

تأثیر کانی شناسی و اندازه دانه‌ها بر آستانه‌های آسیب گرانیات و دیوریت

شهرام قاسمی^۱، ماشالله خامه‌چیان*^۲، محمدرضا نیکودل^۳، احمد ذلولی^۴

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۰۲

دریافت مقاله: ۹۸/۱۰/۲۲

چکیده

ویژگی‌های تغییر شکل و شکست سنگ‌ها در نتیجه اعمال بار به مراحل مختلفی تقسیم شده‌اند که به وسیله آستانه‌های آسیب از هم تفکیک می‌گردند. با در نظر گرفتن پیدایش یا رشد ترک به عنوان یک ویژگی ماده، ویژگی‌های زمین‌شناسی سنگ‌ها را می‌توان به عنوان یک عامل کنترل کننده تغییرات در سطح تنش آستانه‌های آسیب در نظر گرفت. در این تحقیق آستانه‌های آسیب در دو سنگ گرانیات و دیوریت به کمک آزمایش تک‌محوری و انتشار آوایی تعیین شد. پس از تعیین آستانه‌های آسیب نمونه‌هایی از هر سنگ تا آستانه‌های آسیب مختلف بارگذاری شد و از آن‌ها مقاطع نازک فلورسانس به منظور بررسی تأثیر کانی شناسی و اندازه دانه‌ها و ترک خوردگی تهیه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که وجود کانی‌های مقاوم به دلیل مقاومت در برابر ترک خوردگی سبب افزایش سطح تنش آستانه آغاز ترک می‌گردد. با کاهش میانگین اندازه دانه‌ها قفل و بست بهتری در بین دانه‌ها ایجاد می‌شود و از طرف دیگر تعداد مرز دانه‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند که سبب می‌گردد نیروی اعمال شده در سطح بیشتری توزیع گردد، در نتیجه کانی‌ها کمتر تحت تأثیر قرار گرفته و میزان ترک در آن‌ها کم شود که باعث افزایش سطح تنش آستانه‌ای آغاز ترک در سنگ‌های ریزدانه می‌گردد.

کلید واژه‌ها: آستانه آسیب، انتشار آوایی، ترک، دیوریت، گرانیات.

^۱ - دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، shahram.ghasemi@modares.ac.ir

^۲ - استاد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه khamechm@modares.ac.ir

^۳ - دانشیار زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه nikudelm@modares.ac.ir

^۴ - دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس a.zalooli@modares.ac.ir

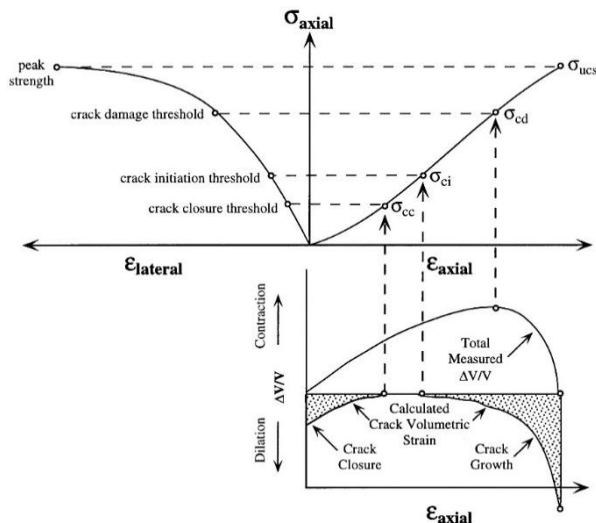
۱. مقدمه

در میان تمامی عوامل تأثیرگذار بر روی رفتار مکانیکی سنگ‌ها نقش ترک‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. رشد ترک‌ها به‌طور مؤثری کنترل‌کننده رفتار مکانیکی سنگ‌ها می‌باشد (Alm et al., 1985; Cao et al., 2016; Eberhardt et al., 1999a; Munoz and Taheri, 2017; Zhou et al., 2018).

ترک‌ها در سنگ‌ها به وسیله فرآیندهای متفاوتی مانند اعمال بارهای خارجی (Kranz, 1979) انقباض حرارتی ناشی از سرد شدن سنگ‌ها، تنش‌های تکتونیکی، رهایی تنش (Kowallis and Wang, 1983) و عوامل هوازدهی مانند ذوب و انجماد و شوک‌های حرارتی (Freire-Lista et al., 2015a; Freire-Lista et al., 2016; Freire-Lista et al., 2015b; Zalooli et al., 2018) ایجاد گردند.

ویژگی‌های تغییر شکل و شکست سنگ‌ها در نتیجه اعمال بار که ناشی از ایجاد و رشد ترک‌ها می‌باشند توسط محققان بسیاری بررسی شده است که از آن جمله می‌توان به (Bieniawski, 1967; Brace, 1961; Cai et al., 2004; Diederichs et al., 2004; Everitt and Lajtai, 2004; Martin and Chandler, 1994; Taheri et al., 2016; Wawersik and Fairhurst, 1970) اشاره کرد. نتیجه‌گیری کلی از مطالعات این محققین این است که فرآیند شکست می‌تواند به مراحل بدین شرح تقسیم بندی گردد که بر اساس ویژگی‌های تنش- کرنش در آزمایش‌های تک‌محوری و سه محوری و اندازه‌گیری تغییر شکل‌های محوری و جانبی صورت گرفته است. بر اساس رفتار تنش- کرنش مواد بارگذاری شده فرآیند شکست عبارت‌اند از (شکل ۱):

مرحله (۱) بسته شدن ترک (Crack closure)، مرحله (۲) تغییر شکل الاستیک (Linear elastic deformation)، مرحله (۳) شروع ترک و رشد ثابت ترک (Stable crack propagation)، مرحله (۴) آزاد شدن انرژی بحرانی و رشد ناپایدار ترک (Unstable crack propagation) و مرحله (۵) شکست و رفتار بعد از بار حداکثر (Post peak). مراحل به وسیله آستانه‌هایی که به آن‌ها آستانه‌های آسیب می‌گویند از یکدیگر جدا می‌شوند که عبارت‌اند از: آستانه بسته شدن ترک (Crack



شکل ۱. Error! No text of specified style in document.

نمودار تنش کرنش که نشان‌دهنده مؤلفه‌های توسعه ترک می‌باشد (Martin, 1993).

