دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

رساله برای دریافت درجه دکتری

رشته معدن گرایش مکانیک سنگ

مطالعه رفتار هیدرومکانیکی ناپیوستگیهای سنگی

نگارنده

رضا اشجاری

استاد راهنما

دکتر مرتضی احمدی

اردیبهشت ۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای رضا اشجاری رساله ۲٤ واحدی خود را **با عنوان مطالعه رفتار هیدرومکانیکی ناپیوستگیهای سنگی** در تاریخ ۱۳۹۲/۲/۳۱ 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 مرتضی احمدی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر کامران گشتاسبی گوهرریزی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر مصطفی شریف زاده	استادیار	
استاد ناظر	دکتر عبدالهادی قزوینیان	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر علی ارومیه ای	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر کورش شهریار	استاد	
استاد ناظر	دکتر مرتضی قارونی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر عبدالهادی قزوینیان	دانشیار	

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

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های 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 پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های 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 باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود 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 آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های 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 هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء

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 رساله دکتری **رضا اشجاری** در رشته **مهندسی معدن-مکانیک سنگ** است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای **دکتر مرتضی احمدی**، مشاوره جناب آقای **دکتر کامران گشتاسبی** و مشاوره جناب آقای **دکتر مصطفی شریف‌زاده** 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 رضا اشجاری دانشجوی رشته مهندسی معدن-مکانیک‌سنگ مقطع دکتری تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله برای دریافت درجه دکتری
رشته معدن گرایش مکانیک سنگ

مطالعه رفتار هیدرومکانیکی ناپیوستگیهای سنگی

نگارنده
رضا اشجاری

استاد راهنما
دکتر مرتضی احمدی

استاتید مشاور
دکتر کامران گشتاسبی
دکتر مصطفی شریف زاده

اردیبهشت ۹۲

ای وطن ای مادر تاریخ ساز
ای مرا بر خاک تو روی نیاز

ای کویر تو بهشت جان من
عشق جاویدان من، ایران من

ای ز تو هستی گرفته، ریشه ام
نیست جز اندیشه ات، اندیشه ام

تقدیم به دو وجود مقدس:

آنان که ناتوان شدند تا من به توانایی برسم...

موهایشان سپید شد تا رو سفید شوم...

و عاشقانه سوختند تا گرما بخش وجودم و روشنگر راهم باشند...

پدر عزیزم

و

مادر مهربان و فداکارم

و تقدیم به

آنانکه اهل یافتند نه اهل بافتن

و آنانکه متواضعانه معترف اند حقیقتی را یافته اند نه کل حقیقت را

تقدیر و تشکر

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمتهای او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. سلام و درود بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگارم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانتهایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلتهایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده اند؛ از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر مرتضی احمدی که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های سازنده شان بارور ساختند؛ از اساتید مشاور جناب آقایان دکتر کامران گشتاسبی و دکتر مصطفی شریف زاده که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین بر خود واجب میدانم از زحمات جناب آقای دکتر عبدالهادی قزوینیان که همواره با گفته های حکیمانه خود راهنما و راهگشای دانشجویان می باشند تشکر و قدردانی نمایم. لازم می دانم که یادی از سرکار خانم عرب زاده (معلم سال اول ابتدایی) نمایم که الفبای علم و انسانیت را به من آموخت. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

بخشی از رساله در آزمایشگاه بتن تونل صدر نیایش (شرکت تابلیه) انجام شد. بر خود لازم می دانم از زحمات جناب آقای مهندس سلحشور و پرسنل آزمایشگاه بتن تونل صدر نیایش که در مرحله طراحی مصالح مصنوعی بدون هیچ چشمداشتی بنده را یاری نمودند تشکر نمایم.

