمونه‌ها نباید کمتر از ۲۵۰ گرم باشد و برای آزمایش باکتری، این نمونه‌ها باید در ظروف استریل، پوشیده و بدون امکان نفوذ هوا قرار گیرند.

علاوه بر آنالیز باکتری‌شناسی، گردآوری اطلاعات در ارتباط با میزان سولفات، کلرور، کربنات و سولفید، لازم و ضروری است. همچنین اندازه pH و پتانسیل احیا (به پیوست مراجعه شود) نیز باید معین شوند. اطلاعات مربوط به باکتری‌شناسی و مقاومت خاک، در اغلب موارد، راهنمای کافی و تکمیلی بوده و با این وجود اطلاعات شیمیایی نیز در تشخیص نوع خوردگی احتمالی و تعیین نوع مواد آند مفید خواهد بود.

در مورد سازه‌های غوطه‌ور در آب، در آنالیز نمونه‌های آب، باید اندازه‌گیری میزان اکسیژن و هدایت الکتریکی آن نیز گنجانده شود و در مورد آب‌های سطحی مصب رودخانه‌ها، بیان این نکته حایز اهمیت است که در هنگام جزر و مد و همچنین در فصول مختلف، تغییرات قابل توجهی بروز خواهد کرد.

علاوه بر این، لایه لایه شدن آب اغلب وجود دارد؛ بنابراین استفاده از یک روش نمونه‌برداری مناسب توصیه می‌شود.

۱۰-۶-۲ مقاومت الکتریکی خاک

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی خاک اطراف سازه بر حسب اهم متر (Ω. M) ضروری است. مهم‌ترین اهداف این اندازه‌گیری به شرح زیر است :

الف- ارزیابی میزان خورندگی خاک که بر اساس طبقه‌بندی تقریبی زیر استوار است:

- مقاومت تا ۱۰ اهم متر خاک، شدیداً خورنده است،

1 - Probes
2 - Hardened Point

- مقاومت ۱۰ تا ۵۰ اهم متر خاک، خورنده است،
- مقاومت ۵۰ تا ۱۰۰ اهم متر خاک، دارای خورندگی متوسط است، و
- مقاومت ۱۰۰ اهم متر به بالا خاک، دارای خورندگی کم است.

ب – رسیدن به تصمیم نهایی در مورد انتخاب نوع سیستم حفاظت کاتدی یعنی سیستم آندهای فدا شونده یا سیستم جریان اعمالی.

برای هر سازه مدفون خاص، تعداد و مکان نقاطی که در آنها اندازه‌گیری مقاومت خاک باید صورت گیرد، با توجه به اندازه آن سازه و در ارتباط با تغییرات احتمالی شرایط خاک دور سازه، تعیین می‌شود.

معمولاً عوامل تجربی و اقتصادی، تعداد اندازه‌گیرهای مقاومت را محدود می‌سازد. بنابراین ممکن است نواحی کوچک با مقاومت خاک پایین، احتمالاً دور از چشم باقی بماند، که لازم است این موضوع مد نظر قرار گرفته شود. قاعدتاً قرائت‌های اولیه در طول مسیر لوله، با توجه به تغییرات احتمالی مقاومت خاک در فواصل بین ۱ تا ۳ کیلومتر انجام می‌پذیرد و قرائت‌های اضافه‌تر، برای تعیین گستردگی نواحی خورنده، صورت می‌گیرد. قرائت‌ها ممکن است در مناطقی که برق به‌راحتی در دسترس می‌باشد، به منظور گردآوری اطلاعات برای طراحی بستر آندی جهت سیستم اعمال جریان، صورت پذیرد.

هنگامی‌که از روش ونر (بند ۱۰–۵–۱) استفاده شود، مقاومت میانگین خاک از سطح تا عمق مورد نظر، که برابر با فاصله بین الکترودها خواهد بود، به‌دست می‌آید. هنگامی که مسیر خط لوله در دست بررسی است، بهتر است اندازه‌گیری مقاومت خاک با فواصل الکترودی نصف، مساوی و دو برابر عمق لوله انجام گیرد، این کار باعث کسب اطلاعات از محیط اطراف لوله خواهد بود؛ در ضمن تغییر مقاومت خاک نسبت به عمق را مشخص می‌نماید. اگر خط لوله قبلاً نصب شده و مخصوصاً اگر پوشش عایق آن نیز ضعیف باشد، در آن صورت آزمایش‌ها باید با خط الکترود عمود بر امتداد لوله و دور از آن انجام پذیرد.

بررسی مقاومت خاک به منظور تعیین خورندگی، باید در صورت امکان، در دوره‌هایی صورت گیرد که احتمال مواجه شدن با کمترین میزان مقاومت وجود دارد؛ به عنوان مثال زمان‌هایی که خاک مرطوب و یا سطح آب زیرزمینی بالا می‌باشد. بررسی‌ها نباید در شرایط یخبندان که رسیدن به مقاومت پایین الکترود به خاک، مشکل می‌باشد، انجام پذیرد. برای طراحی بستر آندی، اندازه‌گیری‌ها باید در دوره خشکسالی نیز انجام شود تا بدترین شرایط، مشخص گردد.

قرائت‌ها از الکترودهایی که در فواصل مختلف و تا $\frac{۱}{۴}$ طول بستر آندی مورد انتظار تعبیه گردیده، گرفته می‌شود که انتخاب این فواصل الکترودی به تغییرات مقاومت خاک با عمق زمین بستگی خواهد داشت.

۱۰-۶-۳ بررسی‌های پتانسیل طبیعی سازه به الکترولیت

انجام بررسی‌های لازم جهت تعیین تغییرات پتانسیل سازه به الکترولیت در طول یا روی سطح سازه همان‌طور که در بند ۱۰–۳ توصیف گردیده، به کمک یک الکترود مرجع و ولت‌متر مناسب، می‌تواند مفید واقع شود. این دسته از اندازه‌گیری‌های پتانسیل، احتمالاً نقاطی از سازه را که در معرض شدیدترین خوردگی‌ها هستند، مشخص می‌کند.

بدون اعمال حفاظت کاتدی و بدون حضور جریان‌های سرگردان، منفی‌ترین پتانسیل‌های سازه به الکترولیت، نشان‌دهنده مناطق خوردگی هستند. از طرف دیگر، اگر خوردگی عمدتاً ناشی از جریان‌های سرگردان درون خاک باشد، در آن صورت هر چه پتانسیل سازه به الکترولیت مثبت‌تر باشد، نمایانگر خوردگی بیشتر سازه خواهد بود (به بند ۴-۲-۳ رجوع شود).

۱۰-۶-۴ جریان‌های الکتریکی سرگردان

در مکان‌هایی که وجود جریان‌های سرگردان محتمل باشد، مثلاً در کنار سیستم‌های قطار برقی dc یا محل‌هایی که تغییرات پتاسیل سازه به الکترولیت وجود چنین جریان‌هایی را نشان بدهد، بررسی دقیق‌تر گستردگی اثر این جریان‌ها روی سازه ضروری می‌باشد. این بررسی می‌تواند با ترسیم میدان پتانسیل منطقه، توسط یک الکترود مرجع ثابت، یا یک سازه به عنوان نقطه مرجع صورت گیرد. اثر ناشی از کارکرد قطار برقی را می‌توان از طریق بررسی‌های پتانسیل در طول مدت کار سیستم حفاظت کاتدی و پس از آن که سیستم قطع شود به‌دست آورد.

۱۰-۶-۵ آزمایش‌های پیوستگی الکتریکی

چنانچه در درستی پیوستگی الکتریکی سازه شکی وجود داشته باشد، باید آزمایش‌های تشخیص محل قطعی (ناپیوستگی) صورت گیرد (به بند ۱۰-۵-۳ رجوع شود).

۱۰-۷ بررسی‌های ویژه

۱۰-۷-۱ کلیات

چندین روش و تکنیک خاص نیز برای تهیه یک‌سری اطلاعات اضافی و جزیی‌تر در رابطه با سیستم‌های حفاظت از خوردگی وجود دارند. این روش‌ها معمولاً توسط افراد آموزش دیده و با ابزار و وسایل ساخته شده خاص این روش‌ها، انجام می‌گیرد. این ابزارها اغلب فقط در دسترس پیمانکاران متخصص این کار می‌باشد. مثال‌هایی از این روش‌ها در بخش‌های ۱۰-۷-۲ تا ۱۰-۷-۴ گنجانده شده است.

۱۰-۷-۲ روش پیرسون[1]

از این روش، برای پیدا کردن عیوب پوشش خط لوله‌های مدفون استفاده می‌شود که در آن، یک سیگنال ac بین لوله و زمین دور[2] فرستاده می‌شود و آنگاه اختلاف پتانسیل بین دو الکترود متصل به زمین، با فاصله حدوداً ۶ متر از یکدیگر، اندازه‌گیری می‌شود. دو اپراتور در امتداد طول مسیر خط لوله قدم می‌زنند و اتصالات ضروری با خاک را برقرار می‌سازند؛ یا هر دو در یک امتداد روی لوله حرکت می‌کنند یا پهلو به پهلوی هم و یکی از آنها روی خط لوله.

1 - Pearson survey
2 - Remote earth

هرگونه افزایش اختلاف پتانسیل موضعی می‌تواند بیانگر وجود عیوب در پوشش خط لوله بوده و یا به یک شیء فلزی در مجاورت لوله اشاره داشته باشد. حرکت در یک امتداد، برای تعیین محل اولیه عیوب احتمالی پوشش مناسب خواهد بود. هر افزایشی در اختلاف پتانسیل (معمولاً از طریق افزایش سیگنال صوتی دریافت می‌شود) همچنان که هر کدام از اپراتورها از بالای آن عبور می‌کنند قابل حصول است. هنگامی‌که یک‌سری عیوب نزدیک به هم رخ داده باشد، یا جایی‌که اطلاعات در مورد عیوب خاصی مد نظر باشد، معمولاً روش حرکت پهلو به پهلو انتخاب می‌گردد. برای ارزیابی کامل طی کردن کل مسیر خط لوله ضروری است و گزارش نتایج به‌دست آمده تماماً به اپراتور بستگی دارد، مگر آنکه از روش‌های ثبت داده‌ها استفاده نماید.

