دانشکده فنی و مهندسی

رساله دکتری رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

گسترش شکست هیدرولیکی در سازندهای لایه‌ای

محمود بهنیا

استاد راهنما:

کامران گشتاسبی

شهریور ۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای محمود بهنیا رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان گسترش شکست هیدرولیکی در سازندهای لایه ای در تاریخ ۱۳۹۱/۶/۲۹ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی معدن - مکانیک سنگ پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر کامران گشتاسبی گوهرریزی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر علی اکبر گلشنی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر محمد فاتحی مرجی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر عبدالهادی قزوینیان	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مرتضی احمدی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد فاروق حسینی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر حمید هاشم الحسینی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر عبدالهادی قزوینیان	دانشیار	

دانشگاه تربیت مدرس
اداره پژوهش
دانشکده فنی و مهندسی

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

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری 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 هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورسد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب **محمود بهنیا** دانشجوی رشته **مهندسی معدن- مکانیک سنگ** ورودی سال تحصیلی **۱۳۸۵** مقطع **دکتری** دانشکده **فنی و مهندسی** متعهد می شوم کلِیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: تاریخ:

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

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

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» 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/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد 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 **محمود بهنیا** دانشجوی رشته **مهندسی معدن-مکانیک سنگ** مقطع **دکتری** تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

دانشکده فنی و مهندسی

رساله دکتری رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

گسترش شکست هیدورلیکی در سازندهای لایه‌ای

محمود بهنیا

استاد راهنما:

کامران گشتاسبی

استاد مشاور(اول):

علی اکبر گلشنی

استاد مشاور(دوم):

محمد فاتحی

شهریور ۹۱

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی‌ام بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونم شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرم نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزی‌ام ساخت.

تقدیم به

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

که سختی‌ها را به جان خریدند و سپر بلای ناملایمات شدند تا اکنون من در این جایگاه بایستم

و همسر مهربانم

که لطف و مهربانیش همراه همیشگی‌ام می باشد

تقدیر و تشکر:

با تشکر از استاد بزرگوار، جناب آقای دکتر کامران گشتاسبی که در طول دورهٔ دکتری از راهنمایی‌های ایشان بهرهٔ فراوان گرفتم. همچنین از جناب آقای دکتر علی اکبر گلشنی و جناب آقای دکتر محمد فاتحی که از مشاوره‌های شایسته ایشان در انجام این پایان‌نامه استفاده نمودم، کمال تشکر را دارم.

از پروفسور میان چن و پروفسور گوانکینگ ژانگ که امکان انجام آزمایشات شکست هیدرولیکی را در دانشگاه نفت پکن فراهم نمودند سپاسگزاری می‌نمایم.

از اساتید گرانقدرگروه مکانیک سنگ، جناب آقای دکتر عبدالهادی قزوینیان و جناب آقای دکتر مرتضی احمدی که در سال‌های تحصیل از محضرشان درس گرفتم، تشکر می‌نمایم.

همچنین از کارشناس محترم آزمایشگاه مکانیک سنگ، جناب آقای مهندس فرهاد شیخانی تشکر می‌کنم.

از دوستان و همکاران عزیز در شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس که در مراحل مختلف پایان نامه همراهی نمودند، قدردانی می نمایم.

در انتها از پدر و مادر عزیزم که دعای خیرشان همیشه امید بخش و حامی من بوده است و همچنین همسر گرامی‌ام که در طول این دوره تحصیلی پشتیبانم بود، سپاسگزارم.

