فهرست مطالب

عنـــوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	۲
فصل دوم: مطالعات تئوری	
۲ ـ ۱ ـ مقدمه	۴
۲ ـ ۲ ـ خوردگی در خاک	۴
۲ ـ ۲ ـ ۱ ـ مقاومت مخصوص خاک	۵
۲ ـ ۲ ـ ۲ ـ اسیدیته یا PH خاک	۶
۲ ـ ۲ ـ ۳ ـ پتانسیل اکسیداسیون ـ احیاء	۶
۲ ـ ۲ ـ ۴ ـ مقدار رطوبت خاک	۶
۲ ـ ۲ ـ ۵ ـ نمک‌های محلول و ترکیبات نامحلول در خاک	۷
۲ ـ ۳ ـ اصول حفاظت کاتدی	۷
۲ ـ ۳ ـ ۱ ـ جنبهٔ ترمودینامیکی حفاظت کاتدی برمبنای دیاگرام (E - PH)	۸
۲ ـ ۳ ـ ۲ ـ جنبهٔ سینتیکـــــی حفاظت کاتدی برمبنای دیاگرام (E - Log i)	۹
۲ ـ ۴ ـ تاریخچهٔ حفاظت کاتدی	۹
فصل سوم: معرفی پارامترهای طراحی	
۳ ـ ۱ ـ انتخاب معیار حفاظت	۱۱
۳ ـ ۱ ـ ۱ ـ معیار مطلق پتانسیل	۱۱
۳ ـ ۱ ـ ۲ ـ معیار ۱۰۰ میلی‌ولت کاهش در پتانسیل	۱۲
۳ ـ ۱ ـ ۳ ـ معیار تغییر در پتانسیل	۱۳
۳ ـ ۱ ـ ۴ ـ معیار شکست در منحنی (E - Log(i))	۱۳
۳ ـ ۲ ـ باکتری احیاءکنندهٔ سولفات	۱۴
۳ ـ ۲ ـ ۱ ـ مکانیسم‌های تخریب (SRB)	۱۴
۳ ـ ۲ ـ ۲ ـ روش‌های شناسایی (SRB)	۱۴
۳ ـ ۲ ـ ۳ ـ تأثیر (SRB) بر معیار حفاظت کاتدی	۱۵
۳ ـ ۳ ـ افت پتانسیل (IR)	۱۵

عنـــوان	صفحه
۳ ـ ۴ ـ الکترودهای مرجع	۱۶
۳ ـ ۴ ـ ۱ ـ الکترود مرجع Cu / CuSO4	۱۶
۳ ـ ۴ ـ ۲ ـ الکترود مرجع کالومل	۱۷
۳ ـ ۴ ـ ۳ ـ الکترود مرجع کلرورنقره ـ نقره	۱۷
۳ ـ ۴ ـ ۴ ـ الکترود روی خالص	۱۷
۳ ـ ۴ ـ ۵ ـ نکات مهم در اندازه‌گیری پتانسیل سازه نسبت به خاک	۱۷
۳ ـ ۵ ـ مقاومت مخصوص خاک	۱۸
۳ ـ ۵ ـ ۱ ـ روش محاسبهٔ مقاومت مخصوص خاک	۱۸
الف ـ روش آزمایشگاهی	۱۸
ب ـ روش صنعتی و در محل	۱۹
۳ ـ ۵ ـ ۲ ـ نکات مهم اجرایی	۱۹
۳ ـ ۶ ـ سطح مدفون سازه	۲۰
۳ ـ ۷ ـ پوشش لوله‌ها	۲۰
۳ ـ ۷ ـ ۱ ـ انواع پوشش‌های مورد استفاده همراه با سیستم حفاظت کاتدی	۲۲
الف ـ پوشش اپوکسی کولتار	۲۲
ب ـ نوارهای پلاستیکی (پلی‌اتیلن)	۲۲
ج ـ قیر زغال‌سنگی	۲۳
د ـ قیر پایهٔ نفتی	۲۴
ه ـ پوشش اپوکسی پیوندی مذاب	۲۴
و ـ پلی‌اتیلن اکسترودشده	۲۵
۳ ـ ۸ ـ جریان حفاظتی	۲۶
۳ ـ ۹ ـ پشت‌بند	۲۷
۳ ـ ۱۰ ـ بستر آندی عمودی (چاهی)	۲۹
۳ ـ ۱۰ ـ ۱ ـ انواع بسترهای چاهی	۲۹
۳ ـ ۱۱ ـ رکتیفایر	۳۱

فصل چهارم: الگوریتم برنامه

۴ ـ ۱ ـ انتخاب معیار حفاظت	۳۲
۴ ـ ۲ ـ سطح سازه	۳۲
۴ ـ ۳ ـ پوشش لوله‌ها	۳۴
۴ ـ ۴ ـ جریان حفاظتی	۳۵
۴ ـ ۵ ـ انتخاب سیستم حفاظت کاتدی	۳۵

عنـــوان	صفحه
۴ ـ ۶ ـ انتخاب آند	۳۵
۴ ـ ۷ ـ مقاومت بستر آندی	۳۷
۴ ـ ۷ ـ ۱ ـ مقاومت بستر عمودی (مسطح)	۳۷
۴ ـ ۷ ـ ۲ ـ مقاومت بستر عمودی (چاهی)	۳۸
۴ ـ ۷ ـ ۳ ـ مقاومت بستر افقی	۳۹
۴ ـ ۸ ـ مقاومت خط لوله	۴۰
۴ ـ ۹ ـ مقاومت کابل مسی	۴۱
۴ ـ ۱۰ ـ مقاومت پوشش	۴۲
۴ ـ ۱۱ ـ رکتیفایر	۴۳
۴ ـ ۱۲ ـ مقاومت مخصوص خاک	۴۴
۴ ـ ۱۳ ـ وزن پشت‌بند	۴۵
۴ ـ ۱۴ ـ الکترود مرجع	۴۵
۴ ـ ۱۵ ـ طول تحت حفاظت	۴۶
۴ ـ ۱۶ ـ فاصلهٔ بستر آندی تا خط لولهٔ حفاظت شده	۴۶
۴ ـ ۱۷ ـ فاصلهٔ سازهٔ خارجی و بستر آندی	۴۷

فصل پنجم: معرفی برنامه

مقدمه	۴۸
معیار حفاظت	۵۱
سطح سازهٔ مدفون	۵۳
پوشش لوله‌ها	۵۶
جریان حفاظتی	۵۷
سیستم حفاظت کاتدی	۵۸
انتخاب آند (جریان اعمالی)	۶۰
انتخاب آند فداشونده	۶۲
انتخاب نوع بستر آندی	۶۳
بستر آندی عمودی (مسطح)	۶۵
بستر آندی عمودی (چاهی)	۶۸
بستر آندی افقی	۷۱
مقاومت خط لوله	۷۳
مقاومت کابل مسی	۷۴
مقاومت پوششی	۷۵

عنـــوان	صفحه
مقاومت مدار	۷۶
انتخاب رکتیفایر	۷۷
رکتیفایر (انتخاب توسط کاربر)	۷۹
رکتیفایر (انتخاب توسط برنامه)	۸۱
مقاومت مخصوص خاک	۸۳
الکترودهای مرجع	۸۴
تبدیلات طول	۸۵
وزن پشت‌بند	۸۷
فصل ششم : جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	
۶ ـ ۱ ـ مقدمه	۹۱
پیوست ۱ ـ مدل‌سازی عددی برای حفاظت کاتدی لوله‌های مدفون	۹۷
پیوست ۲ ـ برنامهٔ کامپیوتری نرم‌افزار	۱۰۲
منابع	۱۹۰
چکیدهٔ انگلیسی	۱۹۲

فهرست جداول

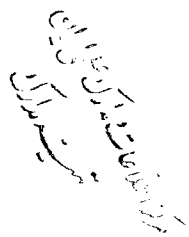
عنوان	صفحه
جدول ۲ ـ ۱ ـ ارتباط خورندگی خاک با مقاومت مخصوص آن	۵
جدول ۲ ـ ۲ ـ حداقل و حداکثر برخی از پارامترهای مشخصهٔ خاک	۶
جدول ۲ ـ ۳ ـ ارتباط خورندگی خاک با پتانسیل اکسیداسیون ـ احیاء	۶
جدول ۳ ـ ۱ ـ مشخصات انواع الکترودهای مرجع کالومل	۱۷
جدول ۳ ـ ۲ ـ خصوصیات انواع پوشش‌های همراه با سیستم حفاظت کاتدی	۲۶
جدول ۳ ـ ۳ ـ دانسیتهٔ جریان حفاظتی برحسب طول‌عمر طراحی و نوع پوشش براساس استاندارد (IPS)	۲۶
جدول ۳ ـ ۴ ـ دانسیتهٔ جریان حفاظتی برحسب کیفیت پوشش	۲۷
جدول ۳ ـ ۵ ـ دانسیتهٔ جریان حفاظتی برای حفاظت فولاد لخت براساس شرایط خاک	۲۷
جدول ۳ ـ ۶ ـ پشت‌بند مورد استفاده در سیستم جریان اعمالی	۲۸
جدول ۳ ـ ۷ ـ پشت‌بند مورد استفاده در سیستم آند فداشونده	۲۸
جدول ۴ ـ ۱ ـ حداقل پتانسیل حفاظتی برحسب شرایط محیطی	۳۲
جدول ۴ ـ ۲ ـ مشخصات استاندارد لوله	۳۳
جدول ۴ ـ ۳ ـ حداکثر پتانسیل قابل‌تحمل برحسب نوع پوشش	۳۴
جدول ۴ ـ ۴ ـ چگالی جریان حفاظتی برحسب مقاومت مخصوص خاک و وضعیت پوشش لوله	۳۵
جدول ۴ ـ ۵ ـ نوع سیستم حفاظتی برحسب طول‌عمر طراحی و مقاومت مخصوص خاک	۳۵
جدول ۴ ـ ۶ ـ انتخاب آند فداشونده برحسب مقاومت مخصوص خاک	۳۶
جدول ۴ ـ ۷ ـ مشخصات انواع آندهای فداشونده	۳۶
جدول ۴ ـ ۸ ـ مقاومت واحد طول لوله برحسب اندازهٔ استاندارد آن	۴۰
جدول ۴ ـ ۹ ـ مقاومت واحد طول کابل برحسب اندازهٔ استاندارد آن	۴۱
جدول ۴ ـ ۱۰ ـ مقاومت واحد سطح پوشش برحسب نوع آن	۴۲
جدول ۴ ـ ۱۱ ـ مقاومت واحد سطح لوله برحسب کیفیت پوشش و مقاومت مخصوص خاک	۴۲
جدول ۴ ـ ۱۲ ـ تبدیل الکترودهای مرجع مختلف به Cu / CuSO4	۴۵

فهرست نمودارها

عنوان	صفحه
نمودار ۲ ـ ۱ ـ دیاگرام E - PH مربوط به آهن	۸
نمودار ۲ ـ ۲ ـ دیاگرام E - Logi ، اثر پلاریزاسیون کاتدی بر جریان خوردگی	۹
نمودار ۳ ـ ۱ ـ روش به‌دست آوردن پتانسیل اضافی با استفاده از برون‌یابی	۱۶

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۲ ـ ۱ ـ حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده	۷
شکل ۲ ـ ۲ ـ حفاظت کاتدی به روش جریان اعمالی	۸
شکل ۳ ـ ۱ ـ قسمت‌های مختلف الکترود مرجع (CSE)	۱۶
شکل ۳ ـ ۲ ـ جعبهٔ خاک جهت اندازه‌گیری مقاومت مخصوص خاک به روش آزمایشگاهی	۱۸
شکل ۳ ـ ۳ ـ روش ونر در اندازه‌گیری مقاومت مخصوص خاک	۱۹
شکل ۳ ـ ۴ ـ نحوهٔ اعمال پوشش پلی‌اتیلن بر روی لوله	۲۳
شکل ۳ ـ ۵ ـ بستر چاهی به‌صورت غلاف لوله‌ای‌همراه با آند و پشت‌بند	۳۰
شکل ۳ ـ ۶ ـ بستر چاهی خشک با لولهٔ تکیه‌گاه	۳۰
شکل ۴ ـ ۱ ـ مشخصات لولهٔ مدفون در خاک	۳۳
شکل ۴ ـ ۲ ـ مشخصات مخزن روزمینی	۳۳
شکل ۴ ـ ۳ ـ مشخصات مخزن زیرزمینی	۳۴
شکل ۴ ـ ۴ ـ بستر آندی عمودی (مسطح)	۳۷
شکل ۴ ـ ۵ ـ بستر آندی عمودی (چاهی)	۳۸
شکل ۴ ـ ۶ ـ بستر آندی افقی	۳۹
شکل ۴ ـ ۷ ـ نحوهٔ محاسبهٔ مقاومت مخصوص لایه‌های مختلف خاک	۴۴



چکیده :

طراحی سیستم حفاظت کاتدی مستلزم استفاده از روابط متعدد، جداول، استانداردها و تجربه می‌باشد که عموماً زمان‌بر بوده و دقت فراوانی را می‌طلبد. از دهۀ هشتاد میلادی، تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با استفاده از کامپیوتر و شبیه‌سازی عددی در طراحی سیستم حفاظت کاتدی آغاز گردیده که همچنان ادامه دارد. به‌همین‌منظور در این پروژه سعی گردیده تا نرم‌افزاری جامع، جهت طراحی سیستم حفاظت کاتدی تهیه گردد.

نرم‌افزار حاضر، پس از دریافت اطلاعات ورودی ــ که در تمامی مراحل با راهنمایی کامل کاربر همراه می‌باشد ــ با توجه به روابط، جداول و بانک‌های اطلاعاتی موجود در برنامه، طراحی سیستم را به‌طور دقیق و با سرعت به انجام می‌رساند. طراحی شامل محاسبۀ سطح سازه، جریان حفاظتی، انتخاب پوشش، نوع سیستم حفاظتی، ابعاد و جنس آند، نوع، تعداد و نحوۀ آرایش بستر آندی، محاسبۀ مقاومت مدار (شامل مقاومت سازه، کابل، پوشش و بستر آندی) انتخاب رکتیفایر و دیگر موارد می‌باشد. کاربر این امکان را دارد که طراحی را با هر سه نوع بستر آندی (عمودی، افقی و چاهی) انجام دهد. همچنین در مواردی مانند انتخاب رکتیفایر سعی شده از سیستم هوشمند در طراحی استفاده گردد. برنامه، دارای بانک‌های اطلاعاتی متنوعی می‌باشد که همگی قابلیت افزودن اطلاعات جدید را دارند. نرم‌افزار فوق به زبان برنامه‌نویسی (Inprise Borland Delphi 5.0) و تحت Windows نوشته شده است.

فصل اول
مقدمه

حفاظت کاتدی به‌عنوان مؤثرترین روش حفاظتی به‌منظور جلوگیری از خوردگی سازه‌های مدفون در خاک شناخته شده است که به‌طور گسترده‌ای در حفاظت از خوردگی لوله‌های توزیع و انتقال گاز، مواد نفتی و آب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ایدهٔ اولیهٔ حفاظت کاتدی، در اوایل قرن نوزدهم میلادی به‌وسیلهٔ سرهمفری دیوی[1]، با حفاظت مس توسط اتصال آن به آهن و روی، داده شد اما استفادهٔ فنی و صنعتی آن سالها به‌طول انجامید و از اوایل قرن بیستم میلادی اولین کاربردهای صنعتی حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، در انگلستان آغاز گردید.

طراحی سیستم حفاظت کاتدی سازهٔ مدفون در خاک، از جمع آوری و دسته‌بندی اطلاعات مختلفی نظیر: اطلاعات مربوط به سازه (از قبیل: جنس سازه، نوع پوشش، شکل فیزیکی و ابعاد و سطح سازه و ...) و اطلاعات مربوط به خاک (از قبیل: مقاومت مخصوص، حضور باکتری SRB ، دما، PH و ...) آغاز می‌گردد. سپس توسط روابط ریاضی، جداول استاندارد و تجربیات قبلی به محاسبهٔ پارامترهای طراحی پرداخته می‌شود.

1-- Sir Humphry Davy

به‌دلیل حجم زیاد محاسبات و لزوم دقت بالا در طراحی، استفاده از کامپیوتر و محاسبات و شبیه‌سازی‌های عددی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. خصوصاً در رابطه با طراحی بستر آندی، شرکت‌های بزرگ سازندهٔ مواد و تجهیزات حفاظت کاتدی، برنامه‌های کامپیوتری ساده‌ای را براساس محصولاتشان به خریداران و کاربران ارایه می‌نمایند.

با توجه به اینکه درکشور ما، شبکه‌های وسیع لوله‌های زیرزمینی شامل لوله‌های انتقال و توزیع گاز، مواد نفتی و آب موجود می‌باشد و این شبکه‌ها همچنان نیز درحال گسترش می‌باشند، وجود نرم‌افزاری کامپیوتری به‌منظور طراحی دقیق و سریع سیستم حفاظت کاتدی احساس می‌شود.

در شهر تهران به تنهایی بیش از پنج‌هزار کیلومتر خطوط لولهٔ گاز موجود می‌باشد که توسط سیستم حفاظت کاتدی، محافظت می‌گردد و نزدیک به ده‌هزار کیلومتر هم خطوط توزیع آب آشامیدنی وجود دارد که متأسفانه مورد حفاظت قرار نمی‌گیرد و طبق آمار منتشره توسط وزارت نیرو، ۳۰٪ آب شرب در تهران و نقاط مختلف کشور به‌دلیل فرسودگی و خوردگی لوله‌ها، تلف می‌شود و نرم‌افزار فوق که به سفارش وزارت نیرو تهیه گردیده، می‌تواند در طراحی سیستم حفاظتی فوق به‌کار برده شود.

تئوری حفاظت کاتدی و خوردگی در خاک و تاریخچهٔ حفاظت کاتدی و معرفی نرم‌افزارهای موجود در جهان در فصل دوم آورده شده است.

معرفی پارامترهای مختلف طراحی مورد استفاده در نرم‌افزار ــ که به‌عنوان دستورالعمل برنامه نیز می‌باشد ــ در فصل سوم آمده است.

الگوریتم برنامه، شامل فرمول‌ها، روابط و جداول مورد استفاده در برنامه در فصل چهار آمده‌اند.

در ادامه، صفحات اصلی برنامه به‌همراه دستورالعمل استفاده از آنها آورده شده است.

