



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی



IMAM KHOMEINI  
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دانشکده فنی و مهندسی

# مطالعات آزمایشگاهی جهت تعیین چقرمگی شکست مود اول در نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم سنگ مارن

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی معدن

گرایش استخراج

هوتن سدیفی

استاد راهنما:

دکتر مهدی حسینی

بهمن ۱۳۹۲

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه بزرگ اسلامی قم



IMAM KHOMEINI  
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی معدن

## مطالعات آزمایشگاهی جهت تعیین چقرمگی شکست مود اول در نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم سنگ مارن

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی معدن

گرایش استخراج

هوتن سدیفی

استاد راهنما:

دکتر مهدی حسینی

اساتید مشاور:

دکتر محمد علی عقیقی

دکتر سعیده سنماری

بهمن ۱۳۹۲



## تقدیم

این پایان نامه را به خانواده مهربانم، پدر عزیزم، مادر دلسوزم و برادر همیشه یار و همراهم که در تمامی مراحل زندگی یار و همدمم بودند و با زحمات ایشان است که توانستم به این موفقیت نائل شوم و نیز تمامی دوستان و همراهانی که مشوقم بودند، تقدیم می‌کنم.



## قدردانی

پس از حمد و سپاس خداوند متعال که توفیق حضور در دانشگاه و تحصیل در دانش معدن را به من عطا فرمود، در اینجا بر خود لازم می‌بینم که از همه عزیزانی که در تهیه و تدوین این پایان نامه، مرا یاری نمودند به ویژه استاد گرامی، جناب آقای دکتر مهدی حسینی که با راهنمایی‌ها و پیگیری‌های دلسوزانه ایشان این پایان نامه به سر انجام رسید و نیز همراهی‌های اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر محمد علی عقیقی و سرکار خانم دکتر سعیده سنماری و مهندسین آقایان محسنی، باقری و مهندس خانم آقایی و شرکت مناطق نفت خیز جنوب و دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) تشکر و قدردانی به عمل آورم. این تحقیق با همکاری شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب انجام شده است.



دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

معاونت آموزشی - مدیریت تحصیلات تکمیلی

### فرم تاییدیه هیأت داوران جلسه دفاع از پایان‌نامه

بدین وسیله گواهی می‌شود جلسه دفاعیه از پایان‌نامه کارشناسی ارشد هوتن سدیفی دانشجوی رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان مطالعات آزمایشگاهی جهت تعیین چقرمگی شکست مود اول در نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم سنگ مارن در تاریخ ۱۳۹۲ / ۱۱ / ۲۶ در دانشگاه برگزار گردید و این پایان‌نامه با نمره به عدد ۱۹/۲۵ و به حروف نوزده و بیست و پنج صدم و درجه عالی مورد تایید هیأت داوران قرار گرفت.

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه‌ی دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	دکتر مهدی حسینی	استادیار	دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)	
۲	استاد مشاور اول	دکتر محمد علی عقیقی	استادیار	دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)	غایب
۳	استاد مشاور دوم	دکتر سعیده سنماری	استادیار	دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)	
۴	داور داخل	دکتر رضا شکور شهابی	استادیار	دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)	
۵	نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر قاسمعلی گروسی	دانشیار	دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)	



## تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب هوتن سدیفی دانش موخته مقطع کارشناسی ارشد در رشته مهندسی معدن گرایش استخراج که در تاریخ ۲۶ / ۱۱ / ۱۳۹۲ از پایان نامه خود تحت عنوان مطالعات آزمایشگاهی جهت تعیین چقرمگی شکست مود اول در نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم سنگ مارن با کسب درجه عالی دفاع کرده‌ام، شرعا و قانونا متعهد می‌شوم:

