دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

گرایش سازه‌های دریایی

عنوان:

خرابی خمیری پیش‌رونده در لوله‌های فولادی فراساحل دارای قرشدگی تحت بارگذاری تناوبی محوری

استاد راهنما

دکتر مصطفی زین‌الدینی

نگارش

مهدی عزتی

بهمن ماه ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیر:

اکنون که کار تهیه این پایان نامه به لطف ایزد منان به پایان رسیده است، بر خود لازم می بینم تا از استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر مصطفی زین الدینی که انجام این پایان نامه جز در سایه راهنمایی های ایشان میسر نبود کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

مهدی عزتی

زمستان ۹۱

چکیده

قطع و وصل جریان در حین بهره‌برداری از خطوط لوله فولادی انتقال نفت وگاز فراساحل، نیروهای تناوبی محوری کشش و فشار در خط ایجاد می‌کند که می‌توانند منجر به چین خوردگی، کمانش و یا خرابی خمیری پیش‌رونده در این خطوط شوند. این نوع از کاهش مقاومت موضعی غالباً بوسیله ناراستی‌های اولیه و خرابی‌های موجود در خط لوله تشدید می‌شود. از طرفی آسیب‌های ایجاد شده در خطوط لوله غیر مدفون مانند قرشدگی ناشی از عملیات حفاری، برخورد ابزارهای کششی در راستای افقی و مایل و یا برخورد لنگر کشتی در راستای قائم و دیگر وسایل تاثیر به سزایی بر ایمنی و عمر بهره‌برداری خطوط لوله دارد.

در این تحقیق با استفاده از دو روش عددی و آزمایشگاهی، تاثیر قرشدگی به شکل کروی بر پدیده خرابی خمیری پیش‌رونده در خطوط لوله‌های فراساحل تحت بارگذاری تناوبی محوری مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها بر روی لوله‌ای از درجه *X70* و نسبت قطر به ضخامت(*D/t*) ۲۲ انجام شده است. دو دسته کلی آزمایش بر روی نمونه‌های کوچک مقیاس انجام شده است. این نمونه‌ها به دو گروه سالم و دارای قرشدگی تقسیم بندی شده و به صورت جداگانه تحت بارگذاری یک‌سویه و تناوبی قرار گرفته‌اند. قرشدگی ایجاد شده در نمونه‌های آزمایشگاهی دارای عمق‌های نسبی(*X/D*) ۶، ۱۲ و ۱۸ درصد بوده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در نمونه‌های دارای قرشدگی امکان بروز خرابی پیش‌رونده به میزان زیادی تشدید می‌شود. در نمونه دارای قرشدگی، در شرایط بارگذاری یکسان نسبت به لوله سالم، نرخ رشد کرنش خمیری پیش رونده افزایش چشمگیری از خود نشان می‌دهد. در این حالت تعداد تناوب‌های بار محوری قابل تحمل در لوله‌های دارای قرشدگی به شکل قابل توجهی نسبت به لوله سالم کاهش یافته‌اند.

با استفاده از مدل اجزاء محدود، آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های سالم و دارای قرشدگی تحت بارهای یک‌سویه و تناوبی شبیه‌سازی شده‌اند. مشاهده شده است که، اگر مشخصات غیرخطی و سخت شوندگی مصالح با دقت خوبی تعریف شوند (با استفاده از آزمایش خواص مواد)، می‌توان به انطباق نسبتاً خوبی بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی دست یافت. در ادامه به مطالعه پارامترهای مختلف و تاثیر گذار بر روی پدیده خرابی پیش رونده، در لوله های سالم و دارای قرشدگی پرداخته شده است. پارامترهایی همچون، مقدار کرنش آغازین، دامنه بارگذاری تناوبی، عمق قرشدگی و نسبت قطر سنبه به قطر لوله(*d/D*) مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی: خرابی خمیری پیش‌رونده، بارگذاری تناوبی محوری، خطوط لوله فولادی،

