ن والقلم وما یسطرون

دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی معدن– گرایش مکانیک سنگ

بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر مکانیزم شکست و مقاومت سنگ تحت فشارهای جانبی

نگارنده:

ابوالفضل رضایی‌پور

استاد راهنما:

دکتر عبدالهادی قزوینیان

زمستان ۱۳۹۳

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای ابوالفضل رضایی پور پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر مکانیزم شکست و مقاومت سنگ تحت فشارهای جانبی** در تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۱ 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 معدن - مکانیک سنگ پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر عبدالهادی قزوینیان	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر کامران گشتاسبی گوهرریزی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مرتضی قارونی نیك	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر کامران گشتاسبی گوهرریزی	دانشیار	

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 مورد 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 **ابوالفضل رضایی‌پور** دانشجوی رشته **مهندسی معدن - مکانیک سنگ** ورودی سال تحصیلی**۱۳۹۱** مقطع **کارشناسی ارشد** 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 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: ۱۳۹۳/۱۱/۱۱

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 نگارنده در رشته **مهندسی معدن – مکانیک سنگ** است که در سال**۱۳۹۳**در **دانشکده فنی و مهندسی** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی **جناب آقای دکتر عبدالهادی قزوینیان** 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 **ابوالفضل رضایی‌پور** دانشجوی رشته **مهندسی معدن – مکانیک سنگ** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: ابوالفضل رضایی‌پور

تاریخ و امضا:۱۳۹۳/۱۱/۱۱

تقدیم به

پدر و مادرم که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یاوری دلسوز و فداکار، و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

و تقدیم به

همه انسان‌های بزرگ و معلمانم که به من علم و عمل آموختند.

تشکر و قدردانی

فضل خدای را که تواند شمار کرد؟ یا کیست آن که شکر یکی از هزار کرد؟

در این بخش بر خود لازم می‌دانم که از زحمات خانواده‌ام، مخصوصاً پدر و مادر عزیزم که همواره در تمام مراحل زندگیم با من همراه بوده و سختی‌ها و مشکلات فراوانی را برای آسایش و راحتی ایجانب متحمل شده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

از استاد عالیقدر، دلسوز و بزرگوارم جناب آقای دکتر عبدالهادی قزوینیان که همواره با رویی گشاده پذیرای من بودند و در انجام این پایان‌نامه از راهنمایی‌ها، نصایح و رهنمودهای حکیمانه و ارزشمند ایشان بهره‌های فراوان بردم، تشکر و قدرانی می نمایم و از خداوند متعال توفیق و بهروزی در تمام طول زندگی برای ایشان آرزومندم.

از کلیه اساتید و سرورانی که از سر لطف مرا در طی تحصیل یاری کردند، خصوصاً اساتید گروه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس جناب آقایان دکتر کامران گشتاسبی و دکتر مرتضی احمدی و دکتر حمیدرضا نجاتی از صمیم قلب تشکر و قدردانی می‌کنم.

از جناب آقای دکتر میررئوف هادئی که با راهنمایی بی منتشان در به ثمر رسیدن این پژوهش بنده را یاری کردند، نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

از جناب آقای مهندس شیخانی نیز که انجام آزمایش‌ها بدون محبت بی دریغشان امکان‌پذیر نبود، نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