با در نظر گرفتن پیدایش یا رشد ترک به عنوان یک ویژگی ماده، ویژگی‌های زمین‌شناسی سنگ‌ها را می‌توان به عنوان یک عامل کنترل‌کننده تغییرات در تنش ایجاد و رشد ترک در نظر گرفت. علاوه بر این ویژگی‌های زمین‌شناسی مواد که بر روی مقاومت تک‌محوری مؤثر می‌باشند می‌توانند به عنوان پارامتر کنترل‌کننده در سطح تنش آستانه‌های آسیب ایفای نقش کنند. این پارامترها شامل اندازه دانه‌ها، بافت (Brace, 1961; Meng and Pan, 2007)، توزیع اندازه دانه‌ها، تخلخل (Dunn et al., 1973; Farquhar et al., 1994)، مدول الاستیسیته (Palchik and Hatzor, 2002) و کانی‌شناسی می‌باشد. از میان پارامترهای بیان شده در این تحقیق به بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها و همچنین کانی‌شناسی بر آستانه‌های آسیب پرداخته خواهد شد. ارتباط بین اندازه دانه‌ها و خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها توسط محققین بسیاری مطالعه شده است. ارتباط خطی بین اندازه کانی‌های مختلف با مقاومت تک‌محوری توسط تورگل

کانی‌شناسی بر سطح تنش آستانه‌های آسیب به وسیله بررسی میکروسکوپی مقاطع نازک با روش فلورسانس بررسی خواهد شد.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲. نمونه‌برداری

نمونه‌های گرانیته که به نام گرانیته سفید بروجرد یا گرانیته جوکار شناخته می‌شود از معادن گرانیته جوکار در استان لرستان در شهرستان بروجرد برداشت شده است. در این منطقه سه مجموعه گرانیته قرار دارد که شامل توده نفوذی آستانه، گوشه و مجموعه بروجرد می‌باشد. مجموعه بروجرد شامل محدوده وسیعی از سنگ‌ها از گرانیته تا دیوریت را دربر گرفته است. اما نوع غالب سنگ در این منطقه سنگ‌های گرانودیوریت و کوارتز دیوریت می‌باشد. گرانودیوریت‌های این منطقه عمدتاً شامل پلاژیوکلاز، کوارتز، آلکالی فلدسپار و بیوتیت می‌باشند. کانی‌های فرعی این سنگ‌ها شامل اسفن، زیرکن و آپاتیت است. نتایج حاصل از سن سنجی Rb/Sr سن این توده نفوذی را به کراتسه پایینی ارتباط می‌دهد (Sepahi and Athari, 2006).

به‌منظور برداشت نمونه سنگ‌های دیوریت از منطقه چشمه قصابان همدان که بخشی از منطقه دگرگونی سندج سیرجان می‌باشد بازدید صورت گرفت. در این منطقه به علت پیچیدگی زیاد منطقه مرز بین گابروها و دیوریت‌ها مشخص نیست. دیوریت‌های این منطقه به رنگ خاکستری و دانه متوسط می‌باشند که عمدتاً شامل پلاژیوکلاز، آمفیبول و به مقدار کمتر پیروکسن و بیوتیت می‌باشد. بیوتیت‌های موجود در این سنگ ناشی از نفوذ توده گرانیتوئیدی الوند می‌باشد و شاهد این مدعا هورنبلندها می‌باشند که از اطراف به‌صورت بخشی به بیوتیت تبدیل شده‌اند (صادقیان، ۱۳۷۳).

۲-۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از انتقال نمونه‌ها به کارگاه برش سنگ، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵۴ میلی‌متر و با نسبت طول به قطر ۲/۵-۲

و ظریف (Tuğrul and Zarif, 1999) گزارش شده است. همچنین پرکریل (Prikryl, 2001) نشان داد که برای سنگ‌های گرانیته مقاومت نهایی با میانگین اندازه دانه‌ها نسبت عکس دارد حتی اگر نمونه‌ها در شرایط سه محوری و فشار محصور کننده ۲۰۰ Mpa آزمایش شوند. باوجود اینکه تأثیر اندازه دانه‌ها بر مقاومت تک‌محوری به‌خوبی شناخته شده است اما تأثیر اندازه دانه‌ها و کانی‌شناسی بر خصوصیات مرتبط با آزمایش تک‌محوری (آستانه‌های آسیب) به‌خوبی شناخته نشده است. درزمینه تأثیر اندازه دانه‌ها بر تنش آغاز ترک ابرهارد و همکاران (Eberhardt et al., 1999b) نشان دادند که در سنگ‌های با ترکیب کانی‌شناسی یکسان اما با اندازه دانه‌های متفاوت، اندازه دانه‌ها تأثیر محدودی بر روی CI دارند. در این تحقیق مشخص گردید که CI بیشتر با مقاومت کانی‌های تشکیل دهنده سنگ در ارتباط می‌باشد و اندازه دانه‌ها عامل کنترل کننده رفتار ترک‌ها در زمان انتشار آنها می‌باشند. از طرف دیگر گلامدن (Glamheden et al., 2007) بیان کردند که اگر دو سنگ دارای کانی‌شناسی یکسان باشند تفاوت در اندازه دانه‌ها و توزیع آنها می‌تواند منجر به ایجاد تفاوت در سطوح تنش و مقاومت سنگ گردد. از آنجائی که ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌ها به‌وسیله ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی (Ündül and Tuğrul, 2012) و همچنین ترک‌های ذاتی آنها (Eberhardt et al., 1999a; Rigopoulos et al., 2011) کنترل می‌شود. تأثیر نوع دانه‌ها و یا محتوای کانی‌ها بر آستانه‌های آسیب می‌تواند به‌صورت شکل‌گیری و انتشار ترک‌ها و با اصطلاح ناهمگنی (Heterogeneity) در مدول الاستیسیته کانی‌ها بیان شود که باعث ایجاد کشش‌های مرزی اضافی و ایجاد ترک در مرز دانه‌ها می‌شود (Dey and Wang, 1981).

در این تحقیق به‌منظور بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها و کانی‌شناسی بر آستانه‌های آسیب دو نمونه سنگ گرانیته و دیوریت مورد بررسی قرار خواهند گرفت. آستانه‌های آسیب برای هر دو نمونه سنگ به‌وسیله آزمایش انتشار آوایی و بارگذاری تک‌محوری تعیین و سپس تأثیر اندازه دانه‌ها و

شمارش شده است و با تقسیم تعداد ترک‌ها بر طول خط چگالی خطی ترک‌ها به دست آمد.

۲-۴. تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

ویژگی‌های وزنی-حجمی سنگ‌ها (وزن واحد حجم خشک و اشباع، تخلخل مؤثر و جذب آب وزنی) با استفاده از روش اشباع-غوطه‌وری و سرعت موج P و S با استفاده از دستگاه Pandit lab طبق استاندارد (ISRM(۲۰۰۷ در حالت سالم و پس از بارگذاری نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری در حالت سالم سه نمونه از هر نوع سنگ با نسبت طول به قطر $۰/۲ \pm ۲/۵$ طبق استاندارد (ISRM(۲۰۰۷ مورد آزمایش قرار گرفتند و برای محاسبه خصوصیات فیزیکی پنج نمونه از هر سنگ تحت آزمایش قرار گرفتند.

۲-۵. آزمایش انتشار آوایی

به منظور تعیین آستانه‌های آسیب برای نمونه‌های سنگ نیاز به انجام آزمایش انتشار آوایی (Acoustic emission) در بارگذاری تک‌محوری می‌باشد. بدین منظور در تحقیق حاضر از دستگاه AMSY-5 ساخت شرکت Vallen System GmbH استفاده شده است. سنسورهایی به منظور دریافت امواج آوایی به دو سمت نمونه‌ها متصل شد. به منظور پرهیز از نویزهای محیطی آستانه تحریک بر روی ۳۸ dB تنظیم شد. در طول آزمایش از یک لایه ژل و نوارچسب به منظور اتصال کامل گیرنده‌ها به سطح نمونه استفاده شد. سپس از ترکیب داده‌های حاصل از کرنش محوری و داده‌های انتشار آوایی برای تعیین آستانه‌های آسیب استفاده شد (Zhao et al., 2013). برای تعیین آستانه‌های آسیب در نمونه سنگ‌های تحقیق حاضر، از هر سنگ ۲ مغزه با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۲/۵ تحت بارگذاری تک‌محوری قرار گرفت و سپس میانگین آستانه‌ها به دست آمده مبنای آستانه‌های هر سنگ در نظر گرفته شد. نحوه انجام آزمون انتشار آوایی در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، بارگذاری چرخه‌ای، سرعت امواج طولی و ویژگی‌های وزنی-حجمی تهیه شد.

