

بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر ریز ترکها بر رفتار مکانیکی

نمونه‌های سنگی

امین خدایار^۱، حمیدرضا نجاتی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

h.nejati@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۲/۰۵]

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۸/۰۹]

چکیده

درزه‌ها و ترک‌ها جزء جدانشدنی سازه‌های سنگی بوده که بر اساس نوع کاربری سازه تحت تأثیر مجموعه‌ای از بارهای استاتیکی و دینامیک قرار می‌گیرند. یکی از مهمترین عامل گسیختگی سازه‌های سنگی گسترش همین درزه‌ها و ترک‌های موجود در سنگ است. ریز ترک‌ها در سنگ معمولاً به دو شکل طبیعی و القایی مشاهده می‌شوند. در این پژوهش، تاثیر ریز ترک‌های القایی بر رفتار مکانیکی نمونه‌های سنگی بررسی شده است. برای این کار از حرارت برای القای ریز ترک در داخل نمونه استفاده شده است به نحوی که نمونه‌های گرانیتی در داخل یک کوره دما بالا با نرخ ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و از ۲۵ تا ۱۰۰۰ درجه حرارت داده شده‌اند. برای شناسایی ریز ترک‌های ایجاد شده در نمونه از میکروسکوپ الکترونی استفاده شده و مشخص شد که در دمای ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه ریز ترک‌هایی در داخل نمونه القا شده است. آزمون‌های آزمایشگاهی شامل اولتراسونیک، مقاومت فشاری تک محوره و برزلی در آزمایشگاه انجام گرفته و الگوی شکست نمونه‌ها در آزمون مقاومت فشاری تک محوره مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که حضور ریز ترک‌ها باعث کاهش مقاومت، مدول الاستیسیته، سرعت موج طولی و افزایش کرنش متناظر با مقاومت نهایی در نمونه می‌شود. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که الگوی شکست نمونه‌های گرانیتی با افزایش ریز ترک‌ها از حالت «جدایش محوری» به حالت «شکست برشی» تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر افزایش تعداد ریز ترک‌ها در نمونه‌های گرانیتی باعث تغییر الگوی شکست نهایی نمونه‌ها از حالت شکست شکننده به شکست شکل‌پذیر می‌شود. همچنین با استفاده از نرم افزار RFPA، ناهمگنی ناشی از ریز ترک‌ها به صورت عددی مدلسازی شده و تاثیر آن بر الگوی شکست نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی مشخص شد که علت تغییر در الگوی شکست نمونه‌های سنگی با افزایش ریز ترک‌های القایی، کاهش ترک‌های کششی و افزایش ترک‌های برشی در نمونه‌ها است.

واژه‌های کلیدی: الگوی شکست، ریز ترک‌ها، رفتار مکانیکی، گرانیت

۱- مقدمه

سنگ‌ها در ابتدا به شکل ریز ترک‌های کششی آغاز می‌شود که ناشی از تمرکز تنش‌های محلی است [2]. آسیب القا شده به وسیله ریز ترک‌ها تحت بارگذاری فشاری یک فرآیندی

سنگ‌ها بیشتر ناهمگن و دارای نقص‌هایی از قبیل مرزهای بین دانه‌ای، ریز ترک‌ها و منافذ هستند [1]. فرآیند آسیب

اجتناب ناپذیر در بسیاری از سنگ‌های شکننده است. تنش‌های اعمالی موجب می‌شود تا این ریز ترک‌ها رشد کرده و آسیب در سرتاسر نمونه توزیع شود. در نهایت، ریز ترک‌ها به هم متصل شده و آسیب تبدیل به یک صفحه برشی در داخل سنگ می‌شود. همین عمل باعث ایجاد یک فرآیند کرنش نرمی و شکست در مقیاس بزرگتر می‌شود [3].

شکست نمونه‌های سنگی تحت فشار، بر اثر رشد و به هم پیوستن ریز ترک‌های ناپایدار صورت می‌گیرد. ناحیه شکست در نمونه‌های سنگی، محدوده‌ای است که بر اثر بهم رسیدن ریز ترک‌های در حال رشد در سنگ‌ها حادث می‌شود. بنابراین چگالی اولیه ریز ترک‌ها می‌تواند به عنوان یکی از عوامل تاثیر گذار در روند رشد ترک و چقرمگی شکست سنگ‌ها مطرح باشد. طبق روابط ارائه شده در مکانیک شکست، می‌توان به رابطه مستقیم چقرمگی شکست سنگ‌ها با طول ریز ترک‌ها پی‌برد. از طرفی چگالی ریز ترک‌ها و تمرکز آنها در داخل سنگ نیز سبب کاهش مقاومت سنگ در برابر رشد ترک شده و در نهایت منجر به کاهش چقرمگی سنگ می‌شود. بنابراین مطالعه تاثیر ویژگی‌های ریز ترک‌ها همچون طول و چگالی آنها در گسترش ترک در سنگ و الگوی شکست نهایی آن، امری لازم و ضروری به شمار می‌رود [4].