اجرای کاملی از برنامه همراه با مقایسه نسبت به کارهای عملی، در فصل نتایج آمده است.

استفاده از شبیه‌سازی عددی توسط روش‌های FEM و BEM نیز در سال‌های اخیر، به‌منظور محاسبهٔ توزیع پتانسیل و جریان در خاک و لوله مورد توجه بوده است و توسط این روش‌ها، سعی می‌گردد تا کارایی سیستم حفاظت کاتدی را قبل از اجراء مشخص نمایند، در پیوست (۱)، به این مطلب نیز پرداخته شده است.

برنامهٔ کامل کامپیوتری به زبان Delphi در پیوست (۲)، آمده است.

فصل دوم
مطالعات تئوری

۲ـ۱ـ مقدمه

خوردگی لوله‌های مدفون در خاک، به‌دلیل ماهیت خورندهٔ برخی از خاک‌ها، درصورت عدم حفاظت، به‌طور چشمگیری باعث فرسودگی و نشت و در ادامه، شکست لوله‌ها می‌گردد.

گستردگی لوله‌های زیرزمینی در سراسر دنیا (به‌عنوان مثال تنها در امریکا دو میلیون کیلومتر لولهٔ گاز زیرزمینی و ۲۸۰ هزار کیلومتر لوله‌های نفتی و در کانادا ۵۸۰ هزار کیلومتر لولهٔ زیرزمینی موجود می‌باشد [۱]) و خطرات نشت لوله‌ها (چه از لحاظ مسائل جانی و چه از بعد فنی و اقتصادی)، لزوم حفاظت از آنها را مسجل می‌نماید.

در این فصل به خوردگی در خاک، اصول حفاظت کاتدی و تاریخچهٔ آن پرداخته می‌شود.

۲ـ۲ـ خوردگی در خاک

فاکتورهای مؤثر در خورندگی خاک عبارتند از:[۲]

- مقاومت مخصوص خاک[1]؛
- فعالیت باکتری‌هایی نظیر (SRB)؛
- میزان نمک‌های محلول؛
- میزان اکسیژن؛
- میزان رطوبت؛
- اسیدیته یا PH خاک؛
- وجود جریان‌های سرگردان؛

1- Soil Resistivity

۲ ـ ۲ ـ ۱ ـ مقاومت مخصوص خاک

به‌عنوان آسانترین روش جهت تخمین خورندگی خاک، می‌توان به مقدار مقاومت مخصوص خاک مراجعه نمود. باکاهش مقاومت مخصوص یا افزایش رسانایی خاک، خورندگی آن افزایش می‌یابد.

جدول ۲ ـ ۱ ـ ارتباط خورندگی خاک با مقاومت مخصوص آن [۱]

خورندگی خاک	مقاومت مخصوص خاک (ohm - cm)
به‌شدت خورنده	< 500
خیلی خورنده	500 - 1000
خورنده	1000 - 2500
خورندگی متوسط	2500 - 7500
غیرخورنده	> 10000

زمانی که خط لوله‌ای، خاک‌هایی با مقاومت مخصوص متفاوت را طی کند، پیل‌های خوردگی روی سطح ایجاد می‌گردد. مقاطعی از لوله که در تماس با خاک با مقاومت مخصوص کم می‌باشد، نسبت به نواحی در تماس با خاک با مقاومت مخصوص بیشتر، آندی می‌گردند. [اما مسئلهٔ مهم، بزرگی تغییرات و یا محدودهٔ مقاومت مخصوص خاک بوده که اثر بیشتری نسبت به مقدار مطلق آن دارد.]

به‌عنوان مثال، میزان خوردگی یک خط لوله که در یک محیط با محدودهٔ مقاومت مخصوص ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ اهم ـ سانتیمتر قرار دارد، اصولاً بزرگتر از خط لولهٔ مشابهی می‌باشد که در محیط خاکی دیگری با محدودهٔ مقاومت مخصوص بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ اهم ـ سانتیمتر قرار دارد، هر چند که حداقل مقاومت مخصوص در محیط دوم است. محدودهٔ بزرگتر مقاومت مخصوص، نیروی محرکهٔ بزرگتری بین سطوح آندی و کاتدی در طول لوله برقرار می‌کند. [۳]

عوامل مؤثر بر مقاومت مخصوص خاک عبارتند از: [۲]

رطوبت: افزایش رطوبت باعث کاهش مقاومت مخصوص خاک می‌گردد.

تخلخل: افزایش تخلخل تا میزان ۳۰٪ باعث کاهش قابل توجهی در مقاومت ویژهٔ خاک می‌گردد و پس از آن با سرعت کمتری آن راکاهش می‌دهد.

نمک‌های محلول: وجود نمک‌های محلول در آب‌های جذب شده در خاک، باعث کاهش مقاومت مخصوص خاک می‌گردد و از میان نمک‌ها، یون کلرید نقش بیشتری درکاهش مقاومت مخصوص خاک دارد.

دما: افزایش دما، باعث کاهش مقاومت مخصوص خاک می‌گردد.

۲ ـ ۲ ـ ۲ ـ اسیدیته یا PH خاک

در محدودهٔ ۴ — ۰ = PH، خاک به‌خوبی نقش الکترولیت را دارد و در ۷/۵ — ۶/۵ = PH شرایط خاک جهت احیاء سولفات مناسب است و در ۱۴ — ۸/۵ = PH، خاک دارای نمک‌های حل‌شده است و مقاومت مخصوص پایینی دارد. [۲]

جدول ۲ ـ ۲ ـ حداقل و حداکثر برخی از پارامترهای مشخصهٔ خاک [۲]

خاصیت	واحد	حداکثر	حداقل
مقاومت مخصوص خاک	ohm - cm	54400	32
میزان رطوبت	%	75.5	2.3
دانسیته	g / cm^3	2.1	1.4
PH	--	10.2	2.6

۲ ـ ۲ ـ ۳ ـ پتانسیل اکسیداسیون ـ احیاء

تلاش در جهت اندازه‌گیری پتانسیل اکسیداسیون ـ احیاء، چون باعث مشخص شدن شرایط خاکی می‌شود که ممکن است در آن باکتری‌های غیرهوازی، نظیر باکتری احیاءکننده سولفات فعال شود، از اهمیت خاصی برخوردار است. ارتباط بین پتانسیل اکسیداسیون ـ احیاء و میزان خورندگی خاک، در جدول (۲ ـ ۳) آمده است.

جدول ۲ ـ ۳ ـ ارتباط خورندگی خاک با پتانسیل اکسیداسیون ـ احیاء [۱]

خورندگی خاک	پتانسیل اکسیداسیون ـ احیاء (mV)
خورنده	< 100
خورندگی متوسط	100 - 200
خورندگی کم	200 - 400
غیرخورنده	> 400

۲ ـ ۲ ـ ۴ ـ مقدار رطوبت خاک

مقدار رطوبتی که خاک می‌تواند در خود نگهدارد بستگی به خواص فیزیکی خاک دارد. واضح است که توزیع اندازهٔ ذرات خاک از عوامل مهم در خوردگی می‌باشد چراکه این عامل، ارتباط مستقیم با میزان رطوبت و هوادارشدن خاک دارد. در خاک‌هایی که بافت آنها مانند ماسه‌ها و شن‌ها، خشن است گردش آزاد هوا فراهم بوده و خوردگی، همانند اتمسفر خواهد بود.

خاک‌ها در خلال خشک‌شدن، منقبض و ترکدار شده و هنگام خیس‌شدن مجدداً متورم می‌شوند. تنش‌های ایجاد شده توسط تورم یا انقباض خاک، در فصول بارانی و خشک باعث حرکت نسبی خاک نسبت به سطح فلز مدفون شده می‌گردد که می‌تواند روی پوشش سطح فلز، خسارت ایجاد کرده و درنتیجه خوردگی را تشدید نماید.

۲ ـ ۲ ـ ۵ ـ نمک‌های محلول و ترکیبات نامحلول در خاک

تعداد بسیاری از عناصر شیمیایی در خاک‌ها وجود دارد اما اغلب به‌صورت ترکیبات نامحلول بوده و در نتیجه اثر مستقیم شیمیایی بر روی خوردگی ندارند.

به‌هرحال اکثر خاک‌های خورنده، آنهایی هستند که حاوی مقادیر زیادی از نمک‌های قابل حل باشند. به‌علت حضور نمک‌ها، چنین خاک‌هایی دارای رسانایی الکتریکی نسبتاً بالایی هستند.

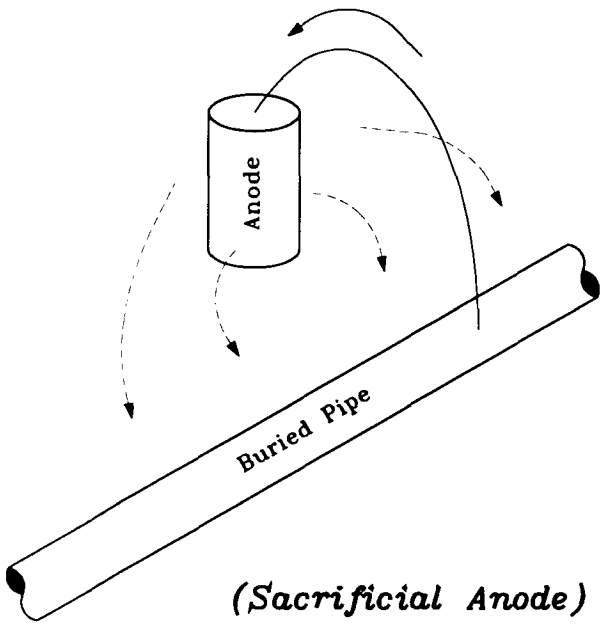
۲ ـ ۳ ـ اصول حفاظت کاتدی

حفاظت کاتدی، تکنیکی الکتروشیمیایی جهت حفاظت از خوردگی بوده که اساس آن، ارسال جریان به فصل مشترک فلز / الکترولیت و کاهش واکنش انحلال آندی فلز می‌باشد.

به دو روش می‌توان این عمل را انجام داد:

الف ـ روش آند فداشونده[1]:

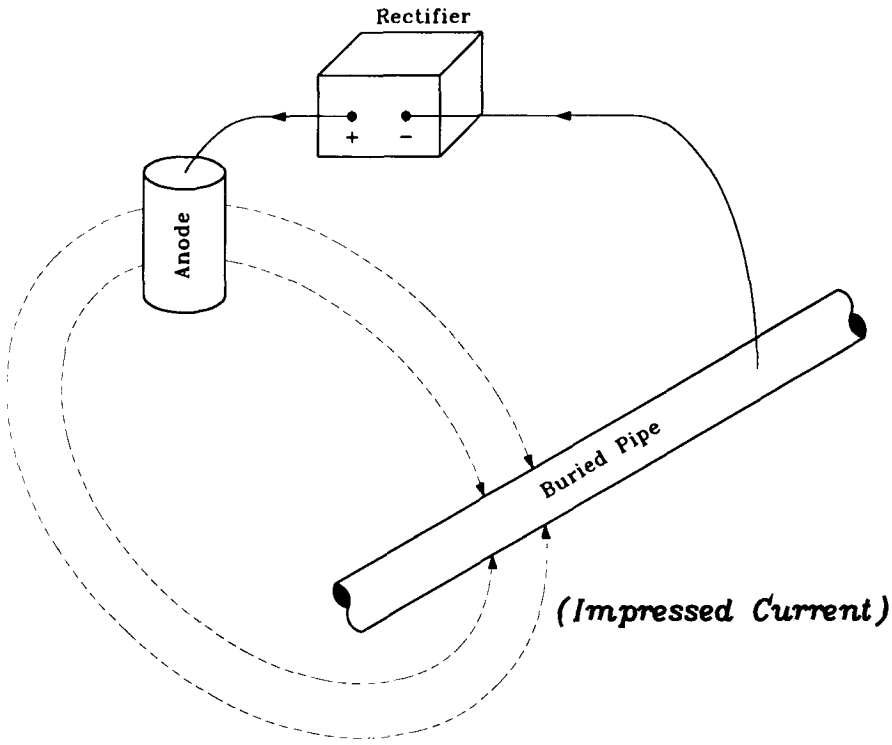
با اتصال فلز مورد نظر به فلزاتی فعال‌تر که در الکترولیت (خاک) مورد نظر قرار گرفته‌اند، یک پیل گالوانیکی تشکیل می‌شود که در آن فلز فعال، نقش آند را داشته و باعث جاری‌شدن جریان الکترونی از الکترولیت به فلز مورد نظر می‌گردد.



شکل ۲ ـ ۱ ـ حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده

1-- Sacrificial Anode

ب ـ روش جریان اعمالی[1]: در این روش، ارسال جریان، بین یک آند کمکی و فلز مورد نظر می‌باشد و فلز، الکترون اضافی دریافت نموده و حفاظت می‌گردد. منبع تولیدکنندهٔ جریان مستقیم، یک رکتیفایر است.



شکل ۲ ـ ۲ ـ حفاظت کاتدی به روش جریان اعمالی

۲ ـ ۳ ـ ۱ ـ جنبهٔ ترمودینامیکی حفاظت کاتدی برمبنای دیاگرام (E - PH)

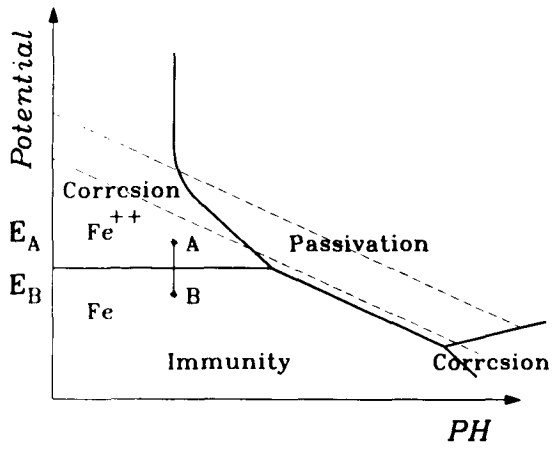
با توجه به دیاگرام E - PH مربوط به آهن، ملاحظه می‌گردد که ابتدا، پتانسیل خوردگی در نقطهٔ A می‌باشد و واکنش‌های زیر را داریم:

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

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

تماس الکتریکی سازه‌های آهنی با روی یا با قطب منفی یک یکسوکنندهٔ DC، باعث ایجاد جریان الکتریکی و درنهایت انجام صرفاً واکنش کاتدی در فصل مشترک فلز ـ الکترولیت می‌گردد.

نتیجهٔ این عمل پلاریزاسیون کاتدی $\mathcal{E}_c$ یا تغییر در پتانسیل الکترود از A به B می‌باشد.



نمودار ۲ ـ ۱ ـ دیاگرام E - PH مربوط به آهن [۴]

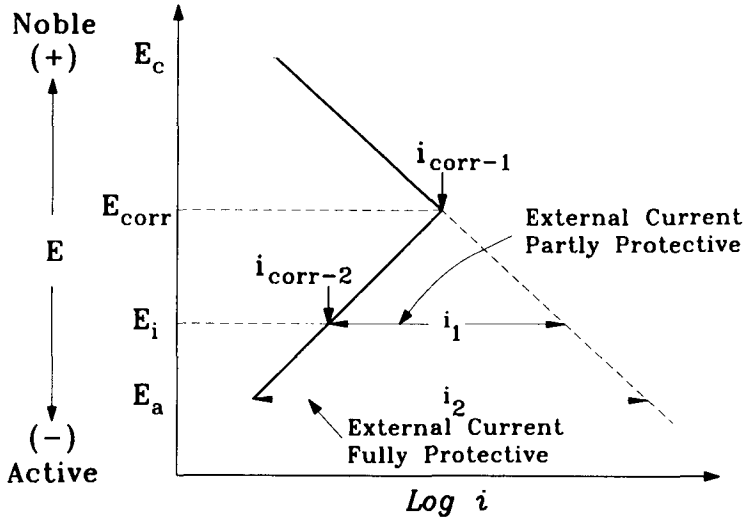
1-- Impressed Current

در دانسیتهٔ جریان‌های نسبتاً بالا، پتانسیل الکترود به مقدار E_B در ناحیهٔ مصونیت آهن می‌رسد که آهن خورده نمی‌شود لیکن تصاعد هیدروژن بر روی آهن افزایش یافته که می‌تواند باعث تردی و مصرف انرژی اضافی گردد.

دیاگرام E - PH ایدهٔ اولیه‌ای از حفاظت کاتدی ارایه می‌دهد و ابزاری ترمودینامیکی است. حفاظت کاتدی نیز بیشتر جنبهٔ ترمودینامیکی دارد زیرا به‌جای ایجاد یک لایهٔ محافظ که به‌عنوان سد عمل نماید، شرایطی را به‌وجود می‌آورد که یون‌های فلزی پایداری خود را از دست داده و حالت فلزی سیستم، موقعیت پایدار آن می‌گردد.

۲ ـ ۳ ـ ۲ ـ جنبهٔ سینتیکی حفاظت کاتدی برمبنای دیاگرام (E - Log i)

هنگام خوردگی، پتانسیل خوردگی فلز E_{Corr} بوده و فلز با سرعتی معادل i_{Corr-1} خورده می‌شود. اگر پتانسیل فلز از E_{Corr} به E_i توسط اعمال جریان خارجی i_1 کاهش یابد، درآن‌صورت فلز به‌صورت جزیی حفاظت می‌شود، زیرا جریان خوردگی از i_{Corr-1} به i_{Corr-2} کاهش می‌یابد. اگر پتانسیل فلز به E_a (پتانسیل مدار باز) از طریق اعمال جریان خارجی i_2 کاهش یابد، درآن‌صورت فلز به‌طورکامل حفاظت می‌گردد و دراین‌حالت جریان خوردگی به صفر کاهش می‌یابد. لذا فلز جهت حفاظت کامل باید تا پتانسیل E_a پلاریزه شود. درعمل E_a تابعی از ماهیت، ترکیب، PH و دمای محیط است.