قرشدگی، چین خوردگی

فهرست مطالب

فصل ۱: پیش‌درآمد ۱

۱-۱- کلیات ۲

۱-۲- بارهای وارد بر لوله‌های فراساحل ۴

۱-۲-۱- تاثیر فشار ۵

۱-۲-۲- تأثیر حرارت ۶

۱-۳- هدف و روش تحقیق ۷

۱-۴- مراحل تحقیق ۸

۱-۵- روند ارائه مطالب ۹

فصل ۲: خرابی خمیری پیشرونده ۱۰

۲-۱- کلیات ۱۱

۲-۲- بارگذاری یک سویه ۱۱

۲-۲-۲- اثر باوشینگر ۱۲

۲-۳- بارگذاری تناوبی ۱۳

۲-۴- مقایسه بین منحنی تنش-کرنش در بارگذاری یک سویه و تناوبی ۱۶

۲-۴-۱- کرنش خمیری پیشرونده میانگین ۱۶

۲-۴-۲- نرخ کرنش پیشرونده ۱۷

۲-۵- دلیل وقوع خرابی خمیری پیشرونده ۱۷

۲-۶- عوامل موثر بر خرابی خمیری پیشرونده ۱۸

۲-۶-۱- تاثیر تنش میانگین و دامنه تنش ۱۸

۲-۶-۲- تاثیر سخت شدگی و نرم شدگی ۲۰

۲-۶-۳- تاثیر سرعت بارگذاری ۲۲

۲-۷- مصالح مورد مطالعه ۲۴
۲-۸- مطالعات قبلی در زمینه خرابی خمیری پیشرونده در لوله‌های فولادی ۲۷
۲-۸-۱- مطالعات انجام شده بر روی لوله‌های سالم ۲۷
۲-۸-۲- مطالعات انجام شده بر روی لوله‌های دارای ناراستی ۳۳
فصل ۳: مبانی نظری ۴۰
۳-۱- کلیات ۴۱
۳-۲- رفتار مصالح تحت بارگذاری تناوبی ۴۱
۳-۳- مدل های سخت شوندگی/نرم‌شوندگی ۴۳
۳-۳-۱- مدل سخت شوندگی همسان دو خطی ۴۴
۳-۳-۲- مدل سخت شوندگی حرکتی دوخطی BKIN ۴۶
۳-۳-۳- مدل سخت شوندگی همسان غیرخطیNLISO ۴۷
۳-۳-۴- مدل سخت شوندگی حرکتی غیرخطی Chaboche ۱۹۹۰ ..... ۴۹
۳-۳-۵- ترکیب دو مدل NLISO,Chaboche ۵۱
۳-۴- ناراستی در لوله ۵۳
۳-۵- خوردگی ۵۵
۳-۶- ناراستی‌های مکانیکی ۵۸
۳-۷- رفتار لوله‌ها در مقابل فرورفتگی ۵۹
فصل ۴: مطالعات آزمایشگاهی ۶۴
۴-۱- کلیات ۶۵
۴-۲- آزمایش‌های خواص مواد ۶۵
۴-۲-۱- بررسی رفتار یک سویه ۶۵
۴-۲-۲- بررسی رفتار تناوبی ۶۸
۴-۲-۳- روش تناوب متعدد پایدار شده ۷۱

۴-۳- آماده سازی نمونه‌های اصلی ۷۵
۴-۳-۱- تراشکاری نمونه‌ها ۷۵
۴-۳-۲- اندازه‌گیری دقیق نمونه‌ها به روش اسکن سه بعدی ۷۹
۴-۴- سیستم‌های اندازه‌گیری و تجهیزات اعمال نیرو ۸۳
۴-۴-۱- اندازه‌گیری کرنش ۸۳
۴-۴-۲- اندازه‌گیری نیرو و تغییرمکان ۸۵
۴-۴-۳- دستگاه DATA LOGER ۸۵
۴-۴-۴- دستگاه INSTRON ۸۵
۴-۵- اعمال قرشدگی ۸۷
۴-۶- مشخصات و اطلاعات کلی آزمایش‌ها ۹۴
۴-۷- بارگذاری یک سویه ۹۵
۴-۷-۱- نمونه سالم($IM1$) ۹۵
۴-۷-۲- نمونه همراه با قرشدگی(DM) ۱۰۰
۴-۸- بارگذاری تناوبی ۱۰۳
۴-۸-۱- تاثیر عمق قرشدگی ۱۰۴
۴-۸-۲- تاثیر افزایش دامنه تنش ۱۱۷
۴-۸-۳- تاثیر افزایش کرنش آغازین ۱۳۲
۴-۸-۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۴۰
فصل ۵: شبیه‌سازی عددی ۱۴۴
۵-۱- کلیات ۱۴۵
۵-۲- مختصات هندسی مسئله ۱۴۶
۵-۳- تعریف المانها ۱۴۸
۵-۳-۱- لوله فولادی ۱۴۸