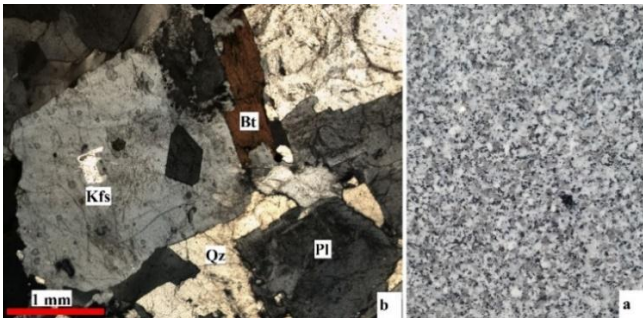
سپس به منظور بررسی ترک‌های از پیش موجود در سنگ و کانی‌های سازنده آن و همچنین از بین بردن اثر مغزه‌گیری، از مغزه‌های تهیه شده جهت تهیه مقاطع فلورسانس استفاده شد. لازم به ذکر است که برای بررسی میکروسکوپی ترک‌ها از هر مغزه ۲ مقطع نازک تهیه گردید.

به این دلیل که در بارگذاری تک‌محوری ترک‌ها بیشتر به موازات جهت اعمال بار شکل می‌گیرند، با این هدف که بتوان قسمت اعظمی از ترک‌های ایجاد شده را در مقطع نازک مشاهده کرد مقاطع نازک فلورسانس در جهت عمود بر جهت اعمال بار تهیه شدند. مقاطع نازک به منظور اجتناب از هرگونه اثر سطوح انتهایی از وسط مغزه‌ها بارگذاری شده تهیه شد. بدین منظور به وسیله دستگاه برش قطعات سنگی به ابعاد طول و عرض تقریبی ۳×۲ سانتی‌متر تهیه گردید. در مرحله بعد نمونه‌های برش خورده به روش اشباع سطحی توسط رزین اپوکسی با گرانروی پایین حاوی کمتر از ۱ درصد وزنی ماده فلورسانس، تحت فشار خلأ $۰/۸$ بار اشباع شدند. بعد از خشک شدن رزین، سطح هدف به روش دستی و با استفاده از پودر مقطع‌زنی صیقل داده شد. در مرحله بعد نمونه‌ها به لام چسبانده شد و سپس برش و صیقل داده شد تا به ضخامت معمول مقاطع نازک زمین‌شناسی برسد.

۲-۳. مطالعه ترک‌ها

جهت مطالعه ترک‌ها از رابطه چگالی خطی ریزترک‌ها (Linear Microcrack Density (LMD)) استفاده شده است (Sousa et al., 2005). بدین منظور یک سطحی از ریزموزائیک به ابعاد ۱۲×۲۰ میلی‌متر مربع توسط خطوطی موازی و عمود بر هم با ابعاد هر مش شبکه ۳×۵ میلی‌متر مربع شبکه‌بندی شد. سپس تعداد ترک‌های در کل سنگ و کانی‌های مشترک هر دو سنگ که خطوط را قطع می‌کردند

دیده می‌شود. هورنبلند به صورت بخشی در حال تبدیل شدن به کلریت بوده و آثار کلریت در هسته برخی از هورنبلندها دیده می‌شود. سرسیتی شدن در پلاژیوکلازها نیز مشاهده شده است.



شکل ۳. سنگ گرانیت در نمونه دستی و مقطع نازک (a) نمونه دستی صیقل داده شده گرانیت (b) مقطع نازک گرانیت در نور پلاریزه. Bt=بیوتیت، Pl=پلاژیوکلاز، Qz=کوارتز و Kfs=فلدسپار پتاسیم.

بر اساس مطالعات مقاطع نازک صورت گرفته سنگ دیوریت در نمونه دستی دارای رنگ خاکستری و دانه متوسط می‌باشد و از لحاظ کانی‌شناسی در زیر میکروسکوپ شامل: ۵۷-۵۵ درصد پلاژیوکلاز، ۶-۴ درصد پیروکسن، ۲۰-۱۸ درصد بیوتیت و ۱۹-۱۷ درصد آمفیبول می‌باشد. کانی‌های فرعی موجود در این سنگ شامل اسفن، زیرکن و آپاتیت و همچنین کانی‌های اپک می‌باشد (شکل ۴). این سنگ عمدتاً دارای بافت گرانولار می‌باشد و بافت ساب افتیک (Subophitic) نیز در آن مشاهده می‌گردد. آمفیبول موجود در این سنگ از نوع هورنبلند است و رنگ سبز کمرنگ آن به همین دلیل می‌باشد. در این سنگ پیروکسن‌ها در حال تبدیل به آمفیبول بوده و همچنین وجود بیوتیت‌های غیر شکل‌دار و حالت لکه‌لکه نشان از بیوتیت‌های ثانویه می‌باشند که از تبدیل آمفیبول‌ها به وجود آمده‌اند.



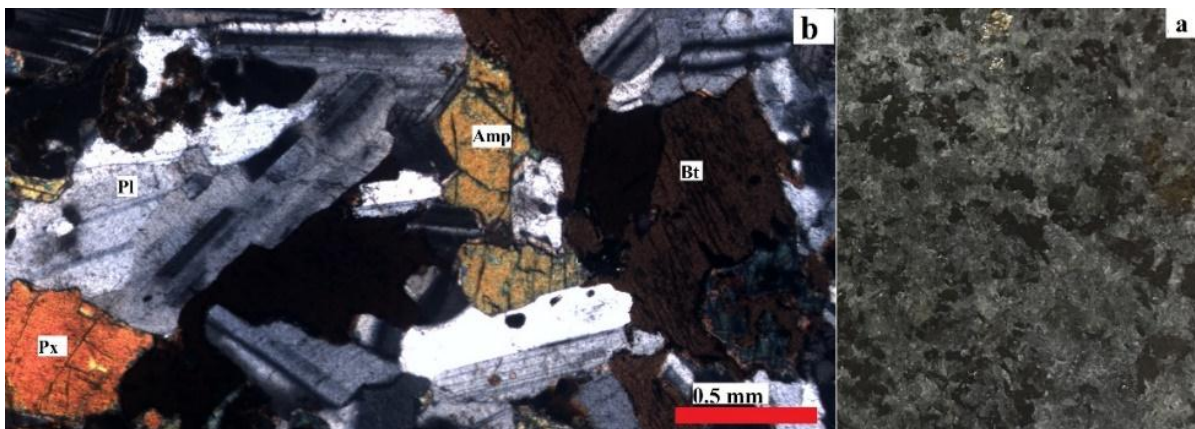
شکل ۲. نحوه انجام آزمایش انتشار آوایی

بعد از تعیین آستانه‌های آسیب برای هر یک از نمونه‌های سنگی، به منظور بررسی تأثیر کانی‌شناسی و اندازه دانه‌ها بر سطح تنش آستانه‌های آسیب، تعداد ۳ مغزه از هر سنگ برای هر یک از آستانه‌های آسیب CI و CD (مجموع ۶ مغزه برای هر نمونه سنگ) تحت شرایط بارگذاری تک‌محوری مشابه با آزمایش انتشار آوایی قرار گرفت و سپس این نمونه‌ها برش خورده و از آن‌های مقاطع نازک فلورسانس تهیه گردید.