ابوالفضل رضایی‌پور- زمستان ۱۳۹۳

چکیده

ناپیوستگی‌ها یکی از مهمترین عواملی هستند که باعث ایجاد انیزوتروپی مکانیکی در سنگ شده و سبب کاهش مقاومت سنگ می‌گردند.از جمله مهمترین خواص ناپیوستگی‌ها که بر روی مقاومت نمونه‌ی انیزوتروپ اثر می‌گذارد، زبری سطح ناپیوستگی‌هاست. همچنین با توجه به اینکه در طبیعت سنگ‌ها تحت فشار جانبی قرار دارند، لذا بررسی تأثیر آن بر رفتار سنگ نیز همواره مورد توجه مهندسین مکانیک سنگ قرار داشته است.در تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر روی مقاومت و مدشکست سنگ، بدلیل نیاز به تعداد نسبتاً زیادی از نمونه‌های درزه‌دار با خصوصیات کاملاً یکسان و عدم امکان فراهم کردن این نمونه‌ها به صورت طبیعی ،از نمونه‌های مصنوعی ساخته شده از مخلوط گچ و سیمان استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌های مناسب، ابتدا بر اساس پروفیل‌های زبری استاندارد ارائه شده توسط بارتن- چوبی سه زبری با مقادیر JRC برابر با ۷، ۱۲ و ۱۷ انتخاب گردید و بر روی قطعات پلاستیک فشرده طراحی شد. سپس با استفاده از قالبهای مناسب بلوک‌هایی قرینه با سطح زبر ایجاد گردید. این بلوک‌ها تحت زوایای ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه برش داده شد و در ادامه از این بلوک‌ها در جهت موازی با برش کرگیری شد تا یک نمونه دارای ناپیوستگی با زاویه‌ی شیب برابر با زوایای بیان شده ایجاد گردد. پس ازمغزه‌گیری، نمونه‌ها بر اساس استاندارد ISRM برای انجام آزمایش‌ها آماده گردید. ۲۸۰ نمونه‌ی تهیه شده تحت آزمایش مقاومت فشاری سه محوری در فشارهاری جانبی ۰/۵، ۱/۵، ۲، ۳/۵ و ۵ مگاپاسکال قرار گرفت و تاثیر زبری سطح ناپیوستگی بر روی مقاومت و مد شکست نمونه‌های انیزوتروپ بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان دادند که با افزایش زبری سطح ناپیوستگی و همچنین افزایش فشار جانبی مقاومت نمونه‌های انیزوتروپ افزایش می‌یابد و اثر انیزوتروپی بر روی مقاومت سنگ کاهش می‌یابد. همچنین افزایش زبری باعث کاهش فرم شانه‌ای نمودارهای انیزوتروپی می‌گردد. همچنین تغییرات زبری سطح ناپیوستگی باعث تغییر در مد شکست ایجاد شده در نمونه‌های انیزوتروپ می‌گردد. در نهایت به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری سه محوری با توجه به تغییرات فشارجانبی، زاویه ناپیوستگی و همچنین مقدار JRC، یک رابطه‌ی تجربی ارائه شد. اضافه بر رابطه‌ی تجربی دو مدل رگرسیون چندمتغیره‌ی خطی و سیستم های فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی نیز ارائه گردید. بررسی نتایج نشان می‌دهد که رابطه‌ی تجربی و مدل‌های ارائه شده کارآیی قابل قبولی به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری سه محوری سنگ تحت شرایط زبری و فشار جانبی مختلف دارد.

کلمات کلیدی: انیزوتروپی، زبری سطح ناپیوستگی، فشار محصور کننده، اثر انیزوتروپی، مد شکست

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... د

فهرست شکل‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- معرفی تحقیق ۲

فصل ۲- مطالعه‌ی اثر انیزوتروپی در مقاومت سنگ‌ها ۴

۲-۱- مقدمه ۵

۲-۲- انواع انیزوتروپی ۵

۲-۲-۱- تقسیم بندی انیزوتروپی بر اساس نحوه‌ی تشکیل سطوح ضعیف ۵

۲-۲-۱-۱- انیزوتروپی ذاتی ۵

۲-۲-۱-۲- انیزوتروپی القائی ۶

۲-۲-۲- طبقه‌بندی انیزوتروپی براساس شکل منحنی مقاومت فشاری تک محوری ($\boldsymbol{\sigma c}$) نسبت به زاویه بین صفحه ضعف و تنش اصلی ماکزیمم (β) ۶