۵-۳-۲- سنبه و بستر ۱۵۱
۵-۴- شرایط مرزی و بارگذاری ۱۵۱
۵-۵- مصالح ۱۵۲
۵-۵-۱- مدل سازی سخت شوندگی کینماتیک خطی ۱۵۳
۵-۵-۲- مدل سخت شوندگی غیرخطی کینماتیک/همسان ۱۵۴
۵-۵-۳- تعیین پارامترهای سخت شوندگی همسان با استفاده از قانون نمایی ۱۵۴
۵-۵-۴- تعیین پارامترهای سخت شوندگی همسان از طریق داده های جدولی ۱۵۴
۵-۵-۵- تعیین پارامترهای سخت شوندگی حرکتی از طریق تعیین مستقیم پارامترها ۱۵۶
۵-۵-۶- تعیین مشخصات سخت شوندگی حرکتی با استفاده از نتایج آزمایش نیم تناوب کشش ۱۵۶
۵-۵-۷- تعیین مشخصات سخت شوندگی حرکتی با استفاده از داده‌های آزمایش تناوب‌های ثابت شده ۱۵۷
۵-۶- صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی با استفاده از مدل اجزاء محدود ۱۵۸
۵-۶-۱- شبیه‌سازی آزمایش کشش ۱۵۸
۵-۶-۲- شبیه‌سازی رفتار نمونه‌ها تحت بارگذاری جانبی ۱۵۹
۵-۶-۳- شبیه‌سازی رفتار اعضای لوله‌ای سالم و قرشده تحت بارگذاری یک‌سویه ۱۶۲
۵-۶-۴- شبیه‌سازی رفتار نمونه های سالم و قرشده تحت بارگذاری تناوبی ۱۶۵
۵-۷- بررسی عوامل مختلف بر کرنش خمیری پیش‌رونده ۱۶۷
۵-۷-۱- بارگذاری یک‌سویه ۱۶۸
۵-۷-۲- تاثیر عمق قرشدگی ۱۶۹
۵-۷-۳- تاثیر افزایش دامنه بارگذاری ۱۷۲
۵-۷-۴- تاثیر افزایش کرنش آغازین ۱۷۳
۵-۷-۵- تاثیر نسبت قطر سنبه به قطر لوله(d/D) ۱۷۵
۵-۸- نتیجه‌گیری ۱۷۸
فصل ۶: ۱۸۲

نتایج و تحقیقات آتی ۱۸۲
۶-۱- کلیات ۱۸۳
۶-۲- نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی ۱۸۳
۶-۲-۱- آزمایش یک سویه بر روی نمونه‌های فاقد قرشدگی ۱۸۳
۶-۲-۲- آزمایش تناوبی بر روی نمونه‌های فاقد قرشدگی ۱۸۴
۶-۲-۳- آزمایش یک سویه بر روی نمونه‌های دارای قرشدگی ۱۸۵
۶-۲-۴- آزمایش تناوبی بر روی نمونه‌های دارای قرشدگی ۱۸۶
۶-۳- نتایج حاصل از مطالعات عددی ۱۸۷
۶-۴- پیشنهاد برای تحقیق‌های آتی ۱۸۹
مراجع ۱۹۰
ضمائم ۱۹۵