۳. نتایج

۳-۱. ویژگی‌های سنگ‌شناسی

بر اساس مطالعات مقطع نازک و ترسیم چندوجهی برای هر نوع کانی در نرم‌افزار JMicroVision، مشخص شد گرانیت جوکار یک سنگ‌دانه متوسط می‌باشد که شامل ۲۷٪-۲۵ کوارتز، ۵۵٪-۵۳ پلاژیوکلاز، ۱۰٪-۸ فلدسپار پتاسیم، ۷٪-۵ بیوتیت و کمتر از ۲٪ هورنبلند است (شکل ۳). کانی‌های فرعی مشاهده شده در مقاطع نازک شامل اکسید آهن و تیتانیم، اسفن و زیرکن است. پلاژیوکلازها فراوان‌ترین کانی می‌باشند که به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار رشد کرده‌اند و ماکل‌های دوتایی در آن‌ها به خوبی شکل گرفته است. از لحاظ بافتی گرانیت جوکار بافت متوسط تا درشت دارد و بافت گرانوفیری (هم رشدی کوارتز و آلکالی فلدسپار) در آن



شکل ۳-۲. سنگ دیوریت در نمونه دستی و مقطع نازک (a) نمونه دستی و صیقل داده شده دیوریت (b) مقطع نازک دیوریت در زیر نور پلاریزه. Bt=بیوتیت، Amp=آمفیبول، Pl=پلاژیوکلاز و Px=پیروکسن.

رشد ترک‌ها، جابجایی‌ها و دیگر تغییرات دگرگون کننده در درون مواد می‌باشد. در مصالح ترد مثل سنگ که عمدتاً از چند نوع کانی تشکیل شده‌اند، انتشار آوایی در نتیجه انواع رخدادها مثل، سایش بین دانه‌ها، ایجاد و گسترش ترک، شکست در فضاهای خالی و غیره روی می‌دهد. هر ماده بر اساس خصوصیات خود تغییر شکل داده و تعدادی از - رخدادهای آوایی را ایجاد می‌کند. بنابراین رخدادهای منتشر شده درون مصالح شامل اطلاعاتی اند که بیان‌کننده روندهای مختلف تغییر شکل به مانند روند شکستی که برای ترک‌های موجود در مصالح رخ داده، می‌باشد. سیگنال‌های آنالیز شده انتشار آوایی اطلاعاتی درباره طبیعت، محل و نوع مکانیزم تغییر شکل را در بر دارد. با آنالیز داده‌های این‌گونه رخدادها می‌توان ایجاد ترک، رشد آن، ترکیب و شکل‌گیری ترک‌ها را بررسی نمود (Hu et al., 2013; Lockner, 1993). نتایج حاصل از انجام آزمایش تک‌محوری و انتشار آوایی برای گرانیت و دیوریت در شکل ۵ نشان داده شده است.

۳-۲. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

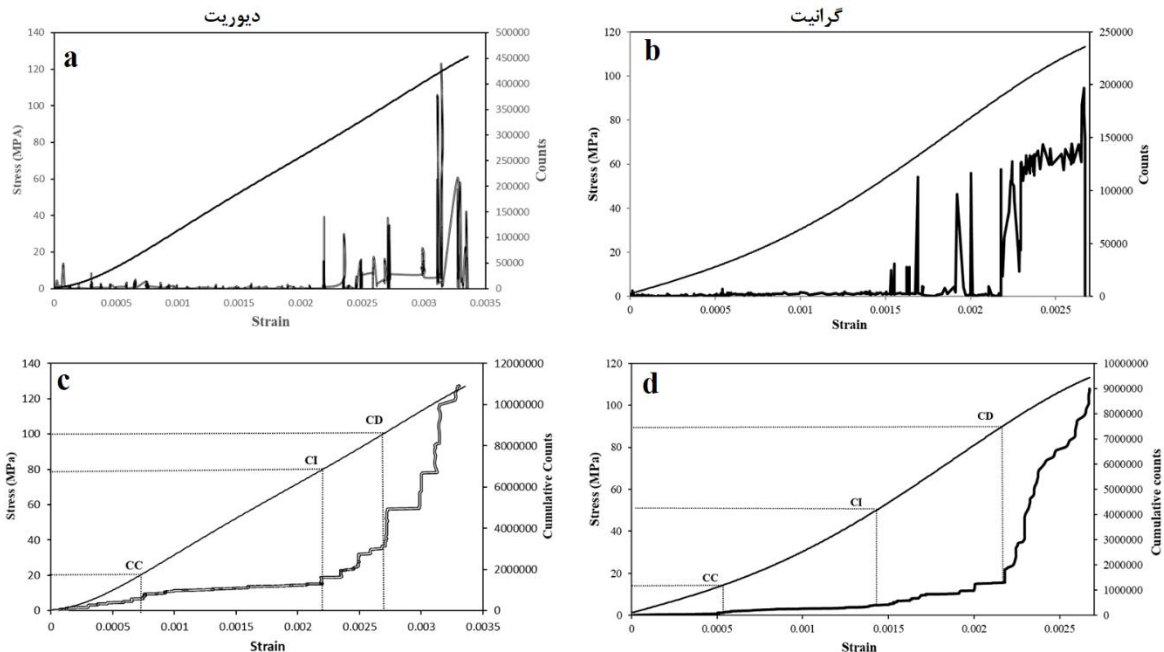
سنگ‌ها مواد ناهمگنی هستند که شامل درز و ترک و حفراتی می‌باشند که توسعه و همچنین ارتباط آن‌ها با هم خصوصیات فیزیکی و رفتار مکانیکی سنگ اثر می‌گذارد. بر این اساس اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها در حالت بکر انجام شد و در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده دیوریت با مقاومت تک‌محوری ۱۲۹ مگاپاسکال نسبت به گرانیت با مقاومت تک‌محوری ۱۱۴/۶ مگاپاسکال مقاومت بیشتری از خود نشان داده است. اما مدول الاستیسیته گرانیت ۴۳/۸ گیگاپاسکال می‌باشد که نسبت به دیوریت مقدار بیشتری است. گرانیت با تخلخل مفید ۰/۷ و جذب آب ۰/۲۷ بیشترین تخلخل مفید و جذب آب را از خود نشان می‌دهد.

۳-۳. آزمایش تک‌محوری و انتشار آوایی

به منظور تعیین آستانه‌های آسیب از آزمایش انتشار آوایی هم‌زمان با انجام آزمایش تک‌محوری استفاده شد. انتشار آوایی پدیده انتقال امواج الاستیک منتج از آزادسازی ناگهانی انرژی الاستیک به وجود آمده از تغییر شکل‌های مکانیکی، ایجاد و

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها.