چکیده

شکست هیدرولیکی یکی از تکنیک‌های تحریک مخازن است که برای افزایش بازدهی مخازن نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهمترین مسئله در روش شکست هیدرولیکی، پیش‌بینی صحیح هندسهٔ شکستگی به منظور طراحی ایمن و بهینهٔ این فرآیند می‌باشد. نحوهٔ گسترش شکست هیدرولیکی در محیط‌های دارای لایه‌بندی، به شدت از وجود ناپیوستگی‌ها (لایه‌بندی، درزه، گسل و ...) و خصوصیات آنها، پارامترهای مکانیکی توده سنگ و تنش‌های برجا تأثیر می‌پذیرد. در این پژوهش با بررسی فرآیند اندرکنش شکست هیدرولیکی با ناپیوستگی‌های موجود در محیط، نحوهٔ گسترش، انحراف و توقف آن به صورت تجربی و عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، با انجام یک سری آزمایش بر روی نمونه‌های مکعبی که خود شامل ترکیبی از بلوک‌های کوچک‌تر یا به صورت چند لایه بودند، نحوهٔ گسترش شکست هیدرولیکی در سلول سه محورهٔ واقعی، با تغییر شرایط ناپیوستگی‌ها و خصوصیات مکانیکی بلوک‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که این نحوه طراحی برای اولین بار در مجموعهٔ آزمایش‌های حوزه شکست هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته است. براساس هدف دوم پژوهش، به منظور بررسی بیشتر گسترش شکست هیدرولیکی و اندرکنش آن با ناپیوستگی‌های موجود، برنامهٔ عددی *2DFPM* با مبنای المان مرزی (روش ناپیوستگی- جابجایی (*DDM*)) توسعه داده شد. در راستای ارتقای این برنامهٔ عددی و افزایش دقت محاسبات، المان‌های ویژه (نوک ترک، کوادراتیک و درزه)، معیارهای مختلف گسترش شکستگی و فرمولاسیون جریان سیال مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از مطالعهٔ تجربی و عددی نشان می‌دهد که با افزایش مقادیر پارامترهای مکانیکی ناپیوستگی و در نتیجه عدم لغزش و بازشدگی آن، شکستگی می‌تواند از ناپیوستگی عبور کند، در حالی که کاهش آنها، منجر به لغزش و بازشدگی ناپیوستگی می‌شود و در نتیجه انحراف شکستگی هیدرولیکی و یا توقف آن پدیدهٔ غالب می‌باشد. هم چنین روشن شد که تغییر خصوصیات مکانیکی لایه‌های مجاور نیز بر میزان نفوذ شکستگی هیدورلیکی اثر می‌گذارد و می‌تواند رشد آن را به طور کامل متوقف نماید. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که لغزش و بازشدگی

ناپیوستگی، در فرآیند گسترش شکستگی تأثیر گذار است و در آن سوی، پارامترهایی همچون نرخ تزریق، گرانروی سیال، فاصلهٔ محل تزریق از ناپیوستگی، زاویهٔ برخورد و تنش‌های برجا، بیشترین تأثیر را در میزان فعال‌سازی ناپیوستگی‌ها به عهده دارند.

واژگان کلیدی: شکستگی هیدرولیکی، سازندهای لایه‌ای، ناپیوستگی، اندرکنش، هندسهٔ شکستگی، سیال نیوتنی، تنش‌های برجا، ضریب اصطکاک

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق ۴

۱-۲-۱ روش انجام پژوهش ۷

۱-۳ رئوس مطالب رساله ۸

فصل دوم مرور ادبیات پژوهش ۹

۲-۱ مقدمه ۱۰

۲-۲ مدلسازی هندسهٔ شکست هیدرولیکی ۱۰

۲-۳ گسترش شکست هیدرولیکی در سازندهای دارای ناپیوستگی طبیعی ۱۷

۲-۳-۱ مطالعات تجربی ۲۰

۲-۳-۲ مطالعات تحلیلی ۲۴

۲-۳-۳ مطالعات عددی ۲۹

فصل سوم آزمایش های تجربی ۳۶

۳-۱ مقدمه ۳۷

۳-۲ ساخت نمونه ۳۷

۳-۳ آزمایش‌های آزمایشگاهی ۴۵

۳-۴ نتایج آزمایش‌ها و تحلیل آنها ۵۱

۳-۴-۱ برخورد شکستگی هیدرولیکی با فصل مشترک مقید شده ۵۲

۳-۴-۲ برخورد شکستگی هیدرولیکی با فصل مشترک مقید نشده ۵۵

۳-۴-۳ برخورد شکستگی هیدرولیکی با فصل مشترک دارای پرشدگی ۶۱

۳-۴-۴ گسترش شکستگی هیدرولیکی از درون لایهٔ ضعیف به سمت لایهٔ مقاوم ۶۵

۳-۵ گسترش شکستگی هیدرولیکی در درون نمونه های سه لایه ای ۶۹

۳-۵-۱ آماده سازی نمونه ها و شرایط آزمایش ۷۰
۳-۵-۲ نتایج آزمایش ها و تحلیل آنها ۷۲
- گسترش شکستگی هیدرولیکی از درون لایهٔ مقاوم به سمت لایهٔ ضعیف ۷۲
- گسترش شکستگی هیدرولیکی از درون لایهٔ ضعیف به سمت لایهٔ مقاوم ۷۴
۳-۶ بحث و بررسی ۷۷