فهرست اشکال

شکل (۱-۱) نمونه‌ای از سکوی ثابت در فراساحل ۲

شکل (۱-۲) نمونه ای از لوله اجرا شده در کف دریا ۳

شکل (۱-۳) لوله تحت تأثیر نیروی خارجی و داخلی [۱] ۵

شکل (۲-۱) منحنی تنش – کرنش یک لوله فولادی در بارگذاری یک‌سویه [۳] ۱۱

شکل (۲-۲) اثر باوشینگر [۴] ۱۲

شکل (۲-۳) بارگذاری تناوبی کنترل تنش با تنش میانگین [۴] ۱۴

شکل (۲-۴) کرنش خمیری پیشرونده [۵] ۱۴

شکل (۲-۵) کرنش خمیری پیشرونده به ازای تنش میانگین ثابت *MPa* 80[۸] ۱۹

شکل (۲-۶) کرنش خمیری پیشرونده به ازای دامنه تنش ثابت *MPa* 350 [۸] ۱۹

شکل (۲-۷) منحنی پاسخ ماده *25CDV4.11* به بارگذاری تناوبی [۱۲] ۲۰

شکل (۲-۸) منحنی پاسخ ماده فولاد ضد زنگ *SS304* به بارگذاری تناوبی [۱۲] ۲۱

شکل (۲-۹) روند رشد کرنش پیشرونده در یک ماده نرم شونده [۱۲] ۲۱

شکل (۲-۱۰) روند رشد کرنش پیشرونده در یک ماده سخت شونده [۱۲] ۲۲

شکل (۲-۱۱) تاثیر سرعت بارگذاری بر روی کرنش خمیری پیشرونده [۱۶] ۲۳

شکل (۲-۱۲) تاثیر سرعت بارگذاری بر کرنش خمیری پیشرونده [۷] ۲۳

شکل (۲-۱۳) تاثیر توقف چند ثانیه‌ای تنش در اوج و حضیض [۷] ۲۴

شکل (۲-۱۴)a)منحنی پاسخ ماده *CIS* به بارگذاری تناوبی b) نرخ کرنش پیشرونده در مقابل تعداد نوسانات مربوط به ماده *CIS* [۱۹] ۲۶

شکل (۲-۱۵) تغییر شکل ایجاد شده قبل از بارگذاری، پس از ۲۱۰ نوسان و پس از ۲۸۶ نوسان [۳] ۲۸

شکل (۲-۱۶) منحنی تنش کرنش تحت بارگذاری یک سویه در لوله ab)مسیر تنش بدون حضور فشار داخلی $a'b'$)مسیر تنش با حضور فشار داخلی[۲۹] ۳۰

شکل (۲-۱۷) روند کرنش خمیری پیشرونده در جهت کاهش طول[۳۱] ۳۲

شکل (۲-۱۸) تاثیر دامنه بارگذاری بر کرنش پیشرونده[۳۱]..... ۳۲
شکل (۲-۱۹) نحوه ایجاد کردن فرورفتگی در لوله [۳۲]..... ۳۴
شکل (۲-۲۰) یک نمونه از لوله پس از اعمال فرو رفتگی [۳۲]..... ۳۴
شکل (۲-۲۱) تاریخچه فشار داخلی اعمالی بر لوله [۳۲]..... ۳۵
شکل (۲-۲۲) پاسخ لوله به نوسانات فشار داخلی [۳۲]..... ۳۶
شکل (۲-۲۳) مدل‌سازی مصنوعی خوردگی [۳۴]..... ۳۶
شکل (۲-۲۴) برش‌کاری و ایجاد خوردگی با دستگاه *CNC* بر روی قطعه مورد نظر [۳۳]..... ۳۷
شکل (۲-۲۵) مقایسه خرابی ایجاد شده در آزمایشگاه (شکل راست) با نتایج عددی (شکل چپ) [۳۳]..... ۳۷
شکل (۲-۲۶) مقایسه کرنش ایجاد شده در لوله در قسمت سالم و دارای خوردگی [۳۳]..... ۳۸
شکل (۳-۱) حالت‌های مختلف پاسخ به بارگذاری تناوبی [۴]..... ۴۲
شکل (۳-۲) رفتار تنش-کرنش مدل *BISO* [۴۱]..... ۴۵
شکل (۳-۳) رفتار تنش-کرنش مدل *BKIN* [۴۱]..... ۴۶
شکل (۳-۴) رفتار تنش-کرنش مدل *NLISO* [۴۳]..... ۴۸
شکل (۳-۵) ارتباط میان تنش-کرنش سخت شوندگی غیر خطی حرکتی [۴۱]..... ۵۱
شکل (۳-۶) ترکیب سخت شوندگی حرکتی و همسان تحت بارگذاری یک سویه[۴۱]..... ۵۳
شکل (۳-۷) نمایی شماتیک از ناراستی در لوله [۲]..... ۵۵
شکل (۴-۱) نمایی کلی از دستگاه Wire cut..... ۶۶
شکل (۴-۲) نمایی از برش قطاع از لوله مادر..... ۶۶
شکل (۴-۳) ابعاد هندسی نمونه استاندارد آزمایش کشش. (واحد mm)..... ۶۷
شکل (۴-۴) نمایی از انجام آزمایش کشش ساده..... ۶۷
شکل (۴-۵) نمودار تنش – کرنش آزمایش کشش ساده..... ۶۸
شکل (۴-۶) نمایی کلی از قطعات ساخته شده برای محاسبه پارامترهای سخت شوندگی..... ۷۰

شکل (۴-۷) ابعاد قطعات ساخته شده برای انجام آزمایش های تناوبی کرنش ثابت و محاسبه پارامترهای سخت شوندگی(واحد *mm*) **۷۱**

شکل (۴-۸) تاریخچه تنش در مقابل زمان به ازای بارگذاری کرنش کنترل شده ۱/۵ درصد **۷۲**