۲-۲-۲-۱- انیزوتروپی صفحه ای یا کلیواژ ۷

الف) انیزوتروپی U شکل: ۷

۲-۲-۲-۲- انیزوتروپی صفحه لایه بندی ۹

۲-۳- نسبت انیزوتروپی ۱۰

۲-۴- پارامتر اثر انیزوتروپی ۱۲

۲-۵- تاریخچه مطالعات رفتار محیط انیزوتروپ ۱۳

۲-۶- پیش بینی مقاومت سنگ‌های انیزوتروپ ۱۶

۲-۶-۱- معیار موهر-کولمب ۱۷

۲-۶-۲- معیار جیگر ۱۷

۲-۶-۳- معیار هوک- براون ۱۹

۲-۶-۴- معیار هوک- براون برای سنگ‌های انیزوتروپ ۱۹

۲-۶-۵- اصلاح معیار هوک و براون ۲۲

۲-۶-۶- اثر انیزوتروپی بر روی مقاومت فشاری تک محوره ۲۲

۲-۶-۷- معیار یادبیر ۲۳

۲-۶-۸- معیار رامامورتی ۲۴
۲-۶-۹- معیار اصلاح شده‌ی رامامورتی ۲۹

فصل ۳- مروری بر روش‌های اندازه‌گیری و تعیین زبری سطح درزه ۳۲

۳-۱- مقدمه ۳۳
۳-۲- معیارهای مهم برای تعیین مقاومت برشی ۳۳
۳-۲-۱- مدل کولمب ۳۴
۳-۲-۲- مدل پاتن ۳۴
۳-۲-۳- مدل لدیانی و آرچامبولت ۳۵
۳-۲-۴- مدل بارتن ۳۶
۳-۳- روش‌های اندازه‌گیری زبری ۳۶
۳-۳-۱- تعیین JRC با استفاده از مدل‌های استاندارد ۳۶
۳-۳-۲- تعیین JRC با استفاده از سطح شیبدار ۳۷
۳-۳-۳- تعیین JRC با استفاده از تخته تراز در صحرا ۳۸
۳-۳-۴- تعیین JRC با استفاده از پارامترهای آماری ۳۹
۳-۳-۵- روش‌های مبتنی بر هندسه‌ی فراکتال ۴۰
۳-۳-۵-۱- تعریف اشکال فراکتال ۴۱
۳-۳-۵-۲- تعیین بعد فراکتال و JRC درزه های طبیعی ۴۴
۳-۳-۵-۳- تعیین بعد فراکتال و JRC درزه های مصنوعی ۴۴
۳-۳-۶- تأثیر مقیاس بر JRC ۴۴

فصل ۴- مطالعات آزمایشگاهی و انجام آزمایشات ۴۶

۴-۱- مقدمه ۴۷
۴-۲- ساخت نمونه‌های مورد نیاز در آزمایشگاه ۴۷
۴-۲-۱- انتخاب مواد مناسب برای مدلسازی نمونه‌های زبر درزه‌دار ۴۷
۴-۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها ۴۸
۴-۳- آزمون‌های آزمایشگاهی ۵۵
۴-۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری ۵۵
۴-۳-۲- آزمایش برش مستقیم ۵۷
۴-۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری سه محوری ۵۸
۴-۳-۳-۱- مشخصات کلی ابزار آزمایش مقاومت فشاری سه محوری ۶۰
۴-۳-۳-۲- نمونه‌های مورد آزمایش ۶۲
۴-۳-۳-۳- مراحل انجام آزمایش ۶۳

۴-۳-۳-۴- آزمایش مقاومت فشاری سه محوری بر روی نمونه‌های بکر ۶۳
۴-۳-۳-۵- آزمایش مقاومت فشاری سه محوره بر روی نمونه‌های انیزوتروپ و تحت JRC های مختلف ۶۴

فصل ۵- مطالعه اثر زبری سطح ناپیوستگی بر روی مقاومت سنگ و مد شکست تحت فشارهای جانبی مختلف ۶۷