بخش اصلی آزمایشهای این رساله در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه انجام شد. لذا از مسئولین این آزمایشگاه بویژه جناب آقایان مهندس قالیباف، مهندس مسکنی، مهندس اسماعیلی و مهندس نظرنژاد که امکان استفاده از تجهیزات آن آزمایشگاه را مهیا نمودند تشکر و قدردانی می نمایم. انجام این رساله موجب شد که با دوستان عزیزی آشنا شوم که همیشه در خاطرم خواهند بود. انجام این رساله بدون کمکها و حمایتهای جناب آقای مهندس علی محمودی مدیریت وقت بخش سنگ شناسی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک و جناب آقای قورچیانی از تکنسینهای این آزمایشگاه میسر نبود. همچنین از کلیه پرسنل بخش سنگ شناسی این آزمایشگاه که با سعه صدر مرا تحمل نمودند قدردانی می نمایم.

بدین وسیله از جناب آقای مهندس فرهاد شیخانی که در تمام مراحل انجام آزمایشها همچون برادری مهربان کمک و راهنمایی خود را از بنده دریغ ننموده کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در انتها از کلیه دانشجویان بخش معدن که همواره مشوق بنده بوده و مزاحمتهای بنده را با آرامش تحمل می نمودند صمیمانه تشکر می نمایم

رضا اشجاری (بهار ۱۳۹۲)

شکر خدا که هر چه طلب کردم از خدا بر منتهای همت خود کامران شدم

چکیده

جریان سیال در توده‌سنگ ناپیوسته یکی از مباحث مهم در مهندسی معدن، عمران، محیط زیست و انرژی می-باشد. شبکه ناپیوستگی مسیرهای اصلی جریان را تشکیل داده و نفوذپدیری توده‌سنگ توسط نفوذپذیری ناپیوستگیها کنترل می‌شود. مطالعه آزمایشگاهی درزه‌های تکی اساس درک رفتار هیدرولیکی و مکانیکی توده-سنگ می‌باشد. جریان سیال در یک درزه توسط بازشدگی وابسته به تنش درزه(تابعی از تنش خارجی، امتداد بارگذاری نسبت به امتداد درزه، فشار سیال، خصوصیات هندسی درزه و همچنین مواد پرکننده)، مسیرهای جریان(پیچ و خم) در درزه، اتساع و ایجاد گوژ در اثر برش، زبری، سطح تماس، سختی درزه، امتداد ناپیوستگی و رفتار بارگذاری-باربرداری درزه کنترل می‌شود. تنش اعمالی بر ناپیوستگی را می‌توان به دو مولفه نرمال و برشی تجزیه نمود. در مجموع، اثرات این دو مولفه بشدت بهم وابسته بوده و تغییرشکل حاصل از نیروی برشی به بزرگی نیروی نرمال وابسته است. با افزایش تنش نرمال بازشدگی درزه کاهش یافته و مساحت نسبی سطح تماس درزه افزایش می‌یابد. با افزایش جابجایی برشی، درزه اتساع نموده و گذردهی هیدرولیکی افزایش می‌یابد. در طی برش درزه، دندانه‌ها دچار آسیب شده و مسیرهای جریان تغییر می‌یابند. در این شرایط مقادیر گذردهی حاصل از قانون مکعبی دارای بیش تخمینی خواهند بود. لذا نیاز است به منظور استفاده از قانون مکعبی در محاسبه نفوذپذیری درزه، بازشدگی اصلاح شده و بازشدگی معادل(هیدرولیکی) تعیین شود. در این رساله تلاش شده است رفتار هیدرومکانیکی درزه در طی جابجایی برشی بررسی شده و اثر توسعه آسیب بر رابطه بازشدگیهای مکانیکی و هیدرولیکی مطالعه شود. با توجه به پیچیدگی فرآیند توسعه آسیب و اثر آن بر رفتار هیدرومکانیکی درزه، پیش از مطالعه رفتار هیدرولیکی درزه در طی جابجایی برشی، تلاش شد با درنظر گرفتن پارامترهای هندسی سطح درزه، میزان جابجایی برشی، تنش نرمال و مشخصات مقاومتی درزه، فرآیند آسیب در آزمایشهای برش مکانیکی بررسی و کمّی سازی شده و سپس ارتباط بازشدگیهای هیدرولیکی و مکانیکی با استفاده از پارامتر آسیب تعیین شود. به منظور بررسی اثر آسیب بر رفتار هیدرومکانیکی درزه‌ها، مطالعه آزمایشگاهی برروی رفتار مکانیکی و هیدرومکانیکی درزه‌های کششی انجام شد. بدین منظور ۱۵۰ آزمایش برش مستقیم مکانیکی تحت شرایط بار نرمال ثابت و در جابجاییهای برشی و نیروهای نرمال مختلف انجام شده و براساس آن رابطه‌ای جهت پیش‌بینی رشد آسیب برحسب پارامترهای هندسی و مکانیکی درزه ارائه شد. در بخش بعد با انجام ۹ آزمایش هیدرولیکی تحت نیروهای نرمال مختلف و محاسبه بازشدگی هیدرولیکی معادل و بازشدگی مکانیکی تلاش شد، رابطه بین این دو پارامتر برحسب مشخصات هندسی سطح درزه و پارامتر آسیب تعیین شود. علاوه بر بررسیهای فوق براساس نتایج بدست آمده در بخش آزمایشهای مکانیکی، معیاری جهت

