

صلى الله عليه وسلم



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد  
گرایش خوردگی و حفاظت از مواد

**بررسی خوردگی تنش فولاد خط لوله گاز در محیط کربنات/بی کربنات  
با استفاده از تکنیک‌های الکتروشیمیایی**

نگارش:

سید داود حسینی

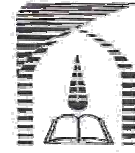
استاد راهنما:

دکتر تقی شهرابی فراهانی

استاد مشاور:

دکتر جابر نشاطی

بهمن ۱۳۸۹



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای سید داود حسینی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان بررسی خوردگی تنشی فولاد خط لوله گاز در محیط کربنات / بی کربنات با استفاده از تکنیک های الکتروشیمیایی در تاریخ ۱۳۸۹/۱۱/۹ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مواد - خوردگی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر تقی شهبازی فراهانی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر جابر نشاطی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر علیرضا صبور روح اقدم	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر سعیدرضا اله کرم	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر علیرضا صبور روح اقدم	دانشیار	

## آیین نامه چاپ پایان نامه های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت های علمی - پژوهشی دانشگاه است، بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

**ماده ۱:** در صورت اقدام به چاپ پایان نامه خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به "دفتر نشر آثار علمی" دانشگاه اطلاع دهد.

**ماده ۲:** در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

"کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد سید داود حسینی در رشته مهندسی مواد - خوردگی و حفاظت مواد است که در سال ۱۳۸۹ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر تقی شهرابی فراهانی و مشاوره جناب آقای دکتر جابر نشاطی از آن دفاع شده است."

**ماده ۳:** به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به "دفتر نشر آثار علمی" دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

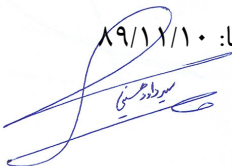
**ماده ۴:** در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

**ماده ۵:** دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

**ماده ۶:** اینجانب سید داود حسینی دانشجوی رشته مهندسی مواد - خوردگی و حفاظت مواد مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: سید داود حسینی

تاریخ و امضا: ۸۹/۱۱/۱۰



دستور العمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران لازم است اعضای هیات علمی دانشجویان دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان نامه و رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱: حقوق مادی و معنوی پایان نامه ها / رساله های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هر گونه بهره برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین نامه ها و دستورالعمل های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی می باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما نویسنده مسئول مقاله باشند. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان نامه / رساله نیز منتشر می شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آیین نامه های مصوب انجام می شود. ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره های ملی، منطقه ای و بین المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه / رساله و تمامی طرح های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هر گونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.



سرپرست

این پایان نامه با حمایت و پشتیبانی شرکت ملی گاز  
ایران اجرا شده است

تقدیم به

# پدر و مادر عزیزم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خود گذشتگی،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در سردترین روزگاران بهترین

پشتیبان است.

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهِشان به

شجاعت می‌گراید.

و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند.

## تشکر و قدردانی

پروردگار متعال را سپاس می‌گویم که توفیق اجرای این تحقیق را تحت عنوان پایان‌نامه کارشناسی ارشد عنایت فرمود. آرزو دارم که این تحقیق و تحقیق‌های دیگری که انجام خواهم داد، بهانه‌ای برای کشف قدرت بی‌انتهای او باشد و حرکتی در جهت رضای او.

از استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر تقی شهرابی، که راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده داشتند و در طول انجام این تحقیق مشوق همیشگی من بودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. بی‌شک اگر پیگیری‌ها و مساعدت‌های ایشان نبود، این تحقیق به نتایج ارزنده‌ای دست نمی‌یافت و به سرانجام نمی‌رسید.

از جناب آقای دکتر جابر نشاطی که مشاوره این پایان‌نامه را بر عهده داشتند و در روند انجام تحقیق از هیچ کمکی دریغ نوزیدند، سپاسگزاری می‌نمایم.

از جناب آقای مهندس منوچهر آذریان که سمت مشاور صنعتی این پروژه را بر عهده داشتند و تجربیات کاری خود را در اختیار بنده قرار دادند، قدردانی می‌نمایم.