نمودار ۲ ـ ۲ ـ دیاگرام E - Logi، اثر پلاریزاسیون کاتدی بر جریان خوردگی [۴]

۲ ـ ۴ ـ تاریخچهٔ حفاظت کاتدی

سرهمفری دیوی در سال ۱۸۲۴ میلادی اعلام کرد که حفاظت مس در آب نمک با اتصال آن به فلزاتی نظیر آهن و روی امکان‌پذیر می‌باشد. لذا اولین پیشنهاد حفاظت کاتدی کشتی‌ها (ناوهای جنگی انگلیس) با بدنهٔ پوشش داده شده از مس، به‌وسیلهٔ نامبرده ارایه گردید. (اما جلوگیری از خوردگی مس باعث تجمع موجودات ریز

دریایی شد که موجب تقلیل سرعت حرکت کشتی گردید، زیرا تراکم یون‌های مس باعث مسمومیت موجودات ریز دریایی می‌گردد، لذا استفاده از این روش متوقف شد). بعدها ادموند دیوی[۱] با به کارگیری قطعات فلزی روی موفق به حفاظت قسمت‌های آهنی راهنمای شناور کشتی گردید. متعاقباً در سال ۱۸۴۰ رابرت مالت[۲] موفق به تهیهٔ آلیاژی از فلز روی شد که آند فداشونده مناسبی بود. [۱ و ۵]

در حدود سال‌های ۱۹۱۲ ـ ۱۹۱۰ اولین کاربرد حفاظت کاتدی به توسط روش اعمال جریان در انگلستان و امریکا آغاز گردید و در همین زمان، اولین سیستم حفاظت کاتدی بتن مسلح در اتوبان‌ها اجراء شد. [۵]

در دو دههٔ اخیر با گسترش کاربرد کامپیوتر در علوم مهندسی، پاره‌ای از تحقیقات به سمت استفاده از کامپیوتر در زمینهٔ طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدی متمایل شده است. این تحقیقات عموماً بر جنبه‌های خاصی از حفاظت کاتدی از قبیل شبیه‌سازی توزیع جریان و پتانسیل در سازه‌های تحت حفاظت متمرکز می‌باشند که توسط روش‌های حل عددی BEM و FEM انجام می‌گیرد. در این رابطه می‌توان به نرم‌افزارهای ارایه شده توسط شرکت BEASY و شرکت ELSYCA با عنوان CatPro اشاره نمود.

در رابطه با نرم‌افزارهای کاربردی در طراحی سیستم کاتدی، شرکت‌های بزرگ تولیدکنندهٔ تجهیزات حفاظتی، نظیر (LIDA، MESA و LORESCO)، نرم‌افزارهایی را برای طراحی (عمدتاً مربوط به بستر آندی) براساس محصولات خود ارایه نموده‌اند که جنبهٔ عمومی نداشته و صرفاً، خریداران محصولاتشان قادر به استفاده از آن می‌باشند.

کارهای دانشگاهی متعددی هم در رابطه با استفاده از کامپیوتر در طراحی سیستم‌های فوق در سال‌های اخیر صورت گرفته که عموماً به طراحی قسمتی از سیستم حفاظت کاتدی پرداخته‌اند و اکثراً مربوط به سازه‌های دریایی می‌باشند. [۶ و ۷ و ۸]

1-- Edmund Davy

2-- Robert Mallet

فصل سوم
معرفی پارامترهای طراحی

۳ ـ ۱ ـ انتخاب معیار حفاظت[1]

جهت طراحی اولیه و کنترل کارآیی سیستم حفاظت کاتدی، از روش‌های غیرمستقیم به‌عنوان معیارهای حفاظتی استفاده می‌شود تا عملکرد حفاظت کاتدی در جلوگیری و کاهش خوردگی سازه پیش‌بینی گردد. معیارهای حفاظت کاتدی عموماً بر پایهٔ اندازه‌گیری پتانسیل سازه نسبت به الکترولیت (خاک) استوار می‌باشند و با توجه به روش‌ها و معیارهای مختلف، به تفسیر پتانسیل اندازه‌گیری شده، پرداخته می‌شود.

آنچه مسلم است انتخاب معیار حفاظتی و تحلیل و تفسیر داده‌ها، باید با توجه به شرایط خاص هر منطقه و مسائل اقتصادی و فنی صورت گیرد.

۳ ـ ۱ ـ ۱ ـ معیار مطلق پتانسیل

با عبور جریان از سازه، پتانسیل آن نسبت به خاک در جهت منفی تغییر پیدا می‌کند. پتانسیل جدیدی راکه لوله بعد از اعمال جریان حفاظتی اختیار خواهد کرد را به‌عنوان معیار حفاظت کاتدی محسوب می‌نمایند.

در عمل، پلاریزاسیون سازه تا رسیدن به پتانسیل مدار باز آن، غیرعملی می‌باشد زیرا پتانسیل مدار باز سازه عدد ثابتی نیست و به محیط بستگی دارد و به سادگی از طریق محاسبات ترمودینامیکی یا به‌طریق تجربی قابل

1--Select of Protection Criteria

تعیین نمی‌باشد و همچنین سرعت خوردگی در پتانسیل‌های نزدیک به آن، بسیار کم بوده (حداکثر خوردگی قابل قبول در سازه، 0.1 mm/year می‌باشد) و جوابگوی اکثر کاربردها می‌باشد، ضمن آنکه رسیدن به پتانسیل مدار باز سازه، هزینه‌های زیادی دربر دارد که اقتصادی نمی‌باشد.

در سال ۱۹۳۳ میلادی، کوهن[1] براساس آزمایشات عملی، پتانسیل (۰/۸۵ −) ولت نسبت به الکترود مرجع $Cu / CuSO_4$ (CSE) را به‌عنوان معیار حفاظتی برای آهن، پیشنهاد نمود. [۴]

بیان استاندارد NACE در خصوص معیار مطلق پتانسیل: [۱۶]

"جهت حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی در خاک، حداقل ولتاژ (۰/۸۵ −) ولت باید بین سازه و الکترود مرجع (CSE) که در تماس با الکترولیت (خاک) است، وجود داشته باشد."

بیان استاندارد BS در خصوص معیار مطلق پتانسیل:

"به‌منظور حفاظت کاتدی، باید پتانسیل سازه / خاک برابر یا منفی‌تر از (۰/۸۵ −) ولت نسبت به (CSE) در محیط هوازی باشد."

این معیار، متغیر بوده و بسته به شرایطی چون تغییر دما، حضور باکتری‌ها و تغییر PH و پارامترهای فنی و اقتصادی، تغییر می‌کند.

حداقل پتانسیل لازم برای حفاظت برحسب ولت نسبت به الکترود مرجع (CSE) در معیار مطلق پتانسیل برای پاره‌ای از فلزات و آلیاژها عبارتند از: [۱۰]

سرب	۰/۶۵ −	مس و آلیاژهای مس ـ نیکل	۰/۲ −
آلومینیم در خاک	۰/۹۵ −	فولاد در تماس بتن	۰/۷۵ −
فولاد گالوانیزه	۱/۲ −		

۳ ـ ۱ ـ ۲ ـ معیار ۱۰۰ میلی‌ولت کاهش در پتانسیل

روش کار در این معیار بدین‌صورت است که پس از قطع جریان DC از یکسوکننده، میزان پتانسیل سازه اندازه گرفته می‌شود (E_{off})، سپس حدود چهار ساعت بعد از مرحلهٔ پلاریزاسیون[2]، سیستم، در حالت قطع باقیمانده و مجدداً پتانسیل اندازه گرفته می‌شود(E_R). جهت برقرار بودن حفاظت مناسب، این دو مقدار می‌بایست ۱۰۰ میلی‌ولت و یا بیشتر اختلاف داشته باشند. [۱]

$$(E_{off} - E_R \leq -0.1\ V) \qquad (۱ ـ ۳)$$

این روش را می‌توان در مورد سیستم‌هایی که در حال کار هستند، به‌کار برد. این معیار پراستفاده‌ترین معیار حفاظت کاتدی برای بتن مسلح می‌باشد اما به تجهیزات خاص و گرانی برای اندازه‌گیری نیاز دارد. در ضمن معمولاً این معیار برای خطوط لولهٔ بدون پوشش به‌کار می‌رود. [۱]

1-- B.J.Kuhn

2-- After Step Polarization

۳ـ۱ـ۳ـ معیار تغییر در پتانسیل

این معیار بر پایهٔ تحقیقات هانسمن[۱] استوار است. در این معیار عقیده بر این است که جریان اعمالی جهت حفاظت کاتدی زمانی کافی می‌باشد که بر اثر آن پتانسیل فلز حداقل ۳۰۰ میلی‌ولت در جهت منفی شیفت پیدا کند. به تعبیر دیگر اختلاف پتانسیل سازه در حالت عبور جریان اعمالی (E_{on}) نسبت به پتانسیل آن در حالت مدار باز (E_R) برابر یا بیشتر از ۳۰۰ میلی‌ولت باشد.

$$(E_{on} - E_R \leq -0.3\ V) \qquad (۲ـ۳)$$

پتانسیل مدار باز سازه‌های فولادی در خاک نسبت به (CSE) بین (۰/۷ ـ ۰/۵) می‌باشد.

در این معیار، کل سازه ۳۰۰ میلی‌ولت تغییر پتانسیل می‌دهد و به‌عبارت دیگر، مقاطعی که قبلاً پتانسیل‌های منفی‌تری از بقیهٔ مناطق داشته‌اند دچار حفاظت بیش‌ازحد[۲] می‌گردند.

در اینجا E_{on} و E_R بدون درنظرگرفتن افت پتانسیل و فیلم پوشش سطحی سازه می‌باشند اما چون درصورت وجود پوشش، مقدار E_{on} و E_R به‌طور یکسانی تغییر می‌کنند، درنتیجهٔ حاصله، تفاوتی ایجاد نمی‌شود. [۱] از معایب این روش درنظرگرفته نشدن افت اهمی (IR) می‌باشد.

۳ـ۱ـ۴ـ معیار شکست در منحنی (E - Log(i))

منحنی‌های (E - Log(i)) معمولاً از دو قسمت خطی و منحنی تشکیل شده‌اند. براساس این معیار، نقطهٔ شکست یعنی نقطه‌ای که رفتار خطی تبدیل به منحنی می‌گردد، نشان‌دهندهٔ جریان لازم برای حفاظت می‌باشد. (به عبارت دیگر، حداقل پتانسیل منفی که در آن رفتار فلز در منطقهٔ تافل قرار می‌گیرد، معیار پتانسیل حفاظتی می‌باشد.) [۴]

این معیار را نمی‌توان برای یک سیستم در حال سرویس، به‌کار برد و تنها پیش از مرحلهٔ نصب مفید است. درضمن به‌دست آوردن یک ناحیهٔ تافل کاملاً خطی و مشخص شده در منحنی پلاریزاسیون کار مشکلی است.

1-- Hunsman

2-- Over Protection

۳ ـ ۲ ـ باکتری احیاءکنندهٔ سولفات[1]

مهمترین باکتری مؤثر بر خوردگی لوله‌های مدفون در خاک، (SRB) می‌باشدکه مطابق واکنش زیر، سولفات را به سولفید احیاء می‌کند:

$$SO_4^{-2} + 4H_2 \rightarrow S^{-2} + 4H_2O$$

و درصورت وجود یون آهن مناسب در محیط، ترکیب بیولوژیک سولفیدآهن (FeS) سیاه رنگ نتیجه می‌شود.

۳ ـ ۲ ـ ۱ ـ مکانیسم‌های تخریب (SRB)

- تخریب لایه‌های سطحی محافظ سطح فلز؛
- تأثیر مستقیم بر واکنش‌های آندی و کاتدی از طریق ایجاد مزاحمت برای واکنش‌های کاتدی (خصوصاً واکنش آزادشدن هیدروژن) در غیاب هوا؛
- ایجاد محیط خورنده در اثر تولید مواد حاصل از سوخت و ساز با طبیعت خورنده؛
- تولید رسوب بر روی سطح فلز و تشکیل پیل‌های غلظتی و اختلاف دمشی؛

این باکتری، غیرهوازی می‌باشد و در فصل‌های بارندگی که خاک مرطوب است و هوای آن خارج می‌شود، به سرعت رشد می‌کند.

۳ ـ ۲ ـ ۲ ـ روش‌های شناسایی (SRB)

استفاده از آزمایش اسید: با افشاندن چند قطره اسیدکلریدریک رقیق بر روی محصولات سیاه رنگ خوردگی، بوی تخم‌مرغ گندیده (گاز H_2S) به مشام خواهد رسید و می‌توان آن را از Fe_3O_4 که آن هم سیاه رنگ است، مشخص نمود.

شناسایی چشمی: وجود محصولات خوردگی سولفیدی، روی سازه‌هایی که در خاک قرار دارند، دلیل محکمی بر فعالیت باکتری (SRB) می‌باشد.

استفاده از محیط کشت میکروب (کولتوریزه کردن): برای رشد (SRB) از محیطی که دارای لاکتات و سولفات می‌باشد و بدون اکسیژن است استفاده می‌گردد و به محیط آهن اضافه می‌شود تا رنگ سیاه در محیط، درصورت وجود (SRB) ، حاصل گردد.

برای نمونه‌برداری از الکترولیت جامد (خاک)، مقداری از آب محل اصلی نمونه‌برداری را هم باید به نمونه اضافه نمود و نمونه را در شرایط طبیعی و طی چند ساعت واردکولتور نمود.

با استفاده از لوله‌های Easicult (مخصوص کشت SRB) و مطابق دستورالعمل شرکت‌های سازنده و با توجه به چارت استاندارد، می‌توان باکتری‌های (SRB) را شناسایی کرد.

1-- Sulfate Reducing Bacteria

۳ـ۲ـ۳ـ تأثیر (SRB) بر معیار حفاظت کاتدی

دپلاریزاسیون کاتدی توسط باکتری (SRB) با معادلهٔ زیر نمایش داده می‌شود. [۹]

$$SO_4^{-2} + 4H_2O + 8e^- \rightarrow S^{-2} + 8OH^- \qquad E^\circ_{red} = -0.68\ v$$

برای آنکه معادلهٔ فوق برقرار نگردد، در شرایط استاندارد باید داشته باشیم: [۹]

$$\frac{E_{applied}}{Cos\ h\ [1 + 0.54\ \beta^2]} \geq E^\circ_{red} \qquad (۳ـ۳)$$

$$\underbrace{E_{applied}}_{\text{اختلاف پتانسیل اعمال شده}} \geq \underbrace{E^\circ_{red} \cdot Cos\ h\ [1 + 0.54\ \beta^2]}_{\text{(پتانسیل بحرانی) } E_{critical}} \qquad (۴ـ۳)$$

β ضریب فعالیت باکتری

با توجه به رابطهٔ فوق و تأثیر فعالیت باکتری SRB بر آن، اعمال پتانسیل اضافی برای مؤثر بودن حفاظت کاتدی، ضروری می‌باشد. در عمل معمولاً از پتانسیل اضافی در حدود 0.1− ولت استفاده می‌گردد.

۳ـ۳ـافت پتانسیل (IR)

به‌دلیل وجود میدان پتانسیل و جریان در اطراف خط لوله و سازه، هیچ نقطه‌ای روی سطح زمین وجود ندارد که با سطح لوله، پتانسیل یکسانی داشته باشد و همواره اختلافی ناشی از افت پتانسیل (IR) خواهیم داشت. افت پتانسیل، نتیجهٔ عبور جریان از بین مقاومت مؤثر بین الکترود مرجع و سازهٔ تحت حفاظت می‌باشد. میزان حداقل پتانسیل که به‌عنوان معیار درنظر گرفته شده، بدون درنظر گرفتن افت پتانسیل می‌باشد. بنابراین درصورتیکه پتانسیل اندازه‌گیری شده مثلاً (۰/۸۵−) ولت را نشان دهد، در این وضعیت، خود لوله در حداقل پتانسیل لازم نبوده (این عدد شامل مقدار افت اهمی نیز می‌باشد) و مورد حفاظت کامل قرار نمی‌گیرد.

به‌منظور محاسبهٔ افت پتانسیل، بلافاصله بعد از قطع جریان، پتانسیل اندازه‌گیری می‌گردد. اختلاف این مقدار با مقدار عمومی، برابر IR یا افت پتانسیل می‌باشد.

به‌منظور کاهش این خطا باید تا حدامکان الکترود مرجع در بالا و نزدیکترین مکان نسبت به سازه قرار گیرد. زیرا مطابق رابطه داریم:

$$R = \rho \frac{L}{S} \qquad (۵ـ۳)$$

R مقاومت اهمی بین سازه و الکترود مرجع

ρ مقاومت ویژهٔ خاک (مقداری ثابت)

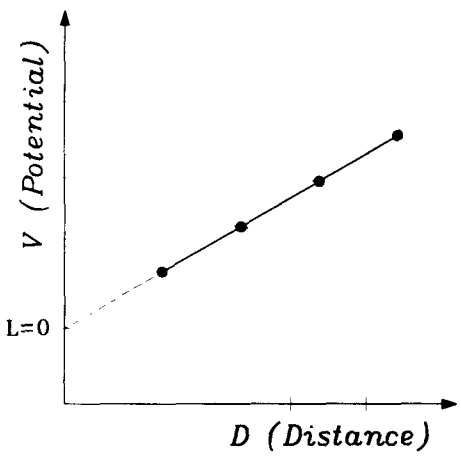
S سطح مقطع (مقدار ثابت)

L فاصلهٔ بین الکترود مرجع و سازه

هرچه مقدار L کمتر باشد، R کاهش می‌یابد و افت پتانسیل کاهش می‌یابد.

با روش برون‌یابی[1] می‌توان میزان افت پتانسیل را تخمین زد. بدین ترتیب که در فاصله‌های مختلف الکترود مرجع نسبت به سازه، اندازه‌گیری پتانسیل انجام شود و نمودار فوق رسم شود و با امتداد آن در حالت L = 0، پتانسیل را حساب نمود.

به تجربه مشخص گردیده است اگر ۰/۱ − ولت به‌عنوان افت پتانسیل به معیار حفاظتی اضافه گردد، سازه تحت حفاظت کاتدی مطلوبی قرار می‌گیرد، بنابراین مناسب است به عدد حاصله، این مقدار افزوده شود و در مراحل مونیتورینگ و بازرسی خط، ملحوظ گردد.