۱. مطالب مندرج در این پایان نامه، حاصل تحقیق و مطالعه اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران اعم از پایان نامه، کتاب، مقاله و غیره استفاده کرده‌ام، با رعایت کامل امانت، مطابق مقررات، اقدام به ارجاع در متن و ذکر آن در فهرست منابع و مآخذ نموده‌ام.
۲. تمامی یا بخشی از این پایان نامه قبلا برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی به سایر دانشگاه‌ها و موسسات آموزش عالی ارائه نشده است.
۳. مقالات مستخرج از این پایان نامه کاملا حاصل کار اینجانب بوده و از هرگونه جعل و یا تغییر اطلاعات پرهیز کرده‌ام.
۴. از ارسال همزمان و یا تکراری مقالات مستخرج از این پایان نامه (با بیش از ۳ درصد همپوشانی) به مجلات و یا همایش‌های گوناگون خودداری نموده و می‌نمایم.
۵. کلیه حقوق مادی و معنوی حاصل از این پایان نامه متعلق به دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) بوده و متعهد می‌شوم هرگونه بهره‌مندی و یا نشر دستاوردهای حاصل از این تحقیق اعم از چاپ کتاب، مقاله، ثبت اختراع و غیره (چه در زمان دانشجویی و یا بعد از فراغت از تحصیل) با کسب اجازه از استاد راهنما باشد.
۶. در صورت اثبات تخلف و نقض موارد پنجگانه فوق (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) از درجه اعتبار ساقط و اینجانب هیچ گونه ادعایی نخواهم داشت.

نام و نام خانوادگی دانشجو: هوتن سدیفی

امضاء



## سوگند دانش آموختگان کارشناسی ارشد دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

### به نام خدا

سپاس ایزدمنان که مرا مشمول الطاف خویش نمود که با طی مراحل تحصیل موفق به اخذ درجه کارشناسی ارشد شوم. به شکرانه این نعمت بزرگ الهی که با امکانات این مرز و بوم، فراهم و نزد اینجانب به امانت گذاشته شده است، در پیشگاه ملت ایران به کتاب آسمانی خود، قرآن کریم، سوگند یاد می‌کنم که:

- در سراسر زندگی حرفه‌ای، در راه اعتلای کشور ایران و جامعه بشری به نحو احسن قدم برداشته و در این راه از هیچ تلاشی دریغ ننمایم.
- در تمام فعالیت‌های تخصصی، رضای خدا را همراه با صداقت علمی و اجتماعی در نظر داشته و از موقعیت‌های بدست آمده در جهت رفع مشکلات جامعه استفاده کنم و در همه امور، منافع کشور را بر منافع فردی مقدم بدارم.
- همواره علم و دانش خود را به روز نگاه داشته و در ایفای مسئولیت و تعهدات حرفه‌ای در حد توان سعی و تلاش خود را به کار گیرم.
- و اینک از خداوند علیم توفیق بندگی و پای بندی به مفاد این سوگندنامه را خواستارم و از او می‌خواهم که مرا در ایفای رسالت و انسانی خویش موفق بدارد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: هوتن سدیفی

امضا





## مجوز بهره‌برداری از پایان نامه

کلیه حقوق اعم از چاپ، تکثیر، نسخه برداری، ترجمه، اقتباس و ... از نتایج این پایان‌نامه برای دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین محفوظ است. بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- بهره‌برداری از این پایان‌نامه برای همگان بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه تا تاریخ ..... ممنوع است.

استاد راهنما می‌تواند یکی از گزینه‌های بالا را انتخاب کند و مسئولین کتابخانه موظف به رعایت موارد تعیین شده می‌باشد.

نام استاد راهنما: دکتر مهدی حسینی

تاریخ:

امضاء:

## چکیده

در صنعت نفت به منظور افزایش شاخص تولید و بازیافت از چاه‌هایی که به علت برداشت طولانی مدت، بازده آن‌ها کاهش یافته است یا سنگ‌های اطراف چاه میزان نفوذپذیری کمی دارند از شکست هیدرولیکی استفاده می‌کنند. با توجه به اینکه در عملیات شکست هیدرولیکی ترک‌ها به صورت کشتی باز می‌شوند، فقط چقرمگی شکست مود I مورد بررسی قرار گرفت.

در این تحقیق با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی به بررسی سه پارامتر مهم شامل طول و عرض ترک و نیز فشار جانبی بر چقرمگی شکست مود I در استوانه تو خالی جدار ضخیم که در واقع شبیه سازی محیط چاه نفت در آزمایشگاه است، پرداخته شد. نمونه مورد مطالعه، سنگ مارن تهیه شده از سازند بنگستان واقع در قسمت جنوب و جنوب غربی ایران بود. برای انجام آزمایش در نمونه‌هایی به قطر خارجی ۷۳ میلی‌متر و قطر داخلی ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر دو ترک مصنوعی با ابعاد مشخص به صورت متقارن ایجاد شد. پس از آن نمونه تحت تنش سه محوری قرار گرفت و سپس میزان فشار لازم برای گسترش ترک‌های مصنوعی اندازه‌گیری شد.