شکل (۴-۹) تناوب‌های پایدار شده نمونه اول **۷۳**

شکل (۴-۱۰) نمودار تنش بازگشتی بر حسب کرنش غیر خطی **۷۴**

شکل (۴-۱۱) ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی **۷۷**

شکل (۴-۱۲) نمایی از نمونه آزمایشگاهی بعد از انجام تراشکاری **۷۷**

شکل (۴-۱۳) نمایی سه بعدی از اسکن نمونه‌های آزمایشگاهی **۷۸**

شکل (۴-۱۴) نمونه‌ای از یک دستگاه *CMM* تماسی **۷۹**

شکل (۴-۱۵) نحوه اندازه گیری سه بعدی توسط اسکنر نوری بر مبنای مثلث بندی **۸۱**

شکل (۴-۱۶) اسکنر نوری *ATOS* **۸۲**

شکل (۴-۱۷) محل علامت گذاری شده توسط کولیس و سطح آماده شده برای نصب کرنش‌سنج **۸۴**

شکل (۴-۱۸) نمای کلی لوله و کرنش‌سنج متصل شده همراه با ترمینال و سیم‌های مربوطه **۸۴**

شکل (۴-۱۹) نمایی از دستگاه DATA LOGER **۸۵**

شکل (۴-۲۰) نمای کلی از دستگاه INSTRON 8502 و صفحه کنترل بارگذاری دستگاه **۸۶**

شکل (۴-۲۱) نمایی کلی از اعمال قرشدگی در آزمایشگاه **۸۷**

شکل (۴-۲۲) نمایی از بستر لوله و سنبه **۸۸**

شکل (۴-۲۳) مقطع هندسی بلوک بستر لوله (واحد *mm*). طول بلوک برابر با ۶۵ میلیمتر است. **۸۸**

شکل (۴-۲۴) مشخصات هندسی سنبه (واحد *mm*) **۸۹**

شکل (۴-۲۵) نمودار نیرو- جابه‌جایی سنبه به ازای عمق‌های قرشدگی مختلف **۹۰**

شکل (۴-۲۶) نمایی کلی از نمونه‌های آزمایشگاهی پس از اعمال قرشدگی **۹۱**

شکل (۴-۲۷) نمایی از اسکن سه بعدی نمونه‌های آزمایشگاهی پس از اعمال قرشدگی **۹۱**

شکل (۴-۲۸) مقطع عرضی نمونه آزمایشگاهی به ازای عمق قرشدگی ۷ میلی‌متر. واحد(*mm*) **۹۲**

شکل (۴-۲۹) مقطع طولی نمونه آزمایشگاهی به ازای عمق قرشدگی ۷ میلی‌متر ۹۲
شکل (۴-۳۰) نمایی از محل قرارگیری کرنش‌سنج‌ها بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی ۹۳
شکل (۴-۳۱) کرنش‌های طولی و شعاعی ثبت شده توسط کرنش‌سنج‌ها به ازای قرشدگی ۴ میلی‌متر ۹۴
شکل (۴-۳۲) کرنش‌های طولی و شعاعی ثبت شده توسط کرنش‌سنج‌ها به ازای قرشدگی ۷ میلی‌متر ۹۴
شکل (۴-۳۳) تاریخچه زمانی کرنش‌های ثبت شده در نمونه *IC1* تحت بار محوری یک سویه ۹۶
شکل (۴-۳۴) مقایسه نمودارهای تنش-کرنش حاصل از کرنش‌سنج‌ها و دستگاه اعمال فشار *IM1* تحت بار محوری یک‌سویه ۹۷
شکل (۴-۳۵) روند وقوع چین خوردگی و رشد کردن آن تحت بارگذاری یک سویه محوری ۹۸
شکل (۴-۳۶) نمایی سه بعدی از نمونه تحت بار یک‌سویه حاصل از اسکن سه بعدی ۹۸
شکل (۴-۳۷) مقطع طولی نمونه تحت بار یک‌سویه حاصل از اسکن سه بعدی ۹۹
شکل (۴-۳۸) مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش به ازای عمق‌های ثرشدگی مختلف ۱۰۱
شکل (۴-۳۹) تصویری از قبل و بعد از خرابی نمونه دارای قرشدگی (*X/D*=6%) تحت نیروی محوری یک‌سویه ۱۰۲
شکل (۴-۴۰) مقایسه رفتار اعضای استوانه‌ای سالم و قرشده تحت بارگذاری یک‌سویه محوری ۱۰۲
شکل (۴-۴۱) تاریخچه بارگذاری تناوبی ۱۰۵
شکل (۴-۴۲) منحنی شماتیک تنش-کرنش در یکعضو لوله‌ای تحت بارگذاری فشاری یک‌سویه ۱۰۵
شکل (۴-۴۳) منحنی تنش-کرنش حاصل از دستگاه (*IC1*) ۱۰۶
شکل (۴-۴۴) تاریخچه زمانی کرنش محوری (*IC1*) ۱۰۷
شکل (۴-۴۵) نمودار رشد کرنش غیر خطی پیش‌رونده براساس تعداد تناوب‌های اعمال شده (نمونه *IC1*) ۱۰۸
شکل (۴-۴۶) منحنی تنش-کرنش حاصل از دستگاه (*DC1*) ۱۰۹
شکل (۴-۴۷) تاریخچه زمانی کرنش محوری (*DC1*) ۱۰۹
شکل (۴-۴۸) مقایسه نرخ کرنش پیش‌رونده در دو نمونه *IC1* و *DC1* ۱۱۰
شکل (۴-۴۹) تصویر قبل و بعد از بارگذاری تناوبی نمونه دوم (*DC1*) حاصل از اسکن سه بعدی ۱۱۰