۱۰-۷-۳ روش تضعیف جریان[1]

این روش، شبیه روش پیرسون است با این تفاوت که در اینجا از یک سیم‌پیچ ردیاب به منظور پایش جریان عبوری از خط، به‌واسطه تزریق سیگنال ac استفاده می‌شود. هر گونه تضعیف قابل توجهی در جریان، نشانه وجود تخریب پوشش لوله بوده و یا به تماس با سازه‌های فلزی دیگری اشاره دارد.

۱۰-۷-۴ اندازه‌گیری پتانسیل در فواصل کوتاه[2]

این روش، برای تعیین سطح حفاظت کاتدی اعمال شده در تمام طول مسیر خط لوله به کار برده می‌شود. حتی با استفاده از این روش می‌توان نواحی تأثیرپذیر از پدیده تداخل و همچنین عیوب پوشش را مشخص نمود. پتانسیل لوله به خاک در فواصل کوتاهی (کمتر از ۱/۵ برابر عمق خط لوله) با استفاده از یک ولت‌متر با مقاومت بالا، نیم پیل و یک کابل سیار، متصل به یک نقطه آزمایش[3] روی خط لوله، اندازه‌گیری می‌شود. از روی منحنی پتانسیل، بر حسب فاصله می‌توان تغییر مقادیر پتانسیل را که در اثر تغییر موضعی دانسیته جریان حفاظت به‌وجود آمده مشخص کرد. در طول مدت انجام این بررسی، سیستم حفاظت کاتدی می‌تواند برقرار باشد و یا می‌توان از روش قطع و وصل پتانسیل استفاده نمود (به بند ۱۰-۳-۲-۳ رجوع شود). به علت حجم زیاد میزان داده‌ها، می‌توان برای رسم منحنی پتانسیل بر حسب فاصله از کامپیوتر استفاده کرد.

1 - Current attenuation survey
2 - Close interval potential survey
3 - Test point

۱۱- راه‌اندازی[1]، بهره‌برداری[2] و نگهداری[3]

۱۱-۱ کلیات

در این بخش، مراحلی که باید در آنها آزمایش‌هایی انجام گیرد مشخص شده و برنامه انجام منظم این آزمایش‌ها ارائه می‌گردد، به طوری‌که اطمینان حاصل شود که سیستم حفاظت کاتدی، چه در حالت عمومی و چه در حالت خاص (مانند سازه‌های مدفون و غوطه‌ور، سازه‌های بتن مسلح، مخازن و تأسیسات با حفاظت داخلی) به صورت پیوسته و مؤثر در حال بهره‌برداری است. در مورد ابزار و وسایل مربوط به آزمایش‌ها و روش استفاده از آنها، در بخش ۱۰ شرح داده شده است. تأثیر سیستم حفاظت کاتدی به اعمال و برقرار ساختن اختلاف پتانسیل صحیح، بین فلز و محیط مجاور تمام قسمت‌های سازه بستگی دارد. این موضوع، هدف اصلی مطالب این بخش می‌باشد.

۱۱-۲ آزمایش‌های هنگام راه‌اندازی

۱۱-۲-۱ کلیات

یکی از مهم‌ترین آزمایش‌ها هنگام راه‌اندازی، اندازه‌گیری پتانسیل در نقاط مختلف سازه تحت حفاظت است. معمولاً تغییرات پتانسیل الکترولیت – سازه در نقاط مختلف سازه و تا مدتی پس از اعمال حفاظت کاتدی ادامه می‌یابد. بنابراین باید آزمایش‌ها در فواصل زمانی معین انجام گیرد و جریان به مقدار مورد نیاز تنظیم شود تا شرایط تثبیت گردد و پتانسیل‌ها در نقاط مختلف سازه از مقادیر ارائه شده در جدول (۱) (به بند ۴-۳-۲ رجوع شود) منفی‌تر نشود. پس از این باید یک بررسی کامل صورت گیرد و نتایج، تجزیه و تحلیل شود تا فهرست مناسبی از آزمایش‌های لازم که به‌وسیله آنها بهره‌برداری پیوسته و رضایت‌بخش سیستم حفاظت کاتدی تضمین می‌شود، تهیه گردد.

اگر تغییرات غیرعادی پتانسیل در جهت مثبت باشد، باید سریعاً اقدام شود؛ مخصوصاً در نقاط اعمال جریان، که نشان‌دهنده اتصال معکوس مبدل یک‌سوکننده می‌باشد.

انجام بازرسی فنی در فواصل زمانی کوتاه‌تر (مثلاً ماهانه) در موارد زیرضرورت بیشتری پیدا می‌کند:

الف – عدم کارکرد یک مبدل یک‌سوکننده موجب از دست دادن کل یا قسمتی از حفاظت کاتدی شود.

ب – عدم کارکرد مبدل‌های یک‌سوکننده به دلیل عوامل غیر قابل کنترل توسط بهره‌بردار[4]، مانند شبکه برق نامطمئن، بهره‌برداری مشترک با گروه ثالث، شک وتردید نسبت به آشفتگی‌های الکتریکی[5]، محتمل باشد.

ج– زمانی‌که حفاظت توسط اتصال، از سازه‌های حفاظت شده دیگر تأمین شود.

---

1 - Commissioning
2 - Operation
3 - Maintenance
4 - Operator
5 - Electrical storm

ثبت دائمی قرائت‌ها و نتایج آزمایش‌های دوره‌ای مهم است، زیرا در اغلب موارد مقایسه با این داده‌ها تنها وسیله دستیابی به شرایط و چگونگی عملکرد سیستم است. به همین منظور، باید برنامه‌ای برای بازنگری دوره‌ای اندازه‌گیری‌ها تدوین شود تا از کارکرد درست و رضایت‌بخش سیستم اطمینان حاصل گردد. بهتر است به نمایش‌های گرافیکی و رایانه‌ای نمودن اطلاعات و داده‌های ثبت شده و به‌موارد استثنایی که پتانسیل سازه خارج از محدوده‌های تنظیم شده قرار دارند نیز، توجه لازم مبذول گردد.

۱۱-۲-۲ سازه‌های مدفون

پتانسیل‌های سازه – الکترولیت باید در نقاط مختلف به ویژه نقاط دور از بستر زمینی یا مواضع آندی اندازه‌گیری شود. نتایج باید در حداقل مقادیری باشند که سطح حفاظتی دلخواه را تأمین نماید (به جدول ۱ بند ۴-۳-۲ رجوع شود).

زمان لازم برای تثبیت پتانسیل‌ها ممکن است از چند روز برای یک سازه با پوشش خوب، تا چند ماه برای سازه‌های لخت و یا با پوشش‌های ضعیف تغییر نماید.

در صورت امکان، جریان‌های حاصله از آندهای فدا شونده یا مبدل‌های یک‌سوکننده باید اندازه‌گیری شوند. در شبکه‌های لوله‌کشی پیچیده، اندازه‌گیری جریان در هر انشعاب و یا هر قسمت مفید خواهد بود. نتایج این اندازه‌گیری‌ها باید ثبت شوند و برنامه‌ای نیز برای اندازه‌گیری‌های دائمی مطابق بند ۱۱-۲-۱ تدوین گردد.

هنگامی‌که شرایط بهره‌برداری حاصل شد، باید به سازمان‌هایی که بخواهند تجهیزات و تأسیسات زیرزمینی در آن منطقه نصب نمایند، از امکان بروز مشکلات خوردگی تداخلی اطلاعات کافی داده شود. این اطلاعات، ممکن است حاوی موقعیت بسترهای زیرزمینی و جریان‌های مورد انتظار باشد، و در صورتی‌که قبلاً مسیر سازه تحت حفاظت به سازمان‌های مذکور ارائه نشده باشد باید نشانی از مسیرهای سازه حفاظت شده و هر سازه دیگری که برای کاهش اثر تداخل به این سازه متصل شده است، به اطلاع رسانده شود.

۱۱-۲-۳ سازه‌های غوطه‌ور ثابت

پتانسیل‌های سازه – الکترولیت باید بلافاصله بعد از روشن کردن سیستم حفاظتی، در نقاط پیش‌بینی شده اندازه‌گیری شود. جریان آندهای تکی یا گروهی باید اندازه‌گیری شده و در پایین‌ترین مقداری که حفاظت کاتدی را تأمین می‌کند، تنظیم گردد (به بند ۴-۳-۲ رجوع شود).

تغییرات بعدی پتانسیل‌های سازه – الکترولیت، بستگی دارد به اینکه سازه در آب دریا و یا آب مصب، غوطه‌ور بوده و نیز تحت تأثیر متغیرهایی مانند هدایت الکتریکی، مقدار اکسیژن محلول، سرعت حرکت و میزان آلودگی آب باشد. در آب دریای تمیز، پتانسیل بخش‌هایی از سازه لخت که دائماً غوطه‌ور است، پس از چند ماه تثبیت می‌گردد، در حالی‌که تثبیت پتانسیل سازه‌های پوششدار خیلی سریع‌تر انجام می‌گیرد. پتانسیل سازه فلزی در قسمت‌های جزر و مد، باید در بالاترین وضعیت مد، کنترل و تنظیم شود تا بتوان کارایی سیستم حفاظت کاتدی برای قطبی‌شدن کامل در آن ناحیه را بدون اینکه به قسمت غوطه‌ور دائمی زیان وارد آورد تأمین نمود.

۱۱-۲-۴ حفاظت داخلی تأسیسات

پتانسیل‌های سازه – الکترولیت باید قبل و بلافاصله بعد از روشن کردن سیستم حفاظت کاتدی در نقاط آزمایش اندازه‌گیری شود. میزان جریان در آندهای تکی یا گروهی باید اندازه‌گیری شود و چنانچه لازم باشد پس از مدت زمانی مثلاً یک هفته، این جریان‌ها تنظیم گردند. اگر هیچ انحراف جریان قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد، مجدداً باید پس از گذشت یک ماه، این کار تکرار گردد. در هر تنظیمی، جریان‌های تک تک و نیز کل آندها باید برای مقایسه ثبت شود.