در نهایت برای بررسی اثر هر پارامتر بر روی چقرمگی شکست مود I سه آزمایش انجام شد و به کمک مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزارهای ABAQUS و ANSYS نتایج نشان داد که چقرمگی شکست با افزایش خطی عرض و طول ترک، به صورت خطی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد و با افزایش خطی فشار جانبی، به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد. همچنین فشار شکست با افزایش خطی عرض به صورت خطی کاهش می‌یابد و با افزایش خطی طول ترک و فشار جانبی به صورت غیر خطی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** چقرمگی شکست، مود I، استوانه تو خالی، سنگ مارن، طول ترک، عرض ترک، فشار

جانبی.

## فهرست مطالب

فصل اول: کلیات.....	۱
۱ - ۱ - مقدمه.....	۲
۱ - ۲ - بیان مسئله تحقیق.....	۲
۱ - ۳ - فرضیات تحقیق.....	۲
۱ - ۴ - اهداف و ضرورت تحقیق.....	۳
۱ - ۵ - روش و مراحل انجام تحقیق.....	۳
۱ - ۶ - ساختار پایان نامه.....	۴
فصل دوم: مروری بر پیشینه تحقیق.....	۶
۲ - ۱ - مکانیک شکست.....	۷
۲ - ۱ - ۱ - تاریخچه.....	۷
۲ - ۱ - ۲ - مکانیک شکست الاستیک خطی.....	۸
۲ - ۱ - ۳ - مودهای بارگذاری.....	۹
۲ - ۱ - ۴ - اجزا تشکیل دهنده تنش و جابجایی نوک ترک برای مود I.....	۱۱
۲ - ۱ - ۵ - چقرمگی شکست.....	۱۴
۲ - ۱ - ۶ - محاسبه ضریب شدت تنش.....	۱۸
۲ - ۱ - ۶ - ۱ - روش همبستگی جابجایی.....	۱۹
۲ - ۱ - ۶ - ۲ - روش پایان ترک اصلاح شده.....	۲۰
۲ - ۱ - ۶ - ۳ - روش انتگرال J.....	۲۱
۲ - ۲ - آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I.....	۲۴
۲ - ۲ - ۱ - آزمایش‌های متداول.....	۲۴



- ۲۴-۲-۱-۱-۱-آزمایش‌های کاربردی با بار کششی.....۲۴
- ۲۴-۲-۱-۱-۱-بارگذاری کششی بر نمونه استوانه کوتاه.....۲۴
- ۲۷-۲-۱-۲-آزمایش‌های کاربردی با بار فشاری.....۲۷
- ۲۷-۲-۱-۲-۱-ترک مستقیم در میان دیسک برزیلین.....۲۷
- ۲۹-۲-۱-۲-۲-فشار قطری.....۲۹
- ۳۰-۲-۱-۲-۳-ترک چورون بریده شده بر دیسک برزیلین.....۳۰
- ۳۳-۲-۱-۳-آزمایش‌های کاربردی تحت بارگذاری خمشی.....۳۳
- ۳۴-۲-۱-۳-۱-بارگذاری خمشی بر نمونه نیمه دایره‌ای با ترک مستقیم.....۳۴
- ۳۵-۲-۱-۳-۲-بارگذاری خمشی بر نمونه استوانه‌ای با ترک چورون.....۳۵
- ۳۶-۲-۲-۲-آزمایش‌های انجام شده بر روی استوانه تو خالی جدار ضخیم.....۳۶
- ۳۶-۲-۲-۱-ضریب شدت تنش ترک شعاعی در استوانه تو خالی جدار ضخیم.....۳۶
- ۳۹-۲-۲-۲-اندازه‌گیری چقرمگی شکست هیدرولیکی.....۳۹