فصل چهارم فرمولاسیون روش عددی ۸۲

۴-۱ مقدمه ۸۳

۴-۲ روش المان مرزی ۸۴

۴-۳ روش ناپیوستگی- جابجایی ۸۶

۴-۳-۱ روش ناپیوستگی – جابجایی مرتبهٔ بالا ۸۸
۴-۳-۲ فرمول بندی معادلات جبری خطی ۹۰
۴-۳-۳ ناپیوستگی- جابجایی مرتبه بالا در نیم صفحه ۹۳
۴-۳-۴ ناپیوستگی- جابجایی مرتبه بالا در دو نیم صفحهٔ متصل به هم ۹۵
۴-۴ محاسبه تنش مماسی در امتداد مرز ۹۷

۴-۵ المان درزه الاستیک ۱۰۰

۴-۶ درزهٔ دارای چسبندگی و اصطکاک (المان موهر-کلمب) ۱۰۲

۴-۷ آنالیز غیرخطی ۱۰۴

۴-۸ المان نوک ترک ۱۰۵

۴-۹ مکانیک شکست الاستیک خطی و معیارهای گسترش ترک ۱۰۸

۴-۹-۱ ضریب شدت تنش ۱۰۷
۴-۹-۲ مودهای شکست ۱۰۸
۴-۹-۳ میدان تنش و تغییر شکل ۱۰۹
۴-۹-۴ تخمین ضرایب شدت تنش ۱۱۱
۴-۹-۵ معیارهای رشد ترک ۱۱۲
۴-۹-۶ معیار تنش مماسی حداکثر ۱۱۵
۴-۹-۷ معیار حداقل چگالی انرژی کرنشی ۱۱۷

۴-۱۰ جریان سیال نیوتنی در درون شکستگی ۱۱۹

فصل پنجم ساختار برنامهٔ عددی توسعه داده شده و اعتبارسنجی آن ۱۲۳

۵-۱ مقدمه ۱۲۳

۵-۲ فلوچارت ها و الگوریتم عددی ۱۲۵

۵-۳ الگوریتم عددی برای آنالیز غیرخطی درزه ۱۲۹

۵-۴ نحوهٔ تشکیل ماتریس B ۱۳۰

۵-۵ نحوهٔ تشکیل ماتریس A ۱۳۲

۵-۶ الگوریتم عددی حل جریان سیال ۱۳۴

۵-۷ اعتبارسنجی مدل عددی برای مسائل مکانیک شکست ۱۳۸

۵-۷-۱ ترک تحت فشار در محیط نامحدود ۱۳۸
۵-۷-۲ ترک مایل در محیط نامحدود ۱۴۲
۵-۷-۳ ترک خمیده تحت کشش دو محوره در محیط نامحدود ۱۴۴
۵-۷-۴ ترک زاویه دار تحت فشار در حضور تنش های فشاری برجا ۱۴۷
۵-۷-۵ اندرکنش میان دو ترک با طول های برابر ۱۴۷
۵-۷-۶ ترک مرکزی زاویه دار در محیط محدود ۱۵۱
۵-۸ اعتبارسنجی مدل عددی در محیط های ناهمگن ۱۵۳

۵-۸-۱ فضای حلقوی در محیط نامحدود ۱۵۴
۵-۸-۲ ترک قائم در نیم صفحهٔ بالایی ۱۵۶
۵-۸-۳ ترک فصل مشترک ۱۵۸
۵-۹ اعتبار سنجی مدل عددی در حل مسائل لغزش درزه ۱۶۰