الکترودهای حساسی که برای کنترل اتوماتیک استفاده می‌شود، باید با یک الکترود مرجع مناسب که نزدیک به آن نصب می‌گردد کنترل شود، مگر این‌که چنین تجربه‌ای در تأسیسات مشابه وجود داشته باشد. الکترودهای مرجع باید در چندین نقطه و به تعداد کافی در تجهیزات حفاظت شده نصب گردد، تا بتوان منحنی توزیع پتانسیل را ترسیم نمود. این منحنی، نشان خواهد داد که آیا الکترود حساس در وضعیت صحیح قرار گرفته است و آیا دستگاه کنترل، درست انتخاب شده است یا خیر؟ اگر بیش از یک الکترود حساس به دستگاه کنترل، علامت برگشت بفرستد، قرائت هر کدام باید برای عدم تطابق پیش و پس از روشن نمودن سیستم ملاحظه گردد. این داده‌ها ممکن است در نتیجه حضور مواد الکتروپوزیتیو و شیب‌های پتانسیل[1] دور آندها اختلافاتی را نشان دهد. در حالت ایده‌آل، کلیه علائم ارسال شده توسط الکترودهای حساس، هنگامی‌که سیستم حفاظت کاتدی روشن است، باید در محدوده۵۰ میلی‌ولت باشد. اما رواداری[2] وسیع‌تری (مثلاً ۱۰۰ میلی‌ولت) را نیز می‌توان پایه‌ای قابل قبول برای کنترل پذیرفت.

۱۱-۳ بهره‌برداری و نگهداری[3]

۱۱-۳-۱ کلیات

کارایی سیستم حفاظت کاتدی با اندازه‌گیری جریان‌ها و پتانسیل‌ها در نقاط انتخابی، هنگام دوره راه‌اندازی مشخص می‌شود (به بند ۱۱-۲-۱ رجوع شود) و اگر نتایج با مقادیر مورد انتظار مغایر باشد، باید اقدامات لازم انجام گیرد.

۱۱-۳-۲ نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده

۱۱-۳-۲-۱ کلیات

به علت تنوع سازه‌های مورد حفاظت و به علت احتمال عدم دسترسی به بعضی از قسمت‌های تجهیزات برای انجام آزمایش‌ها، تعیین جزییات روش کار مشکل است. به‌هرحال، نگهداری این سیستم‌ها به اندازه سیستم‌های اعمال جریان حساس بوده و ضروری است که اجزای در دسترس به صورت منظم بازرسی گردند.

---

1 - Gradients
2 - Tolerance
3 - Operation and Maintenance

تناوب و گسترش بازرسی و اندازه‌گیری پتانسیل، به ملاحظاتی از قبیل احتمال اختلال توسط سازمان‌های دیگر (خاکبرداری، راه‌سازی برای خطوط لوله و مناطق شهری) و امکان توسعه و تغییرات در سازه (یک شبکه لوله‌های مدفون ممکن است توسعه بیشتری یافته و یا تغییر داده شود ولی یک اسکله ممکن است از نظر سازه‌ای برای سال‌های متمادی بدون تغییر باقی بماند) بستگی دارد. در محل‌هایی که جعبه‌های تقسیم یا وسایل مشابه تعبیه گردیده، علاوه بر پتانسیل، جریان نیز اندازه‌گیری می‌شود تا در حال کار بودن آندها را تأیید نماید. ثبت جریان خروجی نیز می‌تواند تخمینی از میزان مصرف آندها را ارائه دهد. این اندازه‌گیری‌ها در مواردی که آندها به‌طور مستقیم به سطح فلز، جوش و پیچ شده غیر ممکن است و اگر آندها برای بازرسی قابل دسترس باشند، ظاهر آنها نشان‌دهنده تولید جریان می‌باشد، بنابراین، این وضعیت ظاهری نمی‌تواند بیانگر سطح مورد نیاز حفاظت کاتدی باشد.

۱۱-۳-۲-۲ تعیین موقعیت عیوب

اگر پتانسیل به اندازه کافی منفی نشود، علت آن با اندازه‌گیری جریان، با توجه به موارد زیر، مشخص می‌گردد:

الف – به‌دلایل زیر جریان می‌تواند صفر یا کمتر از میزان مورد انتظار باشد:

- از بین رفتن آندها و احتمال ضرورت تعویض آنها
- از بین رفتن اتصالات آند- کاتد، شکستگی کابل‌ها یا آند
- خشک شدن خاک اطراف آند
- آثار آلودگی بر روی آندها

ب – به‌دلایل زیر، مقدار جریان ثابت باقی مانده یا افزایش یافته است:

- اتصال فلزی تصادفی با سازه‌ای که جدیداً نصب شده است
- تجهیزات مجزا کننده معیوب
- تغییر محیط اطراف که سبب از بین رفتن سریع قطبی‌شدن یا افزایش اکسیژن محلول در آب (مثلاً در محیطی که مقدار آلودگی کاهش یافته است) می‌شود
- توسعه سازه
- از بین رفتن یا صدمه دیدن پوشش‌های حفاظتی

۱۱-۳-۳ نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی با اعمال جریان

۱۱-۳-۳-۱ کلیات

نگهداری وسایل از قبیل یک‌سوکننده‌ها، مبدل‌ها، روغن مبدل‌ها، کلیدهای قطع و وصل جریان و کابل‌های جریان متناوب، در این استاندارد مورد بحث قرار نمی‌گیرد. روش نگهداری تجهیزات مذکور، مشابه روش‌های نگهداری آنها در موارد دیگر

می‌باشد. توجهات ویژه در خصوص ایمنی، سیستم اتصال زمین و تجهیزات مورد استفاده در مناطق خطرناک و نگهداری ضمائم فلزی، مطابق استانداردهای معتبر[1] باید اعمال گردد.

کلیه کابل‌های قابل دسترسی که دستگاه‌های مبدل – یک‌سوکننده را به سازه‌ها یا تأسیسات مورد حفاظت و یا به آندها یا بسترهای زمینی متصل می‌نمایند، باید به طور منظم مورد بررسی قرار گیرند، تا اطمینان به‌دست آید که عایق‌های کابل‌ها سالم بوده و اتصالات تمیز و محکم می‌باشند. عایق بودن کابل‌های آند، اهمیت بیشتری دارند. کابل‌هایی که برای اتصال به سازه‌های دیگر یا نقاط آزمایش دائمی نصب شده‌اند، باید به‌طور منظم مورد بازدید قرار گیرند.

۱۱-۳-۳-۲ عیب‌یابی

اگر مقادیر غیر عادی از پتانسیل و جریان مشاهده شود، مقایسه با مقادیر مورد انتظار یا مقادیر قبلی نوع عیب را به‌ترتیب زیر مشخص می‌سازد:

الف – پتانسیل سازه – الکترولیت از زمانی که سیستم حفاظت کاتدی روشن می‌گردد مثبت‌تر می‌شود.

این پدیده بیانگر اتصال معکوس است که جدی‌ترین عیب بوده و می‌تواند در زمانی نسبتاً کم خسارات سنگینی را به سازه وارد آورد.

ب– ولتاژ اعمالی صفر یا خیلی کم و جریان صفر است:

- از کار افتادگی فیوز ac یا اختلال در عملکرد دیگر وسایل محافظت کننده
- از کار افتادگی سیستم تولید کننده برق ac
- از کار افتادگی مبدل– یک‌سوکننده

توجه: ممکن است هنوز در حدود ۲ ولت در ولت‌متر نشان داده شود که ناشی از نیروی محرکه برگشتی (emf) بین سازه فولادی و پشت‌بند ذغالی در بستر آندی می‌باشد.

ج – ولتاژ اعمالی طبیعی، جریان کم ولی صفر نیست:

- خراب شدن آندها یا بسترهای زمینی
- خشک بودن خاک اطراف بستر زمینی یا عدم غوطه‌وری کامل برخی از آندها
- تجمع گازهای الکترولیتی در اطراف آندها
- قطع شدن برخی از اتصالات به آندهای تکی بستر زمینی یا سیستم آندی
- قطع شدن اتصال قسمتی از سازه حفاظت شده

د – ولتاژ اعمالی عادی، و جریان صفر است:

- جدا شدن رشته‌ها یا قطع شدن کابل‌های آند یا کاتد
- از کار افتادگی فیوز dc یا آمپرسنج مبدل – یک‌سوکننده
- از کار افتادگی کامل بستر زمینی یا سیستم آندی

---

1 - BS5493 , BS5345

هـ – جریان و ولتاژ اعمالی کم است:

- سیستم کنترل روی مبدل – یک‌سوکننده در وضعیت پایین تنظیم شده است
- از کار افتادگی مبدل – یک‌سوکننده
- معیوب بودن سیستم برق رسانی

و– ولتاژ و جریان اعمالی زیاد است

- کنترل روی مبدل – یک‌سوکننده در وضعیت خیلی بالا تنظیم شده است.