محاسبه مقاومت برشی درزه ارائه شد. براساس مطالعات انجام شده مشخص شد که مقاومت برشی درزه به هندسه درزه وابسته بوده و در ارائه معیار مقاومت برشی علاوه بر پارامترهای زاویه‌ای، پارامترهای ارتفاعی نیز باید لحاظ شود. در طی جابجایی برشی، گذردهی افزایش یافته و تغییرات گذردهی با زبری درزه در ارتباط می-باشد. در طی آزمایش برش-جریان و با افزایش بازشدگی مکانیکی، نسبت بازشدگی هیدرولیکی به بازشدگی مکانیکی(e_h/e_m) به دلیل آسیب دندانه‌های درزه و تولید مواد گوژی و در نتیجه مسدود شدن مسیرهای جریان و افزایش پیچ و خم مسیر جریان کاهش یافته و در مقادیر بالای بازشدگی مکانیکی، نسبت e_h/e_m به سمت عدد ثابتی که به هندسه درزه وابسته می‌باشد میل می‌کند. براساس تحقیق انجام شده مشخص شد که در ناحیه پس از مقاومت برشی حداکثر، استفاده از پارامتر بازشدگی متوسط جهت محاسبه نفوذپذیری درزه مناسب نبوده و نیاز است از پارامترهای دیگری استفاده شود. بدین منظور پارامتر آسیب درزه در محاسبه بازشدگی اعمال شده و بازشدگی معادل برحسب حاصلضرب بازشدگی متوسط مکانیکی و پارامتر آسیب(پارامتر آسیب توسط تنش نرمال اعمالی بر درزه و جابجایی برشی اوج نرمالسازی شده است) بیان شده و معیاری جهت تعیین بازشدگی معادل(بازشدگی هیدرولیکی) ارائه شد. معیار ارائه شده به طور مناسبی توانایی پیش‌بینی بازشدگی هیدرولیکی را در نمونه های مختلف و جابجاییهای برشی مختلف دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: درزه، مقاومت برشی، جابجایی برشی، دستگاه برش-جریان، بازشدگی هیدرولیکی، بازشدگی مکانیکی، توسعه آسیب

فهرست مطالب

فصل اول- مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- ضرورت و اهداف تحقیق ۴

۱-۳- روش تحقیق ۵

۱-۴- متغیرها و فرضیات تحقیق ۶

۱-۵- نوآوری تحقیق ۷

۱-۶- ساختار رساله ۸

فصل دوم-مروری بر مطالعات مکانیکی و هیدرومکانیکی درزه

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- هندسه بازشدگی و بازشدگی درزه ۱۲