شکل (۴-۵۰) منحنی تنش-کرنش حاصل از دستگاه (*DC2*) ۱۱۱
شکل (۴-۵۱) تاریخچه زمانی کرنش محوری (*DC2*) ۱۱۲
شکل (۴-۵۲) مقایسه نرخ کرنش پیش‌رونده در سه نمونه (*IC1*)، (*DC1*) و (*DC2*) ۱۱۳
شکل (۴-۵۳) تصویر قبل و بعد از بارگذاری تناوبی نمونه (*DC2*) حاصل از اسکن سه بعدی ۱۱۳
شکل (۴-۵۴) منحنی تنش-کرنش حاصل از دستگاه (نمونه *DC3*) ۱۱۴
شکل (۴-۵۵) تاریخچه کرنش محوری (نمونه *DC3*) ۱۱۴
شکل (۴-۵۶) مقایسه نرخ کرنش پیش‌رونده در سه نمونه (*IC1*)، (*DC1*)، (*DC2*) و (*DC3*) ۱۱۵
شکل (۴-۵۷) منحنی تنش-کرنش حاصل از دستگاه (نمونه *IC2*) ۱۱۸
شکل (۴-۵۸) تاریخچه کرنش محوری (نمونه *IC2*) ۱۱۸
شکل (۴-۵۹) سیر تکامل حلقه‌های هیسترزیس نمونه (*IC2*) ۱۱۹
شکل (۴-۶۰) مقایسه نرخ کرنش خمیری پیش‌رونده در دو نمونه *IC1* و *IC2* ۱۲۰
شکل (۴-۶۱) منحنی تنش کرنش حاصل از دستگاه (نمونه *DC4*) ۱۲۰
شکل (۴-۶۲) تاریخچه زمانی کرنش (نمونه *DC4*) ۱۲۱
شکل (۴-۶۳) مقایسه منحنی تنش-کرنش رو نمونه (*DC4*) و (*IC2*) ۱۲۱
شکل (۴-۶۴) مقایسه نرخ کرنش خمیری پیش‌رونده در نمونه‌های (*DC1*) و (*DC4*) ۱۲۲
شکل (۴-۶۵) منحنی تنش کرنش حاصل از دستگاه نمونه‌های (*DC5*) و (*DM*) ۱۲۳
شکل (۴-۶۶) تاریخچه زمانی کرنش (نمونه *DC5*) ۱۲۴
شکل (۴-۶۷) مقایسه نرخ کرنش خمیری در دو نمونه (*DC2*) و (*DC5*) ۱۲۵
شکل (۴-۶۸) منحنی تنش-کرنش حاصل از دستگاه نمونه *DC6* ۱۲۵
شکل (۴-۶۹) تاریخچه زمانی کرنش محوری نمونه *DC6* ۱۲۷
شکل (۴-۷۰) روند تکامل حلقه‌های هیسترزیس در نمونه *DC6* ۱۲۷
شکل (۴-۷۱) مقایسه نرخ کرنش خمیری پیش‌رونده در دو نمونه *DC6* و *DC3* ۱۲۸
شکل (۴-۷۲) نمایی ار نمونه (*DC6*) قبل و پس از بارگذاری ۱۳۰

شکل (۴-۷۳) مقایسه نرخ کرنش خمیری پیش‌رونده در نمونه‌های (*IC2*)، (*DC4*)، (*DC5*) و (*DC6*).....۱۳۱