ز– ولتاژ و جریان اعمالی عادی، ولی پتانسیل سازه – الکترولیت به اندازه کافی منفی نیست:

- قطع شدن اتصال پیوستگی الکتریکی یا افزایش مقاومت بین نقطه اتصال و نقطه آزمایش
- افزایش شدید هواگیری خاک در نقطه آزمایش یا مناطق نزدیک به آن به علت خشکسالی یا زهکشی موضعی بیش از اندازه
- تغییرات در محیط، که به از بین رفتن سریع قطبی‌شدن یا افزایش اکسیژن محلول در آب منجر گردیده (مثلاً کاهش سطح آلودگی و یا افزایش جریان آب)
- تجهیزات عایق کننده معیوب، مثلاً اتصال کوتاه در یک اتصال جدا کننده خط لوله
- سازه حفاظت شده تحت تأثیر موانع عایق کننده قرار گرفته و یا تحت تأثیر سازه‌های جدیدی واقع شده است
- از کار افتادگی سیستم حفاظت کاتدی روی قسمت دیگری از همان سازه یا روی سازه ثانویه‌ای که به آن متصل شده است.
- صدمات وارده به پوشش‌های محافظ
- افزایش یا توسعه سازه مدفون، شامل تماس اتفاقی با دیگر سازه‌های فلزی
- آثار تداخلی ناشی از دیگر سیستم‌های حفاظت کاتدی
- آثار جریان‌های متناوب سرگردان روی سازه

ح – جریان و ولتاژ اعمالی عادی، ولی پتانسیل سازه – الکترولیت به صورت غیر عادی منفی است:

- قطع شدن اتصال پیوستگی الکتریکی در نقاطی دورتر از نقطه آزمایش
- کاهش هواگیری خاک یا الکترولیت در نقطه آزمایش
- کاهش بده[1] الکترولیت
- سازه‌های ثانویه حذف شده یا به‌طور مستقل حفاظت کاتدی شده‌اند یا اتصال بین سازه اولیه و سازه‌های ثانویه قطع شده است
- آثار جریان‌های متناوب سرگردان روی سازه

ط– جریان و ولتاژ اعمالی عادی، ولی پتانسیل سازه – الکترولیت کم و زیاد می‌شود:

- حضور جریان‌های زمینی سرگردان، مثلاً تأثیر جریان مستقیم ناشی از سیستم‌های ریلی و یا آثار مغناطیسی زمین.

---

1 - Rote of Flow

۱۱-۴ بهره‌برداری و نگهداری سازه‌های مدفون

۱۱-۴-۱ سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده

گرچه دستورالعمل‌های خاص بهره‌برداری و نگهداری مربوط به هر یک از تجهیزات ممکن است تهیه شده باشد، ولی به هر حال، موارد زیر باید برای سازه‌های پوشش شده رعایت گردد:

الف- در فاصله‌های زمانی یک‌ماهه، پتانسیل‌های سازه – خاک در نقاط آزمایش مشخص، اندازه‌گیری و ثبت گردد (به ویژه در نقاطی که پتانسیل کمتر منفی می‌باشد).

ب- در فاصله‌های زمانی سه ماهه، پتانسیل‌های سازه – خاک در تمام نقاط آزمایش، و مقدار جریان در هر اتصال، اندازه‌گیری و ثبت گردد. در نقاطی که سازه‌های ثانویه به سازه اولیه متصل شده یا در نقاطی که آندهای فدا شونده روی سازه نصب گردیده تا مانع از خوردگی تداخلی شود نیز، باید اندازه‌گیری‌ها صورت گرفته و یادداشت شوند. به عنوان یک قاعده کلی، مقادیر پتانسیل سازه – الکترولیت قرائت شده باید حداقل به اندازه مقادیر ثبت شده در زمان نصب اتصال‌ها یا آندها منفی باشد. کلیه تجهیزات آزمایش به منظور اطمینان از قابلیت سرویس‌دهی و سلامتی آنها، به صورت چشمی کنترل و در صورت نیاز، تعمیر و نگهداری شوند. وسایل اندازه‌گیری باید به‌طور منظم واسنجی[1] شوند.

۱۱-۴-۲ سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان

۱۱-۴-۲-۱ کلیات

روش‌های معمول بهره‌برداری و نگهداری سیستم‌های با اعمال جریان و مثلاً استفاده از مبدل- یک‌سوکننده که متداول‌ترین منبع برق است به قرار زیر می‌باشد:

الف – در فواصل زمانی حداکثر یک‌ماهه و برای اطمینان از عملکرد رضایت‌بخش سیستم، مبدل‌های یک‌سوکننده باید مورد بررسی و بازدید قرار گرفته، جریان‌ها و ولتاژهای خروجی آنها اندازه‌گیری و ثبت شوند. پتانسیل‌های سازه – خاک در نقطه یا نقاط اعمال جریان، در وسط بین نقاط اعمال جریان و در نقاط انتهایی یک سازه مورد حفاظت، اندازه‌گیری و ثبت شوند. هر انحراف از حالت عادی باید مورد توجه و بررسی قرار گیرد.

ب – در فاصله‌های زمانی حداکثر سه ماهه، پتانسیل‌های سازه – خاک در تمام نقاط مخصوص آزمایش، نقاطی که برای اندازه‌گیری مناسب است و نیز در نقاط انتخابی که قبلاً در بررسی پتانسیل با فواصل زمانی کم (دوره‌های یک‌ماهه) مشخص شده است، اندازه‌گیری‌ها صورت گیرد (به بند ۱۰-۷-۴ رجوع شود) تا اطمینان حاصل شود که حفاظت کاتدی به میزان مورد نظر در کل سازه برقرار می‌باشد. نقاطی که در آنجا سازه‌های ثانویه به سازه‌های اولیه متصل است، یا نقاطی که روی آنها آندهای فدا شونده برای خنثی ساختن خوردگی تداخلی نصب شده است نیز، باید در این بررسی گنجانده شود. به عنوان یک قاعده کلی، مقادیر پتانسیل سازه – خاک اندازه‌گیری شده، باید حداقل به اندازه مقادیر ثبت شده در زمان نصب اتصال‌ها و یا آندها، منفی باشد.

---

1 - Calibration

در مورد کلیه تجهیزات و وسایل آزمایش و مبدل – یک‌سوکننده، برای اطمینان از قابلیت سرویس‌دهی و صدمه‌دیدگی‌های احتمالی آنها، بازرسی چشمی به عمل آید و تعمیر و نگهداری لازم صورت گیرد. وسایل اندازه‌گیری باید به‌طور منظم واسنجی شوند.

ج – در صورت نیاز در فواصل زمانی ۵ تا ۱۰ ساله، بر حسب ویژگی‌های سازه، ملاحظاتی برای انجام یک بررسی پتانسیل با فواصل کوتاه‌تر صورت گیرد (به بند ۱۰-۷-۴ رجوع شود).

۱۱-۴-۲-۲ بسترهای زمینی

بسترهای زمینی ممکن است بنا به دلایل گوناگون نتوانند به خروج جریان مطلوب ادامه دهند. بسترهای با جریان‌های خروجی بالاتر، بیشتر مستعد این تغییرات می‌باشند. مقاومت الکتریکی بسترهای زمینی که به‌صورت افقی نصب شده‌اند، ممکن است در زمان‌های خاصی از سال به علت خشک شدن خاک اطراف آنها افزایش یابد. بنابراین جریان خروجی برای همان ولتاژ اعمالی پایین می‌آید. این اثر را می‌توان یا با افزایش ولتاژ خروجی مبدل – یک‌سوکننده و یا با آب دادن بستر زمینی خنثی نمود. در مناطقی که خشک شدن خاک یک مشکل شناخته شده است، عموماً از بسترهای زمینی عمیق یا عمودی به دلیل خیس بودن دائمی محیط استفاده می‌شود. چنین بسترهایی، نیازمند یک سیستم تهویه می‌باشد که اندازه و ابعاد و پیچیدگی آن به جریان خروجی آند بستگی دارد. برای یک ولتاژ معین، جریان خروجی ممکن است به دلیل عدم تهویه (گرفتگی منافذ خاک یا لوله) کاهش یابد (به بند ۶-۱-۳ رجوع شود). در برخی موارد، ممکن است به برداشتن لایه‌های بالایی بستر زمینی و جایگزینی آنها با مواد متخلخل نیاز باشد (به بند ۱۲-۳-۲ رجوع شود).

توجه: تغییرات ناگهانی در کارایی بستر زمینی می‌تواند ناشی از نصب سازه‌های جدید توسط سازمان‌های دیگر باشد. در این موارد، به مذاکره با مالکین سازه‌های جدید، نیاز است. لازم به یادآوری است که این سازمان‌ها، مسئول خسارت‌های وارده به سیستم در اثر خوردگی تداخلی می‌باشند، ضمن اینکه باید به آنان تذکر داده شود که این تداخل، موجب وارد شدن صدماتی به سیستم آنان نیز خواهد شد.

۱۱-۵ بهره‌برداری و نگهداری سازه‌های غوطه‌ور

۱۱-۵-۱ سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده

در فواصل زمانی یک‌ماهه، پتانسیل الکترولیت– سازه در تعدادی از نقاط انتخابی به طور معمول (روتین) قرائت و یادداشت می‌شود، و در صورت وجود وسایل اندازه‌گیری، مقدار جریان نیز قرائت می‌گردد.

در مواردی که آندها به وسیله کابل به سازه‌های غوطه‌ور ثابت متصل شده‌اند، باید با توجه به احتمال وارد شدن خسارات ناشی از امواج آب و لنگراندازی قایق‌های کوچک یا سایر اجسام شناور، آزمایش روی سازه اصلی به‌طور منظم صورت گیرد؛ البته زمانی که پتانسیل سازه – الکترولیت به اندازه کافی منفی نباشد، نیاز به تعویض آند وجود دارد.

در برخی موارد، ممکن است آندی را به عنوان نمونه از آب بیرون آورده و میزان اتلاف آند را مورد بازرسی قرار داد.

در مواردی که آندها به طور مستقیم روی قسمتی از سازه غوطه‌ور متصل شده باشند [مانند آندهایی که قبل از شمع کوبی (پایه کوبی) روی آنها جوش داده شده‌اند]، جریان خروجی را نمی‌توان اندازه گرفت؛ که در این صورت، بر اساس اندازه‌گیری پتانسیل سازه – الکترولیت و نیز بر اساس اطلاعات تکمیلی از میزان اتلاف آندها، نیاز به تعویض آندها را مشخص می‌نمایند. در شرایطی که آندها برای مدتی کوتاه و در زمان پایین رفتن آب (جزر) قابل دسترسی می‌باشند، می‌توان اطلاعات لازم را به‌دست آورد. در غیر این‌صورت بازرسی با عملیات غواصی ضروری می‌گردد.

آندهایی که به‌طور مستقیم به سازه اتصال دارند، معمولاً برای مدت زمان طولانی‌تری طراحی می‌شوند که البته در این صورت نیز، در نهایت، آندها پس از اینکه به طور کامل به مصرف رسیدند نیاز به تعویض خواهند داشت.