#### فصل سوم: نمونه مورد مطالعه.....۴۴

- ۴۵-۱-۳-محل برداشت نمونه‌ها.....۴۵
- ۴۵-۱-۱-۳-تعاریف مهم زمین شناسی نفت.....۴۵
- ۴۷-۱-۲-سازندهای بنگستان.....۴۷
- ۴۹-۱-۳-۳-نکاتی پیرامون مخازن بنگستان.....۴۹
- ۵۰-۲-۳-مطالعات میکروسکوپی.....۵۰
- ۵۱-۳-۳-خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها.....۵۱
- ۵۴-۳-۴-نحوه آماده‌سازی استوانه تو خالی جدار ضخیم دارای ترک مصنوعی.....۵۴

#### فصل چهارم: دستگاه و برنامه آزمایش.....۵۹

- ۶۰-۱-۴-دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده برای مطالعه چقرمگی شکست.....۶۰



- ۶۰ ..... ۴-۱-۱ - سلول آزمایش
- ۶۱ ..... ۴-۱-۲ - جک اعمال کننده بار محوری
- ۶۲ ..... ۴-۱-۳ - پمپ اعمال کننده فشار جانبی
- ۶۳ ..... ۴-۱-۴ - پمپ اعمال کننده فشار داخلی گمانه
- ۶۵ ..... ۴-۲ - برنامه آزمایش
- ۶۶ ..... ۴-۲-۱ - برنامه آزمایش برای بررسی اثر عرض ترک
- ۶۶ ..... ۴-۲-۲ - برنامه آزمایش برای بررسی اثر طول ترک
- ۶۷ ..... ۴-۲-۳ - برنامه آزمایش برای بررسی اثر فشار جانبی
- ۶۸ ..... ۴-۳ - نحوه انجام آزمایش

## ۷۲ ..... فصل پنجم: مدلسازی عددی

- ۷۳ ..... ۵-۱ - معرفی تکنیک المان محدود
- ۷۳ ..... ۵-۲ - معرفی نرم‌افزارهای المان محدود مورد استفاده برای مدلسازی عددی
- ۷۳ ..... ۵-۲-۱ - ABAQUS
- ۷۴ ..... ۵-۲-۲ - ANSYS
- ۷۴ ..... ۵-۳ - ماژول‌های ABAQUS
- ۷۴ ..... ۵-۳-۱ - ماژول Part
- ۷۴ ..... ۵-۳-۲ - ماژول Property
- ۷۵ ..... ۵-۳-۳ - ماژول Assembly
- ۷۵ ..... ۵-۳-۴ - ماژول Step
- ۷۵ ..... ۵-۳-۵ - ماژول Interaction
- ۷۶ ..... ۵-۳-۶ - ماژول Load
- ۷۶ ..... ۵-۳-۷ - ماژول Mesh



۷۶	Job	۵-۳-۸-ماژول
۷۷	Visualization	۵-۳-۹-ماژول
۷۷	ABAQUS	۵-۴-محاسبه ضریب شدت تنش مود I برای نمونه استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم سنگ مارن در نرم‌افزار
۷۷	ABAQUS	۵-۴-۱-راه‌اندازی نرم‌افزار
۷۷	Part	۵-۴-۲-ماژول
۸۰	Property	۵-۴-۳-ماژول
۸۱	Assembly	۵-۴-۴-ماژول
۸۳	Step	۵-۴-۵-ماژول
۸۳	Interaction	۵-۴-۶-ماژول
۸۵	Load	۵-۴-۷-ماژول
۸۷	Mesh	۵-۴-۸-ماژول
۸۹	Job	۵-۴-۹-ماژول
۸۹	Visualization	۵-۴-۱۰-ماژول
۹۲	ANSYS	۵-۵-مراحل شبیه‌سازی تحلیل در نرم‌افزار
۹۲	ANSYS	۵-۵-۱-بررسی‌های پیش از آغاز شبیه‌سازی
۹۲	ANSYS	۵-۵-۲-پردازش اولیه
۹۳	ANSYS	۵-۵-۳-اعمال شرایط مرزی و حل
۹۳	ANSYS	۵-۵-۴-پردازش نهایی
۹۳	ANSYS	۵-۵-۵-پردازنده‌های
۹۴	ANSYS	۵-۶-محاسبه ضریب شدت تنش مود I برای نمونه استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم سنگ مارن در نرم‌افزار
۹۴	ANSYS	۵-۶-۱-بررسی‌های پیش از آغاز شبیه‌سازی
۹۵	ANSYS	۵-۶-۲-راه‌اندازی نرم‌افزار