و در پایان از همه دوستانم در آزمایشگاه خوردگی آقایان علی اکبر اسکویی، اسماعیل صادقی مرشت، سید احمد لاجوردی، حسین حسن‌نژاد، احسان صائب نوری و همچنین جناب مهندس هادی نصیری وطن، مسئول آزمایشگاه خوردگی، که در طول انجام تحقیق مرا یاری کردند، صمیمانه قدردانی می‌کنم.



## چکیده

در این تحقیق خوردگی تنشی فولاد خط لوله X65 در محیط کربنات/بی کربنات pH بالا مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا پس از تعیین محدوده پتانسیل ترک برداری فولاد X65 در محیط کربنات/بی-کربنات یک نرمال، با استفاده از آزمون پلاریزاسیون، پتانسیل‌های کاتدی مختلف در حین آزمون کشش با نرخ کرنش  $10^{-6}$  بر ثانیه اعمال شدند. در این مرحله ثابت شد که فقط نمونه‌ای که در طول آزمایش SSRT به صورت پتانسیواستاتیک در پتانسیل  $650 \text{ mV}_{\text{SCE}}$  بوده است دچار ترک برداری خوردگی تنشی شده است. در تصاویر متالوگرافی، وجود ترک‌های ثانویه بین دانه‌ای در نزدیکی مقطع شکست نمونه قرار گرفته در پتانسیل  $650$  میلی‌ولت (SCE) ثابت کرد که یک شکست بین دانه‌ای حاکم است. در مرحله دوم از تحقیق جهت بررسی بیشتر شرایط محیطی، اثر دمای محلول در حین آزمون SSRT بررسی شد و نتایج نشان داد که با افزایش دمای محلول، سرعت ترک برداری افزایش می‌یابد و در نتیجه حساسیت به خوردگی تنشی ایجاد شده، افزایش می‌یابد. در پایان با اعمال شرایط مناسب برای ایجاد SCC در فولاد X65 (پتانسیل ترک برداری و دما)، تغییرات پتانسیل و جریان الکتروشیمیایی (نویز الکتروشیمیایی) به طور همزمان اندازه‌گیری و ثبت شد. آنالیز داده‌ها به روش آماری و آنالیز در قلمرو فرکانس داده‌های حاصل از بررسی این داده‌ها، نشان داد که نویز الکتروشیمیایی می‌تواند یک روش مناسب برای پایش خوردگی تنشی در فولاد خط لوله و تشخیص شروع ترک برداری و تخمین زمان شکست باشد.

**کلمات کلیدی:** خوردگی تنشی pH بالا، فولاد خط لوله X65، پتانسیل کاتدی، دمای محلول، نویز

الکتروشیمیایی.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
<b>فصل اول: مقدمه</b> .....	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- اهداف	۳
۳-۱- طرح کلی پایاننامه	۴
<b>فصل دوم: مروری بر منابع</b> .....	۵
۱-۲- مقدمه	۶
۲-۲- خوردگی تنشی	۶
۱-۲-۲- پارامترهای مؤثر در خوردگی تنشی	۷
۲-۲-۲- مکانیزمهای رایج در خوردگی تنشی	۷
۳-۲-۲- روشهای جلوگیری از خوردگی تنشی	۹
۴-۲-۲- آزمون کشش سرعت کرنش آهسته	۱۰
۳-۲- SCC خطوط لوله	۱۳
۱-۳-۲- عوامل مداخله کننده در SCC خطوط لوله	۱۸
۴-۲- SCC pH بالا	۲۲
۱-۴-۲- مکانیزم SCC pH بالا	۲۴
۲-۴-۲- اثر پتانسیل بر خوردگی تنشی در شرایط pH بالا	۲۷
۳-۴-۲- اثر دما بر خوردگی تنشی pH بالا	۲۹
۵-۲- مروری بر روش نوین الکتروشیمیایی	۳۱
1-5-2- اندازه گیری نوین الکتروشیمیایی	۳۱
2-5-2- تفسیر نوین الکتروشیمیایی	۳۲
۲-۵-۳- بررسی خوردگی تنشی با استفاده از نوین الکتروشیمیایی	۳۶
<b>فصل سوم: روش تحقیق</b> .....	۴۰
۱-۳- مقدمه	۴۱
۲-۳- ساخت دستگاه آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته (SSRT)	۴۱
۱-۲-۳- ساختار دستگاه SSRT	۴۲
۲-۲-۳- نرم افزار ارتباط کاربر با دستگاه	۴۴