برای دوری از عملیات زیرآبی (غواصی) در تعویض آندها، بهتر است از آندهای کابل‌دار یا آندهای جوش شده به میله‌های فولادی استفاده گردد تا بتوان آنها را در قسمت‌های بالاتر از آب، به سازه متصل نمود (به بند ۷-۱-۲-۳ رجوع شود). گزینه دیگر، استفاده از سیستم با اعمال جریان می‌باشد.

باید توجه کرد که آلودگی شدید آب دریا، ممکن است بازدهی آندها را تحت تأثیر قرار دهد.

۱۱-۵-۲ سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان

جریان خروجی از دستگاه مبدل – یک‌سوکننده، ممکن است هر چند وقت یک‌بار تنظیم گردد تا میزان حفاظت مطلوب تأمین شود. در مرحله اول بهره‌برداری (برای یک دوره ۱۲-۶ ماهه)، میزان جریان حفاظتی، با افزایش قطبی‌شدن کاهش داده می‌شود. اگر جریان خروجی مبدل یک‌سوکننده کاهش نیابد، پتانسیل‌های سازه – الکترولیت ممکن است بیش از اندازه منفی شود که خود به وارد شدن صدمه به پوشش‌ها منجر می‌گردد (به بند ۵-۷-۱ رجوع شود). به‌هر حال، ممکن است در آینده، با کاهش پتانسیل سازه – الکترولیت میزان جریان حفاظتی افزایش داده شود تا حفاظت مطلوب به‌دست آید.

در مواردی که تغییرات قابل توجهی در مقاومت الکتریکی[1] آب صورت می‌گیرد، و دستگاه‌های کنترل خودکار (اتوماتیک) یا تجهیزات مخصوص تثبیت جریان وجود نداشته باشد، باید جریان خروجی مبدل – یک‌سوکننده در سطح و میزانی تنظیم گردد، که بتواند شرایط مقاومت‌های بالا و پایین آب را جبران نماید. در مدت زمانی که مقاومت آب پایین است، انجام آزمایش‌هایی ضروری می‌گردد تا اطمینان حاصل شود که هیچ‌گونه خطر بار اضافی[2] به تجهیزات وارد نمی‌شود.

ولتاژ و جریان خروجی مبدل – یک‌سوکننده، باید حداقل یک‌بار در ماه اندازه‌گیری شده و در خورها تأثیر تغییرات ناشی از جزر و مد مطالعه گردد. سپس باید آزمایش‌های بعدی، در سطوح انتخاب شده جزر و مد انجام پذیرد. نتایج اندازه‌گیری پتانسیل‌های سازه – الکترولیت در تعداد معدودی از نقاط نیز، به عنوان نمونه باید به صورت ماهیانه در طی اولین سال بهره‌برداری ثبت شود. پس از این مدت، اگر شرایط متعادل شده باشد، مدت زمان بین قرائت‌های پتانسیل سازه – الکترولیت ممکن است به ۳-۲ ماه افزایش یابد که این، به شرایط محیطی بستگی دارد. اتصال‌های مجزا کننده (اتصالات عایقی) خط لوله، باید هر ۳ ماه یک‌بار بررسی شود.

---

1 - Resistivity
2 - Overloading

در سازه‌های با شمع‌های فولادی و عرشه بتنی، باید پیوستگی الکتریکی شمع‌ها با اندازه‌گیری پتانسیل سازه – الکترولیت هر شمع به‌طور مجزا صورت گیرد. معمولاً این قبیل بررسی‌ها پس از حدود ۱۲ ماه بهره‌برداری سیستم حفاظت کاتدی انجام شده، و معمولاً اگر دلیل خاصی (مثلاً وارد آمدن صدماتی به سازه) نباشد، بررسی تکرار نمی‌شود. در مواردی که شکل سازه طوری است که شمع‌ها دارای پیوستگی الکتریکی می‌باشند (مانند عرشه‌های فولادی اسکله‌ها که به شمع‌های فولادی جوش شده‌اند)، کنترل اتصالات ضروری نیست.

تجهیزات تأمین برق سیستم نیز به نگهداری نیاز دارد (به بند ۱۱-۳-۳-۱ رجوع شود). بسترهای آندی نیاز به تعویض کامل دوره‌ای دارند، که به طراحی و میزان بار آن بستگی دارد (به بند ۵-۵-۲-۱ رجوع شود). به‌هرحال، آندهای از جنس تیتانیوم پلاتینه شده به‌طور طبیعی، دارای عمری بیش از ۵ سال بوده و نیاز به تعویض آنها از روی کاهش تدریجی جریان خروجی مشخص می‌شود.

انواع زیادی از بسترهای دریایی و کابل‌های اتصال در معرض صدمات گوناگون مکانیکی می‌باشند که ممکن است به کاهش جریان خروجی منجر گردد.

۱۱-۶ بهره‌برداری و نگهداری از سیستم حفاظت داخلی تأسیسات

۱۱-۶-۱ سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده

انجام بازرسی‌های دوره‌ای و منظم از آندهای فدا شونده برای حصول اطمینان از تداوم کارکرد مطلوب آنها ضروری است، اما در بسیاری از وسایل و تجهیزات بسته، مشکلاتی در رابطه با دسترسی به آنها وجود دارد زیرا بازرسی آندها در واحدهای صنعتی، اغلب مستلزم خارج نمودن آنها از سرویس می‌باشد.

عملکرد سیستم حفاظت کاتدی، باید هم توسط اندازه‌گیری پتانسیل‌های فلز – الکترولیت و هم با بازرسی چشمی تأسیسات تحت حفاظت ارزیابی گردد.

از آنجایی‌که آندهای فدا شونده به‌طور مستقیم به سطوح مورد حفاظت متصل می‌گردند، بنابراین جریان، قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. به منظور ارزیابی میزان مصرف و عمر مورد انتظار آنها، می‌توان به طور متناوب ابعاد آنها را پس از تمیزکاری سطحی اندازه‌گیری نمود.

۱۱-۶-۲ سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان

۱۱-۶-۲-۱ کنترل دستی

کلیه جریان‌های خروجی آندها و پتانسیل‌های سازه – الکترولیت، باید در دوره‌های منظم (که به تجربه به‌دست می‌آید و در ابتدا به صورت دوره‌های یک‌ماهه است) اندازه‌گیری شود، به طوری‌که یک تصویر کلی از انحراف‌ها و نوسان‌های سیستم به‌دست آید.

در مواردی که الکترولیت، آب دریا است، ممکن است تثبیت پتانسیل به چندین ماه نیاز داشته باشد. تغییرات محسوس پتانسیل در نقاط دور از آندها اتفاق نمی‌افتد، مگر آنکه رسوبات آهکی روی سازه و در نزدیکی آندها تشکیل شده باشد (به بند ۵-۷-۱- ب رجوع شود). در بند ۵-۵-۵ به این موضوع اشاره شده است.

الکترودهای مرجع، برای کنترل پتانسیل، باید به دقت در محل‌های مناسب قرار داده شوند. برای این منظور (به‌جز در مواردی‌که تجربه کافی وجود داشته باشد) باید در دوره اولیه، چندین الکترود مرجع برای تشخیص و تعیین مناسب‌ترین نقاط مورد استفاده قرار گیرد تا نقاط دائمی مشخص شود. جریان خروجی آندها ممکن است به‌طور مجزا (تکی) یا به صورت گروهی تنظیم شود تا پتانسیل‌های مطلوب سازه – الکترولیت به‌دست آید.

۱۱-۶-۲-۲ کنترل خودکار (اتوماتیک)

وسایل و تجهیزات کنترل کننده باید طوری عمل نمایند که پتانسیل فلز – الکترولیت مطلوب و ثابت و قابل اطمینان در الکترود حساس[1] ایجاد نماید؛ و اگر راه‌اندازی اولیه به طور صحیح انجام گرفته باشد، این اطمینان را به وجود آورد که پتانسیل‌ها در کلیه مواضع در دامنه مناسبی باشند (به بند ۵-۵-۵ رجوع شود). قرائت‌های پتانسیل سازه – الکترولیت برای تأیید عملکرد مداوم سیستم کنترل و سایر تجهیزات ضروری است.

الکترودهای حساس باید به‌طور منظم مورد بررسی قرار گیرند. برای انجام این کار، باید از یک الکترود استاندارد و یک ولت‌متر مستقل با مقاومت بالا استفاده گردد. اگر چه واحدهای پایش خودکار در دسترس است، اما باید الکترودها و واحدهای کنترل، به صورت دوره‌ای بررسی شوند تا از عملکرد درست آنها اطمینان به‌دست آید.

1 - Sensing Electrode

۱۲- ایمنی

۱۲-۱ کلیات

در این بخش، پاره‌ای از احتیاط‌های ایمنی که به طور کلی باید برای تجهیزات الکتریکی سیستم‌های حفاظت کاتدی به کار گرفته شود، مشخص گردیده است؛ علاوه بر اینها به‌ویژه خطرات ناشی از شوک‌های الکتریکی در اثر معایب منبع جریان، خسارات ناشی از تصاعد هیدروژن، ایجاد جرقه در محیط‌های خطرناک و مسمومیت‌های حاصل از تصاعد گاز کلر را شامل شده و در مورد اقدامات لازم برای مبارزه با این خطرات توضیح داده شده است.

۱۲-۲ استانداردها و آیین‌نامه‌های قابل اجرا

سیستم‌های حفاظت کاتدی، باید با مقررات مندرج در این بخش، استانداردهایی که در این متن به آنها ارجاع داده می‌شود و نیز با هرگونه قوانین و دستورالعمل‌های ویژه یا استانداردهای دیگر که ممکن است به‌کار گرفته شود، مطابقت داشته باشد.

۱۲-۳ خطرات ناشی از شوک‌های الکتریکی

۱۲-۳-۱ کلیات

معمولاً برای تأمین جریان اعمالی یک‌سو (dc) برای سیستم‌های حفاظت کاتدی، از منابع برق متناوب (ac) استفاده می‌گردد که برای این منظور عموماً مبدل کاهنده و یک‌سوکننده جریان به کار گرفته می‌شود. مبدل باید دارای سیم‌پیچی مضاعف بوده و با استانداردهای شناخته شده و قابل قبول مطابقت داشته باشد. هسته مبدل‌ها (در صورتی‌که عایق مضاعف نشده باشد) و کلیه قسمت‌های فلزی، باید به طور مؤثر اتصال به زمین شده باشند (به بند ۵-۷-۳ رجوع شود).

