٨١/١٠/٢١

بسم الله الرحمن الرحيم

٤٢١٨٨

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکدهٔ مهندسی مواد

نرم‌افزار طراحی سیستم حفاظت کاتدی لوله‌های مدفون در خاک

پایان‌نامهٔ تحصیلی کارشناسی‌ارشد رشتهٔ خوردگی و حفاظت از مواد

سینا فضل‌اللهی

٤٢١٨٨

۱۳۸۱ /۴/ ۳۰

اساتید راهنما

دکتر احمد ساعتچی

دکتر محمدعلی گلعذار

استاد مشاور

دکتر حسین ادریس

۱۳۸۰

٤٢١٨٨

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی‌ارشد رشته خوردگی و حفاظت فلزات آقای سینا فضل‌اللهی

تحت عنوان

نرم‌افزار طراحی سیستم حفاظت کاتدی لوله‌های مدفون در خاک

در تاریخ ۸۰/۸/۷ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب قرار گرفت.

۱ ـ اساتید راهنمای پایان‌نامه :	دکتر احمد ساعتچی ـ دکتر محمدعلی گلعذار
۲ ـ استاد مشاور پایان‌نامه:	دکتر حسین ادریس
۳ ـ استاد داور ۱:	دکتر محمود پاکشیر
۴ ـ استاد داور ۲:	دکتر غلامرضا آریانپور
۵ ـ مسئول تحصیلات تکمیلی دانشکده:	دکتر احمد ساعتچی

بدین‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را نسبت به اساتید راهنما جناب آقای دکتر احمد ساعتچی و جناب آقای دکتر محمدعلی گلعذار و استاد مشاور جناب آقای دکتر حسین ادریس ابراز می‌دارم.

از اساتید ممتحن جناب آقای دکتر محمود پاکشیر از دانشگاه شیراز و جناب آقای دکتر غلامرضا آریانپور، قدردانی می‌گردد.

از آقایان مهندس حسینی، مدیر محترم دفتر تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای اصفهان و مهندس قربانی از نیروگاه اصفهان به‌دلیل فراهم آوردن امکان انجام این پروژه و آقای مهندس پویا پیرزاده از مرکز تحقیقات مخابرات، به‌دلیل همکاری در برنامه‌نویسی پروژه تشکر می‌گردد.

همچنین از آقایان مهندس رضا الماسی از امور خطوط لولهٔ گاز مرکز و غرب، مهندس امید بدرخانی از مرکز تحقیقات نیرو، مهندس امیری از شرکت صاف‌آب، مهندس عباس صادقی از آموزش شرکت گاز و مهندس پوراعظمی از شرکت ملی گاز، به‌دلیل راهنمایی‌های ارزنده و دراختیار قرار دادن منابع و مدارک متعدد قدردانی می‌گردد.

کلیهٔ حقوق مادی مترتب بر نتایج
مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های
ناشی از تحقیق این پایان‌نامه (رساله)،
متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

هر کتابی که در او وصف تو نیست
قول هر کس که بود سوختنیست

تقدیم به
پیشگاه حضرت صاحب‌الزمان علیه‌السلام

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

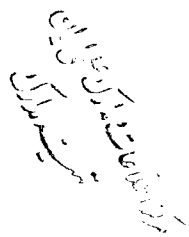
عنوان	صفحه
جدول ۲ ـ ۱ ـ ارتباط خورندگی خاک با مقاومت مخصوص آن	۵
جدول ۲ ـ ۲ ـ حداقل و حداکثر برخی از پارامترهای مشخصهٔ خاک	۶
جدول ۲ ـ ۳ ـ ارتباط خورندگی خاک با پتانسیل اکسیداسیون ـ احیاء	۶
جدول ۳ ـ ۱ ـ مشخصات انواع الکترودهای مرجع کالومل	۱۷
جدول ۳ ـ ۲ ـ خصوصیات انواع پوشش‌های همراه با سیستم حفاظت کاتدی	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.