Sample	Dry unite weight (kN/m ³)	Saturated unite weight (kN/m ³)	Effective porosity (%)	Water absorption by weight (%)	P-wave velocity (m/s)	S-wave velocity (m/s)	Uniaxial compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Grain size (mm)
Granite	26.09	26.19	0.7	0.27	5099	2670	114.6	43.8	1.01
Diorite	28.99	29.01	0.36	0.12	5468	2709	129	35.4	0.49



شکل ۵. آزمایش انتشار آوایی گرانیت و دیوریت؛ (a) نمودار تعداد شمارش‌های انتشار آوایی در برابر تنش در دیوریت؛ (b) نمودار تعداد شمارش‌های انتشار آوایی در برابر تنش در گرانیت؛ (c) نمودار تجمعی تعداد شمارش در برابر تنش در دیوریت؛ (d) نمودار تجمعی تعداد شمارش در برابر تنش در گرانیت.

۳-۴. ترک‌شناسی نمونه‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها و همچنین کانی‌شناسی اقدام به شمارش ترک‌های در نمونه‌های بکر و نمونه‌های آستانه CI و CD شد. نتایج حاصل از شمارش ترک‌ها در کل سنگ در حالت بکر، آستانه‌های CI و CD در جدول ۲ و همچنین در کانی‌های سازنده هر دو سنگ در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت بکر و حالت CD دیوریت مقدار ترک بیشتری را نسبت به سنگ گرانیت از خود نشان داده است ولی کانی‌های سازنده آن میزان ترک کمتری را نشان می‌دهند.

برای به دست آوردن شکل ۵ با توجه به اینکه اندازه گیری تنش، کرنش و تعداد شمارش‌های رخداد آوایی هم‌زمان با هم صورت می‌گیرد. می‌توان به مشترک قرار دادن کرنش در محور افقی به شکل ۵ رسید. با توجه به شکل ۵ که یکی از آزمون‌های انتشار آوایی را برای سنگ‌های گرانیت و دیوریت نشان می‌دهد آستانه‌های مختلف آسیب در هر دو سنگ به راحتی در محل‌های که شیب نمودار تجمعی شمارش‌ها تغییر می‌کند قابل تشخیص‌اند و مقدار معادل تنش در این نقاط را می‌توان به عنوان آستانه‌های آسیب در نظر گرفت.

۱) سبب شده است که دیوریت دارای مقاومت تک‌محوری بیشتری نسبت به سنگ گرانیت باشد. اما مقادیر زیاد کانی بیوتیت در این نمونه دیوریت سبب شده است که مدول الاستیسیته این سنگ نسبت به گرانیت مقدار کمتری را نشان دهد چراکه وجود بیوتیت به دلیل مدول الاستیسیته پایین با شاخص‌های مقاومتی رابطه عکس دارد (Ündül et al., 2015).

در شکل ۵ از ترکیب منحنی تنش-کرنش-شمارش برای تعیین آستانه‌های آسیب استفاده شده است (Zhao et al., 2013). با توجه به شکل ۵b در ابتدای بارگذاری سنگ گرانیت از تنش ۰ تا ۱۵ MPa تعدادی رخداد مهم آوایی ثبت شده است که به علت بسته شدن ترک‌ها، حفرات اولیه از پیش موجود و همچنین لغزش ذرات موجود در سنگ می‌باشد. رفتار سنگ در این مرحله به صورت غیر الاستیک است. انتهای این مرحله در تنش ۱۵ MPa به آستانه‌ای به نام آستانه بسته شدن ترک (CC) منتهی می‌شود (Eberhardt et al., 1998). این مرحله در شکل ۵d که نرخ تجمعی شمارش‌ها را ناچیز نشان می‌دهد به خوبی قابل تشخیص می‌باشد. بعد از CC به مرحله‌ای وارد می‌گردد که در آن نرخ رخدادهای ثبت شده یک رفتار یکنواخت را نشان می‌دهد.

جدول ۲. LMD در حالت بکر و آستانه‌های بارگذاری سنگ‌ها (N/mm).

Samples	Intact	CI	CD
Granite	3.50	6.40	7.60
Diorite	4.20	5.73	7.84

جدول ۳. LMD در کانی‌های سازنده نمونه بکر و آستانه‌های CI و CD سنگ‌های گرانیت و دیوریت (N/mm).

Samples	Minerals	Intact	CI	CD
Granite	Plagioclase	4.17	5.71	7.85
	Biotite	2.66	4.48	5.12
	Quartz	2.13	2.27	3.52
Diorite	K-feldspar	2.54	3.97	4.19
	Plagioclase	3.4	4.8	6.59
	Biotite	1.48	2.85	3.76
	Amphibole	1.45	1.93	2.86
	Pyroxene	1.3	1.45	2.1

۴. بحث

با توجه به مطالعات میکروسکوپی دیوریت نسبت به گرانیت از کانی‌های تیره بیشتر همانند پیروکسن و آمفیبول تشکیل شده است که با توجه به جدول ۴ این کانی‌ها دارای مدول الاستیسیته بیشتری نسبت به کانی‌های دیگر می‌باشند که همین عامل به همراه میانگین اندازه دانه‌های کمتر این سنگ (جدول

جدول ۴. مدول الاستیسیته کانی‌ها (Farahmand and Diederichs, 2015; Lan et al., 2010; Prodaivoda et al., 2004)

Minerals	Biotite	Amphibole	K-feldspar	Plagioclase	Quartz	Pyroxene
E (GPa)	33-64	118-128	69-74	81-106	91-105	120-160

پایدار رشد می‌کنند. این مرحله در تنش ۸۷ MPa به آستانه‌ای به نام آستانه آسیب ترک (CD) منتهی می‌گردد. بعد از CD نرخ رخدادهای آوایی با شدت بسیار زیادتری نسبت به قبل افزایش پیدا می‌کند که در واقع به عنوان مرحله رشد ناپایدار ترک شناخته شده که در نهایت به شکست سنگ منتهی می‌گردد.

شیب ثابت منحنی تجمعی رخدادها در شکل ۵d به خوبی قابل تشخیص می‌باشد. این مرحله نشان دهنده رفتار الاستیک سنگ می‌باشد و به عنوان مرحله آغاز آسیب داخلی سنگ شناخته می‌شود. حد نهایی این مرحله در تنش ۵۱ MPa به آستانه‌ای به نام آستانه آغاز ترک (CI) منتهی می‌گردد. بعد از CI رخدادهای آوایی رشد نسبتاً سریعی را نشان می‌دهند. در این محدوده بارگذاری ترک‌های موجود در سنگ به صورت

که عبارت‌اند از، مقاومت کانی‌های تشکیل دهنده و اندازه دانه‌ها. وجود کانی‌های با مقاومت بالا مانند پیروکسن و آمفیبول (جدول ۴) در دیوریت سبب می‌گردد که مقاومت کلی سنگ و همچنین تاب آوری کلی سنگ در برابر ایجاد ترک‌ها جدید بیشتر گردد و آستانه آغاز ترک در این سنگ نسبت به گرانیت افزایش پیدا کند. از نظر اندازه دانه‌ها با توجه به جدول ۱ دیوریت از میانگین اندازه دانه‌های کمتری برخوردار است. ابرهارد همکاران (Eberhardt et al., 1999b) در تحقیقات خود نشان دادند که دانه‌های با اندازه بزرگ‌تر نسبت به دانه‌های با اندازه کوچک‌تر، ضعیف‌تر می‌باشند. از طرفی اندازه کوچک‌تر سبب می‌گردد طول سطح تماس مرز دانه‌ها با یکدیگر کوتاه‌تر باشد که خود سبب افزایش زبری نحوه اتصال دانه‌ها و همچنین کاهش طول مرز تماسی دانه‌ها با یکدیگر گردد. از آنجایی که میزان انرژی مورد نیاز برای لغزش در سطوح ضعیف مانند مرز دانه‌ها با طول سطح ضعیف کاهش می‌یابد (Petch, 1953)، لغزش در مرز دانه‌های سنگ دیوریت انرژی بیشتری نسبت به سنگ گرانیت نیاز دارد. مجموع عوامل فوق سبب شده است که آستانه آغاز ترک در سنگ دیوریت نسبت به گرانیت در سطح تنش بالاتری قرار گیرد. به همین دلیل در ادامه به منظور بررسی عوامل مطرح شده وضعیت ترک خوردگی کانی‌ها در زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفت.