۴۵	محفظه آزمون SSRT	۳-۲-۳
۴۶	فولاد خط لوله مورد استفاده	۳-۳
۴۶	آماده سازی نمونه	۴-۳
۴۸	محلول آزمایش	۵-۳
۴۹	تعیین خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد خط لوله مورد استفاده در تحقیق	۶-۳
۴۹	آزمون پلاریزاسیون فولاد خط لوله X65 در محلول کربنات سدیم/بی کربنات سدیم	۷-۳
۵۰	آزمون کشش با نرخ کرنش آرام (SSRT)	۸-۳
۵۲	بررسی اثر پتانسیل کاتدی بر نمونه فولاد خط لوله در حین آزمون SSRT	۹-۳
۵۳	بررسی اثر دمای محلول بر خوردگی تنش فولاد X65	۱۰-۳
۵۳	اندازه گیری نويز الكتروشیمیایی در حین آزمایش SSRT فولاد X65	۱۱-۳
۵۶	مشاهدات ریزساختاری و بررسی مقطع شکست	۱۲-۳
۵۷	<b>فصل چهارم: نتایج و بحث</b>	
۵۸	مقدمه	۱-۴
۵۸	بررسی ریزساختار فولاد X65	۲-۴
۵۹	بررسی خواص مکانیکی فولاد خط لوله API 5L X65	۳-۴
۶۰	بررسی عملکرد فولاد خط لوله X65 در معرض محلول کربنات/بی کربنات pH بالا	۴-۴
۶۱	بررسی نتایج اثر اعمال پتانسیل کاتدی بر خوردگی تنش فولاد خط لوله X65	۵-۴
۷۰	بررسی نتایج اثر دمای محلول بر خوردگی تنش فولاد خط لوله API 5L X65	۶-۴
۷۳	بررسی نتایج حاصل از نويز الكتروشیمیایی در حین آزمون SSRT فولاد خط لوله X65	۷-۴
۷۳	آنالیز آماری داده ها	۱-۷-۴
۸۳	آنالیز داده ها در قلمرو فرکانس	۲-۷-۴
۸۹	<b>فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات</b>	
۹۰	نتایج	۱-۵
۹۲	پیشنهادات	۲-۵
۹۳	<b>مراجع</b>	
۹۷	ضمیمه أ - فرمول های محاسباتی مورد کاربرد در اندازه گیری های نويز الكتروشیمیایی	۹۷
۹۹	ضمیمه ب - تصاویر استریوی سطح شکست نمونه های فولادی در شرایط مختلف	۹۹

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۲.....	جدول ۱-۲. مقادیر سرعت کرنش بحرانی ایجاد کننده SCC در سیستم‌های فلز/محیط مختلف
۱۵.....	جدول ۲-۲. خواص pH SCC نزدیک خنثی و pH SCC بالا در خطوط لوله
۴۲.....	جدول ۱-۳. مشخصات قطعات به کار رفته در ساخت دستگاه
۴۶.....	جدول ۲-۳. جزئیات فولاد خط لوله مورد استفاده در تحقیق
۴۶.....	جدول ۳-۳. آنالیز عنصری فولاد خط لوله مورد استفاده در تحقیق
۶۰.....	جدول ۱-۴. خواص مکانیکی فولاد X65 مورد استفاده در تحقیق
	جدول ۲-۴. نتایج بدست آمده از آزمون‌های با نرخ کرنش آهسته فولاد خط لوله X65 کشیده شده با سرعت کرنش $10^{-6}$ بر ثانیه در محلول $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$ در دمای $50^\circ C$ سانتریگراد در پتانسیل‌های الکتروشیمیایی مختلف
۶۳.....	جدول 3-4. نتایج بدست آمده از آزمون‌های با نرخ کرنش آهسته فولاد خط لوله X65 کشیده شده با سرعت کرنش $10^{-6}$ بر ثانیه در محلول $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$ با دماهای مختلف قرار گرفته در پتانسیل $650$ میلی‌ولت (SCE)
۷۱.....	