۵-۹-۱ توزیع تنش در امتداد ناپیوستگی مقید شده ۱۶۰
۵-۹-۲ تغییرات تنش بر روی یک گسل متناسب با پیشروی حفاری ها ۱۶۲
۵-۱۰ اعتبارسنجی برنامهٔ عددی در پیش بینی مسیر شکست هیدرولیکی ۱۶۴

۵-۱۱ جریان سیال در درون شکستگی ۱۶۸

۵-۱۲ اعتبارسنجی برنامهٔ عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ۱۷۱

۵-۱۲-۱ مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی و عددی تغییر مسیر شکستگی هیدرولیکی ۱۷۲
۵-۱۲-۲ مقایسهٔ نتایج تجربی و عددی اندرکنش شکستگی با ناپیوستگی موجود ۱۷۳
فصل ششم مطالعهٔ عددی اندرکنش شکست هیدرولیکی و ناپیوستگی ۱۷۷
۶-۱ مقدمه ۱۷۸
۶-۲ اندرکنش میان شکست هیدرولیکی و ناپیوستگی تحت زاویهٔ قائم ۱۸۰
۶-۳ اندرکنش میان شکستگی هیدرولیکی و ناپیوستگی مایل ۱۸۷
۶-۴ جریان سیال در درون ناپیوستگی ۱۹۱
۶-۵ توزیع فشار سیال درحالات مختلف اندرکنش ۱۹۴
۶-۶ مسیر گسترش شکستگی هیدرولیکی در مجاورت ناپیوستگی..... ۱۹۷
۶-۷ مسیر گسترش شکستگی هیدرولیکی در مجاورت فصل مشترک لایه ها ۱۹۹
فصل هفتم نتیجه گیری ۲۰۵
۷-۱ مقدمه ۲۰۵
۷-۲ نتیجه گیری ۲۰۶
۷-۳ پیشنهادات ۲۱۰
منابع ۲۱۲
پیوست ها

فهرست جداول

جدول ۳- ۱ پارامترهای مکانیکی نمونه های ساخته شده در نسبت های مختلف ماسه به سیمان .. ۳۹

جدول ۳- ۲ خصوصیات بلوک های کوچک آماده شده برای هر نمونه ۴۲

جدول ۳- ۳ شرایط آزمایش برای نمونه‌های تشکیل شده از بلوک های کوچک ۴۹

جدول ۳- ۴ شرایط آزمایش برای نمونه های سه لایه ۷۲

جدول ۳- ۵ نتایج آزمایش های انجام شده بر روی نمونه های بلوکی ۷۸

جدول ۳- ۶ نتایج آزمایش های انجام شده بر روی نمونه های لایه ای ۸۰

جدول ۵- ۱ حالت های مختلف موجود برای المان درزه ۱۳۰

جدول ۵- ۲- مقادیر ضریب شدت تنش بهنجار شده برای ترک زاویه دار در صفحهٔ محدود ۱۵۲

جدول ۵- ۳ مقایسهٔ مقادیر محاسبه شدهٔ ضریب شدت تنش (*SIF*) توسط *2DFPM* با مقادیر ارائه شده توسط دیگر محققین ۱۵۶

جدول ۵- ۴- پارامترهای ورودی در مدلسازی جریان سیال ۱۶۸

جدول ۶- ۱ خصوصیات ناپیوستگی و ماده سنگ ۱۸۰

جدول ۶- ۲ پارامترهای ورودی در مدلسازی جریان سیال..... ۱۹۳

فهرست اشکال

شکل ۱- ۱ تحریک یک مقطع از چاه افقی بوسیلهٔ شکست هیدرولیکی ۳

شکل ۳- ۱ چیدمان بلوک¬های کوچک برای تشکیل بلوک بزرگتر ۳۸

شکل ۳- ۲ بلوک¬های مکعب مستطیل ساخته شده با خصوصیات مکانیکی مختلف ۳۹

شکل ۳- ۳ محل قرارگیری گمانه در بلوک میانی ۴۰

شکل ۳- ۴ نمایی از درون قالب و نحوهٔ قرارگیری گمانهٔ فلزی در آن ۴۰

شکل ۳- ۵ نحوهٔ چیدمان بلوک¬های کوچکتر در قالب بزرگ و محل قرارگیری لولهٔ فلزی ۴۱

شکل ۳- ۶ نمای کلی بلوک بزرگ شکل گرفته از چیدمان بلوک¬های کوچکتر ۴۲

شکل ۳- ۷ نحوهٔ قرارگیری بلوک¬های کوچکتر در نمونهٔ شمارهٔ یک ۴۳

شکل ۳- ۸ بلوک شمارهٔ ۲ ..... ۴۴

شکل ۳- ۹ بلوک شمارهٔ ۳ ..... ۴۴

شکل ۳- ۱۰ بلوک¬های بزرگ ساخته شده پس از خروج از قالب ۴۵

شکل ۳- ۱۱ طرح کلی سیستم سه محورهٔ واقعی برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی ۴۶