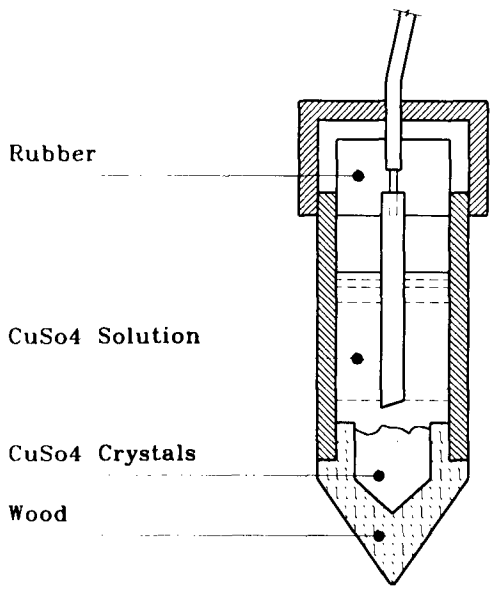
نمودار ۳ ـ ۱ ـ روش به‌دست آوردن پتانسیل اضافی با استفاده از برون‌یابی

۳ ـ ۴ ـ الکترودهای مرجع[2]

اندازه‌گیری پتانسیل سازه به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم حفاظت کاتدی در محل، حائز اهمیت است. به‌منظور اندازه‌گیری پتانسیل از الکترودهای مرجع استفاده می‌گردد که صرف‌نظر از محیطی که در آن قرار گرفته‌اند، پتانسیل ثابت و معینی داشته که با گذشت زمان تغییر نمی‌کند.

۳ ـ ۴ ـ ۱ ـ الکترود مرجع $Cu / CuSO_4$ (CSE):

در این الکترود، میلهٔ مسی خالص در محلول اشباع‌شدهٔ سولفات‌مس قرار گرفته و از طریق یک درپوش متخلخل با زمین تماس دارد. از این الکترود برای اندازه‌گیری پتانسیل فلزات مدفون در خاک استفاده می‌گردد. پتانسیل این الکترود در مقایسه با الکترود استاندارد ئیدروژن (SHE) در ۲۵°C، برابر ۰/۳۱۶ V می‌باشد و ضریب درجهٔ حرارت (dE/dT) برابر $(V / °C)$ ۹×۱۰^{-۴} می‌باشد. [۱ و ۴]



شکل ۳ ـ ۱ ـ قسمت‌های مختلف الکترود مرجع (CSE)

1-- Extrapolation

2-- Refrence Electrode

۳ـ۴ـ۲ـ الکترود مرجع کالومل (Calomel): (SCE)

در این الکترود، یک سیم پلاتین در جیوهٔ مایع که سطح آن با مخلوط Hg و Hg_2Cl_2 (کالومل) پوشیده شده است، قرار دارد. روی سطح کالومل، محلول KCl وجود دارد.

این الکترود یکی از معمولترین الکترودهای مرجع در آزمایشگاه می‌باشد.

جدول ۳ـ۱ ـ مشخصات انواع الکترودهای مرجع کالومل [۱۰]

الکترود مرجع	پتانسیل نسبت به SHE در $25^\circ C$ برحسب ولت	dE / dT $V / ^\circ C$
Calomel (0.1 N)	0.28	-2.4×10^{-4}
Calomel (1.0 N)	0.334	-0.7×10^{-4}
Saturated Calomel	0.242	-7.6×10^{-4}

۳ـ۴ـ۳ـ الکترود مرجع کلرورنقره ـ نقره (Ag - AgCl)

این الکترود شامل یک سیم پلاتینی می‌باشد که روی آن را آب نقره داده‌اند و در داخل یک لوله شیشه‌ای محتوی سیانورنقره ــ به‌عنوان الکترولیت ــ قرار گرفته است.

چون ورود نمک به این الکترود، آلاینده نمی‌باشد لذا در آب دریا از این نوع الکترود استفاده می‌شود. پتانسیل آن نسبت به (SHE)، ۰/۲۸۸ V بوده و ضریب درجه حرارت آن برابر $-۶/۵ \times ۱۰^{-۴}$ (V/°C) می‌باشد. [۱۰]

۳ـ۴ـ۴ـ الکترود روی خالص

برای اندازه‌گیری تقریبی پتانسیل، می‌توان از میله‌های روی خالص استفاده کرد که در بسته‌های پشت‌بند قرار گرفته‌اند و در مواقعی به‌کار می‌رود که به یک الکترود مرجع دائمی نیاز است. این الکترود بیشتر در کارهای زیردریایی استفاده می‌شود. به‌کارگیری الکترودهای مرجع دیگر در اعماق آب به‌علت فشار آب و وجود جریان معکوس از میان درپوش متخلخل که موجب آلودگی و تغییر پتانسیل الکترود مرجع خواهد شد، معمول نمی‌باشد.

۳ـ۴ـ۵ـ نکات مهم در اندازه‌گیری پتانسیل سازه نسبت به خاک

- به‌منظور اندازه‌گیری، قطب(-) ولت‌متر به خط لوله و قطب (+) آن، به الکترود مرجع متصل می‌گردد.
- درصورت خشک‌بودن خاک، مقدار کمی آب باید به آن زده شود تا مقاومت اتصال کاهش یابد. معمولاً کافی است زمین اندکی کنده شود و نمناک گردد. [۱۱]
- معمولاً از ولت‌متری با مقاومت داخلی بالا به‌منظور کاهش خطا استفاده می‌گردد.
- قرائت‌ها باید در دو مقیاس متفاوت صورت گیرد. [۱۱]

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

۳ ـ ۵ ـ مقاومت مخصوص خاک

مقاومت مخصوص خاک، برابر مقاومت بین دو وجه مقابل مکعبی به ابعاد ۱ cm بوده و واحد آن ohm-cm می‌باشد.

۳ ـ ۵ ـ ۱ ـ روش محاسبهٔ مقاومت مخصوص خاک

الف ـ روش آزمایشگاهی

در این روش از جعبهٔ خاک[1] مطابق شکل (۳ ـ ۲)، استفاده می‌گردد. مقاومت خاک در یک مکعب‌مستطیل از رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد: [۳]

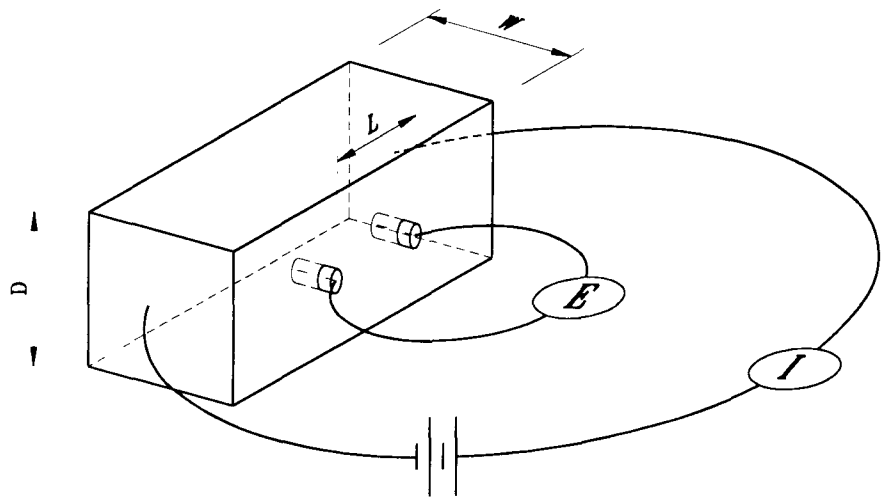
$$R = \frac{\rho \cdot L}{W \cdot D} \qquad (۳ ـ ۶)$$

R	مقاومت خاک	(ohm)
ρ	مقاومت مخصوص خاک	(ohm-cm)
D, W, L	ابعاد مستطیل	(cm)

در جعبهٔ خاک، مقاومت مخصوص با اندازه‌گیری مقاومت بین صفحاتی که به‌وسیلهٔ دو الکترود به منبع جریان متصل شده‌اند، محاسبه می‌شوند. [۳]

$$\rho = \frac{R \cdot W \cdot D}{L} = \frac{E}{I} \cdot \frac{A}{L} \qquad (۳ ـ ۷)$$

E	پتانسیل اندازه‌گیری‌شده بین دو الکترود میانی	(volts)
I	جریان اعمالی توسط پیل	(amps)
A	مساحت صفحات فلزی انتهایی جعبه	(cm^2)
L	فاصلهٔ دو الکترود میانی	(cm)



شکل ۳ ـ ۲ ـ جعبهٔ خاک جهت اندازه‌گیری مقاومت مخصوص خاک به روش آزمایشگاهی

1- soil box

ب ـ روش صنعتی و در محل

معمول‌ترین روش اندازه‌گیری مقاومت مخصوص خاک، استفاده از روش چهارمیله‌ای[۱] یا روش ونر[۲] می‌باشد. در این روش، جریان از طریق دو الکترود بیرونی به داخل خاک هدایت شده و پتانسیل مابین دو الکترود داخلی اندازه‌گیری می‌شود و مطابق رابطهٔ زیر، مقاومت مخصوص خاک محاسبه می‌گردد. [۳ و ۱۱]

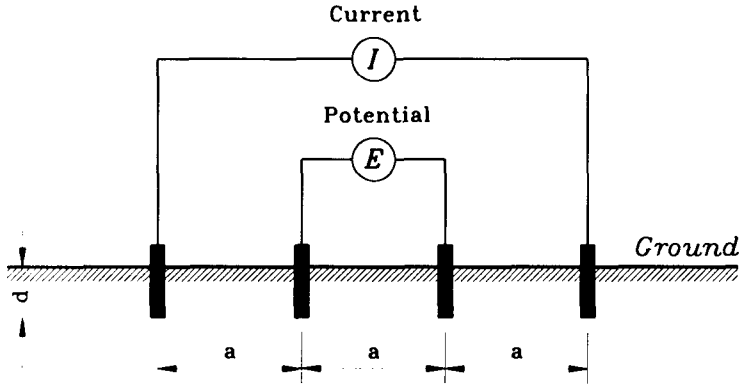
$$\rho = 2\pi a \frac{E}{I} \qquad (۳ ـ ۸)$$

ρ مقاومت مخصوص خاک (ohm-cm)

a فاصلهٔ میله‌ها (cm)

E پتانسیل اندازه‌گیری‌شده بین دو میلهٔ میانی (volts)

I جریان اعمالی توسط پیل (amps)



شکل ۳ ـ ۳ ـ روش ونر در اندازه‌گیری مقاومت مخصوص خاک

درعمل، توسط دستگاه‌های موجود، برحسب فاصلهٔ میله‌ها، مقاومت خاک خوانده می‌شود و با استفاده از روابط داده شده، مقاومت مخصوص خاک محاسبه می‌گردد.

۳ ـ ۵ ـ ۲ ـ نکات مهم اجرایی

- فاصلهٔ میله‌ها از یکدیگر، مقاومت مخصوص متوسط خاک تا این عمق را (برابر فاصلهٔ الکترودها) نشان می‌دهد.
- عمق الکترودها (d) در مقایسه با فاصلهٔ آنها (a)، باید کوچک باشد.
- ولت‌متر مورد استفاده باید مقاومت بالایی داشته باشد یا از یک پتانسیومتر استفاده شود.
- در هنگام اندازه‌گیری مقاومت مخصوص خاک در مجاورت خط لوله لخت، خط امتداد میله‌های اندازه‌گیری عمود بر امتداد لوله و اولین میله حداقل ۴۵ سانتیمتر دورتر از خط لوله انتخاب می‌شود.

1-- four - terminal resistivity determination 2-- Wenner

● برای حذف اثرات جریان‌ها و پتانسیل های نامطلوب موجود در خاک، جهت جریان معکوس شده و از مقادیر بدست آمده میانگین گرفته می‌شود.

● بررسی پیرامون انتخاب محل بستر آندی: محل مورد نظر باید به‌صورت شبکه‌ای با خانه‌های مربع شکل با ابعاد ۱۵ تا ۳۰ متر درنظر گرفته شده و در هرکدام از نقاط شبکه، قرائت صورت گیرد. درصورتیکه بین مقادیر بدست آمده تفاوت خیلی زیادی وجود داشته باشد در مناطق میانی نیز قرائت صورت می‌گیرد.

● مقاومت مخصوص خاک با دما تغییر می‌کند و از رابطهٔ زیر پیروی می‌نماید:

$$\rho_t = \rho_{15.5} \frac{40}{24.5 + t} \qquad (۹-۳)$$

ρ_t مقاومت مخصوص در دمای $t^\circ C$ (ohm-cm)

ρ مقاومت مخصوص در دمای $15.5^\circ C$ (ohm-cm)

t دما به درجهٔ سانتیگراد

۳ ـ ٦ ـ سطح مدفون سازه[1]

تنها سطحی از سازه که در الکترولیت (خاک) قرار دارد یا با آن در تماس است، توسط سیستم حفاظت کاتدی، محافظت می‌گردد، زیرا تنها در سطحی که جریان الکتریکی از آن عبور می‌کند، تغییر پتانسیل و پلاریزاسیون رخ می‌دهد. این سطح، لایهٔ مضاعفی است که در فصل مشترک سازه و خاک واقع گردیده است و قسمت‌های خارج از خاک را شامل نمی‌شود.

۳ ـ ۷ ـ پوشش لوله‌ها[2]

استفاده از رنگ و پوشش همراه با سیستم حفاظت کاتدی، اقتصادی‌ترین روش جهت کنترل خوردگی در سازه‌های فولادی مدفون در خاک می‌باشد. پوششها غالباً نواقصی دارند که فلز از طریق این نواقص در معرض محیط خورنده قرار می‌گیرد. به‌کارگیری پوشش عاری از نقص، باعث افزایش هزینه‌های حفاظت می‌گردد. استفاده از سیستم حفاظت کاتدی به تنهایی نیز هزینه‌های زیادی دربر دارد درحالی که به‌کارگیری پوششی مناسب همراه باسیستم حفاظت کاتدی (جهت مبارزه با خوردگی نواقص موجود روی پوشش) با صرفه‌ترین روش حفاظتی می‌باشد.

نقش پوشش، کاهش سطح تحت حفاظت می‌باشد. در حضور پوشش‌ها، سطح تحت حفاظت محدود به عیوب و نواقص موجود بر روی پوشش می‌گردد. به‌کارگیری پوششهای حفاظتی، موجب توزیع مطلوب شدت جریان در یک سیستم مورد حفاظت کاتدی می‌گردد و درنتیجه با شدت جریان و تعداد آندهای بسیار کمتری حفاظت انجام می‌گیرد.

1-- Buried Structure Surface

2-- Pipes Coating

یک پوشش مناسب بایستی بتواند در تمام محدودهٔ دمایی کار لوله پایدار بوده و نسبت به عوامل خورندهٔ محیط تأثیرناپذیر باشد. پارامترهای دیگری نیز بسته به موقعیت‌های مختلفی که در عمل اتفاق می‌افتد، وجود دارد و انتخاب یک پوشش مطلوب به موقعیت‌کاری و تجربه بستگی دارد.

در زیر برخی از مهمترین مشخصات لازم برای پوششهای آلی مورد استفاده همراه با سیستم حفاظت کاتدی، آمده است: [۱۲ و ۱۹]

- استحکام دی‌الکتریک بالا[۱]
- چسبندگی قوی به سطح فلز[۲]
- مقاومت به مواد قلیایی*[۳]
- مقاومت به عبور یونها[۴]
- مقاومت به عبور الکترونها[۵]
- ضخامت اپتیمم پوشش**[۶]
- سرعت انتقال بخار مرطوب کم[۷] (یا میزان جذب رطوبت کم)
- مقاومت به‌گسستن کاتدی[۸]***

* - پوششها باید دارای مقاومت شیمیایی خصوصاً در مقابل مواد قلیایی باشند. یکی از کلیدی‌ترین واکنش‌های شیمیایی که در کاتد اتفاق می‌افتد تمرکز (تغلیظ) یونهای هیدروکسیل است.

یونیزاسیون آب $2H_2O \rightarrow 2H^+ + 2OH^-$

واکنش کاتد $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow$

بنابراین با تشکیل هر مولکول ئیدروژن گازی، دو یون هیدروکسیل آزاد تولید می‌گردد که یک ترکیب قلیایی قوی را تشکیل می‌دهد و درصورتیکه پوشش دارای مقاومت کافی در مقابل ترکیبات قلیایی نباشد، موجب از بین رفتن آن می‌گردد. لذا در رنگ‌های مورد استفاده در سیستم‌های حفاظت کاتدی از پیگمنت‌های حاوی آلومینیم استفاده نمی‌گردد زیرا آلومینیم فلزی، با مواد قلیایی وارد واکنش شده و موجب شکستن پوشش می‌گردد. [۱۲ و ۱۹]

** - پاره‌ای از مشخصات پوشش ازجمله مقاومت الکتریکی، مقاومت یونی و سرعت عبور بخار مرطوب، مستقیماً به ضخامت آن بستگی دارد. همچنین ضخامت زیاد پوشش می‌تواند تأثیر منفی بر چسبندگی داشته باشد ولی به‌طورکلی هرچه پوشش ضخیم‌تر باشد، نتیجهٔ مطلوب‌تری همراه سیستم حفاظت کاتدی می‌دهد. [۱۲ و ۱۳]

*** - برای تعیین این پارامتر از آزمایشی موسوم به کاتدیک دیس‌باندینگ استفاده می‌گردد که آزمایشی است برای تعیین دوام و میزان چسبندگی و مقاومت به جریان عبوری و پتانسیل کاتدی اعمالی یک پوشش بر روی سطح خارجی لوله‌های مدفون تحت سیستم حفاظت کاتدی.

1-- Dielectric Strength
2-- Adhesion
3-- Alkali Resistance
4-- Ionic Resistance
5-- Electron Resistance
6-- Coating Thickness
7-- Moisture Vapor Transfer Rate
8-- Cathodic Disbonding

نحوهٔ آزمایش براساس استاندارد (ASTM G8 - 72) بدین ترتیب است که لوله‌های پوشش داده شده تحت ولتاژی بین ۳ ـ ۱/۵ ولت و درجه حرارتی بین ۶۵°C ـ ۲۰ در طی مدتی بین ۳۶۵ ـ ۱ روز با اعمال جریان کاتدی تحت بررسی قرار می‌گیرند و میزان چسبندگی پوشش و میزان جریان مصرفی مورد توجه قرار می‌گیرد.