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۲. مجموعه ترک مربوط به SCC فولاد خط لوله ..... ۱۴
- شکل ۲-۲. سطح مقطع متالوگرافی الف) pH بالا ب) pH نزدیک خنثی ..... ۱۶
- شکل ۳-۲. مدل یک ترک SCC که تا مرحله‌ی شکست رشد میکند ..... ۱۷
- شکل ۴-۲. شرایط ل ازم برای SCC در خطوط لوله ..... ۱۸
- شکل ۵-۲. نمودار پلاریزاسیون برای فولاد در دو نرخ روبش پتانسیل سریع و آهسته در محلول ( 1N  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + 1\text{N NaHCO}_3$ ) در دمای  $75^\circ\text{C}$  که محدوده‌های مختلف خوردگی را نشان میدهد ..... ۲۸
- شکل ۶-۲. سرعت رشد ترک به عنوان تابعی از پتانسیل حاصل از آزمونهای SSRT انجام شده در دمای  $55^\circ\text{C}$  در محلول  $1\text{N Na}_2\text{CO}_3 + 1\text{N NaHCO}_3$  ..... ۲۹
- شکل ۷-۲. محدوده پتانسیل ترکیب‌داری به عنوان تابعی از دما حاصل از آزمون SSRT انجام شده در محلول  $1\text{N Na}_2\text{CO}_3 + 1\text{N NaHCO}_3$  ..... ۳۰
- شکل ۸-۲. اثر دمای محلول بر سرعت رشد ترک اندازه‌گیری شده با استفاده از روش SSRT در محلولهای مختلف ..... ۳۰
- شکل ۹-۲. نمایی از مدار لازم برای اندازه‌گیری همزمان نویز پتانسیل و جریان ..... ۳۲
- شکل ۱-۳. تصویری از دستگاه آزمون خوردگی تنشی با تکنیک کشش با سرعت کرنش آهسته ..... ۴۳
- شکل ۲-۳. تصویر سل ساخته شده جهت انجام آزمون SSRT ..... ۴۵
- شکل ۳-۳. جهت نمونه‌های آزمون با توجه به لوله ..... ۴۷
- شکل ۴-۳. مشخصات نمونه‌های تراشکاری شده جهت انجام آزمایشات نرخ کرنش آرام بر اساس استاندارد NACE TM0198 ..... ۴۸
- شکل ۵-۳. نمایی از سل مورد استفاده جهت بررسی رفتار خوردگی فولاد خط لوله در محیط کربنات/بیکربنات ..... ۵۰
- شکل ۶-۳. نمایی از روش به کار رفته جهت اعمال پتانسیل کاتدی در حین آزمون SSRT ..... ۵۲
- شکل ۷-۳. نمایی از روش به کار رفته جهت اندازه‌گیری نویز الکتروشیمیایی نمونه قرار گرفته در پتانسیل کاتدی مستعد به خوردگی تنشی در حین آزمایش SSRT ..... ۵۴
- شکل ۸-۳. تصویری از دستگاه اندازه‌گیری نویز الکتروشیمیایی مورد استفاده در تحقیق ..... ۵۵

شکل ۳-۹. تصویری از نمونه تحت آزمون SSRT و اعمال پتانسیل کاتدی و اندازه‌گیری نویز الکتروشیمیایی در حین آزمون SSRT. ۵۵

شکل ۴-۱. ریزساختار فولاد X65 محلول اچ ۲٪ نایتال. ۵۹

شکل ۴-۲. منحنی تنش کرنش فولاد خط لوله API 5L X65 کشیده شده در هوا. ۵۹

شکل ۴-۳. محدوده پتانسیل ترکیب‌داری در محلول کربنات/بی‌کربنات برای خوردگی تنشی pH بالای فولاد X65. ۶۱

شکل ۴-۴. منحنی تنش کرنش فولاد X65 کشیده شده با سرعت کرنش  $10^{-6}$  بر ثانیه در محلول. ۶۲

شکل ۴-۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست فولاد خط لوله X65 کشیده شده در هوا با سرعت کرنش  $10^{-6}$  بر ثانیه. ۶۴

شکل ۴-۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست فولاد خط لوله X65 کشیده شده با سرعت کرنش  $10^{-6}$  بر ثانیه در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  در دمای  $50^\circ C$  سانتیگراد در پتانسیل  $-250$  میلی ولت (SCE). ۶۴

شکل ۴-۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست فولاد خط لوله X65 کشیده شده با سرعت کرنش  $10^{-6}$  بر ثانیه در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  در دمای  $50^\circ C$  سانتیگراد در پتانسیل  $-650$  میلی ولت (SCE). ۶۶