شکل (۴-۷۴) منحنی تنش-کرنش حاصل از دستگاه (نمونه *IC3*) ۱۳۳

شکل (۴-۷۵) مقایسه نرخ کرنش پیش‌رونده در دونمونه (*IC3*) و (*IC2*) ۱۳۴

شکل (۴-۷۶) منحنی تنش-کرنش حاصل از دستگاه نمونه *DC7*.....۱۳۵

شکل (۴-۷۷) تاریخچه زمانی کرنش محوری نمونه *DC7*.....۱۳۵

شکل (۴-۷۸) مقایسه نرخ کرنش خمیری در دو نمونه *DC7* و *DC4*.....۱۳۶

شکل (۴-۷۹) مقایسه منحنی تنش-کرنش نمونه *DC8* تحت بارگذاری تناوبی و یک‌سویه..... ۱۳۷

شکل (۴-۸۰) مقایسه منحنی تنش-کرنش دو نمونه *DC8* و *DC5*..... ۱۳۷

شکل (۴-۸۱) تاریخچه کرنش محوری نمونه *DC8*..... ۱۳۸

شکل (۴-۸۲) مقایسه نرخ کرنش خمیری در دو نمونه *DC8* و *DC5*.....۱۳۹

شکل (۴-۸۳) مقایسه نرخ کرنش خمیری در نمونه‌های *IC3* و *DC7* و *DC8*.....۱۴۰

شکل (۵-۱) بررسی وضعیت هندسی مسئله.....۱۴۷

شکل (۵-۲) ابعاد هندسی سنبه مورد استفاده در مدل‌سازی.....۱۴۷

شکل (۵-۳) تفاوت المانهای پوسته‌ای متداول و پیوسته.....۱۵۰

شکل (۵-۴) نحوه المان بندی لوله.....۱۵۱

شکل (۵-۵) شرایط تکیه‌گاهی لوله (در پایین لوله در سه راستای x,y,z و در بالای لوله در دو راستای x,z مقید شده است).....۱۵۲

شکل (۵-۶) آزمایش تناوبی متقارن کرنش کنترل با نرخ ثابت $\Delta\varepsilon$.....۱۵۵

شکل (۵-۷) محاسبه پارامترهای سخت شوندگی حرکتی با استفاده از نتایج آزمایش نیم تناوب کشش.....۱۵۶

شکل (۵-۸) تعیین مشخصات سخت شوندگی حرکتی با استفاده از آزمایش تناوب های پایدار شده ۱۵۷

شکل (۵-۹) شبیه‌سازی آزمایش کشش بر روی نمونه کوپن ۱۵۸

شکل (۵-۱۰) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی به ازای عمق قرشدگی ۴ میلی‌متر.....۱۵۹

شکل (۵-۱۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی به ازای عمق قرشدگی ۷ میلی‌متر.....۱۶۰