اتصال مدار خروجی تجهیزات به سیستم اتصال زمین، ضروری نیست، زیرا این مدار توسط اثر همزمان بستر زمینی یا آند غوطه‌ور و اتصال زمین طبیعی سازه مورد حفاظت، به زمین متصل می‌شود. بنابراین غیر از مواردی که مبدل دارای عایق مضاعف مجزا (طبق استاندارد معتبر[1]) است، مبدل باید دارای پرده فلزی متصل شده به زمین بین سیم‌پیچی‌ها بوده و یا بین سیم‌پیچی‌های پیچیده شده بر شاخه‌های مجزای هسته باشد. در غیر این‌صورت، باید مطمئن شد که مقاومت مجموعه اتصال زمین بستر زمینی و سازه مورد حفاظت، به اندازه کافی پایین است تا در صورت بروز خطا در ورودی یا سیم‌پیچ ولتاژ بالای مبدل (ولتاژ اصلی) و خروجی جریان مستقیم یک‌سوکننده، اجازه دهد فیوزهای حفاظتی یا کلیدها عمل نمایند.

باید از تأمین کننده برق خواسته شود تا نوع برق تحویلی را مطابق مقررات سیم‌کشی IEE تنظیم نموده و باید مشخص گردد که آیا برق مورد استفاده دارای اتصال زمین می‌باشد و یا اینکه الکترود زمین در محل ورودی مورد نیاز است؟ همچنین مشورت شود که آیا حفاظت اضافی به شکل یک وسیله عمل کننده با جریان باقی‌مانده، باید پیش‌بینی شود یا خیر.

---

1 - Bs 3535 از جمله

وسایل جداسازی جریان متناوب، باید در دستگاه مبدل – یک‌سوکننده تعبیه گردد. همچنین باید کلیه اتصالات فاز به‌صورت مناسبی حفاظت گردند تا از عدم امکان اتصال‌های تصادفی اطمینان حاصل شود. وسایل حفاظت جریان اضافی در مبدل – یک‌سوکننده‌های خودکار (اتوماتیک)، با جریان خروجی ثابت یا با کنترل جریان نباید هنگام بروز خطا در جریان مستقیم عمل نمایند، بنابراین برای تأمین حفاظت مطلوب باید تمهیدات خاصی به عمل آید.

۱۲-۳-۲ سیستم حفاظت کاتدی بر روی سازه‌های مدفون

در مورد بسترهای زمینی مدفون، لازم است به احتمال بروز خطر برای انسان و حیوانات به دلیل تغییرات ولتاژ در نقاط مختلف سطح خاک توجه شود. این موضوع، به عمق و ابعاد بستر زمینی، مقاومت الکتریکی خاک، ولتاژ خروجی مبدل – یک‌سوکننده و جریان منتشر شده در خاک بستگی دارد؛ به طوری‌که ولتاژ برقرار شده بین پاهای انسان یا حیواناتی که به محل نزدیک می‌شوند، نباید به حد خطرناکی برسد. برای کنترل و حفظ تغییرات ولتاژ در سطح ایمن، باید تمهیدات زیر به کار گرفته شود:

الف – ولتاژ خروجی منبع تغذیه حفاظت کاتدی کننده، باید حتی‌المقدور پایین‌تر از ۵۰ ولت (dc) نگهداشته شود.

ب – آندها و سطح فوقانی توده[1] زغالی[2] اطراف آندها، حداقل ۹۰۰ میلی‌متر زیر سطح زمین باشد، به‌طوری‌که فقط سهم کوچکی از ولتاژ خروجی در سطح زمین ظاهر گردد.

ج – سیم‌ها باید در حد فاصل اتصال به آندها، تا نقطه مطمئنی بالاتر از سطح زمین، کاملاً عایق شده و در مقابل صدمات مکانیکی محافظت شود.

به عنوان مثال، اگر یک حصار سیمی با ستون‌های چوبی به فاصله کمی از بستر زمینی کشیده شود، امکان بروز خطر افزایش می‌یابد، و اگر سیم‌های حصار حتی با فاصله‌ای از بستر اتصال زمین شوند، ولتاژ بین سیم‌های حصار و خاک نزدیک بستر زمین، بخش عمده‌ای از کل افت ولتاژ در خاک را تشکیل می‌دهد. این موارد، باید در مرحله طراحی مد نظر باشد و آزمایش‌های تأییدی، هنگام راه‌اندازی سیستم انجام گیرد. همچنین اگر یک حصار سیمی با ستون‌های چوبی که برای نصب یک بستر زمینی تغییر مکان داده شود و پایه چوبی نزدیک به بستر زمینی با یک پایه فلزی تعویض گردد، خطر مشابه صورت می‌گیرد.

۱۲-۳-۳ ملاحظات ایمنی سازه‌های غوطه‌ور

در مواردی که بستر آندی در آب قرار می‌گیرد، خطرات احتمالی برای شناگران یا ماهی‌ها نیز باید بررسی شود. خطر در آب‌های شیرین (به علت اعمال جریان‌های الکتریکی بیشتر) بیش از آب دریا می‌باشد. چنانچه غواصان در فواصل حدود ۲-۱ متری آندهای با جریان اعمالی و در حال کار باشند، در معرض خطر احتمالی از شوک الکتریکی قرار می‌گیرند. این نکته دارای اهمیت است که قبل از آغاز هر نوع عملیات زیر آبی (غواصی) مانند تمیزکاری بدنه کشتی، جریان اعمال شده به کشتی باید قطع گردد، مگر آنکه مقررات ایمنی غواصی[3] تأمین شده باشد.

---

1 - Backfill
2 - Carbonaceous
3 - BS 7430

۱۲-۳-۴ ملاحظات ایمنی برای حفاظت داخلی

برای جلوگیری از ورود کارکنان به مخازن و لوله‌های آب هنگام روشن بودن جریان برق آندها، باید ملاحظات ایمنی به‌کار گرفته شود.

۱۲-۴ معایب سیستم الکتریکی در رابطه با اتصالات غیر عمدی یا اصلاحی

اتصال عمدی یا غیر عمدی یک سیستم حفاظت کاتدی با سازه‌های فلزی مرتبط با سیستم اتصال زمین (ارت) شبکه برق، ممکن است خطرناک باشد. این خطر، به‌ویژه در اطراف ایستگاه‌های فرعی با ولتاژ بالا دارای اهمیت است.

اتصال و تماس بین هر قطعه فلزی مرتبط با جریان برق (مانند غلاف‌های فلزی کابل‌ها) و سازه‌های حفاظت کاتدی شده، در شرایط غیر عادی در شبکه برق‌رسانی می‌تواند خطرآفرین باشد.

خطر جدی ناشی از برقرار شدن جریان به سازه حفاظت شده، از طریق اتصالات آن و در هنگام خطای اتصال کوتاه فاز با زمین یا جریان ناشی از بار نامتعادل افزایش می‌یابد (به بند ۹-۲-۵-۱ رجوع شود). این جریان، همراه با افزایش ولتاژ، ممکن است موجب شوک‌های الکتریکی، انفجار، آتش‌سوزی یا داغ شدن بیش از حد و نیز احتمال تخریب مقاومت الکتریکی پوشش سازه‌ها گردد، که این خطرات به شرایط موضعی سیستم بستگی دارد.

در صورت وجود اتصال‌های بین تجهیزات برق‌رسانی و تأسیسات دیگر، باید این خطرات مد نظر قرار گرفته و تمهیدات لازم برای رفع خطرات احتمالی صورت پذیرد (به بند ۵-۷-۳ و استانداردهای معتبر[1] رجوع شود). از تعبیه مقاومت‌های محدود کننده جریان در اتصال‌هایی که در آنها احتمال عبور جریان بالای نامطلوب می‌رود، باید تا حد امکان اجتناب شود، و در صورت نیاز به استفاده از این مقاومت‌ها، ضروری است که این مقاومت‌ها دقیقاً برای شرایط مورد انتظار طراحی گردند. اتصالات و هر گونه رابط‌های آن، باید در مقابل خطر و خرابی کاملاً محافظت شده باشند.

از آنجایی‌که اتصالات بین تجهیزات سیستم برق‌رسانی و سازه‌های دیگر قابل اطمینان نیست، بهتر است از آنها دوری گردد و یا از روش‌های دیگر (مثلاً نصب مستقیم آند فدا شونده بر روی سازه استفاده شود) تا از مسائل خوردگی تداخلی اجتناب گردد.

۱۲-۵ ولتاژ و جریان‌های متناوب القایی

جریان‌های متناوب شبکه‌های برق‌رسانی، ایجاد میدان مغناطیسی متناوب می‌نماید. در مناطقی که این میدان‌ها، اجسام هادی دیگری را قطع نمایند، ولتاژ متناوبی در هادی اخیر ایجاد می‌شود؛ پس اگر خط لوله موازی و زیر خط انتقال برق فشار قوی هوایی یا خط برق‌رسانی راه‌آهن کشیده شده باشد، در محل‌هایی‌که لوله میدان مغناطیسی را قطع می‌کند، ولتاژ القاء شده به لوله موجب ایجاد جریان در لوله می‌گردد. بزرگی ولتاژی که در لوله به وجود می‌آید، به عوامل زیادی بستگی دارد از جمله:

الف – ابعاد و موقعیت دو سازه نسبت به یکدیگر

ب – مقدار جریان در خطوط انتقال که ممکن است به دلیل غیر عادی بودن بار، یا وضعیت‌های خطا در خط انتقال نامتعادل باشد.

ج – مشخصه‌های خط لوله و پوشش‌ها

د – مقاومت الکتریکی خاک

---

1 - BS 6651

در مواردی که خط هوایی دارای نقطه خنثی زمین شده باشد، شرایط نامتعادل بار یا خطا در خط انتقال برق موجب جاری شدن جریان زیادی به زمین می‌شود. این جریان‌ها که از نوع القایی یا هدایتی هستند، می‌توانند به لوله انتقال یابند.