دیوریت نسبت به گرانیت از کانی‌های مقاوم‌تری مانند آمفیبول و پیروکسن در ترکیب خود بهره می‌برد. این کانی‌ها با مدول الاستیسیته بالایی که دارند (جدول ۴) در برابر تنش وارد شده مقاومت می‌کنند و در نتیجه ترک خوردگی کمتری در کانی‌های سازنده آن باید ایجاد گردد. به همین منظور وضعیت ترک خوردگی در کل سنگ مورد مطالعه قرار گرفت و در جدول ۲ و ۳ نشان داده شدند. نتایج نشان می‌دهد که در کانی‌های غیر مشترک دو سنگ که در گرانیت شامل کوارتز و فلدسپار پتاسیم می‌باشد و در دیوریت پیروکسن و آمفیبول می‌باشد LMD در کانی‌های سازنده دیوریت کمتر می‌باشد (شکل ۶).

به صورت مشابه با گرانیت در سنگ دیوریت نیز رفتاری مشابه اما در سطوح تنش متفاوت مشاهده شده است. بدین گونه که در ابتدای بارگذاری رخدادهای مهم آوایی ثبت شده‌اند که به دنبال آن به یک مرحله نسبتاً آرام‌تر ختم شده است. آستانه CC در این سنگ ۲۰ MPa می‌باشد و آستانه CI برابر ۷۸ MPa بوده است. در انتهای مرحله رشد ثابت ترک شیب منحنی تجمعی تعداد شمارش‌های آوایی به صورت ناگهانی افزایش پیدا می‌کند که حاکی از آسیب‌ها و ایجاد ترک‌های مهمی در سنگ می‌باشد، آستانه CD در این سنگ ۹۹ MPa می‌باشد.

نتایج میانگین آستانه‌های آسیب برای دو سنگ دیوریت و گرانیت در پایان آزمایش‌ها محاسبه شد و در جدول ۵ نشان داده شده است.

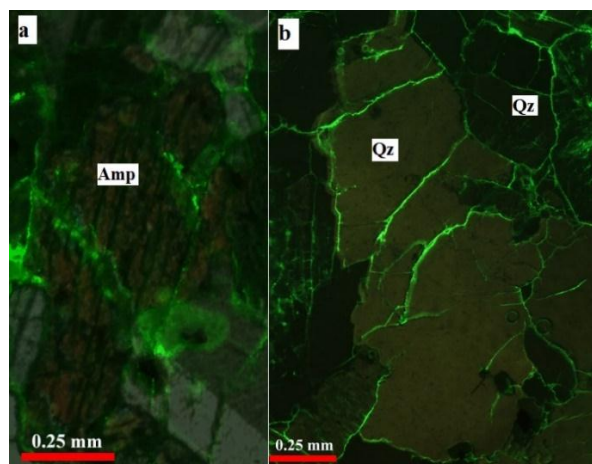
جدول ۵. سطح تنش آستانه‌های آسیب در دو سنگ گرانیت و دیوریت.

Samples	CC (MPa)	CI (MPa)	CD (MPa)	UCS (MPa)
Granite	16	54	91	114/6
Diorite	17/2	86	102	129

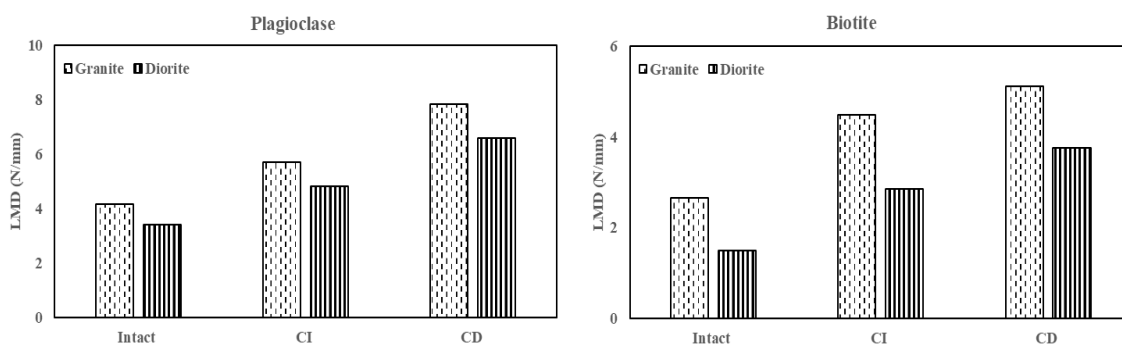
با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵ مشاهده می‌گردد همان‌گونه که سنگ دیوریت مقاومت تک‌محوری بالاتری را نسبت به گرانیت نشان داده است میانگین سطح تنش آستانه‌ها در این سنگ نیز بیشتر می‌باشد. در هر دو سنگ گرانیت و دیوریت آستانه CC به ترتیب در ۱۴ و ۱۳/۳ درصد از مقاومت تک‌محوری هریک از سنگ‌ها قرار گرفته‌اند. اما با عبور از این مرحله اختلاف زیادی در آستانه CI مشاهده می‌گردد به‌گونه‌ای که در سنگ گرانیت این آستانه در ۴۷/۱ درصد و در دیوریت در ۶۶/۶ درصد مقاومت تک‌محوری قرار گرفته‌اند. سپس آستانه CD گرانیت در ۷۹/۴ و دیوریت در ۷۹/۱ درصد مقاومت تک‌محوری قرار گرفته‌اند که دوباره درصد نزدیکی از مقاومت تک‌محوری را نشان داده‌اند.