شکل (۵-۱۲) نمایی کلی از دو لوله پس از اعمال قرشدگی الف)شبیه‌سازی عددی ب)نمونه‌های آزمایشگاهی ... ۱۶۰
شکل (۵-۱۳) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی کرنش‌سنج‌ها ۱۶۱
شکل (۵-۱۴) مقطع عرضی قرشدگی حاصل از عکس‌برداری و شبیه‌سازی عددی (واحد *mm*) ۱۶۱
شکل (۵-۱۵) شبیه‌سازی عددی بارگذاری یک‌سویه بدون درنظر گرفتن ناراستی(نمونه *IM*) ۱۶۳
شکل (۵-۱۶) مود ۲۲ کمانش حاصل از تحلیل کمانش لوله با نرم افزار ABAQUS ۱۶۳
شکل (۵-۱۷) شبیه‌سازی عددی بارگذاری یک‌سویه با درنظر گرفتن ناراستی(دامنه ناراستی ۰/۰۵ میلی‌متر) ... ۱۶۳
شکل (۵-۱۸) نمایی از بارگذاری یک‌سویه در نمونه تجربی و شبیه‌سازی عددی(نمونه *IM*) ۱۶۴
شکل (۵-۱۹) مقایسه منحنی تنش-کرنش در بارگذاری یک‌سویه در لوله با عمق قرشدگی نسبی ۱۲٪ ۱۶۵
شکل (۵-۲۰) نمایی از نمونه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی پس از بارگذاری یک‌سویه در لوله قرشده ۱۶۵
شکل (۵-۲۱) مقایسه نرخ کرنش پیش‌رونده نتایج آزمایشگاهی وشبیه‌سازی عددی (نمونه IC2) ۱۶۶
شکل (۵-۲۲) مقایسه منحنی تنش-کرنش نمونه *DC5* حاصل از نتایج تجربی عددی ۱۶۷
شکل (۵-۲۳) مقایسه نرخ کرنش پیش‌رونده نمونه *DC5* حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی ۱۶۷
شکل (۵-۲۴) تاثیر عمق قرشدگی بر رفتار یک‌سویه نمونه‌های استوانه‌ای بر حسب عمق قرشدگی نسبی(X/D) مختلف ۱۶۹
شکل (۵-۲۵) مقایسه کرنش خمیری پیش‌رونده در نمونه سالم و قرشده ۱۷۰
شکل (۵-۲۶) روند رشد عمق قرشدگی در مقابل تعداد تناوب‌های اعمالی (نمونه *DC1*) ۱۷۱
شکل (۵-۲۷) روند رشد عمق قرشدگی در مقابل تعداد تناوب‌های اعمالی (نمونه *DC3*) ۱۷۱
شکل (۵-۲۸) تاثیر افزایش دامنه تنش بر نرخ کرنش پیش‌رونده(نمونه *IC2* الی *DC6*) ۱۷۳
شکل (۵-۲۹) تاثیر افزایش کرنش آغازین بر نرخ کرنش خمیری پیش‌رونده ۱۷۵
شکل (۵-۳۰) رفتار یک‌سویه اعضای لوله‌ای به ازای نسبت *d/D* ۰/۲ و عمق قرشدگی نسبی(*X/D*) مختلف ۱۷۶
شکل (۵-۳۱) رفتار یک‌سویه اعضای لوله‌ای به ازای نسبت *d/D* ۰/۹ و عمق قرشدگی نسبی(*X/D*) مختلف ۱۷۶
شکل (۵-۳۲) تاثیر افزایش قطر سنبه بر نرخ کرنش پیش‌رونده (عمق قرشدگی نسبی ۳۰٪) ۱۷۷
شکل (۵-۳۳) تاثیر افزایش عمق قرشدگی بر کرنش خمیری پیش‌رونده به ازای نسبت *d/D* برابر با ۰/۲ ..... ۱۷۸

شکل (۵-۳۴) تاثیر افزایش عمق قرشدگی بر کرنش خمیری پیش‌رونده به ازای نسبت d/D برابر با ۰/۹..... **۱۷۸**

فهرست جداول

جدول (۳-۱) تقسیم بندی روش‌های ارزیابی خوردگی در لوله ها [۴۴]..... **۵۶**

جدول (۴-۱) مشخصات مکانیکی فولاد مورد نظر **۶۸**

جدول (۴-۲) مشخصات شیمیایی فولاد نوع اول..... **۶۸**

جدول (۴-۳) مشخصات کلی ابعادی و میزان بار اعمالی در آزمایش‌های دامنه کرنش ثابت..... **۷۳**

جدول (۴-۴) داده های مورد نیاز به منظور کالیبراسیون پارامترهای سخت شوندگی حرکتی..... **۷۴**

جدول (۴-۵) قطر خارجی و داخلی اندازه‌گیری شده..... **۷۸**

جدول (۴-۶) مشخصات کلی آزمایش‌های انجام شده به منظور بررسی تاثیر عمق قرشدگی..... **۱۰۶**

جدول (۴-۷) خلاصه نتایج چهار آزمایش اول..... **۱۱۶**

جدول (۴-۸) خلاصه مشخصات آزمایش‌های انجام شده..... **۱۱۷**

جدول (۴-۹) خلاصه نتایج چهار آزمایش دوم..... **۱۳۲**

جدول (۴-۱۰) خلاصه‌ای از مشخصات آزمایش‌ها **۱۳۳**

جدول (۴-۱۱) خلاصه نتایج به‌دست آمده از نمونه‌های *IC3* و *DC7* و *DC8*..... **۱۴۰**

جدول (۵-۱) خلاصه نتایج تاثیر عمق قرشدگی(نمونه *IC1* الی *DC3*) **۱۷۰**

جدول (۵-۲) خلاصه نتایج آزمایش‌های تاثیر افزایش دامنه بارگذاری(نمونه *IC2* الی *DC6*)..... **۱۷۳**

جدول (۵-۳) خلاصه نتایج آزمایش‌های تاثیر افزایش کرنش آغازین(نمونه *IC3* الی *DC9*)..... **۱۷۴**

جدول (۵-۴) خلاصه نتایج آزمایش‌های تاثیر قطر سنبه (نمونه *IC1* الی *DC15*)..... **۱۷۷**

فصل ۱:

پیش‌درآمد