شکل ۴-۸. تصویر میکروسکوپی از سطح مقطع نمونه قرار گرفته در پتانسیل  $-650$  میلی ولت (SCE) (محلول اچ نایتال ۲٪). ۶۶

شکل ۴-۹. تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست فولاد خط لوله X65 کشیده شده با سرعت کرنش  $10^{-6}$  بر ثانیه در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  در دمای  $50^\circ C$  سانتیگراد در پتانسیل  $-800$  میلی ولت (SCE). ۶۷

شکل ۴-۱۰. تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست فولاد خط لوله X65 کشیده شده با سرعت کرنش  $10^{-6}$  بر ثانیه در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  در دمای  $50^\circ C$  سانتیگراد در پتانسیل  $-1200$  میلی ولت (SCE). ۶۹

شکل ۴-۱۱. تصویر میکروسکوپی از سطح مقطع نمونه قرار گرفته در پتانسیل  $-1200$  میلی ولت (SCE) در دو بزرگنمایی مختلف (محلول اچ نایتال ۲٪). ۶۹

شکل ۴-۱۲. منحنی تنش - کرنش فولاد خط لوله X65 کشیده شده با سرعت کرنش  $10^{-6}$  بر ثانیه در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  در دماهای مختلف قرار گرفته در پتانسیل  $-650$  میلی ولت (SCE). ۷۰

شکل ۴-۱۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست فولاد خط لوله X65 کشیده شده با سرعت کرنش  $10^{-6}$  بر ثانیه در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  در دمای  $25^\circ C$  سانتیگراد. ۷۲

شکل ۴-۱۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست فولاد خط لوله X65 کشیده شده با سرعت کرنش  $10^{-6}$  بر ثانیه در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  در دمای  $50^\circ C$  درجه سانتیگراد..... ۷۲

شکل ۴-۱۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست فولاد خط لوله X65 کشیده شده با سرعت کرنش  $10^{-6}$  بر ثانیه در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  در دمای  $70^\circ C$  درجه سانتیگراد..... ۷۳

شکل ۴-۱۶. نمودار تغییرات پتانسیل و جریان بر حسب زمان در حین آزمون SSRT فولاد خط لوله X65 قرار گرفته در پتانسیل  $-650$  میلی‌ولت (SCE) در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^\circ C$  ..... ۷۴

شکل ۴-۱۷. نمودار تغییرات همزمان تنش و پتانسیل بر حسب زمان در حین آزمون SSRT فولاد خط لوله X65 قرار گرفته در پتانسیل  $-650$  میلی‌ولت (SCE) در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^\circ C$  ..... ۷۵

شکل ۴-۱۸. نمودار تغییرات همزمان تنش و جریان بر حسب زمان در حین آزمون SSRT فولاد خط لوله X65 قرار گرفته در پتانسیل  $-650$  میلی‌ولت (SCE) در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^\circ C$  ..... ۷۶

شکل ۴-۱۹. نمودار تغییرات همزمان انحراف استاندارد پتانسیل و تنش بر حسب زمان در حین آزمون SSRT فولاد خط لوله X65 قرار گرفته در پتانسیل  $-650$  میلی‌ولت (SCE) در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^\circ C$  ..... ۷۷

شکل ۴-۲۰. نمودار تغییرات همزمان انحراف استاندارد جریان و تنش بر حسب زمان در حین آزمون SSRT فولاد خط لوله X65 قرار گرفته در پتانسیل  $-650$  میلی‌ولت (SCE) در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^\circ C$  ..... ۷۸

شکل ۴-۲۱. نمودار تغییرات مقاومت نوپ بر حسب زمان در حین آزمون SSRT فولاد خط لوله X65 قرار گرفته در پتانسیل  $-650$  میلی‌ولت (SCE) در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^\circ C$  ..... ۷۹

شکل ۴-۲۲. نمودار تغییرات مقدار کورتزیز جریان در ساعتهای مختلف آزمایش SSRT فولاد X65 قرار گرفته در پتانسیل  $-650$  میلی‌ولت (SCE) در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^\circ C$  ..... ۸۰

شکل ۴-۲۳. نمودار تغییرات مقدار کورتزیز پتانسیل در ساعتهای مختلف آزمایش SSRT فولاد X65 قرار گرفته در پتانسیل  $-650$  میلی‌ولت (SCE) در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^\circ C$  ..... ۸۱