۲-۲-۱- روش توپوگرافی سطح ۱۵

۲-۲-۲- روش تزریق ۱۵

۲-۲-۳- روش قالب گیری ۱۶

۲-۳- زبری ناپیوستگی ۱۶

۲-۳-۱- اندازه‌گیری JRC ۱۶

۲-۳-۲- پارامترهای آماری ۱۷

۲-۳-۳- روش طیف‌سنجی ۲۴

۲-۳-۴- روش تبدیل فوریه ۲۵

۲-۳-۵- اثر هندسه پروفیل درزه بر پارامترهای زبری ۲۵

۲-۴- رفتار مکانیکی درزه ۲۹

۲-۴-۱- رفتار درزه تحت بار نرمال ۲۹

۲-۴-۲- رفتار درزه تحت بار برشی ۳۱

۲-۴-۳- آزمایش برش مستقیم ۳۴

۲-۴-۴- اثر زبری سطح درزه بر رفتار برشی درزه ۳۸

۲-۴-۵- معیارهای مقاومت برشی درزه ۴۰

۲-۵- آسیب درزه تحت بارهای برشی ۵۷

۲-۶- رفتار هیدرومکانیکی درزه‌ها ۶۳

۲-۶-۱- اثرات تنش بر هندسه حفرات درزه ۶۵

۲-۶-۱-۱- تغییرشکل نرمال-تنش نرمال ۶۵

۲-۶-۱-۲- تغییرشکل برشی-تنش برشی ۶۶

۲-۶-۲- اثر تنش بر نفوذپذیری درزه ۶۷
۲-۶-۲-۱- اثر تنش نرمال بر نفوذپذیری ۶۷
۲-۶-۲-۲- اثر تغییر شکل برشی بر نفوذپذیری ۷۱
۲-۶-۳- بازشدگی و بازشدگی هیدرولیکی ۸۱
۲-۷- جمع‌بندی و بیان فرآیند تحقیق ۸۶
فصل سوم-روش آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایشهای مکانیکی
۳-۱- مقدمه ۹۲
۳-۲- دستگاه برش مستقیم ۹۲
۳-۲-۱- سلول برشی ۹۲
۳-۲-۲- سیستم بارگذاری ۹۴
۳-۲-۳- سیستم کنترل و جمع‌آوری اطلاعات ۹۴
۳-۳- روش آزمایش و آماده‌سازی نمونه ها ۹۵
۳-۳-۱- آماده‌سازی نمونه های طبیعی ۹۶
۳-۳-۲- آماده‌سازی نمونه های مصنوعی ۹۸
۳-۳-۲-۱- قالبگیری ۹۹
۳-۳-۲-۲- ساخت نمونه های مصنوعی ۱۰۰
۳-۴- اندازه‌گیری زبری سطوح درزه ۱۰۳
۳-۴-۱- سیستم اندازه‌گیری زبری سطح درزه ۱۰۳
۳-۴-۲- مشخصات هندسی اولیه سطوح درزه انتخابی ۱۰۷
۳-۵-جمع‌بندی ۱۱۶
فصل چهارم-مطالعه آزمایشگاهی رفتار مکانیکی درزه طی برش و ارائه معیارهای مقاومت برشی و آسیب درزه
۴-۱- مقدمه ۱۱۹
۴-۲- روش انجام آزمایشهای برش ۱۱۹
۴-۳- نتایج آزمایشهای برش بر روی نمونه‌های مصنوعی ۱۲۰
۴-۴- بررسی اثر زبری بر رفتار برشی درزه ۱۲۳
۴-۵- ارائه مدل مقاومت درزه ۱۲۶
۴-۶- نتایج آزمایشهای برش بر روی نمونه‌های سنگی و اعتبارسنجی مدل ارائه شده ۱۳۶
۴-۷- بررسی معیار گراسلی ۱۳۷
۴-۸- ویژگیهای رابطه پیشنهادی ۱۳۸
۴-۹- مطالعه آسیب درزه ۱۴۲