اختلاف زیاد بین سطح تنش آستانه آغاز ترک در دو سنگ گرانیت و گابرو را می‌توان از دو جنبه مورد بررسی قرار داد

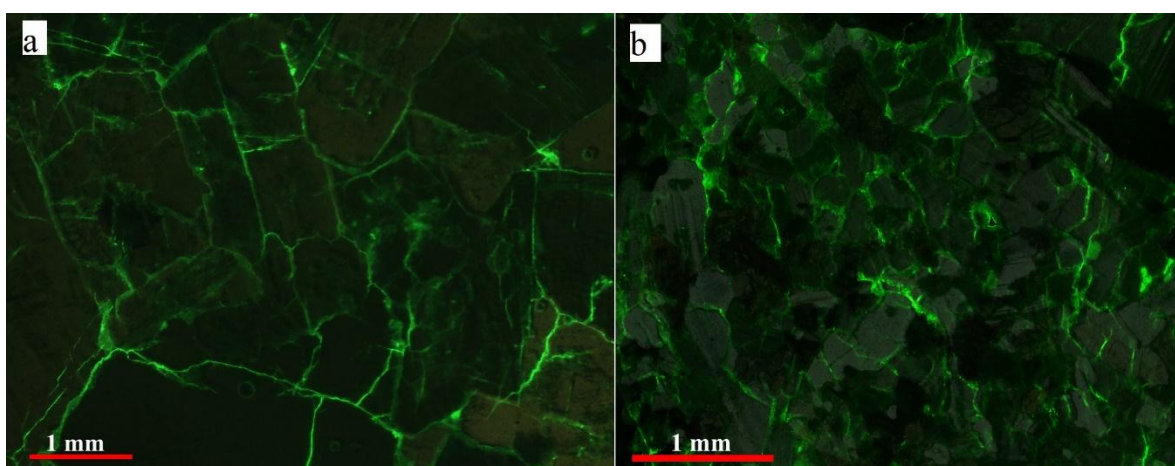
از طرف دیگر در کانی‌های مشترک سازنده دو سنگ نیز که شامل بیوتیت و پلاژیوکلاز می‌باشند در حالت بکر، CI و CD و کانی‌های سنگ دیوریت مقادیر LMD کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۷). به گونه‌ای که پلاژیوکلاز در نمونه بکر گرانیت LMD آن ۴/۱۷ و در دیوریت ۳/۴۰ ترک در میلی‌متر است و به همین صورت در پلاژیوکلاز گرانیت در آستانه CI ۵/۷۱ و در دیوریت ۴/۸۰ و در آستانه CD ۷/۸۵ و در دیوریت ۶/۵۹ ترک در میلی‌متر است (شکل ۷). در حالی که میزان LMD در کانی‌های سازنده دیوریت کمتر از گرانیت است ولی LMD در کل سنگ دیوریت نسبت به گرانیت بیشتر است که به خوبی در تصاویر میکروسکوپی در شکل ۸ نیز مشخص است.



شکل ۶. وضعیت ترک خوردگی در کانی‌های سازنده دیوریت و گرانیت در آستانه CD؛ (a) آمفیبول در دیوریت (b) کوارتز در گرانیت.



شکل ۷. نمودار ستونی مقایسه LMD در کانی پلاژیوکلاز و بیوتیت.



شکل ۸. تصاویر مقطع نازک سنگ دیوریت و گرانیت در زیر نور فلورسانس در آستانه CI؛ (a) گرانیت (b) دیوریت.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر کانی‌شناسی و اندازه دانه‌ها بر آستانه‌های آسیب دو سنگ گرانیت و دیوریت با استفاده از روش ترکیبی انتشار آوایی و مقطع نازک فلورسانس پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که وجود کانی‌های مقاوم با مدول الاستیسیته بالا سبب افزایش مقاومت نهایی و در نتیجه افزایش سطح تنش آستانه‌های آسیب می‌گردد. کانی‌هایی مانند پیروکسن و آمفیبول که مدول الاستیسیته بالایی دارند نسبت به سایر کانی‌ها چگالی خطی ریزترک (LMD) کمتری را نشان می‌دهند. کاهش اندازه دانه‌ها در سنگ سبب می‌گردد که طول سطوح ضعف کاهش پیدا کرده و قفل و بست بهتری در بین دانه‌های سنگ وجود داشته باشد و در نتیجه آستانه CI در سطح تنش بالاتری نسبت به سنگ‌های درشت‌دانه قرار گیرد. در سنگ‌های ریزدانه زیاد بودن مرز دانه‌ها سبب می‌گردد که نیروی اعمال شده به سنگ در سطح بیشتری توزیع گردد و در نتیجه نیروی کمتری به کانی‌های سازنده سنگ وارد گردد و میزان LMD در کانی‌های سازنده سنگ نسبت به سنگ‌های با دانه‌های بزرگ‌تر کمتر باشد. از طرف دیگر در سنگ‌های ریزدانه تعداد نقاط ضعف (مرز دانه) بیشتری در سنگ وجود داشته باشد و تمرکز تنش در این نقاط سبب می‌گردد که ترک‌هایی در مرز دانه‌ها (در سطوح تنش بالا) ایجاد گردد که LMD کل سنگ را افزایش می‌دهد. به همین دلیل در دیوریت در حالی که کانی‌هایی مانند بیوتیت و پلاژیوکلاز LMD کمتری را نسبت به بیوتیت و پلاژیوکلاز موجود در گرانیت از خود نشان می‌دهند به دلیل میزان بالای ترک‌ها در مرز کانی‌های سازنده آن شاهد LMD بیشتری در کل سنگ دیوریت نسبت به گرانیت باشیم. مجموعه این عوامل سبب شده است که علاوه بر میزان ترک خوردگی کمتر در کانی‌های سازنده سنگ دیوریت آستانه آغاز ترک در این سنگ گرانیت در درصد بالاتری از مقاومت تک‌محوری شروع گردد.

عامل اصلی زیاد بودن LMD سنگ دیوریت در میانگین اندازه دانه‌های این سنگ نهفته است. میانگین اندازه دانه‌ها در گرانیت ۱/۰۱ میلی‌متر و در دیوریت ۰/۴۹ میلی‌متر است. کوچک بودن اندازه دانه‌ها سبب می‌گردد که در یک فاصله یکسان تعداد بیشتری دانه در سنگ دیوریت وجود داشته باشد. زیاد بودن تعداد دانه‌ها سبب می‌گردد که تعداد بیشتری مرز دانه وجود داشته باشد که به عنوان سطوح ضعف در سنگ شناخته می‌شوند (Ghasemi et al., 2019). مرز دانه‌ها و سطوح ضعف دیگر مانند سطوح رخ نفاطی می‌باشند که سطح انرژی پائینی برای ترک خوردگی نیاز دارند بنابراین در اثر اعمال بار ابتدا در این سطوح لغزش رخ می‌دهد (Lee et al., 2006; Seo et al., 2002) و سبب می‌گردد که LMD کل در دیوریت نسبت به گرانیت بیشتر باشد در حالی که میزان ترک در کانی‌های سازنده گرانیت بیشتر از دیوریت می‌باشد.

سطوح مرزدانه‌ای بیشتر در سنگ دیوریت نسبت به سنگ گرانیت سبب می‌شود که نیروی وارد شده به سنگ، سطح در دسترس بیشتری نسبت به گرانیت برای توزیع شدن داشته باشد بنابراین نیروی کمتری به دانه‌های سازنده سنگ وارد شده و نیرو بیشتر در مرز دانه‌ها توزیع می‌گردد و در نتیجه ترک خوردگی در دانه‌ها کاهش می‌یابد. ابرهارد و همکاران (Eberhardt et al., 1999b) بیان کردند که در سنگ‌های با دانه‌های بزرگ‌تر تعداد رخداد‌های آوایی بیشتری را در هنگام بارگذاری دریافت کرده‌اند که نشان دهنده ترک خوردگی بیشتر در دانه‌های بزرگ‌تر می‌باشد. از طرف دیگر ریزتر بودن اندازه دانه‌ها سبب می‌گردد که قفل و بست بهتری در بین دانه‌های تشکیل دهنده سنگ شکل گیرد که نیاز به انرژی بیشتری برای ایجاد لغزش و ترک دارد. این عامل سبب شده است که علاوه بر میزان ترک خوردگی کمتر در کانی‌های سازنده سنگ دیوریت آستانه آغاز ترک در این سنگ نسبت به سنگ گرانیت در درصد بالاتری از مقاومت تک‌محوری شروع گردد.