- ۹۵ ..... ۵-۶-۳- پردازش اولیه
- ۹۵ ..... ۵-۶-۳-۱- انتخاب المان و خواص مواد و مقطع
- ۹۵ ..... ۵-۶-۳-۲- تولید مدل المان محدود
- ۹۸ ..... ۵-۶-۴- شرایط مرزی و حل
- ۱۰۱ ..... ۵-۶-۵- بررسی نتایج

### ۱۰۳ ..... فصل ششم: نتایج و تحلیل

- ۱۰۴ ..... ۶-۱- نتایج آزمایش
- ۱۰۴ ..... ۶-۱-۱- نتایج آزمایش اثر عرض ترک بر چقرمگی شکست مود I
- ۱۰۴ ..... ۶-۱-۲- نتایج آزمایش اثر طول ترک بر چقرمگی شکست مود I
- ۱۰۵ ..... ۶-۱-۳- نتایج آزمایش اثر فشار جانبی بر چقرمگی شکست مود I
- ۱۰۶ ..... ۶-۲- تحلیل نتایج
- ۱۰۶ ..... ۶-۲-۱- تحلیل نتایج آزمایش اثر عرض ترک بر چقرمگی شکست مود I
- ۱۰۸ ..... ۶-۲-۲- تحلیل نتایج آزمایش اثر طول ترک بر چقرمگی شکست مود I
- ۱۱۰ ..... ۶-۲-۳- تحلیل نتایج اثر فشار جانبی بر چقرمگی شکست مود I
- ۱۱۲ ..... ۶-۲-۴- تحلیل نتایج هر سه پارامتر بر چقرمگی شکست مود I
- ۱۱۲ ..... ۶-۳- صحت سنجی با مطالعات گذشته

### ۱۱۴ ..... فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۱۱۵ ..... ۷-۱- نتایج
- ۱۱۵ ..... ۷-۲- پیشنهادها

### ۱۱۷ ..... منابع

### 120 ..... Abstract and Keywords

## فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۲): معرفی پارامترهای مربوط به SR ..... ۲۵
- جدول (۲-۲): مقادیر تعیین شده برای  $u$  در ازای  $\alpha_0$  و  $\alpha_B$  های گوناگون ..... ۳۲
- جدول (۳-۲): مقادیر تعیین شده برای  $v$  در ازای  $\alpha_0$  و  $\alpha_B$  های گوناگون ..... ۳۲
- جدول (۴-۲): محدودیت‌های هندسی برای CCNBD ..... ۳۳
- جدول (۵-۲): معرفی پارامترهای مربوط به CB ..... ۳۶
- جدول (۶-۲): اندازه‌گیری چقرمگی شکست برای نمونه‌های سیمانی تحت فشار جانبی ..... ۴۲
- جدول (۱-۳): جرم مخصوص و تخلخل سنگ مارن ..... ۵۲
- جدول (۲-۳): مقاومت کششی حاصل از آزمایش برزیلین بر نمونه‌های سنگ مارن ..... ۵۲
- جدول (۳-۳): مقاومت تراکم تک محوری نمونه‌های سنگ مارن ..... ۵۲
- جدول (۴-۳): مقدار مدول الاستیسیته و ضریب پواسن حاصل از آزمایش تراکم تک محوری ..... ۵۳
- جدول (۵-۳): اطلاعات بدست آمده از آزمایش سه محوری ..... ۵۳
- جدول (۶-۳): مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بدست آمده از آزمایش سه محوری ..... ۵۳
- جدول (۷-۳): مقدار سرعت صوت بدست آمده از نمونه‌ها ..... ۵۳
- جدول (۸-۳): ابعاد نمونه و ترک‌های مصنوعی برای آزمایش‌های چقرمگی شکست استوانه تو خالی جدار ضخیم ..... ۵۸
- جدول (۱-۴): برنامه آزمایش برای بررسی اثر عرض ترک ..... ۶۶
- جدول (۲-۴): برنامه آزمایش برای بررسی اثر طول ترک ..... ۶۶
- جدول (۳-۴): برنامه آزمایش برای بررسی اثر فشار جانبی ..... ۶۷
- جدول (۴-۴): برنامه کلی آزمایش‌ها ..... ۶۸
- جدول (۱-۵): بررسی‌های پیش از آغاز شیشه‌سازی ..... ۹۴
- جدول (۱-۶): نتایج حاصل از بررسی اثر عرض ترک بر چقرمگی شکست ..... ۱۰۴
- جدول (۲-۶): نتایج حاصل از بررسی اثر طول ترک بر چقرمگی شکست ..... ۱۰۵