۵-۱- مقدمه ۶۸
۵-۲- بررسی تأثیر زبری سطح ناپیوستگی بر مقاومت سنگ در فشار جانبی ثابت ۶۸
۵-۳- بررسی تأثیر زبری سطح ناپیوستگی برروی پارامتر اثر انیزوتروپی در فشار جانبی ثابت ۷۳
۵-۴- بررسی تأثیر فشار محصور کننده بر مقاومت سنگ انیزوتروپ در JRC ثابت ۷۸
۵-۵- بررسی تأثیر فشار محصور کننده بر روی رفتار انیزوتروپی، با توجه به مقاومت فشاری تک محوری سنگ، در JRC ثابت ۸۱
۵-۶- بررسی تأثیر زبری سطح ناپیوستگی بر مد شکست در نمونه‌های انیزوتروپ، تحت فشارهای جانبی مختلف ۸۳
۵-۶-۱- شکافتگی ۸۳
۵-۶-۲- برش ۸۳
۵-۶-۳- چرخش ۸۴
۵-۶-۴- لغزش ۸۴
۵-۷- روش‌های مدل‌سازی به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری سه‌محوری سنگ ۹۳
۵-۷-۱- رگرسیون چند متغیره خطی ۹۳
۵-۷-۲- سیستم های فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS) ۹۵
۵-۸- ارائه‌ی یک رابطه‌ی تجربی به منظور تخمین مقاومت فشاری سه محوری سنگ، بر اساس تغییرات زبری سطح درزه و زاویه‌ی شیب ناپیوستگی ۱۰۰
۵-۸-۱- مقایسه‌ی رابطه‌ی تجربی و مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی مقاومت فشاری سه محوری سنگ ۱۰۲

فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۳

۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۴
۶-۲- پیشنهادات ۱۰۶

فهرست مراجع ۱۰۷

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول۲- : مقادیر پارامتر r برای درزه‌های پر نشده ۲۶

جدول۲-۲: مقادیر پارامتر r برای درزه‌های پر شده ۲۶

جدول۲-۳: مقادیر n برای درزه با زوایای مختلف ۲۷

جدول ۳-۱: نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون پروفیل‌های استاندارد بارتن وچوبی ۴۰

جدول ۴-۱: مقدار JRC برای پروفیل‌های بارتن برای یک درزه به طول ۱۵cm ۵۳

جدول ۴-۲:کلاس مربوط به پروفیل‌های بارتن برای زوایای مختلف در حالت JRC=۷ ..... ۵۴

جدول ۴-۳:کلاس مربوط به پروفیل‌های بارتن برای زوایای مختلف در حالت JRC=۱۲ ..... ۵۴

. جدول ۴-۴:کلاس مربوط به پروفیل‌های بارتن برای زوایای مختلف در حالت JRC=۱۷ ..... ۵۵

جدول ۴-۵: پارامترهای مکانیکی سنگ بکر ۵۶

جدول ۴-۶: نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم ۵۷

جدول ۴-۷: مقایسه‌ی انواع استانداردهای آزمایش مقاومت فشاری سه محوری ۵۹

جدول ۴-۸: نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری سه محوری بر روی نمونه های بکر ۶۳

جدول ۴-۹: مقاومت فشاری سه محوری ،σ_1 (MPa)، نمونه‌های انیزوتروپ برای فشارهای جانبی و زوایای مختلف انیزوتروپی و JRC=۰ ..... ۶۵

جدول ۴-۱۰: مقاومت فشاری سه محوری ،σ_1 (MPa)، نمونه‌های انیزوتروپ برای فشارهای جانبی و زوایای مختلف انیزوتروپی و JRC=۷ ..... ۶۵

جدول ۴-۱۱: مقاومت فشاری سه محوری ،σ_1 (MPa)، نمونه‌های انیزوتروپ برای فشارهای جانبی و زوایای مختلف انیزوتروپی و JRC=۱۲ ..... ۶۶

جدول ۴-۱۲: مقاومت فشاری سه محوری ،σ_1 (MPa)، نمونه‌های انیزوتروپ برای فشارهای جانبی و زوایای مختلف انیزوتروپی و JRC=۱۷ ..... ۶۶