شکل ۴-۲۴. نمودار تغییرات مقدار اسکیونس جریان در ساعتهای مختلف آزمایش SSRT فولاد X65 قرار گرفته در پتانسیل  $-650$  میلی‌ولت (SCE) در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^\circ C$  ..... ۸۲

شکل ۴-۲۵. نمودار تغییرات مقدار اسکینوس پتانسیل در ساعتهای مختلف آزمایش SSRT فولاد X65 قرار گرفته در پتانسیل ۶۵۰- میلی‌ولت (SCE) در محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^{\circ}C$  ..... ۵۰

شکل ۴-۲۶. نمودار دانسیته توان طیفی جریان - فرکانس در ساعات مختلف آزمون SSRT فولاد خط لوله X65 قرار گرفته در پتانسیل ۶۵۰- میلی‌ولت (SCE) و محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^{\circ}C$  با استفاده از روش FFT ..... ۸۵

شکل ۴-۲۷. نمودار دانسیته توان طیفی جریان - فرکانس در ساعات مختلف آزمون SSRT فولاد خط لوله X65 قرار گرفته در پتانسیل ۶۵۰- میلی‌ولت (SCE) و محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^{\circ}C$  با استفاده از روش MEM (مرتبه ۱۵) ..... ۸۵

شکل ۴-۲۸. نمودار PSD پتانسیل - فرکانس در ساعات مختلف آزمون SSRT فولاد خط لوله X65 قرار گرفته در پتانسیل ۶۵۰- میلی‌ولت (SCE) و محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  در دمای  $50^{\circ}C$  با استفاده از روش FFT ..... ۸۶

شکل ۴-۲۹. نمودار دانسیته توان طیفی پتانسیل - فرکانس در ساعات مختلف آزمون SSRT فولاد خط لوله X65 قرار گرفته در پتانسیل ۶۵۰- میلی‌ولت (SCE) و محلول  $1N Na_2CO_3 + 1N NaHCO_3$  با دمای  $50^{\circ}C$  با استفاده از روش MEM (مرتبه ۱۵) ..... ۸۸



**فصل اول**

**مقدمه**

### ۱-۱- مقدمه

خوردگی تنش (SCC)<sup>۱</sup> نوعی ترک‌برداری متأثر از محیط است که در نتیجه هم‌افزایی بین تنش‌های کششی و یک محیط خورنده ایجاد می‌شود. SCC در خطوط لوله وقتی که ترک‌ها روی سطح خارجی خطوط لوله‌ی دفن شده جوانه می‌زنند، شروع می‌شود. سه عامل در ایجاد SCC دخیل هستند: ماده، تنش و محیط خورنده. وقتی ترک‌ها به اندازه کافی بزرگ می‌شوند، خط لوله نهایتاً به صورت ایجاد نشی یا انهدام، از سرویس خارج می‌شود. اکثر انهدام‌های خط لوله ایجاد شده توسط SCC، به اکوسیستم‌ها و جامعه انسانی اطراف آسیب رسانده و علاوه بر آن، با مختل شدن سرویس هزینه‌های اقتصادی زیادی نیز ایجاد کرده‌اند [۱].

در ایران حدود ۳۰۰۰۰ کیلومتر خطوط لوله گاز وجود دارد. قدمت برخی از این خطوط به حدود ۳۰ الی ۴۰ سال می‌رسد. ایجاد SCC در خطوط لوله ایران یک موضوع جدی است. با توجه به سابقه بروز موارد متعدد SCC در خطوط لوله گاز ایران، لازم است راهکارهایی که امروزه به طور عملی در رابطه با تشخیص و کنترل این پدیده در کشورهای صنعتی استفاده می‌شود مورد بررسی قرار گیرد.

تاکنون دو نوع مختلف خوردگی تنش در مورد خطوط لوله انتقال نفت و گاز مدفون در زمین شناسایی شده است: خوردگی تنشی pH بالا<sup>۲</sup> و خوردگی تنشی pH نزدیک خنثی<sup>۱</sup> [۲].