۳ ـ ۷ ـ ۱ ـ انواع پوشش‌های مورد استفاده همراه با سیستم حفاظت کاتدی

الف ـ پوشش اپوکسی کولتار[1]

رزین‌های اپوکسی، اغلب با کولتار (قطران زغال‌سنگ) ترکیب شده و محصول نهایی، سیاه رنگ یا قهوه‌ای می‌باشد. این رزین‌ها دارای مقاومت نسبتاً خوبی در مقابل مواد شیمیایی و خورنده و همچنین رطوبت بوده و اغلب برای پوشش سطوح غوطه‌ور در آب به‌کار می‌روند.

اپوکسی کولتارها دارای ساختمان شیمیایی مقاوم بوده ولی در اثر گذشت زمان انعطاف‌پذیری خود را از دست می‌دهند و به همین دلیل سطح زیر رنگ آن بایستی سخت و محکم باشد. مقاومت به گسستن کاتدی این پوشش‌ها هم در حد متوسط می‌باشد. [۱۴]

ب ـ نوارهای پلاستیکی (پلی‌اتیلن)

کاربردهای شیمیایی نوارها مشابه پوششها می‌باشند با این تفاوت که غالباً نوارها در محل، مورد استفاده و اجراء قرار می‌گیرند لذا صدمات مکانیکی ناشی از نقل و انتقال یا انبار کردن از بین می‌رود. نوارها غالباً در بعضی از حالات محافظت مطمئن‌تری را نسبت به پوششها اعمال می‌نمایند. انتخاب یک سیستم نواری به فاکتورهای مختلفی بستگی دارد که شرایط کاری در عمل، از مهمترین آنهاست. نوارها به‌دلیل استفادهٔ آسان و قابلیت ترمیم و تعمیر مورد توجه می‌باشند.

نوارهای پلاستیکی غالباً پلی‌اتیلنی (PE) بوده و از قدرت چسبندگی و مقاومت بالایی برخوردار هستند و هم‌اکنون به‌طور گسترده‌ای، در خطوط لولهٔ گاز کشور استفاده می‌شوند. [۱۴]

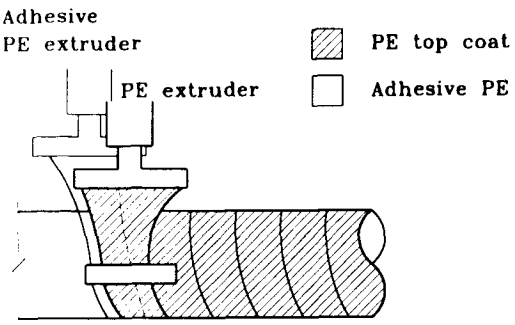
مـــزایـــا:

- سهولت کاربرد و نرخ تولید بالا؛
- به‌علت استفاده از مواد پلاستیکی پخته شده دارای استحکام مکانیکی بالایی بوده و مقاومت متوسطی در برابر تنش‌های خاک دارد.
- مقاومت الکتریکی بالا، که باعث مصرف کم الکتریسیته در سیستم حفاظت کاتدی می‌گردد.
- در برابر نیروهای خمشی به‌خوبی مقاومت می‌نماید.
- توانایی کار در درجه حرارت ۴۰°C ـ تا ۸۰°C؛

1-- Epoxy Coaltar

محدودیت‌ها:

- بر روی لوله‌های با قطر زیاد (بالای ۲۴ اینچ) و لوله‌های چدن نشکن، باید با دقت اعمال شود و نیاز به مراقبت زیاد دارد.
- شکل‌های نامنظم نظیر اتصالات، مشکل پوشیده می‌شود.
- در دمای بالا مقاومت خود را از دست می‌دهد.



شکل ۳ ـ ۴ ـ نحوهٔ اعمال پوشش پلی‌اتیلن بر روی لوله

ج ـ قیر زغال‌سنگی[1]

قیر زغال‌سنگی، از ۸۰ سال قبل برای حفاظت سازه‌های زیرزمینی در مقابل خوردگی مورد استفاده قرار گرفته است و دارای مزایای زیر می‌باشد:

- لعاب قطران زغال‌سنگ نسبت به خسارت ناشی از نفت مقاوم بوده و لذا استفاده از آن در مناطقی نظیر پالایشگاه‌ها و مناطق ذخیرهٔ نفت که ممکن است نفت به زمین رسوخ کند، مناسب است.
- نسبت به باکتری‌های موجود در خاک مقاوم است.
- همانند پوشش‌های دیگر پیر نمی‌شود.
- ارزان‌قیمت است.
- خط لولهٔ فولادی که با لعاب آن پوشش شده باشد و در زیر آن نوارهای با بافت شیشه و بر روی آن از نوارهای با بافت شیشه‌ای اشباع از قیر قطران زغال‌سنگ کشیده شده‌اند، در مقابل خسارت‌های مکانیکی ناشی از استفاده و کارگذاری خط لوله مقاوم است.

نحوهٔ استفاده از قیر زغال‌سنگی به‌صورت زیر می‌باشد:

- تمیزکاری مکانیکی و اعمال آستری؛
- لعاب قطران زغال‌سنگ با ضخامت $\frac{۱}{۱۶}$ اینچ؛
- یک لایهٔ نوار پیچی به‌صورت حلزونی با استفاده از نمد شیشه‌ای؛
- پوشش لعاب قطران زغال‌سنگ با ضخامت $\frac{۱}{۳۲}$ اینچ؛
- یک لایهٔ نوار پیچی به‌صورت حلزونی با استفاده از نمد آزبستی اشباع از قیر؛

1- Coaltar Enamel

د ـ قیر پایهٔ نفتی (Bitumen Enamel)

خصوصیات اصلی قیر پایهٔ نفتی عبارتند از:

خواص فیزیکی: نقطهٔ نرم‌شدگی $93^{\circ}C$ ـ $38^{\circ}C$. فرمولاسیون‌های تجاری این پوشش‌ها، حداقل تا دمای $66^{\circ}C$ را تحمل می‌کنند. مقاومت الکتریکی قیر، بالا بوده که در درازمدت با جذب آب کم می‌شود.

مقاومت شیمیایی: مقاومت خوبی در برابر آب و مقاومت ضعیف نسبت به حلال‌های هیدروکربن، نفت‌ها، چربی‌ها و بعضی حلال‌های آلی دارد. مقاومت خوبی را در مقابل گازهای خورنده نظیر سولفیدئیدروژن و دی‌اکسیدگوگرد دارد. در برابر الکل، متیل، اتیل و گلیکول‌ها هم مقاوم است.

خواص مکانیکی: مقاومت سایشی، ضربه، سختی و انعطاف‌پذیری پوشش‌های آسفالتی به نقطهٔ نرم‌شدگی آسفالت بستگی دارد.

قیر پایهٔ نفتی به‌صورت داغ نمی‌تواند بدون وجود پوشش آستری به لوله سرد بچسبد زیرا سطح سرد فلز قبل از چسبیدن قیر به آن، قیر را سرد می‌کند. اگر بتوان سطح لوله را به نزدیکی دمای کاربرد و اعمال پوشش رساند، دیگر آسترکاری نیاز نخواهد بود ولی حرارت دادن لوله باعث کاهش ضخامت پوشش و همچنین باعث آرام سفت‌شدن پوشش می‌شود. وجود آستری، موجب چسبندگی خوب و مناسب پوشش لوله بر روی آن می‌شود. بعد از اعمال آستری و قبل از اعمال هر پوششی می‌بایست زمان کافی را در نظر گرفت تا آستری به‌خوبی خشک شود که معمولاً یک روز برای این عمل کافی است. [۱۵]

گرایش‌های شدید در مورد رشد ریشهٔ گیاهان و بوته‌های صحرایی در میان و در زیر پوشش‌های قیر آسفالتی (Bitumen پایه نفتی) مشاهده گردید و در اثر آن سطوح فوقانی لوله در مناطق وسیعی در اثر نفوذ آب و نمک از کنار ریشه به سطح لوله دچار خوردگی‌های شدید طویل گردیده‌اند. جالب توجه اینکه این نوع خوردگی در مناطق جنگلی کشور و در مناطق صحرایی بیشتر و شدیدتر مشاهده شده است. به‌نظر می‌رسد که قیر نفتی از نظر غذایی برای برخی از گیاهان مناسب بوده و از طرفی وجود رطوبت در میان پوشش قیر و سطوح لوله، عامل دیگری جهت جلب ریشه گیاهان می‌تواند باشد. [۱۴]

ه ـ پوشش اپوکسی پیوندی مذاب FBE[1]

اپوکسی پیوندی مذاب به‌عنوان محافظی مطلوب برای خطوط لولهٔ زیرزمینی و دریایی استفاده می‌گردد. از جمله مزایای این پوشش، مقاومت در برابر جریان الکتریکی منفی حاصل از اجرای سیستم حفاظت کاتدی است و به‌خوبی می‌تواند ولتاژ تزریقی به لوله را تحمل نموده و دچار حالت گسستن کاتدی نگردد. همچنین منفذ نداشته و دارای چسبندگی مطلوب به سطوح چدنی (داکتیل)، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر آب و ضربه می‌باشد.

1- Fusion Bonded Epoxy

اعمال پوشش: لوله‌های فولادی را ابتدا تمیزکاری کوبشی کرده، به‌طور یکنواخت تا حدود ۲۳۲°C گرم کرده و سپس سپس پود اپوکسی را به‌صورت الکتروستاتیکی بر روی سطح لوله اعمال می‌نمایند. هنگامی که رزین با سطح فلز تماس پیدا می‌کند، ذوب می‌شود و جریان آن باعث افزایش ضخامت پوشش می‌گردد.

اعمال یک زیر لایهٔ کرومات بعد از شن‌زنی سطح تا حد (Sa 2.5) و قبل از اعمال پوشش اصلی، خواص بهینه‌ای در پوشش نهایی به‌دست می‌دهد.

محدودیت‌ها: جهت اعمال پوشش، نیاز به سطحی سفید یا نزدیک سفید[۱] است. این پوشش‌ها نازک و نسبتاً شکننده هستند. حمل و نقل آنها مشکل است. همچنین در محیط‌های مرطوب به‌علت خاصیت نفوذپذیری آن و تشکیل حباب‌های آب، مشکل دارد و کمتر به‌کار می‌رود. مقاومت ضعیفی در برابر سایش و ضربه دارد.

مزایا: جایی که تغییرات دما وسیع است می‌توان به‌کار برد و در دمای بالا نیز بخوبی کاربرد دارد و تا ۸۰°C همچنان مقاوم است. مقاوم خوبی به جدایش کاتدی و تنش‌های خاک دارد همچنین تعمیر پوشش آسان است. |۱۴|

و ـ پلی‌اتیلن اکسترودشده[۲]

این نوع پوشش نیز غالباً از جنس پلی‌اتیلن بوده، بر روی لوله‌های حداکثر تا قطر ۵۶ اینچ اعمال می‌شود و اکثراً بر روی یک لایه آستری و یک پوشش چسبنده مناسب نظیر اپوکسی به‌کار می‌روند. در این روش ابتدا یک پوشش پر دانسیته با ضخامت یکنواخت بر روی سطح ایجاد نموده و سپس آن را با آب سرد کرده تا پوشش منقبض شده و به عمل آید و در نتیجه یک لایه مقاوم در برابر رطوبت روی سطح ایجاد می‌گردد.

پوششهای پلی‌اتیلن اکسترودشده، مستلزم اکستروژن پلی‌اتیلن مذاب از درون یک قالب حلقه‌ای یا تیغه‌ای می‌باشد. بدین‌منظور پس از تمیزکردن اولیه و شن‌زنی تا درجهٔ (Sa. 2.5)، سطح لوله را تا دمای مناسب گرم کرده و از یک لایهٔ چسبنده (عموماً چسبهای پلی‌اتیلن اصلاح شده) که می‌تواند پیوند محکمی ایجاد نمایند، استفاده می‌گردد. پوشش‌های اکسترود شده بیشتر روی لوله‌های کم‌قطر مانند انشعابات خانگی اعمال می‌شود. |۱۵|

مزایا: مقاومت خوب و عالی در برابر تنش خاک، ضربه، مواد شیمیایی و سایر عوامل خوب محیطی دارد و در برابر نور ماوراءبنفش، تغییرات دمایی زیاد و جدایش کاتدی مقاوم است و تا ۶۵°C مقاوم است.

محدودیت‌ها: نیاز به آماده‌سازی سطح دارد. تغییرات آن مشکل است و پوشش یکسانی ایجاد نمی‌کند.

1-- White or Near White

2-- Extruded Polyethylene

جدول ۳ ـ ۲ ـ خصوصیات انواع پوشش‌های همراه با سیستم حفاظت کاتدی [۱۹]

نوع پوشش	ضخامت پوشش (mm)	حداکثر پتانسیل قابل تحمل (v)	دانسیتهٔ جریان حفاظتی (mA/m^2) طول‌عمر لوله (۳۰ ـ ۱۵ سال)	راندمان پوشش (درصد)
Coaltar Epoxy	0.3 - 0.6	ـ1.5	0.05	80 - 90
Plastic Tape (Polyethylene)	1.5 - 3.0	ـ1.5	0.2	90 - 95
Coaltar Enamel	3.0 - 6.0	ـ2.1	0.2	70 - 90
Bitumen Enamel	3.0 - 6.0	ـ2.1	0.2	70 - 90
Fusion Bonded Epoxy	2.5 - 3.5	ـ1.5	0.05	90 - 95
Extruded Polyethylene	2.5 - 3.5	ـ1.5	0.01	80 - 90

۳ ـ ۸ ـ جریان حفاظتی[1]

پارامتر مؤثر در محاسبهٔ مقدار جریان حفاظتی لازم، دانسیتهٔ جریان حفاظتی برای سطوح پوشش‌دار و لخت می‌باشد.

دانسیتهٔ جریان حفاظتی به نوع فلز و پوشش و شرایط محیط (مقاومت مخصوص خاک) بستگی دارد و مقدار آن همواره باید از دانسیتهٔ جریان خوردگی فلز در همان شرایط بیشتر باشد.

دما، PH و نمک‌های محلول در خاک و به‌طورکلی هر عاملی که باعث تغییر در سرعت خوردگی فلز در یک محیط خاص گردد، بر دانسیتهٔ جریان لازم برای حفاظت فلز در آن شرایط تأثیر می‌گذارد.

به‌منظور تعیین مقدار دانسیتهٔ جریان لازم برای حفاظت معمولاً از جداول مختلف که برحسب نوع پوشش، مقاومت مخصوص خاک، نوع خاک و میزان طول عمر طراحی سازه می‌باشد، استفاده می‌گردد که در ادامه پاره‌ای از این جداول آورده شده است که می‌توانند جهت انتخاب دانسیتهٔ جریان حفاظتی مورد استفادهٔ کاربر قرار گیرند.

جدول ۳ ـ ۳ ـ دانسیتهٔ جریان حفاظتی برحسب طول‌عمر طراحی و نوع پوشش براساس استاندارد *(IPS)* [۱۹]

نوع پوشش	دانسیتهٔ جریان حفاظتی (mA/m^2) در دمای ۳۰ °C		
	طول‌عمر طراحی سازه (سال)		
	0 - 5	5 - 15	15 - 30
قیر پایه نفتی و قیر پایهٔ زغال‌سنگی	0.04	0.1	0.2
اپوکسی پیوندی مذاب (FBE)، کولتار اپوکسی	0.01	0.02	0.05
پلی‌اتیلن اکسترود شده	0.002	0.005	0.01
نوار پلاستیکی (پلی‌اتیلن سه‌لایه)	0.04	0.1	0.2

* ـ به‌ازای هر ۱۰ °C بالاتر از ۳۰ °C، ۲۵٪ به مقادیر فوق اضافه گردد.

1- Protection Current

جدول ۳ ـ ۴ ـ دانسیتهٔ جریان حفاظتی برحسب کیفیت پوشش

کیفیت پوشش	دانسیتهٔ جریان (mA/m^2)
سازهٔ لخت	10 - 30
سازه با پوشش ضعیـــف	1
سازه با پوشش خـــوب	0.03
سازه با پوشش خیلی‌خوب	0.003

جدول ۳ ـ ۵ ـ دانسیتهٔ جریان حفاظتی برای حفاظت فولاد لخت براساس شرایط خاک [۱]

شرایط خاک	دانسیتهٔ جریان (mA/m^2)
Neutral Soil	4.5 - 16
Well aerated Neutral Soil	21.5 - 32
Highly acid Soil	32 - 160
Soil Supporting Surface reducing Bucteria	65 - 450
Heated Soil	32 - 270

نکات مهم اجرایی:

- در روش‌های تجربی، اندازه‌گیری پتانسیل فلز، عمومی‌ترین و کاربردی‌ترین روش جهت تعیین دانسیتهٔ جریان لازم برای حفاظت کاتدی است.
- هرچه دانسیتهٔ جریان اولیه را در حفاظت کاتدی سازه‌ها افزایش دهیم، دانسیتهٔ جریان لازم جهت تداوم حفاظت کاتدی در مراحل بعدی کاهش می‌یابد.
- هرچه ضخامت دیوارهٔ لوله و یا قطر آن افزایش یابد با یک دانسیتهٔ جریان ثابت، مقدار طول بیشتری از لوله حفاظت می‌شود، به‌عبارت دیگر هرچه دانسیتهٔ جریان بالاتری برای یک لوله احتیاج باشد، طول کمتری از آن حفاظت می‌شود.

۳ ـ ۹ ـ پشت‌بند[۱]

دلایل استفاده از پشت‌بند در اطراف آند:

- با داشتن مقاومت مخصوص کم، موجب افزایش ابعاد آند و درنتیجه کاهش مقاومت آند نسبت به زمین می‌شود.

1-- Backfill

- بخش اعظمی از جریان، مستقیماً از آند وارد پشت‌بند شده و درنتیجه، بیشتر مصرف مواد در سطح خارجی ستون پشت‌بند صورت می‌گیرد و موجب کاهش مصرف آند می‌شود.
- منجر به توزیع یکنواخت جریان می‌گردد.
- درصورتیکه خاک ناحیه مستقیماً با آند تماس داشته باشد، دراینصورت خوردگی موضعی به‌وقوع پیوسته و بر سطح آند، لایهٔ غیرفعال[1] تشکیل می‌گردد که مقاومت مدار را به‌شدت افزایش می‌دهد.