منابع

- صادقیان، م.، ۱۳۷۳. بررسی پترولوژی سنگ‌های آذرین و دگرگون منطقه چشمه قصابان همدان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- Alm, O., Jaklud, L.-L., and Shaoquan, K., 1985, The influence of microcrack density on the elastic and fracture mechanical properties of Stripa granite: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 40(3): 161-179.
- Bieniawski, Z. T., 1967, Mechanism of brittle fracture of rock: part I—theory of the fracture process, in *Proceedings International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 4: 395-406.
- Brace, W. F., 1961, Dependence of fracture strength of rocks on grain size, in *Proceedings The 4th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, American Rock Mechanics Association.
- Cai, M., Kaiser, P., Tasaka, Y., Maejima, T., Morioka, H., and Minami, M., 2004, Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5): 833-847.
- Cao, R.-h., Cao, P., Lin, H., Pu, C.-z., and Ou, K., 2016, Mechanical behavior of brittle rock-like specimens with pre-existing fissures under uniaxial loading: experimental studies and particle mechanics approach: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(3): 763-783.
- Dey, T., and Wang, C.-Y., 1981, Some mechanisms of microcrack growth and interaction in compressive rock failure, in *Proceedings International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18: 199-209.
- Diederichs, M., Kaiser, P., and Eberhardt, E., 2004, Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5): 785-812.
- Eberhardt, E., Stead, D., and Stimpson, B., 1999a, Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(3) 361-380.
- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B., and Read, R., 1998, Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock: *Canadian Geotechnical Journal*, 35(2): 222-233.
- Eberhardt, E., Stead, D., & Stimpson, B. 1999a. Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(3), 361-380.
- Eberhardt, E., Stimpson, B., and Stead, D., 1999b, Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures: *Rock mechanics and rock engineering*, 32(2): 81-99.
- Everitt, R. A., and Lajtai, E., 2004, The influence of rock fabric on excavation damage in the Lac du Bonnet granite: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8): 1277-1303.
- Farahmand, K., and Diederichs, M., 2015, A calibrated Synthetic Rock Mass (SRM) model for simulating crack growth in granitic rock considering grain scale heterogeneity of polycrystalline rock, in *Proceedings 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, American Rock Mechanics Association.
- Freire-Lista, D. M., Fort, R., and Varas-Muriel, M. J., 2015a, Freeze-thaw fracturing in building granites: *Cold Regions Science and Technology*, 113: 40-51.
- Freire-Lista, D. M., Fort, R., and Varas-Muriel, M. J., 2016, Thermal stress-induced microcracking in building granite: *Engineering geology*, 206: 83-93.
- Freire-Lista, D. M., Gomez-Villalba, L. S., and Fort, R., 2015b, Microcracking of granite feldspar during thermal artificial processes: *Periodico di mineralogia*, 84(3a) 519-537.
- Ghasemi, S., Khomehchian, M., Taheri, A., Nikudel, M. R., and Zalooli, A., 2019, Crack Evolution in Damage Stress Thresholds in Different Minerals of Granite Rock: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-16.
- Glamheden, R., Fredriksson, A., Roeshoff, K., Karlsson, J., Hakami, H., and Christiansson, R., 2007, *Rock mechanics Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.*

- Hu, S., Lu, J., and Xiao, F., 2013, Evaluation of concrete fracture procedure based on acoustic emission parameters: *Construction and Building Materials*, 47: 1249-1256.
- Kowallis, B. J., and Wang, H. F., 1983, Microcrack study of granitic cores from Illinois deep borehole UPH 3: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(b9) 7373-7380.
- Kranz, R. L., 1979, Crack growth and development during creep of Barre granite, in *Proceedings International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16: 23-35.
- Lan, H., Martin, C. D., and Hu, B., 2010, Effect of heterogeneity of brittle rock on micromechanical extensile behavior during compression loading: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115: B1.
- Lee, S.-E., Kim, M.-I., Park, J.-H., Park, C.-K., Kang, M., and Jeong, G.-C., 2006, Damage process of intact granite under uniaxial compression: microscopic observations and contact stress analysis of grains: *Geosciences Journal*, 10(4): 457-463.
- Lockner, D., 1993, The role of acoustic emission in the study of rock fracture, in *Proceedings International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30: 883-899.
- Martin, C., and Chandler, N., 1994, The progressive fracture of Lac du Bonnet granite, in *Proceedings International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 31: 643-659.
- Martin, C. D., 1993, The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings, Thesis (Ph.D.), University of Manitoba.
- Munoz, H., and Taheri, A., 2017, Local damage and progressive localisation in porous sandstone during cyclic loading: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(12): 3253-3259.
- Petch, N. (1953). The cleavage strength of polycrystals. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 174, 25-28.
- Prodaivoda, G., Maslov, B., and Prodaivoda, T., 2004, Thermoelastic properties of rock-forming minerals: *Геология и геофизика*, 45(3): 389-404.
- Rigopoulos, I., Tsikouras, B., Pomonis, P., and Hatzipanagiotou, K., 2011, Microcracks in ultrabasic rocks under uniaxial compressive stress: *Engineering geology*, 117(1-2) p. 104-113.
- Seo, Y., Jeong, G., Kim, J., and Ichikawa, Y., 2002, Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression: *Engineering Geology*, 63(3-4) p. 259-275.
- Sepahi, A. A., and Athari, S. F., 2006, Petrology of major granitic plutons of the northwestern part of the Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt, Zagros Orogen, Iran: with emphasis on A-type granitoids from the SE Saqqez area: *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 183(1): 93-106.
- Sousa, L. M., del Rfo, L. M. S., Calleja, L., de Argandona, V. G. R., and Rey, A. R., 2005, Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites: *Engineering Geology*, 77(1-2): 153-168.
- Taheri, A., Yfantidis, N., Olivares, C., Connelly, B., and Bastian, T., 2016, Experimental study on degradation of mechanical properties of sandstone under different cyclic loadings: *Geotechnical Testing Journal*, 39(4): 673-687.
- Tuğrul, A., and Zarif, I., 1999, Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey: *Engineering Geology*, 51(4): 303-317.
- Ündül, Ö., Amann, F., Aysal, N., and Plötze, M. L., 2015, Micro-textural effects on crack initiation and crack propagation of andesitic rocks: *Engineering geology*, 193: 267-275.
- Ündül, Ö., and Tuğrul, A., 2012, The influence of weathering on the engineering properties of dunites: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(2): 225-239.
- Wawersik, W., and Fairhurst, C., 1970, A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments, in *Proceedings International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 7: 561-575.
- Zalooli, A., Freire-Lista, D. M., Khamehchiyan, M., Nikudel, M. R., Fort, R., and Ghasemi, S., 2018, Ghaleh-khargushi rhyodacite and Goid andesite from Iran: characterization, uses, and durability: *Environmental earth sciences*, 77(8): 315.
- Zhao, X., Cai, M., Wang, J., and Ma, L., 2013, Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 64: 258-269.
- Zhou, S., Xia, C., and Zhou, Y., 2018, A theoretical approach to quantify the effect of random cracks on rock deformation in uniaxial compression: *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(3): 627-637.