---

<sup>۱</sup> Stress Corrosion Cracking

<sup>۲</sup> High pH SCC

بر طبق بررسی‌های انجام شده [۳]، تاکنون، حدود ۱۰ مورد خوردگی تنش‌ی در خطوط لوله انتقال گاز ایران رخ داده است که ۵ مورد منجر به انفجار و در ۵ مورد دیگر نشتی ایجاد گردیده است. اکثر خوردگی‌های تنش‌ی ایجاد شده در ایران در محدوده‌ی خروجی ایستگاه‌های تقویت فشار ایجاد گردیده است. سوابق موجود نشان‌دهنده‌ی آن است که شرایط خوردگی تنش‌ی pH بالا در اطراف محیط لوله‌های انتقال گاز در ایران بیش از خوردگی تنش‌ی pH نزدیک خنثی مهیا بوده و تا کنون خوردگی تنش‌ی pH خنثی در سوابق شرکت گاز ثبت نشده است. هر چند ممکن است منشأ واقعی برخی از نشتی‌ها و حوادث که در قسمت‌های متأثر از حرارت جوشکاری (HAZ)<sup>۲</sup> به وجود آمده است خوردگی تنش‌ی pH خنثی باشد. با توجه به مطالب ذکر شده، تصمیم گرفته شد که خوردگی تنش‌ی pH بالای فولاد خطوط لوله X65 که بیشترین کاربرد را در خطوط لوله گاز ایران دارد، در این تحقیق مورد بررسی قرار گیرد.

### ۱-۲- اهداف

به طور کلی اهداف اصلی این تحقیق عبارتند از:

- تعیین محدوده پتانسیل ترک‌برداری فولاد خط لوله X65 در محیط کربنات/بی‌کربنات pH بالا با استفاده از آزمون کشش با نرخ کرنش آرام (SSRT)<sup>۳</sup> که یک آزمون تسریع شده آزمایشگاهی جهت بررسی خوردگی تنش‌ی می‌باشد.
- بررسی اثر دمای محلول کربنات/بی‌کربنات بر خوردگی تنش‌ی فولاد خط لوله X65 با استفاده از آزمون SSRT.
- بررسی اثر آماده‌سازی سطح و اثر ساچمه‌زنی بر خوردگی تنش‌ی فولاد X65 در محیط کربنات/بی‌کربنات pH بالا.

---

<sup>1</sup> Near Neutral pH SCC

<sup>2</sup> Heat Affected Zone

<sup>3</sup> Slow Strain Rate Tension

- بررسی امکان استفاده از آنالیز نويز الکتروشیمیایی در پایش خوردگی تنشی فولاد خط لوله و تشخیص زمان شروع ترک‌برداری با استفاده از اندازه‌گیری همزمان پتانسیل و جریان الکتروشیمیایی در طول انجام آزمون SSRT بر فولاد X65.

### ۱-۳- طرح کلی پایان‌نامه

در فصل دوم، در ابتدا پس از معرفی خوردگی تنشی، عوامل مؤثر، مکانیزم و روش بررسی SCC به مروری بر انواع خوردگی تنشی فولاد خط لوله و عوامل مؤثر پرداخته شده است. سپس با توجه به هدف تحقیق، پارامترهای مؤثر در خوردگی تنشی pH بالا با جزئیات بیشتری بررسی شده است. در بخش آخر از این فصل نیز به معرفی روش آنالیز نويز الکتروشیمیایی به عنوان یک روش جدید در پایش خوردگی پرداخته شده است و بخشی از کارهای مطالعاتی انجام شده در مورد بررسی خوردگی تنشی با استفاده از آنالیز نويز الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل سوم، تجهیزات و روند کارهای آزمایشگاهی انجام شده در تحقیق شرح داده شده است.

در فصل چهارم، نتایج حاصل از انجام تحقیق به طور مفصل ارائه شده است. پس از بررسی خواص ریزساختاری و مکانیکی فولاد مورد استفاده در تحقیق و بررسی رفتار خوردگی این فولاد در محیط کربنات/بی‌کربنات یک نرمال، اثر اعمال پتانسیل کاتدی و دمای محلول به طور کامل بررسی شده است. در پایان نیز داده‌های حاصل از اندازه‌گیری نويز الکتروشیمیایی حین آزمون SSRT فولاد X65 در محلول کربنات/بی‌کربنات بررسی و تحلیل شده است.

در فصل پنجم نتایج حاصل از انجام تحقیق به صورت کلی ارائه شده است و در پایان پیشنهاداتی جهت انجام تحقیقات گسترده‌تر در زمینه بررسی خوردگی تنشی فولاد خط لوله ارائه شده است.