شکل ۳- ۱۲ سیستم سه محورهٔ واقعی برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی ۴۶

شکل ۳- ۱۳ پمپ های تأمین کنندهٔ فشار در صفحات تخت ۴۷

شکل ۳- ۱۴ پمپ خودکار تأمین کنندهٔ فشار سیال در طی آزمایش ۴۸

شکل ۳- ۱۵ نمای کلی از مسیر گسترش شکستگی در دو آزمایش صورت گرفته بر روی یک نمونه ۵۰

شکل ۳- ۱۶ نمونهٔ شماره ۱ بعد از انجام آزمایش ۵۳

شکل ۳- ۱۷ سطح شکستگی ایجاد شده در اطراف گمانه در نمونه با فصل مشترک مقید ۵۳

شکل ۳- ۱۸ امتداد شکستگی منتشر شده در نمونه با فصل مشترک مقید ۵۴

شکل ۳- ۱۹ سطح شکستگی در بلوک¬های جانبی با پارامتر مقاومتی متفاوت در نمونه با فصل مشترک مقید..... ۵۴
شکل ۳- ۲۰ نمودار فشار - زمان برای نمونه با فصل مشترک مقید شده ۵۵
شکل ۳- ۲۱ نمودار فشار - زمان در آزمایش اول برای نمونه با فصل مشترک مقید نشده ۵۶
شکل ۳- ۲۲ منحرف شدن ترک پس از برخورد به فصل مشترک (سمت چپ) در نمونه با فصل مشترک مقید نشده..... ۵۷
شکل ۳- ۲۳ منحرف شدن ترک پس از برخورد به فصل مشترک (سمت راست) در نمونه با فصل مشترک مقید نشده..... ۵۷
شکل ۳- ۲۴ دو سطح ترک ایجاد شده در جهت شرق و غرب (فسفری) و در جهت شمال و جنوب (قرمز) در بلوک میانی نمونهٔ با فصل مشترک مقید نشده ۵۸
شکل ۳- ۲۵ نمودار فشار - زمان در آزمایش دوم برای نمونه با فصل مشترک مقید نشده..... ۵۹
شکل ۳- ۲۶ اختلاف نفوذ شکستگی در بلوک¬های مجاور با مقاومت های متفاوت در نمونهٔ ۶۰
شکل ۳- ۲۷ میزان بازشدگی در دو بلوک شمارهٔ ۲ و ۸ در آزمایش دوم نمونهٔ شماره ۲ ..... ۶۱
شکل ۳- ۲۸ نمای کلی نمونه با فصل مشترک دارای پرشدگی ۶۲
شکل ۳- ۲۹ نمودار فشار - زمان در آزمایش اول برای نمونه با فصل مشترک دارای پرشدگی ۶۳
شکل ۳- ۳۰ نمودار فشار - زمان در آزمایش دوم برای نمونه با فصل مشترک دارای پرشدگی ۶۳
شکل ۳- ۳۱ تراوش سیال در فصل مشترک دارای پرشدگی در سمت چپ نمونهٔ شمارهٔ ۳..... ۶۴
شکل ۳- ۳۲ تراوش سیال در فصل مشترک دارای پرشدگی در قسمت شمال نمونهٔ شمارهٔ ۳ ..... ۶۴
شکل ۳- ۳۳ صفحهٔ شکستگی و نحوهٔ توقف ترک و نفوذ سیال به درون پرشدگی ماسه ای در آزمایش دومِ نمونهٔ شمارهٔ ۳ ..... ۶۵
شکل ۳- ۳۴ امتداد شکستگی هیدرولیکی در بلوک میانی دارای مقاومت پایین در نمونهٔ شمارهٔ ۴. ۶۶