پس از نصب بستر آندی، ممکن است که شدت جریان ماکزیمم در اوایل به‌دست نیاید. پشت‌بند خشک به آرامی رطوبت زمین را جذب می‌کند و اگر زمین اطراف مرطوب نباشد، این کار روزها و شاید هفته‌ها به‌طول می‌انجامد. در این مواقع بهتر است زمین بالای حفرهٔ آندی پس از نصب مرطوب گردد. ریختن مخلوط آب و مواد پشت‌بند در حفرهٔ آندی در هنگام نصب آند روش مناسبی نمی‌باشد، زیرا پس از چندی آب مخلوط از دست می‌رود و خلل و فرج فراوانی در بستر ایجاد می‌شود. درحالیکه اگر پشت‌بند خشک در حفره ریخته شود و رطوبت زمین را به آرامی بعد از نصب آند جذب نماید، موجب افزایش حجم پشت‌بند شده و فشردگی آن بسیار عالی می‌گردد. [۱۷]

جدول ۳ ـ ۶ ـ پشت‌بند مورد استفاده در سیستم جریان اعمالی [۱۸]

نوع	کربن (wt%)	رطوبت (wt%)	سولفور (wt%)	خاکستر (wt%)	دانسیته (km/m^3)	مقاومت مخصوص (ohm cm)	اندازه (mm)
کک زغال‌سنگی Coal Coke Breeze	80	5	1	15	650 - 800	< 100	< 10
کک حرارتی Petroleum Coke Breeze	90	5	5	5	700 - 1100	< 100	< 3

جدول ۳ ـ ۷ ـ پشت‌بند مورد استفاده در سیستم آند فداشونده [۱۸]

نوع	گچ ($CaCO_3$)	بنتونیت (%)	سولفات سدیم (%)	مقاومت مخصوص (ohm - cm)	کاربرد	اندازه (mm)
(A)	25	75	---	250	در خاک با رطوبت پایین	
(B)	50	50	---	250	همراه با آند Zn	> 0.84
(C)	75	20	5	50	در خاک با مقاومت بالا همراه با Zn و Mg	

1-- Passive

۳ ـ ۱۰ ـ بستر آندی عمودی (چاهی)[1]

در مناطقی که ضریب مقاومت الکتریکی زمین در سطح، بسیار زیاد می‌باشد یا لایه‌های معدودی از زمین دارای مقاومت پایین می‌باشند، استفاده از بستر آندی چاهی مؤثر می‌باشد. در این شیوه اگر لایه‌های عمیق زمین دارای ضریب مقاومت الکتریکی کم باشند، توزیع شدت جریان در اطراف خط لوله بسیار عالی انجام خواهد گرفت.

در نواحی که ضریب مقاومت الکتریکی زمین پایین باشد ولی تراکم شبکه‌های فلزی زیاد باشد، بطوریکه بسترهای آندی سطحی به‌علت نزدیکی به ساختارهای تحت حفاظت یا ساختارهای خارجی نتیجه بخش نباشد، می‌توان از بستر آندی چاهی درصورت کم‌بودن ضریب مقاومت الکتریکی زمین در لایه‌های عمیق استفاده نمود.

به‌منظور اندازه‌گیری ضریب مقاومت الکتریکی زمین در روش ۴ میله، فاصلهٔ میله‌ها را ابتدا ۱۵ متر درنظرگرفته و تا فاصلهٔ بیش از ۳۰ متر هم افزایش می‌دهیم. در این اندازه‌گیری نیاز به سطح گسترده‌ای می‌باشد که عاری از تأسیسات باشند و نیز مسیر تمام ساختارهای زیرزمینی (خطوط لوله، کابل، اتصال زمین و ...) باید کنترل شود، زیرا بخشی از جریان اعمال شده توسط این شبکه‌های فلزی جذب یا پخش خواهند شد و نتیجهٔ به‌دست آمده دقیق نخواهد بود.

در طراحی و نصب بستر آندی به این روش به‌علت هزینهٔ اولیهٔ زیاد و عدم امکان تعمیرات و تغییرات پس از نصب آند، باید دقت فراوانی اعمال نمود.

۳ ـ ۱۰ ـ ۱ ـ انواع بسترهای چاهی [۱۱]

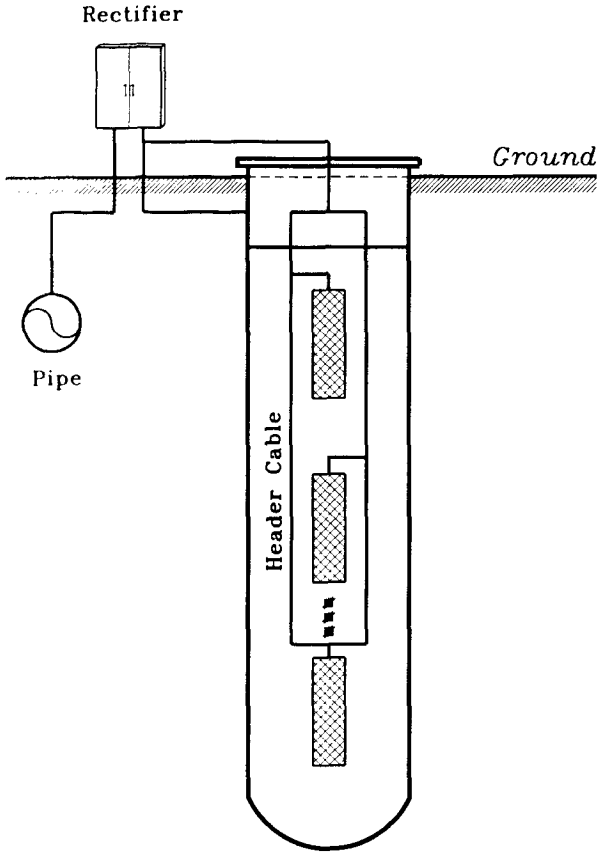
جاگذاری لوله‌ای با دیوارهٔ ضخیم در چاه حفرشده: در این روش، بخش فوقانی لوله را برای جلوگیری از خروج جریان، با پوششی عایق می‌کنند. از مزایای این روش آن است که می‌توان پس از خورده شدن و مصرف لولهٔ اولیه، از لوله‌های بعدی که دارای قطر کمتر هستند، استفاده نمود.

این طریق کارگذاری در نواحی انجام می‌شود که ضریب مقاومت زمین یکنواخت باشد زیرا درغیراینصورت به‌دلیل تمرکز خوردگی در لایه‌های با مقاومت الکتریکی کم، قسمت‌های مختلف لوله از یکدیگر جدا می‌شوند.

- **استفاده از غلاف لوله‌ای همراه با آند و پشت‌بند:** در این روش ابتدا غلاف فلزی مصرف می‌شود و پس از فرسوده‌شدن لوله، آندها و پشت‌بند در مدار قرار می‌گیرند. در اینجا مقاومت بستر چاهی تا مدتها ثابت می‌ماند و با ورود آندها در مدار، افزایش مقاومت ملاحظه می‌گردد.

1-- Vertical Groundbed (Deep)

در مـواردی از لوله‌هـای مشبک فولادی استفاده می‌شود که دو متر اول آنها مشبک نبوده و انتهای لوله مخروطی است. در بستر چاهی فوق باید مسیری برای تخلیهٔ گازهای ایـجاد شـده (عـمدتاً هـیدروژن) درنظر گرفته شود زیرا باعث تشکیل لایه‌ای عایق شـده کـه مـقاومت مـدار را افـزایش می‌دهند و درنتیجه ولتاژ مـخالف افـزایش می‌یابد. بـدین‌منظور مـعمولاً از لوله‌هـایی موسوم به ونت استفاده می‌گردد که از جنس PVC بوده و در سرتاسر چاه کشیده شده و دارای سـوراخ‌هـایی جـهت خـروج گـازها می‌باشند.

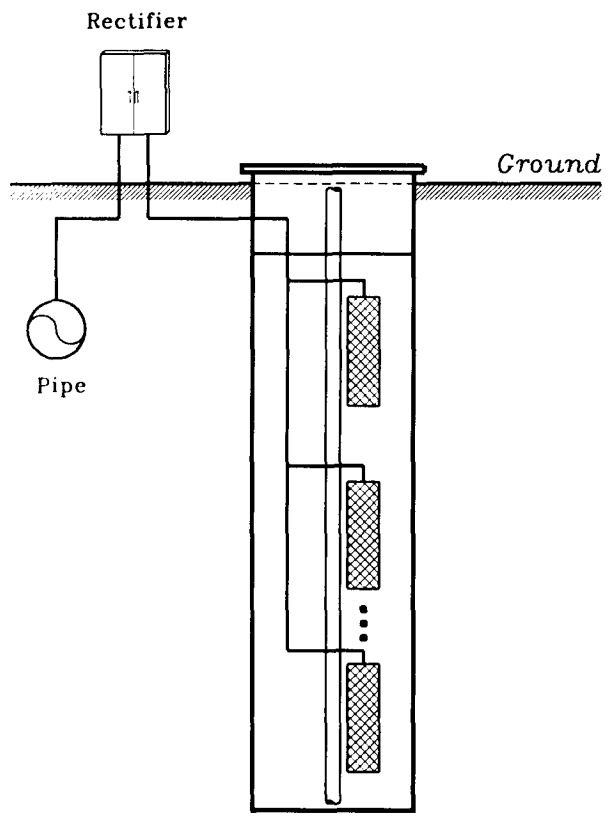


شکل ۳ ـ ۵ ـ بستر چاهی به‌صورت غلاف لوله‌ای همراه با آند و پشت‌بند

استفاده از چاهی که در تمام طول آن لولهٔ غلاف وجود ندارد:

آنـدها را بـه لوله‌ای کـه بـه‌عنوان تکیه‌گاه استفاده می‌شود، وصل می‌کنند.

دراین‌حالت مقاومت بستر نسبت به روش قبل افـزایش مـی‌یابد. مسیری بـرای خروج گازهای ایجاد شـده، درنـظر گـرفته می‌شود (حجم گازهای تـولید شـده بسـیار کمتر از روش قبلی می‌باشد). از طریق انتهای لولهٔ تکـیه‌گـاه، مـخلوط آب و مشـتقات کربنی، درون چاه تلمبه می‌شود.



شکل ۳ ـ ۶ ـ بستر چاهی خشک با لولهٔ تکیه‌گاه

۳ـ۱۱ـ رکتیفایر

منبع یکسوکنندهٔ جریان (تبدیل جریان AC به DC)، ترانس رکتیفایر می‌باشد که بسته به شرایط کاری و محیطی و با توجه به مشخصات عمومی آن، انتخاب می‌گردد.

مشخصات عمومی رکتیفایر:

- برق ورودی: میزان ولتاژ ـ تک فاز یا سه فاز ـ فرکانس؛
- هوایی، روغنی یا روغنی ضد انفجار؛
- نوع یکسوکننده (سلنیوم یا سیلیکان)؛
- لوازم حفاظتی؛
- حداکثر شدت‌جریان و ولتاژ خروجی؛
- مکان نصب (سطح زمین، دیوار یا پایه)؛
- درجهٔ حرارت حداکثر محیط؛

مبدل‌های یکسوکننده با سه نوع محفظه ساخته می‌شوند:

- نوع هوایی؛
- نوع معلق در روغن (در نواحی که محیط خورنده می‌باشد مانند سواحل دریا، نواحی صنعتی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند.)
- نوع روغنی ضدانفجار و آتش (در مکان‌هایی که خطر انفجار و آتش‌سوزی وجود دارد، استفاده می‌شوند.)

ظرفیت مبدل یکسوکننده متناسب با شدت‌جریان مورد نیاز و ولتاژی خواهد بود که قادر به تأمین این شدت‌جریان باشد.

ولتاژ خروجی رکتیفایر باید بیشتر از حداقل طراحی باشد. این افزایش انتخاب به این دلیل می‌باشد که مقاومت بستر آندی در اثر گذشت زمان و فرسوده شدن، افزایش می‌یابد. اگر ولتاژ خروجی ۱۵ تا ۲۵٪ بیشتر از مقدار طراحی شده انتخاب گردد، به‌سهولت قادر به تأمین شدت‌جریان مورد نیاز برای زمان طولانی خواهد بود. شدت‌جریان طراحی شده نیز در رابطه با کار در دست اقدام باید بررسی گردد. اگر حفاظت کاتدی دربارهٔ بخشی از لولهٔ لخت اعمال می‌شود، در اثر گذشت زمان هیچگونه افزایش شدت‌جریان لازم نخواهد بود. اگر ایستگاه‌های حفاظت کاتدی برای یک خط لوله که جدیداً تأسیس گردیده و دارای پوشش عالی می‌باشد درنظر گرفته شود، شدت جریان مورد نیاز در اثر گذشت زمان می‌تواند افزایش چندین برابری احتمالاً حادث کند، در چنین حالتی، رکتیفایر انتخاب شده دارای ظرفیت بسیار بیشتر از مقدار طراحی شده می‌باشد و در ابتدا فقط بخش کوچکی از این ظرفیت بهره‌برداری می‌شود. اگر سیستم حفاظت کاتدی برای خط لوله پوشش‌داری که مدتهاست در سرویس قرار دارد درنظر گرفته شود، دراینصورت ظرفیت ذخیرهٔ لازم برای آینده کمتر خواهد بود.

ولتاژ برگشتی: برای بستر آندی با پشت‌بند مشتقات کربنی، مقدار ولتاژ برگشتی در حدود ۲ ولت می‌باشد. دربعضی نواحی که زمین ترکیبات خاصی دارد، ممکن است ولتاژ مخالف از این مقدار بیشتر باشد. برای تعیین ولتاژ مخالف، اختلاف پتانسیل بین بستر آندی و لوله بلافاصله پس از روشن‌کردن رکتیفایر، اندازه‌گیری می‌شود. [۱۱]

فصل چهارم
الگوریتم برنامه

۴ ـ ۱ ـ انتخاب معیار حفاظت

جدول ۴ ـ ۱ ـ حداقل پتانسیل حفاظتی برحسب شرایط محیطی [۱۰]

جنس سازه	شرایط	حداقل پتانسیل لازم برای حفاظت برحسب الکترود در معیار مطلق پتانسیل
فولاد زنگ‌نزن	دما $< 50^{\circ}C$	-۰/۱
	دما $> 50^{\circ}C$	-۰/۳
آهن و آلیاژهای با درصد پایین	دما $< 50^{\circ}C$	-۰/۸۵
	دما $> 50^{\circ}C$	-۰/۹۵
	درحضور باکتری‌های SRB	-۰/۹۵
	مقاومت مخصوص خاک بالاتر از 5000ohm-cm	-۰/۷۵

۴ ـ ۲ ـ سطح سازه

$$S = \text{قطر خارجی لوله} \times \pi \times \text{طول لوله} \times 2.54 \times \frac{1}{100} \qquad (۴ - ۱)$$

Pipe (لوله):

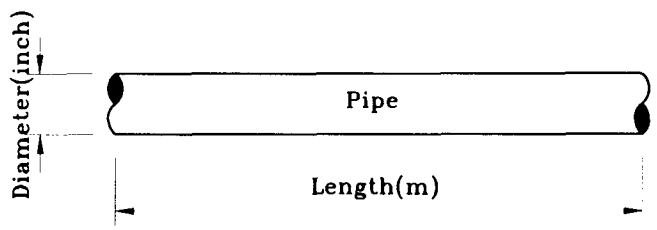
- $\frac{1}{100}$: تبدیل سانتیمتر به متر
- 2.54: تبدیل اینچ به سانتیمتر
- π: به متر
- قطر خارجی لوله: به اینچ

برنامه براساس Pipe Size انتخابی، قطر خارجی لوله را از بانک اطلاعاتی موجود در برنامه خوانده و در رابطهٔ فوق قرار می‌دهد

جدول ۴ ـ ۲ ـ مشخصات استاندارد لوله [۱۷]

اندازهٔ لوله (Inch)	قطر خارجی (Inch)	اندازهٔ لوله (Inch)	قطر خارجی (Inch)
20	20.00	2	2.375
22	22.00	4	4.5
24	24.00	6	6.625
26	26.00	8	8.625
28	28.00	10	10.75
30	30.00	12	12.75
32	32.00	14	14.00
34	34.00	16	16.00
36	36.00	18	18.00

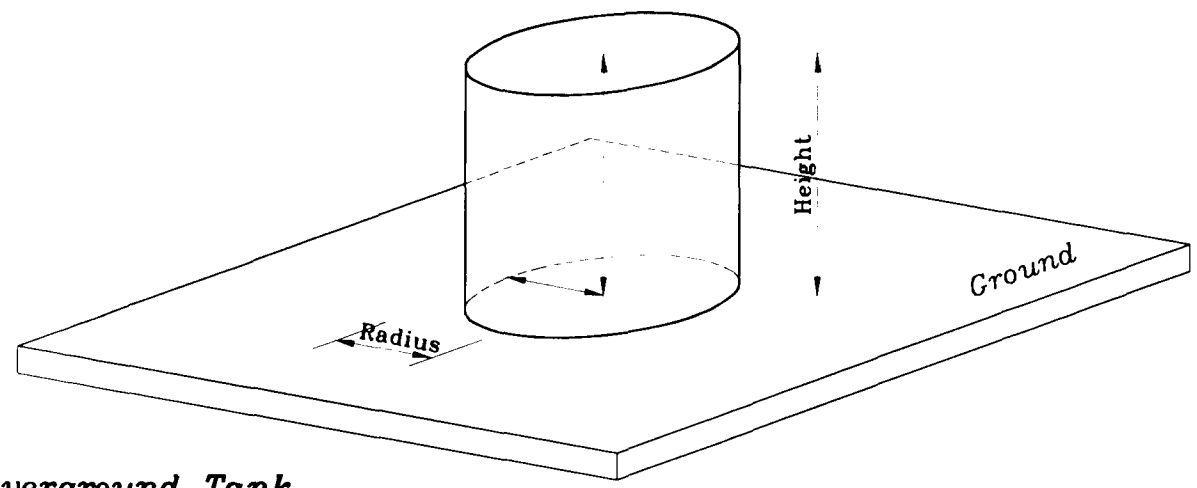
$$S = \sum_{i=1}^{n} S_i \quad \rightarrow \quad S = \pi \sum_{i=1}^{n} D_i \cdot L_i \qquad (۴ ـ ۲)$$



شکل ۴ ـ ۱ ـ مشخصات لولهٔ مدفون در خاک

Overground Tank (مخزن روزمینی): $S = (\pi \times r^2) / 10000$ (۴ ـ ۳)