جدول (۳-۶): نتایج حاصل از بررسی اثر فشار جانبی بر چقرمگی شکست ..... ۱۰۵

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): نمودار تنش - کرنش LEFM ..... ۸
- شکل (۲-۲): مودهای شکست ..... ۹
- شکل (۳-۲): وضعیت تنش صفحه‌ای در زیر تنش‌های کششی دو محوری مثبت ..... ۱۰
- شکل (۴-۲): وضعیت کرنش صفحه‌ای در زیر تنش‌های کششی سه محوری مثبت ..... ۱۱
- شکل (۵-۲): موقعیت محلی تنش‌ها نزدیک به نوک ترک ..... ۱۱
- شکل (۶-۲): صفحه‌ای نامحدود به همراه یک ترک در مرکز آن تحت بار کششی ..... ۱۵
- شکل (۷-۲): صفحه‌ای نیمه نامحدود به همراه یک ترک در لبه آن تحت بار کششی ..... ۱۶
- شکل (۸-۲): صفحه‌ای نامحدود به همراه یک سوراخ و دو ترک متقارن تحت بار کششی ..... ۱۶
- شکل (۹-۲): صفحه‌ای نیمه نامحدود به همراه یک ترک میان آن تحت بار کششی ..... ۱۷
- شکل (۱۰-۲): ترک میان نمونه تحت کشش ..... ۱۷
- شکل (۱۱-۲): ترک منفرد بر روی لبه نمونه تحت خمش ..... ۱۸
- شکل (۱۲-۲): المان‌های سینگولار در نوک ترک ..... ۲۰
- شکل (۱۳-۲): تفکر اروین در مورد انتگرال اتمام ترک ..... ۲۱
- شکل (۱۴-۲): مسیر کانتور در اطراف نوک ترک ..... ۲۲
- شکل (۱۵-۲): نمونه مورد استفاده در آزمایش و نحوه بارگذاری ..... ۲۵
- شکل (۱۶-۲): نمایی دیگر از نمونه مورد استفاده در آزمایش و نحوه بارگذاری ..... ۲۵
- شکل (۱۷-۲): تعریف ضریب تصحیح بر اساس نمودار Load - CMOD ..... ۲۷
- شکل (۱۸-۲): اندازه نمونه و مکان اعمال بار به ترتیب برای مود اول و مود دوم یا ترکیبی در آزمایش ..... ۲۸
- CSTBD ..... ۲۸
- شکل (۱۹-۲): ابعاد و وضعیت‌های مکان‌های اعمال بار بر نمونه آزمایش فشار قطری به ترتیب از چپ به راست برای بارکنش قطری و بارکنش تخت ..... ۲۹