جدول ۵-۱: مقادیر زاویه‌ی مربوط به کمترین مقاومت سنگ انیزوتروپ ۷۲

جدول ۵-۲: مقادیر اثر انیزوتروپی در σ_3=۰/۵ MPa ۷۳

جدول ۵-۳: مقادیر اثر انیزوتروپی در σ_3=۱/۵ MPa ۷۴

جدول ۵-۴: مقادیر اثر انیزوتروپی در σ_3=۲ MPa ۷۴

جدول ۵-۵: مقادیر اثر انیزوتروپی در σ_3=۳/۵ MPa ۷۵

جدول ۵-۶: مقادیر اثر انیزوتروپی در σ_3=۵ MPa ۷۵

جدول ۵-۷: نواحی مد شکست در نمونه‌های انیزوتروپ با سطح صاف ۸۷
جدول ۵-۸: نواحی مد شکست در نمونه‌های انیزوتروپ با سطح زبر ۹۲
جدول ۵-۹: ضرایب به دست آمده حاصل از تحلیل رگرسیون چند متغیره خطی با استفاده از نرم‌افزار SPSS 21 ..... ۹۳
جدول ۵-۱۰: انواع مدل‌های به دست آمده با استفاده از انفیس. ۹۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل۲-۱:انیزوتروپی ذاتی. (الف):مقیاس ماکرو. (ب): مقیاس میکرو. ۶
شکل۲-۲:طبقه بندی انیزوتروپی. ۷
شکل۲-۳: منحنی انیزوتروپی U شکل در اسلیت ۸
شکل۲-۴: منحنی انیزوتروپی در فیلیت. ۸
شکل۲-۵: انیزوتروپی موجی ۹
شکل۲-۶: انیزوتروپی صفحه لایه بندی ۹
شکل۲-۷: تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نسبت به زاویه بین صفحه ضعف و تنش اصلی حداکثر برای انیزوتروپی ذاتی و القائی ۱۰
شکل۲-۸: تغییرات نسبت انیزوتروپی با فشار جانبی ۱۱
شکل۲-۹: تنش نرمال وتنش برشی در سطح ناپیوستگی. ۱۸
شکل۲-۱۰: تئوری صفحه ضعف منفرد ۲۰
شکل۲- ۱۱: تغییرات نسبت $\boldsymbol{m/mi}$ و s نسبت به زاویه شیب β برای اسلیت‌های مارتینبورگ ۲۱
شکل۲-۱۲:نمودار $\boldsymbol{\sigma cj/\sigma 3}$ به $\boldsymbol{\sigma 1-\sigma 3/\sigma 3}$ ۲۴
شکل۲-۱۳:نمونه‌ها با سیستم درزه‌های مختلف که توسط محققین مختلف بکار رفته است ۲۵
شکل۲-۱۴: رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری نمونه ی درزه‌دار و فاکتور درزه. ۲۷
شکل۲-۱۵: رابطه بین $\boldsymbol{\alpha j/\alpha i}$ و $\boldsymbol{\sigma cj/\sigma ci}$ برای نمونه‌های درزه‌دار. ۲۸
شکل۲-۱۶: رابطه بین $\boldsymbol{\beta i/\beta j}$ و $\boldsymbol{\alpha j/\alpha i}$ برای نمونه‌های درزه‌دار. ۲۹
شکل۲- ۱۷: مقایسه نتایج معیار رامامورتی به دست آمده از حالت تجربی با نتایج آزمایشگاهی در زاویه ناپیوستگی صفر درجه. ۲۹
شکل۲-۱۸: مقایسه نتایج معیار رامامورتی به دست آمده از حالت تجربی با نتایج آزمایشگاهی در زاویه ی ناپیوستگی $^{\circ}$۱۵. ..... ۳۰
شکل۲-۱۹: مقایسه نتایج معیار رامامورتی به دست آمده از حالت تجربی با نتایج آزمایشگاهی در زاویه ی ناپیوستگی $^{\circ}$۳۰ ..... ۳۰
شکل۲-۲۰: مقایسه نتایج معیار رامامورتی به دست آمده از حالت تجربی با نتایج آزمایشگاهی در زاویه ناپیوستگی $^{\circ}$۴۵ ..... ۳۰