مطالعه جریان‌ها و ولتاژهای القایی و پیش‌بینی اقدامات اصلاحی ممکن است بسیار پیچیده باشد، پس باید این موارد توسط کارکنان صلاحیتدار پیگیری گردد.

در مورد یک خط انتقال برق ۳ فاز هوایی کاملاً متعادل، در شرایط عادی، جریان برق به نظر نمی‌رسد که ولتاژ خطرناکی در سازه‌ای که (خط لوله) به‌طول کمتر از ۳ کیلومتر موازی آن است، القاء نماید. با این حال، یک برق یک فاز نا متعادل مثلاً برق راه‌آهن با برق متناوب، یا اتصال زمین (ارت) معیوب، حتی در طول‌های کوتاه هم ولتاژهای خطرناک ایجاد می‌نمایند. وقتی محاسبات نشان می‌دهد که ولتاژهای القایی با مقادیر غیر قابل قبول وجود دارد، باید برای کاهش ولتاژ تا حد ایمن اقداماتی صورت گیرد.

یکی از مؤثرترین روش‌ها برای کاهش ولتاژهای القایی، ایجاد اتصال زمین (ارت) در خط لوله در محل‌های بحرانی (باحداکثر ولتاژ) می‌باشد. این عمل را می‌توان با اتصال صفحات اتصال زمین (ارت)، میله‌های اتصال زمین، آندهای فدا شونده یا آندهای سیمی یا تسمه‌ای ممتد به خط لوله انجام داد.

انتخاب نوع سیستم اتصال زمین، به مقاومت زمین و مقدار ولتاژی که باید تخلیه شود بستگی دارد. امپدانس سیستم اتصال زمین، باید به اندازه کافی پایین باشد تا ولتاژ القا شده را به حد ایمن کاهش دهد. اگر برای اصلاح سیستم از مواد غیر فدا شونده استفاده شود، باید برای اتصال سیستم به اتصال زمین خط لوله از یک وسیله مجزا کننده جریان مستقیم مانند پیل قطبی استفاده گردد، تا تخلیه جریان زیاد باعث آسیب به سیستم حفاظت کاتدی نگردد. اگر از آندهای فدا شونده استفاده می‌شود، باید برای انجام آزمایش اتصال زمین در فواصل زمانی حداکثر ۱۲ ماهه پیش‌بینی‌هایی به‌عمل آید. هنگامی که امکان ایجاد ولتاژ القایی، به‌نحوی باشد که بتواند باعث بروز قوس الکتریکی روی اتصال‌های عایقی شود، باید از پیل‌های الکترولیتی زمینی، پیل‌های قطبی شونده[1] یا وسایل مناسب دیگر استفاده گردد. کابل‌های اتصال‌دهنده این وسایل و خود اتصال‌ها باید با اندازه مناسب و برای حداکثر جریان خطا و مدت زمان کارکرد طراحی شوند. اگر از پیل‌های قطبی استفاده می‌شود، برای حمل محلول قوی سود سوزآور (معمولاً هیدروکسیدپتاسیم $۳۰°C$) به منظور پرکردن پیل‌ها باید تمهیداتی خاص پیش‌بینی شود.

۱۲-۶ تصاعد گازهای خطرناک

۱۲-۶-۱ تصاعد هیدروژن

۱۲-۶-۱-۱ کلیات

در سیستم‌های با اعمال جریان و برخی مواقع در سیستم‌های با آندهای فدا شونده منیزیمی، قطبی‌شدن بیش از حد، سبب تصاعد هیدروژن روی سازه می‌گردد. بنابراین در محل‌هایی مانند مخازن سربسته که هیدروژن جمع می‌شود، امکان خطر انفجار افزایش می‌یابد، بنابراین، برای اجتناب از این خطر، باید در کلیه طراحی‌ها، سیستم تهویه کافی برای جلوگیری از تجمع گاز منظور شود.

1 - Polarize

در مواردی‌که تصاعد هیدروژن می‌تواند خطر انفجار به وجود آورد، پتانسیل سازه – الکترولیت باید به دقت تنظیم شود. تصاعد هیدروژن در پتانسیل‌های کمتر از ۱– ولت نسبت به الکترود مرجع نقره – کلرور نقره (در مورد سازه فولادی در آب دریا) قابل توجه نمی‌باشد.

۱۲-۶-۲ تصاعد گاز کلر

در سیستم‌های حفاظت کاتدی با جریان اعمالی در محیط‌های دریایی، واکنش آندی به تشکیل گاز کلر منجر می‌شود. آب دریا معمولاً کمی قلیایی بوده و با گاز کلر، تولید هیپوکلریت سدیم می‌نماید. در حالت سکون، کلر ممکن است به‌صورت گاز، متصاعد شده و موجب خطراتی برای کارکنان بازرسی و تعمیرات و نگهداری گردد.

در مخزن‌ها یا تأسیسات بسته دارای حفاظت کاتدی داخلی، برخی مواقع تخلیه کامل مخزن پیش از ورود برای تعمیرات غیر ممکن است. در صورتی‌که آندها فعال و غوطه‌ور باشند، میزان کلر در آب باقی‌مانده در مخزن افزایش می‌یابد. به‌هم خوردگی آب، سبب آزاد شدن گاز کلر در هوا گشته و موجبات ناراحتی‌های شدید را فراهم می‌سازد. به همین دلیل، پیش از ورود به داخل مخازن باید حفاظت کاتدی قطع شود.

با نصب یک سیستم با کنترل خودکار و یا دو سطحی، که پتانسیل‌های سازه – الکترولیت را در محدوده حفاظت مناسب نگهداری نماید، تشکیل هیپوکلریت و گاز کلر را می‌توان به حداقل میزان رساند.

۱۲-۷ نصب سیستم حفاظت کاتدی در مناطق خطرناک[1]

۱۲-۷-۱ کلیات

هنگام جابه‌جایی یا حمل و نقل، انبار کردن هیدروکربن‌ها و یا مواد پودری، ممکن است مخلوط‌های قابل اشتعال از گازها، بخارات یا پودرها تشکیل شود. که (به استاندارد معتبر[2] رجوع شود) چنانچه تمهیدات مناسبی در نظر گرفته نشود، چنین محیط خطرناکی ممکن است با یک جرقه یا قوس الکتریکی مشتعل گردد. کلیه تجهیزات الکتریکی از جمله سیستم‌های حفاظت کاتدی، می‌توانند باعث ایجاد جرقه و انفجار شوند.

چنین خطراتی می‌تواند در مخازن، لوله‌ها، انشعابات، اسکله‌های بارگیری، کشتی‌های باری و تانکرها نیز اتفاق بیفتد.

سیستم‌های حفاظت کاتدی در محیط‌هایی که احتمال به‌وجود آمدن محلول‌های قابل اشتعال در آنها وجود دارد، باید با قوانین و مقررات ایمنی خاص آن سازه یا صنعت مطابقت داشته باشند. برای مثال انجمن طبقه‌بندی کشتی‌ها، مقررات حاکم بر استفاده و بازرسی آندها در کشتی‌ها را تدوین نموده که برای هر مورد، باید تأییدیه لازم اخذ گردد. برخی از خطرات انفجار که ممکن است ناشی از حفاظت کاتدی باشد و اقدامات ضروری که برای اجتناب از آنها باید انجام شود در بند ۱۲-۷-۲ تا ۱۲-۷-۱۰ توضیح داده شده است.

---

1 - Hazardous Area

۲– برای مثال استانداردهای BS5501, BS683 و BS5345 قسمت دوم

۱۲-۷-۲ پیوستگی الکتریکی

قطع عمدی یا غیرعمدی پیوستگی الکتریکی در محل اتصالات، و یا هر محل دیگری در طول خط لوله که تحت حفاظت کاتدی می‌باشد، موجب بروز خطراتی می‌گردد. به همین منظور، باید اتصالات در خارج از محیط خطرناک و یا در شرایط حفاظت شده نصب گردند تا از قطع غیر عمدی و خطرات ناشی از آن جلوگیری شود. برق‌رسانی سیستم حفاظت کاتدی، باید به یک کلید ضد آتش برای قطع و وصل مجهز باشد (به استانداردهای معتبر در این زمینه رجوع شود[۱]).

۱۲-۷-۳ اتصالات جداکننده (اتصالات عایقی)

اتصالات کوتاه برقی عمدی یا غیر عمدی در یک اتصال عایقی توسط ابزارهای فلزی یا شکستگی‌های عایقی ناشی از افزایش ناگهانی ولتاژ در یک سازه حفاظت شده که ممکن است در اثر رعد و برق یا بروز خطا در سیستم برق رسانی اتفاق افتد، ایجاد خطر می‌نماید. برای جلوگیری از بروز این خطرات، اتصالات عایقی باید در صورت امکان خارج از محیط‌های خطرناک نصب گردند و در صورتی‌که امکان نداشته باشد، برای جلوگیری از قوس و جرقه الکتریکی، باید اقدامات زیر صورت بگیرد:

استفاده از اتصال مقاومت‌دار الکتریکی جاسازی شده در محیط بسته و ضد آتش، یا قرار دادن آن در خارج از محوطه خطرناک، یک برقگیر یا محفظه جرقه، الکترودهای زمینی با جنس روی متصل شده در امتداد اتصال عایقی یا پیل قطبی متصل شده در امتداد اتصال عایقی یا متصل شده به زمین، همچنین برای جلوگیری از اتصال کوتاه برقی تصادفی ناشی از ابزارهای فلزی باید سطح اتصال عایقی پوشانده و محافظت شود.

۱۲-۷-۴ اتصال کوتاه برقی بین نقاط با پتانسیل‌های مختلف

اتصال کوتاه برقی غیر عمدی در اثر به‌هم وصل شدن اتفاقی نقاط با پتانسیل‌های مختلف، مثلاً به علت وجود قراضه‌های فلزات، قطعه‌ای سیم و وسایل متحرک، به بروز خطراتی منجر می‌گردد. پیش‌بینی این خطرات مشکل است ولی به‌وسیله اتصال کلیه قطعات و بخش‌های فلزی به یکدیگر می‌توان برای به حداقل رساندن اختلاف پتانسیل بین قسمت‌های مختلف سازه اقدام نمود.