شکل ۳- ۳۵ نمودار فشار - زمان در آزمایش اول برای نمونهٔ دارای بلوک میانی با مقاومت پایین... ۶۶
شکل ۳- ۳۶ محل برخورد شکستگی به مرز بلوک میانی و محدودهٔ تراوش سیال ۶۷
شکل ۳- ۳۷ نمودار فشار - زمان در آزمایش دوم برای نمونهٔ دارای بلوک میانی با مقاومت پایین .. ۶۸
شکل ۳- ۳۸ دو ترک ایجاد شدهٔ عمود بر هم در دو آزمایش صورت گرفته در نمونهٔ شمارهٔ ۴ ..... ۶۹
شکل ۳- ۳۹ بلوک آزمایش و نحوهٔ قرارگیری لایه ها با خصوصیات متفاوت ۷۰
شکل ۳- ۴۰ نمونهٔ سه لایه و نحوهٔ اعمال تنش های برجای افقی نسبت به وضعیت لایه ها..... ۷۱
شکل ۳- ۴۱ نمودار فشار - زمان در آزمایش گسترش شکستگی از درون لایهٔ مقاوم..... ۷۳
شکل ۳- ۴۲ توسعهٔ شکستگی هیدرولیکی تا مرزهای بلوک در آزمایش گسترش شکستگی از درون لایهٔ مقاوم ۷۳
شکل ۳- ۴۳ توسعهٔ شکستگی در لایه های بالا و پایینی در آزمایش گسترش شکستگی از درون لایهٔ مقاوم ۷۴
شکل ۳- ۴۴ نمودار فشار - زمان در آزمایش گسترش شکستگی از درون لایهٔ ضعیف ۷۵
شکل ۳- ۴۵ توسعهٔ شکستگی در لایهٔ بالایی در آزمایش گسترش شکستگی از درون لایهٔ ضعیف.. ۷۶
شکل ۳- ۴۶ منطقهٔ تراوش یافته در لایهٔ میانی در آزمایش گسترش شکستگی از درون لایهٔ ضعیف۷۶

شکل ۴- ۱ الف- المان ناپیوستگی - جابجایی به همراه توزیع $u(\varepsilon)$. ب- المان ثابت در روش ناپیوستگی - جابجایی..... ۸۸
شکل ۴- ۲ برهم نهی کوادراتیک برای یک المان ناپیوستگی - جابجایی مرتبهٔ بالا ۸۹
شکل ۴- ۳ الف- تصویر یک ترک که بوسیلهٔ N المان ناپیوستگی- جابجایی گسسته شده ۹۱
شکل ۴- ۴ المان ناپیوستگی- جابجایی واقعی و موهومی در فضای نیم صفحه..... ۹۴
شکل ۴- ۵ دو نیم صفحهٔ الاستیک متصل به هم ۹۶

شکل ۴- ۶ المان درزه: الف- در حالت فشاری ب- در حالت برشی ۱۰۱
شکل ۴- ۷ المان نوک ترک استفاده شده در روش عددی ارائه شده ۱۰۶
شکل ۴- ۸ تصاویر شماتیک نشان دهندهٔ سه نوع مود اصلی شکست..... ۱۱۰
شکل ۴- ۹ چارچوب مختصات برای تحلیل الاستیک خطی میدان تنش در نوک ترک..... ۱۱۰
شکل ۴- ۱۰ نتایج تجربی حاصل از رشد شکستگی ترکیبی برای ماسه سنگ ایندیانا..... ۱۱۴
شکل ۴- ۱۱جهت رشد ترک در معیار حداکثر تنش مماسی ۱۱۶
شکل ۴- ۱۲هندسهٔ شکست هیدرولیکی در حالت کرنش صفحه ای برای مدلسازی جریان سیال ۱۲۰