شکل۳- ۱: نمایی از سطح زبر با زاویه دندانه های i ۳۵
شکل۳- ۲: نمایی از پوش شکست دو خطی تحت آزمایش برش مستقیم ۳۵
شکل۳- ۳: پروفیل‌های زبری و مقادیر JRC مربوط به آنها (بارتن و چوبی ۱۹۷۷) ۳۷
شکل۳- ۴ : آزمایش سطح شیبدار جهت تعیین JRC ۳۸
شکل۳- ۵: تعیین مقدار JRC در صحرا ۳۸
شکل۳- ۶: ارتباط بین JRC با Z2 وSF ۴۰
شکل۳- ۷: نمایش خود تشابهی سطوح فراکتال ۴۱
شکل۳- ۸:خصوصیت تشکیل از راه تکرار در اجسام فراکتال ۴۲
شکل۳- ۹: مراحل تولید مثلث‌های متساوی الاضلاع در اشکال شبیه به دانه‌های برف ۴۳
شکل۳- ۱۰:تأثیر مقیاس روی مقاومت برشی ۴۵
شکل ۴-۱:قالب پلکسی‌گلاس مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌ها ۴۸
شکل ۴-۲:یک نمونه از پروفیل‌های زبر ساخته شده با استفاده از دستگاه CNC ۴۹
شکل ۴-۳: یک جفت از پروفیل‌های ساخته شده ۴۹
شکل ۴-۴:نمونه‌ای از یک بلوک با سطح زبر، ساخته شده با استفاده از پروفیل بارتن–چوبی ۵۰
شکل ۴-۵: یک جفت بلوک ساخته شده با سطوح زبر ۵۰
شکل ۴-۶: روند تهیه نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش ۵۱
شکل ۴-۷: مغزه‌ی به دست آمده پس از مغزه‌گیری از بلوک شامل درزه ی زبر ۵۱
شکل ۴-۸: نمونه‌های ساب داده شده در زوایای مختلف انیزوتروپی ۵۲
شکل ۴-۹: مغزه‌های تهیه شده با زبری‌های مختلف و زاویه‌ی انیزوتروپی 30° ۵۲
شکل ۴-۱۰: شماتیکی از یک مغزه‌ی تهیه شده با زاویه‌ی ناپیوستگی 15° ۵۴
شکل ۴-۱۱: منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری ۵۶
شکل ۴-۱۲: نمونه-ی بکر که تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری شکسته است ۵۶
شکل ۴-۱۳: دستگاه آزمایش برش مورد استفاده در آزمایش برش مستقیم ۵۷
شکل ۴-۱۴: منحنی تنش برشی - تنش نرمال ۵۸
شکل ۴-۱۵: تصویری از بدنه سلول سه محوره هوک ۶۰
شکل ۴-۱۶: نمائی از تجهیزات آزمایش مقاومت فشاری سه محوری ۶۲
شکل ۴-۱۷: پوش معیار هوک- براون و موهر – کولمب ۶۴
شکل ۵-۱: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی برای σ_3=۰/۵ MPa ۶۸
شکل ۵-۲: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی برای σ_3=۱/۵ MPa ۶۹
شکل ۵-۳: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی برای σ_3=۲ MPa ۶۹