۱۲-۷-۵ قطع اتصال الکتریکی، جدا شدن یا شکست لوله‌های حفاظت شده

هر کدام از لوله‌های حفاظت کاتدی شده، بخشی از جریان حفاظتی را در خود دارد. هر گونه قطع شدن، جدا شدن یا شکستگی در شبکه لوله‌کشی، موجب قطع جریان شده و ممکن است بسته به مقدار جریان، جرقه و قوس الکتریکی ایجاد بنماید که در این‌صورت، در زمان تعمیرات، انجام اصطلاحات یا تعمیر در لوله‌های شبکه حفاظت شده، باید مبدل – یک‌سوکننده مربوط به آن قسمت از لوله‌کشی خاموش شود و یک اتصال موقت برای برقراری جریان از یک‌سو به سوی دیگر محل شکستگی ایجاد گردد. ضروری است که اتصال موقت باید به صورت محکم و مطمئن به هر دو سوی محل شکستگی ایجاد شود تا کارهای مورد نظر، انجام و سپس جریان دوباره برقرار شود؛ البته با تأیید اینکه محوطه بدون گاز بوده و خطری وجود ندارد.

۱– برای مثال استانداردهای BS5501, BS683 و BS5345 قسمت دوم

۱۲-۷-۶ تجهیزات برقی

کلیه وسایل الکتریکی که در محل‌های خطرناک نصب می‌شوند، باید ضد آتش بوده و برای استفاده در چنین مکان‌هایی تأیید شده باشند (مطابق استانداردهای معتبر[۱]). برای جلوگیری از به‌کارگیری وسایل و تجهیزات ضد آتش، لازم است که تجهیزات، خارج از محوطه‌های خطرناک نصب شوند. در هر کدام از مدارهای ورودی به محل‌های خطرناک، باید کلید دوپل نصب شود، تا در زمان تعمیرات و غیره، اطمینان حاصل شود که هر دو پل قطع می‌گردد (به بند ۱۲-۷-۵ رجوع شود). هر کابلی که جریان حفاظتی را حمل می‌نماید، باید طوری نصب شود که قطع شدن آن در محوطه خطرناک، بدون قطع شدن سیستم حفاظت کاتدی ممکن نباشد. کابل‌ها باید به طور مناسب حفاظت مکانیکی گردند تا از پارگی تصادفی آنها جلوگیری شود.

۱۲-۷-۷ وسایل آزمایش

وصل کردن یا جدا کردن ابزار و وسایل اندازه‌گیری از سیستم حفاظت کاتدی به هنگام آزمایش سیستم‌های حفاظت کاتدی، ممکن است سبب ایجاد جرقه یا قوس الکتریکی شود. چنانچه اندازه‌گیری‌ها در محل‌های خطرناک صورت گیرد، دستگاه اندازه‌گیری باید دارای ایمنی کامل مطابق استانداردهای معتبر[۲] باشند. سیستم‌های اندازه‌گیری، باید قبلاً به سازه وصل شده و سپس به دستگاه اندازه‌گیری متصل شوند و یا اینکه بازرسی‌ها نشان دهد که فضا بدون گازهای خطرناک است، تا استفاده از وسایل اندازه‌گیری و تست متعارف را مجاز سازد. الکترودهای مرجع و دائم نیز، که به صورت ثابت نصب شده و کابل‌های آنها به خارج از محوطه خطرناک کشیده شده باشد را می‌توان مورد استفاده قرار داد.

۱۲-۷-۸ آندهای داخل تجهیزات

اتصال کوتاه برقی غیرعمدی آندهای اعمال جریان، هنگامی که سطح مایع داخل ظروف تحت حفاظت پایین می‌رود، می‌تواند موجب خطراتی شود. در این مورد، باید ترتیبی داده شود تا اطمینان به‌دست آید که هنگامی که آند غوطه‌ور نیست، یعنی مدار آند باز است، مدار به صورت اتوماتیک یا دستی قطع می‌گردد.

۱۲-۷-۹ آندهای فدا شونده

با وجود آنکه کار عادی یک آند فدا شونده خطرناک تلقی نمی‌شود، ولی اگر آند آلومینیمی یا منیزیمی یا قسمتی از آند با سازه آهنی تماس پیدا کند، امکان ایجاد جرقه وجود دارد (به بند ۸-۳-۲-۳ رجوع شود.). در مورد آندهای روی (Zn) این نوع خطر وجود ندارد.

۱۲-۷-۱۰ نصب راهنما جهت پرسنل

در محل‌هایی که امکان بروز هر کدام از خطرات بیان شده وجود داشته باشد، کارکنان بهره‌برداری باید کاملاً راهنمایی شوند و اعلامیه‌های اعلام خطر (به صورت مطمئن و محکم و با دوام) در محل کار نصب گردند. دستورالعمل‌های کتبی و مجوزهای کار رسمی، باید در کتابچه‌های بهره‌برداری درج گردند.

۱- مانند BS5501, BS5345 و قسمت دوم BS4683

2 - BS 5510

پیوست - تعیین اندازه pH و پتانسیل احیا

۱- تعیین اندازه pH

معمولاً اسیدیته (یا قلیاییت) الکترولیت‌های آبی، و تمایل فلزات به جابه‌جایی هیدروژن و پایداری هر گونه لایه‌های اکسیدی روی سطح، مشخص کننده رفتار فلزات مدفون یا غوطه‌ور در آن الکترولیت هستند. به‌طور کلی، اندازه pH می‌تواند نشانگر اسیدیته باشد. رابطه کاربردی و معتبر زیر این موضوع را نشان می‌دهد.

$$pH = -Log_{۱۰}[H^+]$$

که H^+ غلظت یون‌های هیدروژن برحسب گرم یون در یک لیتر الکترولیت است.

یک مقیاس عدد ثابت بر اساس تجزیه یونی آب خالص به صورت زیر بیان می‌شود:

$$pH + pOH = \text{ثابت}$$

که pOH شبیه pH است با این تفاوت که در pOH غلظت یون هیدروکسید مد نظر است. در دمای $۲۵^\circ C$ مقدار ثابت مذکور برابر عدد ۱۴ است. آب خالص در این شرایط به یک تعداد مساوی یون هیدروژن و هیدروکسید تجزیه می‌شود. در واقع نقطه خنثی در مقیاس pH در دمای $۲۵^\circ C$ با اندازه pH، ۷ مشخص می‌شود.

در عمل، مقادیر pH در محدوده ۰ تا ۱۴ واقع شده است. الکترولیت‌های اسیدی دارای مقادیر pH پایین‌تر از نقطه خنثی و الکترولیت‌های قلیایی دارای مقادیر pH بالاتر از نقطه خنثی هستند. باید به نقش لگاریتم در توالی اعداد مذکور تأکید شود.

۲- پتانسیل احیا

پتانسیل احیای یک خاک، مبین میزان فعالیت باکتری‌های احیاکننده یون سولفات (SRB) است. این باکتری‌ها در شرایط احیا (پتانسیل احیای کم) رشد کرده و در شرایط اکسید شوندگی (پتانسیل احیای زیاد) عملاً باکتری‌ها هیچ گونه فعالیتی ندارند.

پتانسیل احیای خاک به‌وسیله اندازه‌گیری پتانسیل یک الکترود پلاتین، نسبت به یک الکترود کالومل اشباع یا یک الکترود دیگر اندازه‌گیری می‌شود. هر دو الکترود در خاک قرار می‌گیرند. مقدار pH خاک نیز در محاسبه پتانسیل احیا مورد نیاز است. پتانسیل احیا از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$E_H = E_p + E_r + ۶۰(pH - ۷)$$

که E_H = عبارت از پتانسیل احیا در مقیاس هیدروژن بر حسب mV ، و E_p = عبارت است از پتانسیل احیا (بر حسب mV) نسبت به الکترود مرجع دارای پتانسیل E_v .

برای نسبت الکترود استاندارد هیدروژن (E_v برابر است با ۲۵۰+ میلی‌ولت برای الکترود کالومل)، به جدول (۶) مراجعه شود .

در الکترولیت‌های نزدیک به خنثی، E_H معرف خورندگی آهن و فولاد است. (مطابق جدول ۷).

جدول ۷- خورندگی آهن و فولاد در الکترولیت‌های مختلف

درجه خورندگی	E_H (mv)
شدید	۱۰۰>
متوسط	۲۰۰≤ و ۱۰۰>
کم	۴۰۰≤ و ۱۰۰>
غیر خورنده	۴۰۰>

اگر مقدار pH خارج از محدوده ۸/۵-۵/۵ باشد، پتانسیل احیا، بی معنی است، زیرا باکتری‌های احیا کننده یون سولفات، فقط در این محدوده pH فعال هستند. اندازه‌گیری و تخمین عملی و آزمایشگاهی و نیز نوع و مشخصات حسگرهای[1] مورد استفاده پتانسیل احیا در استانداردهای معتبر[2] شرح داده شده است.

1 - Probes
2 - مثلاً BS1377

منابع و مراجع

1- Cathodic Protection , Part 1. Code of Practice for Land and Marin Applications , BS 7361 , 1991.

In the Name of God
Islamic Republic of Iran
Ministry of Energy
Iran Water Resources Management CO.
Deputy of Research
Office of Standard and Technical Criteria

Guideline for Cathodic Protection of Pipelines and Steel Structures

Feb 2005 Publication No. 217

این نشریه

با عنوان «راهنمای حفاظت کاتدی خطوط لوله و سازه‌های فولادی»، اصول و قواعد مورد استفاده در سه بخش طراحی، نصب، راه‌اندازی و نگهداری سیستم‌های حفاظت کاتدی را بیان نموده و روش‌های مختلف حفاظت کاتدی شامل اعمال جریان و آند فداشونده را نیز مورد بررسی قرار داده است.