شعاع کف مخزن (cm) ↓ ↓ تبدیل cm^2 به m^2



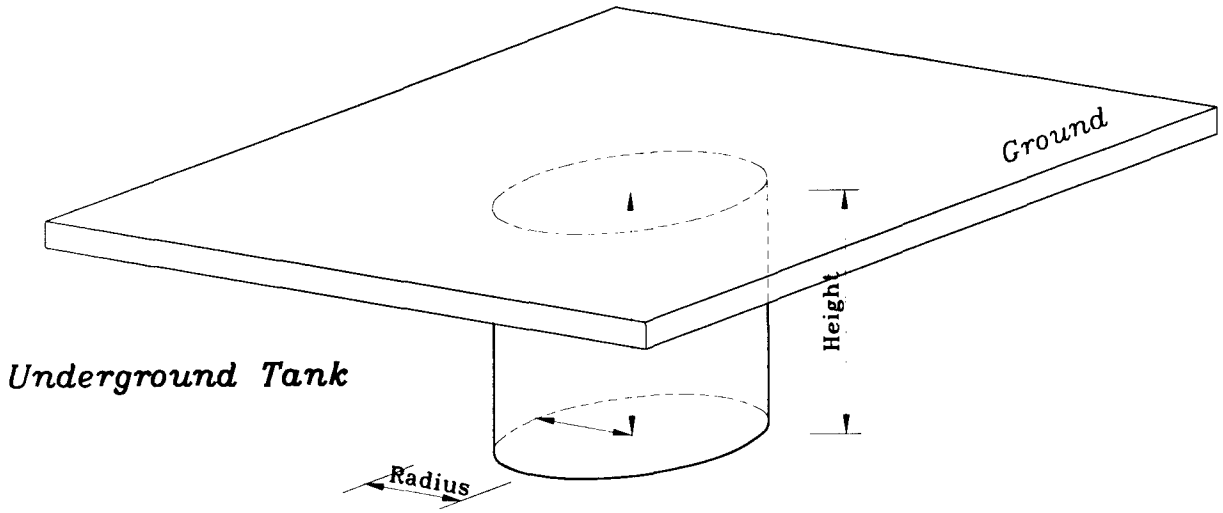
Overground Tank

شکل ۴ ـ ۲ ـ مشخصات مخزن روزمینی

ارتفاع مخزن (cm)

Underground Tank (مخزن زیرزمینی): $S = 2 \times \pi \times r\ (r + H)/10000$ (۴ ـ ۴)

شعاع کف مخزن (cm) — تبدیل cm^2 به m^2



شکل ۴ ـ ۳ ـ مشخصات مخزن زیرزمینی

۴ ـ ۳ ـ پوشش لوله‌ها

جدول ۴ ـ ۳ ـ حداکثر پتانسیل قابل تحمل برحسب نوع پوشش [۱۹ و ۲۴]

Kind of Coating	Potential Limits (Vols) (Cu / $CuSO_4$)
Coaltar Epoxy	– 1.5
Plastic Tape (Polyethylene)	– 1.5
Coaltar Enamel	– 2.1
Bitumen Enamel	– 2.1
Fusion Bonded Epoxy	– 1.5
Extruded Polyethylene	– 1.5

$$S_{Coated} = S_{total} . \{(E - D.T)\} \qquad (۵ ـ ۴)$$

S_{Coated} سطح سازهٔ پوشش‌دار (m^2)

S_{total} سطح کل سازه (m^2)

E راندمان پوشش (%)

D تخریب سالانهٔ پوشش (%)

T طول‌عمر طراحی (years)

۴ ـ ۴ ـ جریان حفاظتی

$$I = \left[(I_1 \cdot S_{Coated}) + \left(I_2 \, (S_{total} - S_{Coated})\right)\right] \times C_s \qquad (۶ - ۴)$$

I جریان حفاظتی لازم (mA)

I_1 چگالی جریان حفاظتی برای سطح پوشش‌دار (mA / m^2)

I_2 چگالی جریان حفاظتی برای سطح بدون‌پوشش (mA / m^2)

S_{Coated} سطح سازهٔ پوشش‌دار (m^2)

S_{total} سطح کل سازه (m^2)

C_s ضریب ایمنی

جدول ۴ ـ ۴ ـ چگالی جریان حفاظتی برحسب مقاومت مخصوص خاک و وضعیت پوشش لوله

مقاومت مخصوص (ohm - cm)	$\rho <$ 5000	$\rho >$ 5000
چگالی مخصوص	0.5	0.2 ← لولهٔ پوشش‌دار
(mA / m^2)	10	5 ← لولهٔ لخت

۴ ـ ۵ ـ انتخاب سیستم حفاظت کاتدی

جدول ۴ ـ ۵ ـ نوع سیستم حفاظتی برحسب طول‌عمر طراحی و مقاومت مخصوص خاک

Soil Resistivity (ohm - cm)	Design Service Life (years)	Kind of Cathodic Protection
> 5000	> 5	Impressed Current
> 5000	< 5	Impressed Current
< 5000	< 5	Sacrificial Anode
< 5000	> 5	Impressed Current

۴ ـ ۶ ـ انتخاب آند

رابطهٔ جریان خروجی از آند: [۱ و ۱۷]

$$i = \frac{\Delta E}{R} = \frac{E_{d.v}}{(\rho/2\pi L)\ ln\ [(8L/D) - 1]} \rightarrow i = \frac{2\pi E_{d.v}\, L}{\rho\ ln\ [(8L/D) - 1]} \qquad (۷ - ۴)$$

i جریان خروجی از آند (amps)

$E_{d.v}$ (driving voltage) $= E_A - E_C$

E_A پتانسیل خروجی آند (volts)

E_C پتانسیل حفاظتی (volts)

R مقاومت آند (بستر آندی) (amps)

ρ مقاومت مخصوص خاک (ohm - cm)

L طول آند (cm)

D قطر آند (cm)

رابطهٔ طول‌عمر آند: [۵]

$$y = \frac{K.U.E.W}{8760 \times I} \qquad (۸-۴)$$

y عمر آند (year)

K ظرفیت انرژی آند (تئوری) (amp.h/kg)

U فاکتور بهره‌برداری (Utilization Factor) (برابر ≈ 0.85)

E راندمان آند (Efficiency of The Anode)

ظرفیت انرژی آند (عملی) = ظرفیت انرژی آند (تئوری) x راندمان آند

W وزن آند (Kg)

I جریان خروجی از آند (amps)

رابطهٔ طول‌عمر آند فداشونده:

$$y_{mg} = \frac{58.07 \times W}{i_t} \qquad (۹-۴)$$

$$y_{Zn} = \frac{38.85 \times W}{i_t} \qquad (۱۰-۴)$$

W وزن آند (پوند)

i جریان خروجی از آند (میلی‌آمپر)

جدول ۴ ـ ۶ ـ انتخاب آند فداشونده برحسب مقاومت مخصوص خاک

مقاومت مخصوص (ohm - cm)	آند پیشنهادی
$\rho < 1500$	Zn . Mg(S) . Mg(H.P)
$1500 < \rho < 4000$	Mg(S) . Mg(H.P)
$\rho > 4000$	Mg(H.P)

جدول ۴ ـ ۷ ـ مشخصات انواع آندهای فداشونده [۱]

Kind of Anode	Theoretical Output (A - h/kg)	Actual Output (A - h/kg)	Eff (%)	Consumption	
				Rate (kg/A.year)	Potential to CSE
Zn	816	739	90	12	1.1
Mg Standard	2265	551 - 1279	25 - 58	6.8 - 16	1.4 - 1.6
Mg High Potential	2205	992 - 1191	45 - 54	7.3 - 8.6	1.7 - 1.8

۴ ـ ۷ ـ مقاومت بستر آندی

۴ ـ ۷ ـ ۱ ـ مقاومت بستر عمودی (مسطح) [۲۰]

$$R_1 = \rho_{Bf} \cdot \{ ln\ (8L / D) - 1 + (2L / d)\ [ln\ (0.656\ N)] \} / (6.28\ NL) \qquad (۱۱ ـ ۴)$$

$$R_2 = \rho \cdot \{ ln\ (8L_{Bf} / D_{Bf}) - 1 + (2L_{Bf} / d)\ [ln\ (0.656\ N)] \} / (6.28\ NL_{Bf}) \qquad (۱۲ ـ ۴)$$

$$R_{V.G.S} = R_1 + R_2 \qquad (۱۳ ـ ۴)$$

R_1 مقاومت اتصال بین آندها و پشت‌بند (ohm)

R_2 مقاومت اتصال بین پشت‌بند و زمین (ohm)

$R_{V.G.S}$ مقاومت بستر عمودی مسطح (ohm)

ρ_{Bf} مقاومت مخصوص پشت‌بند (ohm - cm)

ρ مقاومت مخصوص خاک (ohm - cm)

L طول آند (cm)

L_{Bf} طول مؤثر آند همراه با پشت‌بند (cm)

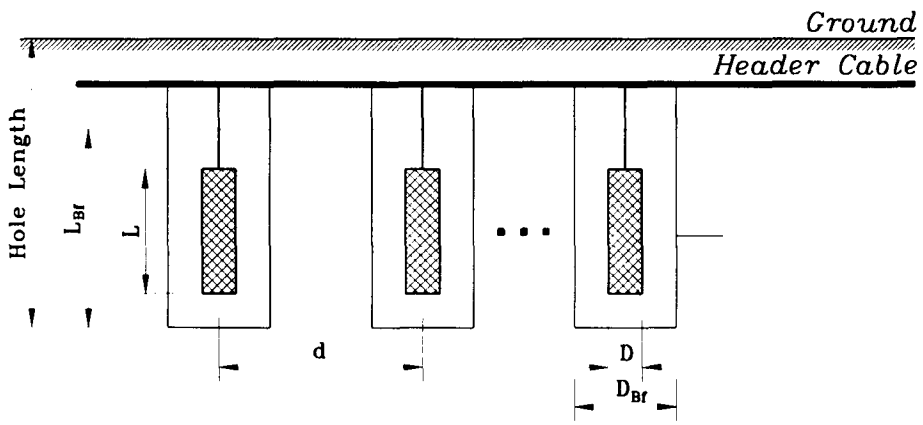
D قطر آند (cm)

D_{Bf} قطر مؤثر آند همراه با پشت‌بند (cm)

d فاصلهٔ مرکز به مرکز بین آندها (cm)

N تعداد آندها در بستر

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
نمایندگی مرکز



شکل ۴ ـ ۴ ـ بستر آندی عمودی (مسطح)

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
نمایندگی مرکز

۴ـ۷ـ۲ـ مقاومت بستر عمودی (چاهی) [۲۰]

$$R_1 = R_3 \cdot F_i / N \qquad (۱۴-۴)$$

$$Fi = 1 + \{ (2L) [ln (0.656 N)] / (d) [ln (8L / D) - 1] \} \qquad (۱۵-۴)$$

$$R_3 = \rho_{Bf} \cdot [ln (8L / D) - 1) / (6.28 L) \qquad (۱۶-۴)$$

$$R_2 = \rho \cdot [ln (8L_{Bf} / D_{Bf}) - 1] / (6.28 L_{Bf}) \qquad (۱۷-۴)$$

$$R_{V.G.D} = R_1 + R_2 \qquad (۱۸-۴)$$

R_1 مقاومت اتصال بین آندها و پشت‌بند (ohm)

R_2 مقاومت اتصال بین پشت‌بند و زمین (ohm)

R_3 مقاومت اتصال بین هر آند و پشت‌بند (ohm)

F_i فاکتور Interference

$R_{V.G.D}$ مقاومت بستر عمودی چاهی (ohm)

ρ_{Bf} مقاومت مخصوص پشت‌بند (ohm - cm)

ρ مقاومت مخصوص خاک (ohm - cm)

L طول آند (cm)

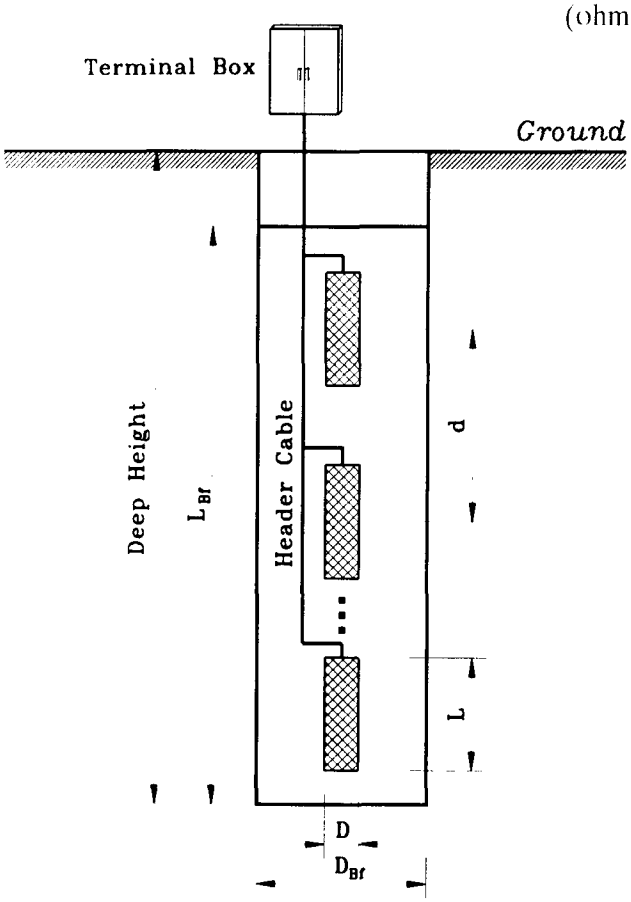
L_{Bf} طول مؤثر آند همراه با پشت‌بند (cm)
(طول کل ستون پشت‌بند)

D قطر آند (cm)

D_{Bf} قطر مؤثر آند همراه با پشت‌بند (cm)

d فاصلهٔ مرکز به مرکز بین آندها (cm)

N تعداد آندها در بستر



شکل ۴ ـ ۵ ـ بستر آندی عمودی (چاهی)

۴ـ۷ـ۳ـ مقاومت بستر افقی [۲۰]

$$R_1 = R_3 \cdot F_i / N \qquad (۱۹-۴)$$

$$Fi = 1 + \{ (2L) [ln (0.656 N)] / (d) [ln (8L / D) - 1] \} \qquad (۲۰-۴)$$

$$R_3 = \rho_{Bf} \cdot \{ ln [(4L^2 + 4L (h^2 + L^2)^{0.5}) / (D \cdot h)] + (h / L) - ((h^2 + L^2)^{0.5} / L) - 1 \} / (6.28 L) \qquad (۲۱-۴)$$

$$R_2 = \rho \cdot \{ ln [(4L_{Bf}^2 + 4L_{Bf} (h^2 + L_{Bf}^2)^{0.5}) / (D_{Bf} \cdot h)] + (h / L_{Bf}) - ((h^2 + L_{Bf}^2)^{0.5} / L_{Bf}) - 1 \} / (6.28 L_{Bf}) \qquad (۲۲-۴)$$

$$R_{H.G} = R_1 + R_2 \qquad (۲۳-۴)$$

R_1 مقاومت اتصال بین آندها و پشت‌بند (ohm)

R_2 مقاومت اتصال بین پشت‌بند و زمین (ohm)

R_3 مقاومت اتصال بین هر آند و پشت‌بند (ohm)

F_i فاکتور Interference

$R_{V.G.D}$ مقاومت بستر عمودی چاهی (ohm)

ρ_{Bf} مقاومت مخصوص پشت‌بند (ohm - cm)

ρ مقاومت مخصوص خاک (ohm - cm)

L طول آند (cm)

L_{Bf} طول مؤثر آند همراه با پشت‌بند (طول کل ستون پشت‌بند) (cm)

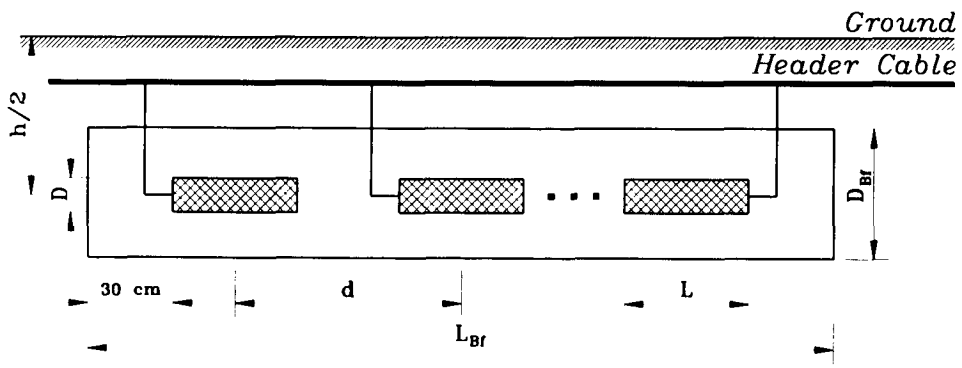
D قطر آند (cm)

D_{Bf} قطر مؤثر آند همراه با پشت‌بند (cm)

d فاصلهٔ مرکز به مرکز بین آندها (cm)

N تعداد آندها در بستر

h دو برابر عمق دفن آندها (cm)



شکل ۴ ـ ۶ ـ بستر آندی افقی

۴ ـ ۸ ـ مقاومت خط لوله

$$R = \frac{2\rho L}{dt} \qquad (۲۴ ـ ۴)$$

R مقاومت خطی لوله

ρ مقاومت ویژهٔ خط لوله

L طول لوله

d قطر لوله

t ضخامت دیواره

$$R = \frac{78.38 \times 18}{\text{وزن هر متر لوله}} \qquad (۲۵ ـ ۴)$$

دانسیتهٔ لولهٔ فولادی $= 7.83\ gr/cm^3$

ρ(مقاومت ویژهٔ فولاد) $= 18\ micro\text{-}ohm\text{-}cm$

R مقاومت یک متر از لوله $(\times 10^{-6}\ ohm\text{-}m)$

جدول ۴ ـ ۸ ـ مقاومت واحد طول لوله برحسب اندازهٔ استاندارد آن [۵ و ۱۰]