شکل ۵-۴: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی برای σ_3=۳/۵ MPa. . ۷۰
شکل ۵-۵: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی برای σ_3=۵ MPa..... ۷۰
شکل ۵-۶: تأثیر زبری سطح ناپیوستگی بر روی زاویه‌ی مربوط به کمترین مقاومت سنگ انیزوتروپ. ۷۳
شکل ۵-۷: تغییرات اثر انیزوتروپی نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی در حالت σ_3=۰/۵ MPa. ۷۶
شکل ۵-۸: تغییرات اثر انیزوتروپی نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی در حالت σ_3=۱/۵ MPa. ۷۶
شکل ۵-۹: تغییرات اثر انیزوتروپی نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی در حالت σ_3=۲ MPa. ۷۷
شکل ۵-۱۰: تغییرات اثر انیزوتروپی نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی در حالت σ_3=۳/۵ MPa. ۷۷
شکل ۵-۱۱: تغییرات اثر انیزوتروپی نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی در حالت σ_3=۵ MPa. ۷۸
شکل ۵-۱۲: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی در شرایط JRC=۰ .. ۷۹
شکل ۵-۱۳: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویهی ناپیوستگی در شرایط JRC=۷... ۷۹
شکل ۵-۱۴: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی در شرایط JRC=۱۲ ۸۰
شکل ۵-۱۵: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویهی ناپیوستگی در شرایط JRC=۱۷ ۸۰
شکل ۵-۱۶: تغییرات اثر انیزوتروپی نسبت به σ_{ci}/σ_3 در زوایای مختلف ناپیوستگی در حالت JRC=۰..... ۸۱
شکل ۵-۱۷: تغییرات اثر انیزوتروپی نسبت به σ_{ci}/σ_3 در زوایای مختلف ناپیوستگی در حالت JRC=۷..... ۸۱
شکل ۵-۱۸: تغییرات اثر انیزوتروپی نسبت به σ_{ci}/σ_3 در زوایای مختلف ناپیوستگی در حالت JRC=۱۲..... ۸۲
شکل ۵-۱۹: تغییرات اثر انیزوتروپی نسبت به σ_{ci}/σ_3 در زوایای مختلف ناپیوستگی در حالت JRC=۱۷..... ۸۲
شکل ۵-۲۰: شماتیک مدهای شکست نمونه های انیزوتروپ ۸۴
شکل ۵-۲۱: شکست ایجاد شده در نمونه های انیزوتروپ با سطوح صاف، برای زوایای ناپیوستگی ۰ و ۱۵°..... ۸۵
شکل ۵-۲۲: شکست ایجاد شده در نمونه های انیزوتروپ با سطوح صاف، برای زوایای ناپیوستگی ۳۰°و ۴۵°..... ۸۶
شکل ۵-۲۳: شکست ایجاد شده در نمونه های انیزوتروپ با سطوح صاف، برای زوایای ناپیوستگی ۶۰°، ۷۵° و ۹۰°..... ۸۶
شکل ۵- ۲۴: مقایسه ی مد شکست در حالت فشار جانبی ۰/۵ و ۵ مگاپاسکال برای نمونه های با زاویه‌ی انیزوتروپی ۶۰°. ۸۷
شکل ۵- ۲۵: نمایی از شکست نمونه‌های دارای ناپیوستگی با سطح زبر در زاویه‌ی انیزوتروپی ۰°..... ۸۸
شکل ۵- ۲۶: نمایی از شکست نمونه‌های دارای ناپیوستگی با سطح زبر در زاویه‌ی انیزوتروپی ۱۵°..... ۸۸
شکل ۵- ۲۷: شماتیکی از شکست یک نمونه..... ۸۹
شکل ۵-۲۸: یک نمونه‌ی دارای ناپیوستگی با سطح زبر (JRC=۷) و زاویه‌ی ۳۰°، ۹۰
شکل ۵-۲۹: یک نمونه‌ی دارای ناپیوستگی با سطح زبر (JRC=۱۲) و زاویه‌ی ۴۵°..... ۹۰

شکل ۵- ۳۰: نمایی از شکست دو نمونه‌ی دارای ناپیوستگی با زاویه‌ی $^{\circ}$۶۰ و زبری‌های مختلف. ۹۱
شکل ۵- ۳۱: نمایی از شکست دو نمونه‌ی دارای ناپیوستگی با زاویه‌ی $^{\circ}$۷۵ و زبری‌های مختلف ۹۱
شکل ۵-۳۲: نمایی از شکست دو نمونه‌ی دارای ناپیوستگی با زاویه‌ی $^{\circ}$۹۰ و زبری‌های مختلف ۹۲
شکل ۵-۳۳: مقایسه‌ی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده‌ی σ_1 با استفاده از رگرسیون چند متغیره‌ی خطی برای هر یک از آزمایش‌ها. ۹۴
شکل ۵-۳۴: همبستگی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده-ی σ_1 با استفاده از رگرسیون چند متغیره‌ی خطی. ۹۴
شکل ۵-۳۵: الگوریتم ساده ای از شبکه انفیس ۹۷
شکل ۵-۳۶: ساختار مدل انفیس انتخاب شده. ۹۸
شکل ۵- ۳۷: مقایسه‌ی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده‌ی σ_1 با استفاده از مدل انفیس برای هر یک از آزمایش‌ها. ۹۹
شکل ۵- ۳۸: همبستگی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیشبینی شدهی σ_1 با استفاده از مدل انفیس. ۹۹
شکل ۵-۳۹: مقایسه‌ی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده‌ی σ_1 با استفاده از رابطه‌ی تجربی، برای هر یک از آزمایش‌ها. ۱۰۱
شکل ۵-۴۰: همبستگی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده‌ی σ_1 با استفاده از رابطه‌ی تجربی. ۱۰۱
شکل ۵-۴۱: مقایسه‌ی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده‌ی σ_1 با استفاده از رابطه‌ی تجربی و مدل‌های ارائه شده. ۱۰۲