۴-۹-۱- آزمایشهای برش ۱۴۲
۴-۹-۲- بررسی نواحی آسیب ۱۴۳
۴-۹-۳- ارائه مدل آسیب درزه ۱۴۹
۴-۱۰- نتیجه‌گیری ۱۵۷
فصل پنجم-مطالعه رفتار هیدرومکانیکی درزه تحت شرایط ارتفاع ثابت سیال و ارائه معیار تجربی نفوذپذیری
۵-۱- مقدمه ۱۶۱
۵-۲- توسعه دستگاه برش-جریان ۱۶۱
۵-۲-۱- سیستم آببندی ۱۶۲
۵-۳- روش آزمایش ۱۶۴
۵-۴- نتایج آزمایشها ۱۶۵
۵-۵- بازشدگی هیدرولیکی ۱۶۹
۵-۶- بازشدگی مکانیکی ۱۷۱
۵-۷- ارتباط بازشدگیهای هیدرولیکی و مکانیکی ۱۸۳
۵-۸- نتیجه‌گیری ۱۹۶
فصل ششم-نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶-۱- مقدمه ۲۰۰
۶-۲- نتیجه‌گیری ۲۰۰
۶-۳- پیشنهادات ۲۰۲
مراجع ۲۰۲
پیوست ۲۰۹

فهرست جداول

جدول ۲-۱- مقادیر پارامترهای مختلف برای درزه‌های با ارتفاع H_x و طول پایه D_x ۲۷
جدول ۲-۲- مقادیر پارامترهای مختلف برای درزه‌های با زاویه I_x و طول پایه D_x ۲۸
جدول ۲-۳- مقادیر پارامترهای مختلف برای درزه‌های با هندسه ارائه شده در شکل۲-۴۰ ..... ۲۸
جدول ۲-۴- مقادیر زاویه اصطکاک و تنش انتقال ۵۰
جدول ۳-۱- پارامترهای ژئومکانیکی سنگهای توف و ماسه سنگ مورد استفاده جهت ایجاد درزه کششی ۹۸
جدول ۳-۲- طرح اختلاط مصالح مورد استفاده در تهیه نمونه های مصنوعی ۱۰۱
جدول ۳-۳- پارامترهای ژئومکانیکی مصالح مصنوعی ۱۰۱
جدول ۳-۴- پارامترهای هندسی درزه‌های مصنوعی ۱۱۶
جدول ۴-۱- تعیین درجه زبری هندسه‌های درزه بر اساس پارامترهای کمی سطح درزه ۱۲۳
جدول ۴-۲- پارامترهای هندسی درزه‌های سنگی ۱۳۷