اندازهٔ لوله (Inch)	قطر خارجی (Inch)	ضخامت دیواره (mm)	وزن هر متر لوله (Kg)	مقاومت هر متر از لوله ($ohm \times 10^{-6}$)
2	2.375	3.91	5.43	259.84
4	4.5	6.02	16.07	87.78
6	6.625	7.11	28.27	49.89
8	8.625	8.18	42.56	33.15
10	10.75	9.27	60.27	23.40
12	12.75	9.53	73.81	19.10
14	14.00	9.53	81.25	17.36
16	16.00	9.53	93.16	15.14
18	18.00	9.53	105.00	13.44
20	20.00	9.53	116.97	12.06
22	22.00	9.53	128.73	10.95
24	24.00	9.53	140.87	10.02
26	26.00	9.53	152.69	9.24
28	28.00	9.53	164.59	8.57
30	30.00	9.53	176.65	7.99
32	32.00	9.53	188.40	7.49
34	34.00	9.53	200.31	7.04
36	36.00	9.53	212.21	6.65

۴ ـ ۹ ـ مقاومت کابل مسی

مقاومت کابل تقسیم در بستر را نصف مقاومت طولی کل کابل تقسیم درنظر می‌گیریم زیرا همهٔ شدت جریان در تمام طول کابل جاری نمی‌باشد و در نقاط انشعاب هر یک از آندها، بخشی از آن خارج می‌شود.[۲۱]

۲ / مقاومت کابل تقسیم (کابل مثبت) + مقاومت کابل اتصالی از منبع برق مستقیم به بستر آندی (کابل مثبت) + مقاومت کابل اتصالی از لوله به منبع برق مستقیم (کابل منفی) = مقاومت کابل

$$R_{Cable} = \frac{\rho L}{S} \qquad (۲۶ ـ ۴)$$

R_C مقاومت کابل (ohm)

ρ مقاومت مخصوص مس (ohm - m)

L طول کابل (m)

S سطح مقطع کابل (m^2)

برای کابل مسی و براساس شمارهٔ استاندارد و با اعمال ضرایب لازم برای تبدیل واحد:

$$R = \frac{0.01776 \times L}{S} \qquad (۲۷ ـ ۴)$$

L طول کابل (m)

S شمارهٔ استاندارد کابل (سطح مقطع برحسب mm^2)

جدول ۴ ـ ۹ ـ مقاومت واحد طول کابل برحسب اندازهٔ استاندارد آن [۵]

اندازهٔ استاندارد کابل	سطح مقطع کابل (mm^2)	مقاومت کابل در $20^\circ C$ (ohm / Kg)
1 X 4	3.97	4.61
1 X 6	5.95	3.08
1 X 10	10.02	1.83
1 X 16	15.89	1.15
1 X 25	25.18	0.727
1 X 35	34.93	0.524
1 X 50	47.28	0.387
1 X 70	68.34	0.268
1 X 95	94.76	0.193
1 X 120	119.75	0.153
1 X 150	147.11	0.124

۴ ـ ۱۰ ـ مقاومت پوشش

$$R_{Coat} = r_{cs} / S_{Coated} \qquad (۲۸ ـ ۴)$$

R_{Coat} مقاومت پوشش (ohm)

r_{cs} مقاومت پوشش سازه در واحد سطح

S_{Coated} سطح پوشش‌دار سازه (m^2)

جدول ۴ ـ ۱۰ ـ مقاومت واحد سطح پوشش برحسب نوع آن

نوع پوشش	مقاومت پوشش در واحد سطح (ohm - m^2)
Bitumen, Coaltar Enamel	4000
Coaltar Epoxy, FBE	2000
Plastic Tape (Polyethylene)	2500

روابط دیگر: [۲۲]

$$R_{Coat} = 262.d.R_L \qquad (۲۹ ـ ۴)$$

$$R_K = (R_S.R_L)^{0.5} \qquad (۳۰ ـ ۴)$$

$$\alpha = \frac{R_S}{R_K} \qquad (۳۱ ـ ۴)$$

d ضخامت پوشش

R_S مقاومت طولی خط لوله

R_K مشخصه مقاومتی خط لوله

R_L مقاومت نشتی لوله

α عدد ثابت (براساس شیب نمودار پتانسیل لوله نسبت به فاصله از آند)

جدول ۴ ـ ۱۱ ـ مقاومت واحد سطح لوله برحسب کیفیت پوشش و مقاومت مخصوص خاک

کیفیت پوشش	مقاومت مخصوص خاک	مقاومت واحد سطح پوشش (μ . ohm / ft^2)
عالی (راندمان > ۹۰٪)	بالا	۱۰ ـ ۱
خوب (راندمان ۹۰ ـ ۸۰٪)	بالا	۵۰ ـ ۱۰
عالی (راندمان > ۹۰٪)	کم	۱۰۰ ـ ۵۰
خوب (راندمان ۹۰ ـ ۸۰٪)	کم	۲۵۰ ـ ۱۰۰
متوسط (راندمان ۸۰ ـ ۷۰٪)	کم	۵۰۰ ـ ۲۵۰
ضعیف (راندمان < ۷۰٪)	کم	۱۰۰۰ ـ ۵۰۰

۴ـ۱۱ـ رکتیفایر

$$\sum_{i=1}^{n} I_{i(tr)} = N I_{tr} \geq I_{total} \qquad (۳۲ـ۴)$$

$$\sum_{i=1}^{n} V_{i(tr)} = N V_{tr} \geq V_{min(tr)} \qquad (۳۳ـ۴)$$

$$R_{max(tr)} \geq R_{circuit} \qquad (۳۴ـ۴)$$

$$R_{circuit} = R_{pipe} + P_{cable} + R_{coat} + R_{groundbed} \qquad (۳۵ـ۴)$$

$$V_{min(tr)} = I_{total} \cdot R_{circuit} \cdot K + V_{B.V} \qquad (۳۶ـ۴)$$

$$R_{max(tr)} = \frac{V_{tr} - V_{BV}}{I_{total} / N \cdot K} \qquad (۳۷ـ۴)$$

$I_{(tr)}$ شدت‌جریان خروجی رکتیفایر (amps)
$V_{(tr)}$ ولتاژ خروجی رکتیفایر (volts)
I_{total} شدت جریان حفاظتی کل (amps)
$R_{circuit}$ مقاومت مدار (ohms)
$V_{B.V}$ ولتاژ برگشتی (volts)
$V_{min(tr)}$ مینیمم ولتاژ درخواستی از رکتیفایر (volts)
$R_{Max(tr)}$ ماکزیمم مقاومت قابل تحمل رکتیفایر (ohms)
N تعداد رکتیفایر
K ضریب ایمنی

راندمان رکتیفایر (Rectifier Efficiency)

$$\text{راندمان رکتیفایر } (\%) = \frac{\text{توان خروجی برق مستقیم}}{\text{توان ورودی برق متناوب}} \times 100 = \frac{I_{DC} \cdot V_{DC}}{I_{AC} \cdot V_{AC} \cdot K} \times 100 \qquad (۳۸ـ۴)$$

I_{DC} شدت‌جریان خروجی رکتیفایر (amps)
V_{DC} ولتاژ خروجی رکتیفایر (volts)
I_{AC} شدت‌جریان ورودی به رکتیفایر (amps)
V_{AC} ولتاژ برق متناوب (volts)
K ضریب توان

با استفاده از روش (Watlhour meter Method) داریم:

$$\text{راندمان رکتیفایر} = \frac{I_{DC} \cdot V_{DC} \cdot r}{36 \cdot K} \qquad (۳۹ـ۴)$$

$Secs\ /\ revolution = r$
$meter\ Constant = k$

۴ـ۱۲ـ مقاومت مخصوص خاک

به‌منظور محاسبهٔ مقاومت مخصوص خاک در روش چهارمیله‌ای ونر، پس از اندازه‌گیری، برحسب فاصلهٔ میله‌ها، مقاومت خاک خوانده می‌شود و سپس براساس روابط زیر، محاسبات انجام می‌شود. [۵]

$$R_i = \frac{\rho_i}{2\pi X_i} \qquad (۴۰-۴)$$

$$\frac{1}{R'_i} = \frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_{i-1}} \qquad (۴۱-۴)$$

$$X'_i = X_i - X_{i-1} \qquad (۴۲-۴)$$

$$\rho'_i = 2 \times 100\, \pi\, X'_i\, R'_i \qquad (۴۳-۴)$$

$$\rho = \frac{\Sigma \rho'_i}{n} \qquad (۴۴-۴)$$

R_i مقاومت خاک (اندازه‌گیری شده توسط دستگاه) تا عمق i متری (ohms)

X_i فاصلهٔ میله‌ها (عمق i متری اندازه‌گیری) (m)

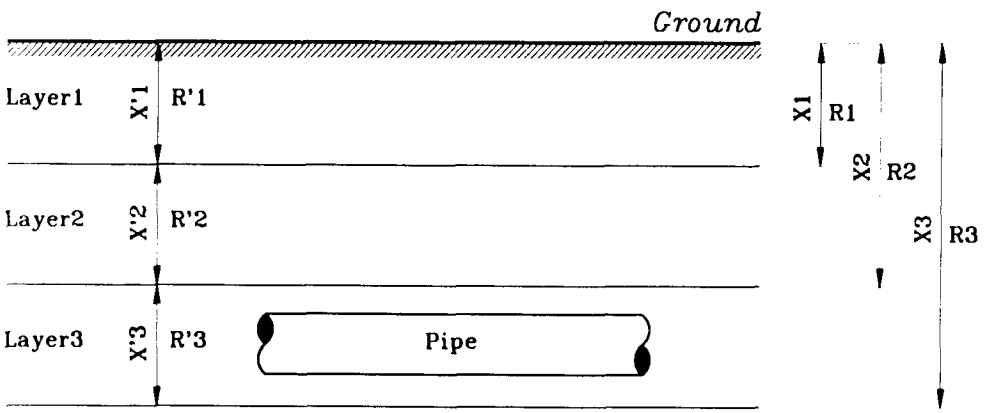
ρ_i مقاومت مخصوص خاک در عمق i متری (ohm - cm)

R'_i مقاومت خاک در لایهٔ i متری (ohms)

X'_i ارتفاع لایهٔ i متری (m)

ρ'_i مقاومت مخصوص خاک در لایهٔ i متری (ohm - cm)

ρ مقاومت مخصوص میانگین خاک (ohm - cm)



شکل ۴ ـ ۷ ـ نحوهٔ محاسبهٔ مقاومت مخصوص لایه‌های مختلف خاک

۴ـ۱۳ـوزن پشت‌بند

$$m = (\rho \cdot V) / 1000 \qquad (۴۵ـ۴)$$

m وزن مـــادهٔ پشت‌بند (kg)

ρ دانسیتهٔ مواد پشت‌بند (gr / cm^3)

$$V_{Cylindrical} = \pi \cdot (\frac{D}{2})^2 \cdot L \cdot 100 \qquad (۴۶ـ۴)$$

$$V_{Rectangular} = W^2 \cdot L \cdot 100 \qquad (۴۷ـ۴)$$

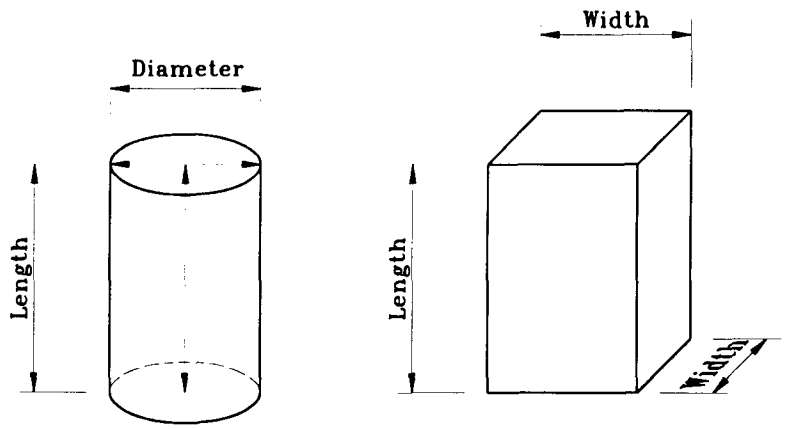
$V_{Cylindrical}$ حجم ستون پشت‌بند استـــوانـــه‌ای (cm^3)

$V_{Rectangular}$ حجم ستون پشت‌بند مکعب‌مستطیل (cm^3)

L ارتفـاع یـا طـول ستون پشت‌بنـد (m)

D قطـــر استـــوانـــه (cm)

W عرض مکعب‌مستطیل (cm)



Cylindrical Hole ***Rectangular Hole***

۴ـ۱۴ـالکترود مرجع

جدول ۴ـ۱۲ ـ تبدیل الکترودهـای مرجع مختلف به $Cu / CuSO_4$

پتانسیل برحسب الکترود مرجع $Cu / CuSO_4$	
پتانسیل خوانده شده برحسب الکترود Ag / AgCl	+ ۰/۰۱- volts
پتانسیل خوانده شده برحسب الکترود کـالومل (۰/۱N)	+ ۰/۰۲۱+ volts
پتانسیل خوانده شده برحسب الکترود کـالومل (۱N)	+ ۰/۰۳۲- volts
پتانسیل خوانده شده برحسب الکترود کـالومل (اشباع‌شده)	+ ۰/۰۷۲- volts
پتانسیل خوانده شده برحسب روی خـالـص	+ ۱/۱- volts

۴ـ۱۵ـ طول تحت حفاظت سیستم حفاظت کاتدی

شعاع حفاظتی سیستم، بستگی به فاصلهٔ بستر آندی نسبت به لوله و طول لوله دارد. عبور جریان حفاظتی در لوله، موجب افت ولتاژی در امتداد خط می‌شود.

به‌منظور محاسبهٔ طول تحت حفاظت داریم: [۲۲ و ۲۳]

$$E_x = E_m \cosh a(L-x) \qquad (۴۸-۴)$$

E_x پتانسیل نقطهٔ x (اختلاف پتانسیل بین نقطهٔ تزریق جریان و نقطه‌ای به فاصلهٔ x از وسط لوله)؛

E_m ولتاژ انتهای لوله (x = L) (پتانسیل لوله در شرایط عادی)؛

a ثابتی برحسب مقاومت واحد طول لوله (r) و ضریب هدایت پوشش عایق (g)؛

$2L$ طول لوله (فرض شده که جریان در نقطهٔ میانی لوله تزریق می‌شود)؛

x نقطه‌ای به فاصلهٔ x از وسط لوله؛

$$a = \sqrt{r.g} \qquad (۴۹-۴)$$

براین اساس، پتانسیل نقطهٔ اتصال تزریق جریان (x = 0) برابر است با:

$$E_A = E_m \cosh(aL) \qquad (۵۰-۴)$$

معمولاً مقدار E_A از یک مقدار خاصی به‌دلیل صدمه‌ندیدن پوشش، نمی‌تواند بیشتر باشد برای مثال: $E_A = 2.1$.

روابط فوق درصورت یکنواختی کامل یا تقریبی وزن لوله، نوع پوشش آن و مقاومت مخصوص خاک و عدم وجود اتصالات غیرمرتبط در خط صادق می‌باشند.

$$L = \frac{\cosh^{-1}(E_A/E_m)}{a} \qquad (۵۱-۴)$$

L شعاع تحت حفاظت یک سیستم C.P

۴ـ۱۶ـ فاصلهٔ بستر آندی تا خط لولهٔ حفاظت شده

به‌منظور توزیع یکنواخت جریان حفاظتی در خط لوله، معمولاً حداقل فاصله‌ای بین بستر آندی و سازهٔ مورد حفاظت در نظر گرفته می‌شود. علت انتخاب یک فاصلهٔ حداقل آن است که به‌دلیل دانسیتهٔ جریان بالا در نزدیکی بستر آندی، افت ولتاژ در آنجا بالا خواهد بود ولی در فواصل دورتر، افت ولتاژ محسوس نبوده و جریان یکنواخت خواهد بود. [۱۱]

$$V_x = \frac{I.\rho}{20.\pi.y} \ln \frac{y + \sqrt{x^2+y^2}}{x} \qquad (۵۲-۴)$$

V_x پتانسیل در نقطهٔ X ناشی از جریان حفاظتی بستر (volts)

I جریان خروجی از بستر آندی (amps)

ρ مقاومت مخصوص خاک (ohm - cm)

y طول آند (ft)

x فاصله از آند (ft)

۴ ـ ۱۷ ـ فاصلهٔ سازهٔ خارجی و بستر آندی

به‌منظور جلوگیری از ایجاد جریان‌های سرگردان روی سازهٔ خارجی، فاصلهٔ بستر آندی و سازهٔ خارجی باید از رابطهٔ زیر پیروی نماید:

$$D \geq (I.\rho)/(2.\pi.V) \qquad (۵۳ ـ ۴)$$

D حداقل فاصلهٔ بستر آندی از سازهٔ خارجی (m)

ρ مقاومت مخصوص خاک (ohm - m)

I جریان خروجی از بستر آندی (amps)

V پتانسیل خاک در حداقل فاصلهٔ سازه از بستر (volts)

این مقدار در نزدیکترین نقطهٔ سازهٔ خارجی به بستر آند نباید از ۲ / ۰ ولت بیشتر باشد.

همچنین می‌توان جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی را برای حذف جریان‌های سرگردان با استفاده از روابط زیر محاسبه نمود.

$$RV_g = \Delta V_g / I_{test} \qquad (۵۴ ـ ۴)$$

$$\Delta V_g = V_{g(off)} - V_{g(on)} \qquad (۵۵ ـ ۴)$$

$V_{g(on)}$ پتانسیل لوله نسبت به خاک هنگام اعمال جریان (volts)

$V_{g(off)}$ پتانسیل لوله نسبت به خاک بدون اعمال جریان (volts)

I_{test} جریان آزمایشی اعمالی (amps)

ΔV_g تغییر ولتاژ ناشی از اعمال جریان در نقاط آزمایش

$$I_n = \Delta V_{gn} / RV_g \qquad (۵۶ ـ ۴)$$

I_n مقدار جریان لازم برای حذف جریان‌های سرگردان

$$\Delta V_{gn} = V_{g(min)} - V_{ga} \qquad (۵۷ ـ ۴)$$

V_{ga} پتانسیل حفاظتی مطلوب (volts) برابر با معیار انتخابی پتانسیل می‌باشد.

$V_{g(min)}$ پایین‌ترین مقدار متوسط پتانسیل (volts)

برای به‌دست‌آوردن $V_{g(min)}$ در یک دورهٔ زمانی مشخص، در محل تقاطع سازه‌ها و جایی‌که احتمال جریان سرگردان می‌رود، پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود و برحسب زمان رسم می‌گردد.