فصل اول:

مقدمه

۱–۱– مقدمه

از کارهای مهمی که در طراحی سازه‌های سطحی و زیرزمینی باید انجام شود، بررسی رفتار مهندسی سنگ و تعیین خصوصیات مکانیکی آن می‌باشد. ناپیوستگی‌ها یکی از مهمترین عواملی هستند که باعث ایجاد انیزوتروپی مکانیکی در سنگ شده و سبب کاهش مقاومت سنگ می‌گردند. در نتیجه جهت توصیف رفتار سنگ حتما باید خواص مربوط به ناپیوستگی‌ها و میزان تاثیری که بر روی سنگ می گذارند مورد توجه و بررسی قرار گیرد. به طور کلی مقاومت سنگ‌های درزه‌دار به مقاومت سنگ بکر، هندسه‌ی درزه و ویژگی‌های مقاومتی درزه بستگی دارد و در هنگام شکست ممکن است سنگ دچار لغزش، برش و یا چرخش شود. از سوی دیگر فشار محصور کننده عاملی است که میزان درصد تاثیر ناپیوستگی بر روی مقاومت سنگ را با توجه به مقاومت سنگ در بر گیرنده کنترل می‌کند. به عبارت دیگر فشار محصور کننده با توجه به مقاومت سنگ، میزان اثر ناپیوستگی‌ها را بر روی مقاومت سنگ تغییر می‌دهد. همچنین زبری سطح درزه عامل دیگری است که درصد تأثیر ناپیوستگی بر روی مقاومت سنگ را کنترل می کند و میزان اثر ناپیوستگی بر روی مقاومت سنگ را تغییر می‌دهد.

۱–۲– معرفی تحقیق

در این تحقیق تأثیر زبری سطح ناپیوستگی و همچنین تأثیر تغییرات زاویه‌ی شیب ناپیوستگی بر روی مقاومت سنگ و مد شکست ،تحت فشارهای جانبی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور دستیابی به اهداف مذکور نمونه‌های انیزوتروپ با سطح زبر به صورت استوانه‌ای به قطر ۵۴mm تهیه شده است. آزمایش‌های مقاومت فشاری سه محوری بر روی نمونه‌های انیزوتروپ دارای درزه‌هایی با زبری مختلف و همچنین زوایای شیب مختلف تحت ۵ فشار جانبی انجام شده است.

نمونه‌های مورد استفاده با استفاده از ترکیب گچ و سیمان و پروفیل‌ها و قالب‌های طراحی شده تهیه گردید.

همچنین به منظور به دست آوردن پارامترهای مقاومتی نمونه‌ها، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره و برش مستقیم انجام گرفت.

فصل دوم این تحقیق شامل، مطالعه انیزوتروپی در سنگ‌ها، تاریخچه‌ای از مطالعات صورت گرفته بر روی رفتار نمونه‌های سنگی انیزوتروپ و معرفی معیارهایی که برای پیش بینی مقاومت سنگ انیزوتروپ کاربرد دارند، می‌باشد.

در فصل سوم معیارهای مهم جهت تعیین مقاومت برشی درزه‌ها و همچنین روش‌های تعیین ضریب زبری درزه توضیح داده شده است.

درفصل چهارم، چگونگی آماده سازی نمونه‌ها، تجهیزات مورد استفاده در آزمایش و آزمایش‌های انجام گرفته توضیح داده شده است.

در فصل پنجم، تأثیر زبری سطح درزه بر روی مقاومت و همچنین مد شکست نمونه‌های انیزوتروپ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها، به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری سه محوری سنگ انیزوتروپ تحت شرایط زبری و فشار جانبی مختلف رابطه‌ای ازائه شده است.

فصل ششم، نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهادهای لازم برای ادامه تحقیقات را ارائه می‌دهد.