شکل ۵- ۱ الگوریتم کلی استفاده شده در برنامهٔ عددی 2DFPM..... ۱۲۷
شکل ۵- ۲ فلوچارت کلی تکنیک افزایش بار..... ۱۳۰
شکل ۵- ۳ فلوچارت نحوهٔ تصحیح ماتریس B ۱۳۱
شکل ۵- ۴ فلوچارت تشکیل ماتریس A در کد عددی ارائه شده ۱۳۳
شکل ۵- ۵ ساختار ماتریس A، B و X..... ۱۳۳
شکل ۵- ۶ فلوچارت حل معادلات جریان سیال در کد عددی ارائه شده ۱۳۷
شکل ۵- ۷ فلوچارت حل معادلات جریان سیال در برنامهٔ عددی توسعه داده شده ۱۳۷
شکل ۵- ۸ یک ترک تحت فشار در محیط نامحدود..... ۱۳۸
شکل ۵- ۹ نحوهٔ گسسته سازی مرز ترک تحت فشار..... ۱۳۹
شکل ۵- ۱۰ توزیع تغییر شکل عمودی در امتداد ترک تحت فشار در محیط نامحدود..... ۱۴۱
شکل ۵- ۱۱ توزیع تنش نرمال در روبروی نوک ترک تحت فشار (در امتداد y=0) ۱۴۱
شکل ۵- ۱۲ منحنی های تنش نرمال در اطراف ترک تحت فشار..... ۱۴۱
شکل ۵- ۱۳ ترک مرکزی زاویه دار در محیط نامحدود و تحت تنش کششی ۱۴۲

شکل ۵- ۱۴ مقادیر فاکتور شدت تنش مد یک (K_I) برای ترک مایل و تحت زوایای مختلف.... ۱۴۲

شکل ۵- ۱۵ مقادیر فاکتور شدت تنش مد دو (K_{II}) برای ترک مایل، تحت زوایای مختلف..... ۱۴۲

شکل ۵- ۱۶ تغییر زاویهٔ انتشار ترک (θ) نسبت به زاویهٔ قرارگیری آن (β) ۱۴۴

شکل ۵- ۱۷ ترک دایره ای تحت تنشهای کششی یکنواخت ۱۴۵

شکل ۵- ۱۸ نحوهٔ گسسته سازی مرز ترک خمیده ۱۴۵

شکل ۵- ۱۹ نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی (G) برای ترک دایره ای با زوایای مرکزی مختلف..... ۱۴۵

شکل ۵- ۲۰ منحنی های تنش میانگین در اطراف ترک خمیده تحت تنش کششی دو محوره ۱۴۶

شکل ۵- ۲۱ ترک بیضوی تحت تنشهای فشاری برجای σH و σh و فشار داخلی P ۱۴۷

شکل ۵- ۲۲ مقادیر تحلیلی و عددی ضرایب شدت تنش (K_I و K_{II}) برای ترک تحت فشار ۱۴۷

شکل ۵- ۲۳ هندسهٔ اندرکنش دو ترک با طول برابر و تحت تنش کششی ۱۴۸

شکل ۵- ۲۴ توزیع زاویهٔ انتشار شکستگی (θ_0) نسبت به زاویه داری ترک (φ) ۱۴۹

شکل ۵- ۲۵ منحنی تنش میانگین در اطرف ترک و ناپیوستگی با زاویهٔ ۳۰ درجه ۱۵۱

شکل ۵- ۲۶ صفحهٔ محدود تحت کشش و دارای ترک مرکزی زاویه دار ۱۵۲

شکل ۵- ۲۷ نحوهٔ گسسته سازی مرز صفحهٔ محدود به همراه ترک مرکزی و المانهای ثابت ۱۵۲

شکل ۵- ۲۸ فضای حلقوی قرار گرفته در درون یک محیط بی نهایت ۱۵۵

شکل ۵- ۲۹ تنش های مماسی و شعاعی در امتداد محور x در درون فضای حلقوی ۱۵۵

شکل ۵- ۳۰ ترک عمود بر فصل مشترک..... ۱۵۷

شکل ۵- ۳۱ جهت تنش های اصلی در اطراف ترک در دو محیط با پارامترهای الاستیک متفاوت.۱۵۷

شکل ۵- ۳۲ توزیع ناپیوستگی- جابجایی عمودی و برشی (D_n و D_s) بر روی یک ترک تحت فشار در درون فصل مشترک ۱۶۰

شکل ۵- ۳۳ تنش برشی در امتداد فصل مشترک مقید شده و در روبروی نوک ترک عمود بر آن .۱۶۲