فهرست شکلها

شکل ۱-۱- فرآیندهای توامان در توده‌سنگ ناپیوسته ۳
شکل ۲-۱- تصویری از سد Malpasset ۱۰
شکل ۲-۲- درزه‌های دارای پرکننده و بدون پرشدگی ۱۱
شکل ۲-۳ خصوصیات ناپیوستگیها براساس هندسه ناپیوستگی ۱۳
شکل ۲-۴- دو پروفیل سطح درزه، بازشدگی h، بهمراه صفحات مرجع با فاصله d ۱۴
شکل ۲-۵- مفهوم بازشدگی درزه ۱۴
شکل ۲-۶- روشهای مختلف اندازه‌گیری بازشدگی درزه ۱۵
شکل ۲-۷- پروفیلهای استاندارد بارتون ۱۷
شکل ۲-۸- زوایای یک پروفیل در راستای محور x ۲۰
شکل ۲-۹- تشریح زاویه شیب یک صفحه المانی ۲۱
شکل ۲-۱۰- تعیین صفحه عبوری از رئوس سطح، جهت محاسبه مساحت A_p ۲۳
شکل۲-۱۱- نمودار PSD نمونه گرانیت وسترلی ۲۴
شکل ۲-۱۲- هندسه پروفیلهای با ارتفاع ۲ میلیمتر و طول پایه‌های مختلف ۲۶
شکل ۲-۱۳- هندسه پروفیلهای با زاویه دندانه ۲۰ درجه و طول پایه‌های مختلف ۲۷
شکل ۲-۱۴- پروفیلهای با هندسه‌های مختلف ۲۸
شکل ۲-۱۵- بربست درزه در نمونه گرانیتی ۳۰
شکل ۲-۱۶- آزمایش برش مستقیم تحت شرایط CNL و شرایط CNS ۳۲
شکل ۲-۱۷- دیاگرام برش درزه تحت شرایط تنش نرمال ثابت و منحنی ایده‌آل رفتار برشی درزه ۳۲
شکل ۲-۱۸- اثر تنش نرمال بر رابطه تنش برشی و جابجایی برشی ۳۳
شکل ۲-۱۹- منحنی ایده‌آل تنش برشی- جابجایی برشی و جابجایی نرمال-جابجایی برشی در شرایط CNL ۳۳
شکل ۲-۲۰- پیکربندی آزمایش برش مستقیم با (الف) اعمال نیروی برشی موازی صفحه درزه، (ب) نیروی برشی زاویه دار ۳۴
شکل ۲-۲۱- دستگاه برش مستقیم توسعه یافته توسط Ahola ۳۵
شکل ۲-۲۲- دستگاه برش مستقیم توسعه یافته توسط Esaki ۳۵
شکل ۲-۲۳- (الف) دستگاه برشی سه بعدی توسعه یافته توسط Hans and Boulon ۳۶
شکل ۲-۲۴- تصویر دستگاه برش مستقیم خودکنترل توسعه یافته توسط Jiang ۳۶
شکل ۲-۲۵- تصویری از دستگاه برش توسعه یافته توسط Ballivy ۳۷
شکل ۲-۲۶- دستگاه برش HPBPSA توسعه یافته توسط Barla ۳۷
شکل ۲-۲۷- تصویری از دستگاه برش توسعه یافته توسط Ferrero ۳۸
شکل ۲-۲۸- منحنیهای تنش برشی-جابجایی برشی درزه‌های مصنوعی با زبریهای مختلف تحت سه سطح تنش نرمال متفاوت. ۳۹
شکل ۲-۲۹- اثر زبری سطح بر اتساع و زاویه اتساع حداکثر ۳۹
شکل ۲-۳۰- اثر زبری سطح سه نوع درزه(CD2، SB و TJ) بر سختی نرمال و سختی برش ابتدایی ۴۰
شکل ۲-۳۱- مدلهای زبری درزه با زوایه زبری i ۴۲
شکل ۲-۳۲- پوش شکست دوخطی پاتون ۴۲
شکل ۲-۳۳- تعیین پارامترهای مورد استفاده برای استخراج پوش شکست غیرخطی ۴۴