- شکل (۲-۲۰): اندازه‌های نمونه و شرایط بارگذاری در آزمایش CCNBD ..... ۳۱
- شکل (۲-۲۱): محدودیت‌های هندسی برای CCNBD ..... ۳۳
- شکل (۲-۲۲): اندازه‌های نمونه SCB و شرایط بارگذاری ..... ۳۴
- شکل (۲-۲۳): اندازه‌های نمونه و شرایط بارگذاری CB ..... ۳۵
- شکل (۲-۲۴): پیکربندی نمونه استوانه‌ای، (a) ترک منفرد، (b) ترک دوتایی ..... ۳۷
- شکل (۲-۲۵): ضریب شدت تنش بی بعد، تابعی از طول ترک ..... ۳۸
- شکل (۲-۲۶): تنظیم دستگاه آزمایشگاهی ..... ۳۸
- شکل (۲-۲۷): دید سه بعدی و دید از بالا نمونه آماده شده ..... ۳۹
- شکل (۲-۲۸): دستگاه برای نمونه‌ها در آزمایش چقرمگی شکست ..... ۴۰
- شکل (۲-۲۹): نمودار مورد نیاز برای محاسبه  $K^*$  ..... ۴۱
- شکل (۲-۳۰): رابطه بین چقرمگی و فشار جانبی ..... ۴۳
- شکل (۳-۱): نقشه میداین نفتی جنوب و غرب ایران ..... ۴۷
- شکل (۳-۲): سازند آهکی سروک واقع در یال جنوبی تاقدیس بنگستان (تنگه سروک، استان کهگلویه و بویر احمد) ..... ۴۸
- شکل (۳-۳): برش نمونه سازند آهکی ایلام و شیلی سورگاه در یال شمالی کبیرکوه (استان ایلام) ..... ۴۹
- شکل (۳-۴): عکس شماره یک گرفته شده از برش مقطع نازک تهیه شده از بلوک ..... ۵۰
- شکل (۳-۵): عکس شماره دو گرفته شده از برش مقطع نازک تهیه شده از بلوک ..... ۵۱
- شکل (۳-۶): نمونه مطلوب به قطر خارجی ۷۳، داخلی ۲۵ و ارتفاع ۱۵۰ میلی متر ..... ۵۴
- شکل (۳-۷): حفر سوراخی به قطر ۲۵ میلی متر در بلوک برای تهیه نمونه مطلوب ..... ۵۵
- شکل (۳-۸): حفاری با مته ۷۳ میلی متری در بلوک دارای سوراخ ۲۵ میلی متری ..... ۵۵
- شکل (۳-۹): استوانه به قطر خارجی ۷۳ میلی متر و قطر داخلی ۲۵ میلی متر ..... ۵۵
- شکل (۳-۱۰): نمونه در دستگاه برش ..... ۵۶
- شکل (۳-۱۱): نمونه پس از برش کامل ..... ۵۶
- شکل (۳-۱۲): ایجاد ترک‌های مصنوعی بر نمونه ..... ۵۷

- شکل (۳-۱۳): نمونه در حال ساب خوردن ..... ۵۸
- شکل (۳-۱۴): نمونه مطلوب آماده شده ..... ۵۸
- شکل (۴-۱): نمای کلی از سلول تغییر یافته هوک ..... ۶۰
- شکل (۴-۲): سلول تغییر یافته هوک بدون نمونه در دید از بالا ..... ۶۱
- شکل (۴-۳): سلول تغییر یافته هوک با داشتن نمونه مناسب در دید از بالا ..... ۶۱
- شکل (۴-۴): نمایی از دستگاه ثبت داده‌ها مربوط به جک محوری ..... ۶۲
- شکل (۴-۵): مکان و صفحات بارگذاری بار محوری ..... ۶۲
- شکل (۴-۶): پمپ اعمال کننده فشار جانبی ..... ۶۳
- شکل (۴-۷): پمپ اعمال کننده فشار به داخل گمانه‌ها ..... ۶۴
- شکل (۴-۸): صفحات بارگذاری، غشای انعطاف پذیر و کف پوش‌ها ..... ۶۴
- شکل (۴-۹): غشا انعطاف پذیر در داخل نمونه و متصل به صفحه بارگذاری ..... ۶۴
- شکل (۴-۱۰): نحوه اتصال کف پوش با صفحات بارگذاری جهت جلوگیری از خروج روغن ..... ۶۵
- شکل (۴-۱۱): نحوه سر هم شدن کف پوش‌ها و صفحات بارگذاری بر نمونه ..... ۶۵
- شکل (۴-۱۲): طول و عرض ترک در نمونه در حالت دید از بالا ..... ۶۷
- شکل (۴-۱۳): برنامه‌دهی و مقدار بار تنظیم شده برای بار محوری ..... ۶۹
- شکل (۴-۱۴): مقدار فشار تنظیم شده برای فشار جانبی ..... ۶۹
- شکل (۴-۱۵): نحوه اتصال اجزا آزمایش به یکدیگر ..... ۷۰
- شکل (۴-۱۶): نمونه شکسته شده در داخل سلول ..... ۷۰
- شکل (۴-۱۷): نمونه شکسته شده بیرون آورده شده از سلول ..... ۷۰
- شکل (۴-۱۸): نمونه شکسته شده، بیرون آورده و باز شده از سلول ..... ۷۱
- شکل (۴-۱۹): نمونه‌های شکسته شده ..... ۷۱
- شکل (۵-۱): مشخصات اولیه هندسه نمونه مورد تحلیل ..... ۷۸
- شکل (۵-۲): نحوه مدل‌سازی هندسه ترک ..... ۷۹
- شکل (۵-۳): نحوه مدل‌سازی نوک ترک ..... ۷۹