شکل ۲-۳۴- تعیین نرخ اتساع و نسبت مساحت برش، پوشهای شکست مورد انتظار برای سطوح نامنظم و توده‌سنگ، تغییرات موردانتظار نرخ اتساع و نسبت مساحت برش برحسب تنش نرمال ۴۶
شکل ۲-۳۵- تعیین پارامترهای زبری در هندسه درزه ایده‌آل ۴۷
شکل ۲-۳۶- تنش برشی حداکثر درزه بتنی دندانه مثلثی تحت شرایط بار نرمال ثابت ۴۷
شکل ۲-۳۷- تعیین زاویه اصطکاک برای سنگ بکر ۴۹
شکل ۲-۳۸- تعریف هندسی زاویه شیب ظاهری براساس جهت برش ۵۲
شکل۲-۳۹- تغییرات بربست-تنش نرمال درزه در شرایط تحکیم عادی و بیش تحکیمی ۵۵
شکل ۲-۴۰- نسبت وزن گوژ تولید شده به وزن کل نمونه برحسب تنش نرمال CNS برای سه نمونه درزه ۵۹
شکل ۲-۴۱- اندازه‌گیریهای بربست درزه تحت تنش نرمال ۶۶
شکل ۲-۴۲- تغییرات اتساع درطی برش درزه زبر تحت بار نرمال ثابت ۶۷
شکل ۲-۴۳- اثر تنش برشی بر نفوذپذیری درزه ۷۳
شکل ۲-۴۴- نتایج آزمایش برش-جریان برای درزه گرانیت ۷۵
شکل ۲-۴۵- تغییرات نفوذپذیری درزه با توجه به جابجایی برشی در طی بارگذاری برشی سیکلی ۷۶
شکل ۲-۴۶- نتایج آزمایشهای برش-جریان تحت جابجایی نرمال ثابت ۷۷
شکل ۲-۴۷- تغییرات گذردهی برحسب جابجایی برشی تحت شرایط مختلف آزمایش ۷۸
شکل ۲-۴۸- بربست اندازه گیری شده و بازشدگی هیدرولیکی محاسبه شده برحسب جابجایی برشی ۷۸
شکل ۲-۴۹- آزمایشهای برش هیدرومکانیکی تحت تنش نرمال ثابت ۴ مگاپاسکال بر روی یک نمونه درزه مصنوعی ۷۹
شکل ۲-۵۰- مقایسه تغییرات هدایت هیدرولیکی طی برش تحت تنش نرمال ۸۰
شکل ۲-۵۱- تغییر هدایت هیدرولیکی در طی برش در درزه‌های دارای تاریخچه برش پیشین ۸۱
شکل ۲-۵۲- فرمهای مختلف ناپیوستگیهای توده‌سنگ ۸۲
شکل ۲-۵۳- رابطه تجربی با درنظر گرفتن زبری ناپیوستگی و بازشدگی ۸۴
شکل ۲-۵۴- E/e محاسبه شده برحسب e ۸۵
شکل ۲-۵۵- فرآیند مطالعه رفتار مکانیکی درزه ۸۹
شکل ۲-۵۶- فرآیند مطالعه رفتار هیدرومکانیکی درزه ۹۰
شکل ۳-۱- اجزا مختلف سیستم برش ۹۳
شکل ۳-۲- سلول برش ۹۴
شکل ۳-۳- تصویری از نرم افزار ثبت داده‌ها. ۹۵
شکل ۳-۴- شمایی از دستگاه مورد استفاده جهت ایجاد درزه کششی ۹۶
شکل ۳-۵- نمونه‌ای از درزه‌های کششی ایجاد شده ۹۷
شکل ۳-۶- نمونهای از نتایج آزمایش تکمحوری بر روی سنگ توف ۹۷
شکل ۳-۷- هندسه شش نمونه درزه مورد استفاده در ساخت نمونه های مصنوعی ۹۸
شکل ۳-۸- سیلیکون RTV2 و هاردنر ۹۹
شکل ۳-۹- سطح درزه اولیه، قالب سیلیکونی تهیه شده و نمونه مصنوعی ۱۰۰
شکل ۳-۱۰- دانهبندی مصالح مورد استفاده در ملاتهای سیمانی ۱۰۱
شکل ۳-۱۱- نمونه‌ای از نتایج آزمایش تکمحوری ملاتهای مورد استفاده ۱۰۲
شکل ۳-۱۲- سطح شکست نمونه‌های استوانه ای و دیسکی ملاتهای مورد استفاده در آزمایشهای فشاری تکمحوری و برزیلین ۱۰۲

شکل ۳-۱۳- مراحل بازتولید نمونه های مصنوعی ۱۰۴
شکل ۳-۱۴- اعوجاج و انحراف پروفیل اندازه‌گیری به علت ابعاد محدود حسگر در روشهای مکانیکی..... ۱۰۵
شکل ۳-۱۵- سیستم اندازه‌گیری ATOS III..... ۱۰۶
شکل ۳-۱۶- اصول سیستم ATOS III..... ۱۰۶
شکل ۳-۱۷- اجزا مختلف سیستم ATOS ۱۰۷
شکل ۳-۱۸- فلوچارت تحلیل هندسه سطوح درزه..... ۱۱۰
شکل ۳-۱۹- رابطه نسبت مساحت تماس بالقوه برحسب زاویه شیب ظاهری..... ۱۱۱
شکل ۳-۲۰- اثر افزایش پارامتر C بر نسبت مساحت تماس..... ۱۱۲
شکل ۳-۲۱- هندسه ارتفاعی و زاویه‌ای سطح پایین درزه‌های مصنوعی مورد استفاده..... ۱۱۳
شکل ۳-۲۲- توزیعهای ارتفاعی و زاویه‌ای سطح پایین هندسه‌های مورد بررسی ۱۱۵
شکل۴-۱- منحنیهای نیروی برشی-جابجایی برشی و اتساع-جابجایی برشی تحت نیروهای نرمال مختلف ۱۲۰
شکل ۴-۲- منحنی تیپ نیروی برشی-جابجایی برشی درزه تحت بار نرمال ثابت ۱۲۱
شکل ۴-۳- دیاگرام جابجایی اصطکاکی و دیاگرام شماتیک نیروی اصطکاکی برحسب جابجایی جسم لغزشی..... ۱۲۳
شکل ۴-۴- رفتار برشی و اتساعی درزه‌های P6, P18, P20 ساخته شده از ملات ۲۵ ..... ۱۲۴
شکل ۴-۵- ارتباط مقادیر جابجایی قائم(اتساع) اوج و حداکثر با پارامترهای هندسی درزه..... ۱۲۵
شکل ۴-۶- تغییرات زاویه اتساع برحسب تنش نرمال برای مقاومتهای مختلف ۱۲۶
شکل ۴-۷- تغییرات زاویه اتساع برحسب تنش نرمال درزه‌های P6، P12 و P18..... ۱۲۸
شکل ۴-۸- تغییرات زاویه اتساع برحسب پارامتر تنش نرمال شده برای نمونه P18..... ۱۲۹
شکل ۴-۹- تغییرات زاویه اتساع برحسب پارامتر تنش نرمال شده برای نمونه‌های P6، P12 و P18 و ملات m25..... ۱۲۹
شکل ۴-۱۰- شمایی از تابع مورد نیاز..... ۱۳۰
شکل ۴-۱۱- پارامترهای b و d هندسه‌های مختلف. ۱۳۲
شکل ۴-۱۲- روند تغییرات پارامتر d برحسب پارامترهای RMS(z) و $C.\theta^*_{max}$. ۱۳۳
شکل ۴-۱۳- رابطه پارامتر d و $C.\theta^*_{max}$/RMS..... ۱۳۴
شکل ۴-۱۴- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده از معیار پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی..... ۱۳۵
شکل ۴-۱۵- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده از معیار پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی برای نمونه P20 در مقاومتهای مختلف.
..... ۱۳۵
شکل ۴-۱۶- نتایج تستهای برش بر روی نمونه‌های سنگی ۱۳۶
شکل ۴-۱۷- مقایسه نتایج مدل پیشنهادی، معیار گراسلی و نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های سنگی. ۱۳۷
شکل ۴-۱۸- پیش بینی معیار گراسلی برای نمونه P6 ساخته شده از ملات پلاستری ۱۳۸
شکل ۴-۱۹- تغییرات مقاومت برشی با افزایش پارامتر زبری C در معیار گراسلی..... ۱۳۸
شکل ۴-۲۰- تغییرات زاویه اتساع با افزایش تنش نرمال ۱۳۹
شکل ۴-۲۱- تغییرات زاویه اتساع با افزایش مقاومت فشاری ۱۳۹
شکل ۴-۲۲- تغییرات زاویه اتساع با افزایش RMS(z) ۱۴۰
شکل ۴-۲۳- تغییرات زاویه اتساع با افزایش زاویه حداکثر درزه..... ۱۴۰
شکل ۴-۲۴- تغییرات زاویه اتساع با افزایش پارامتر زبری C ۱۴۰
شکل ۴-۲۵- عملکرد معیارهای بارتون،گراسلی و معیار پیشنهادی برحسب σ_n/σ_c ۱۴۱