با وجود اینکه اهمیت میکروساختارهایی مانند ریز ترک‌ها بر ویژگی‌های ژئومکانیکی نمونه‌ها به خوبی شناخته شده است، پژوهش‌های کمی روی چگونگی تاثیر میکروساختارها بر سنگ‌های شکننده مانند گرانیت انجام گرفته است [5]. مراحل چندگانه فرآیند شکست شکننده سنگ‌ها شامل بسته شدن ترک، شروع ترک، تخریب ترک و گسیختگی، به وسیله حضور ریز ترک‌ها تحت تاثیر قرار می‌گیرد [6]. در این پژوهش، تاثیر ریز ترک‌های القایی بر خواص مکانیکی و الگوی شکست نهایی نمونه‌های سنگ گرانیت به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۱- تقسیم بندی انواع ریز ترک‌ها

ریز ترک‌ها در سنگ‌های کریستاله زمانی شکل می‌گیرند که تمرکز تنش محلی بیشتر از مقاومت محلی شود. می‌توان

ریز ترک‌ها را در دو گروه طبقه بندی کرد: (۱) ریز ترک‌های طبیعی که فرآیندهای طبیعی شامل فشار یا دما، طی دوره‌های زمین‌شناسی باعث ایجاد این نوع ریز ترک می‌شود. (۲) ریز ترک‌های القایی ناشی از تمرکز تنش در طول فرآیند مغزه‌گیری و استخراج، تنش‌های حرارتی و همچنین توزیع مجدد تنش در اطراف دهانه‌های حفاری مانند تونل اشاره کرد. از جمله عوامل مؤثر در ایجاد ریز ترک‌های ناشی از تنش‌های حرارتی می‌توان به منابع زمین گرمایی، محل ذخیره زباله‌های اتمی و هیدراسیون در سدهای بتنی بزرگ اشاره کرد [7]. ریز ترک‌های طبیعی می‌توانند در سه نوع طبقه بندی شوند (۱) ریز ترک‌هایی که مربوط می‌شوند به صفحات حاوی سیال که در طی فرآیند سرد شدن هم فشار ماگما تشکیل می‌شوند. (۲) ریز ترک‌های که در اثر پرشدگی کانی‌های خارجی ایجاد می‌شوند و (۳) ریز ترک‌های باز که در طی فرآیند کاهش فشار هم‌دما و فعالیت‌های تکتونیکی ایجاد می‌شوند [8]. ریز ترک‌های القایی ناشی از تنش در طی فرآیند رایج مغزه‌گیری از اعماق به وجود می‌آیند. پژوهش‌ها نشان داده که حفاری از یک گمانه سبب تمرکز تنش و توزیع مجدد تنش‌های اولیه می‌شود. زمانی که بزرگی این تنش‌ها بیشتر از تنش لازم برای شروع ریز ترک‌ها شود، ممکن است ریز ترک‌هایی در نمونه ایجاد شود [9]. ریز ترک‌های طبیعی و القایی در ویژگی‌های ریخت‌شناسی و جهت‌یابی تفاوت دارند. ریز ترک‌های طبیعی بیشتر دارای دیواره‌های زبر و نامنظم هستند که با پرکننده‌های مختلف پوشانده شده است. ریز ترک‌های القایی به وسیله دیواره‌های صاف و موازی مشخص می‌شوند و بیشتر عاری از مواد پرکننده هستند و جهت‌یابی ترک‌ها معمولاً موازی با جهت تنش اصلی است که در واقع منعکس کننده ماهیت کششی آنها است [10]. با توجه به شکل ریز ترک‌ها آنها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: (۱) ریز ترک‌هایی که در مرز دانه شکل می‌گیرند. (۲) ریز ترک‌هایی که در داخل دانه‌های کانی تشکیل می‌شوند. (۳) ریز ترک‌هایی که از عرض چند کانی و مرز آنها عبور می‌کنند [11]. صرف نظر از منشأ ریز ترک‌ها، نقش اصلی ناهمگنی‌هایی مثل ریز ترک ایجاد تمرکز تنش‌های محلی است که موجب شکست‌های محلی و در نهایت شکست اصلی می‌شود [12].

۲-۱- کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ‌های گرانیتی

است. در مرحله بعد یک گروه از نمونه‌ها در دمای اتاق و بدون تغییر نگه داشته شده و ۵ گروه از نمونه‌ها داخل کوره و تا دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه به صورت مجزا حرارت داده شده‌اند. نمونه‌های مورد نظر در شکل (۱) آورده شده است به نحوی که نمونه‌ها در گروه‌های دوتایی و از سمت راست به چپ از دمای ۲۵ تا ۱۰۰۰ درجه حرارت دیده‌اند. در هر مورد، دما با نرخ ۱۰ درجه بر دقیقه اعمال شد و هر گروه از نمونه‌ها پس از رسیدن به دمای مورد نظر ۳۰ دقیقه در همان دما نگه داشته شدند تا انتقال گرما از سطح بیرونی نمونه به سمت داخل آن به طور کامل انجام شود. به منظور ایجاد ترک‌های یکنواخت، پس از خاموش شدن کوره نمونه‌ها از کوره خارج نشدند تا از سرد شدن سریع آنها جلوگیری شود. بعد از بیرون آوردن نمونه‌ها با استفاده از آزمایش میکروسکوپ الکترونی ترک‌های ایجاد شده در داخل نمونه‌ها شناسایی شده و مشخص شد که فقط در نمونه‌هایی که ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه دما دیده‌اند، ترک ایجاد شده است، بنابراین این دو گروه از نمونه‌ها به همراه نمونه‌های ۴۰۰ و ۲۵ درجه مبنای بقیه آزمایش‌ها قرار گرفته است. پس از بیرون آوردن نمونه‌های ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه از داخل کوره سرعت موج طولی عبوری از آنها اندازه‌گیری شده است. در نهایت، آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و آزمایش کشش غیر مستقیم برای هر کدام از نمونه‌ها انجام شده و رفتار تنش-کرنش هر نمونه و نتایج مربوطه شامل مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کشش غیر مستقیم، مدول الاستیسیته و کرنش متناظر با مقاومت نهایی ثبت شده است.

شکل ۱. نمونه‌های استوانه‌ای و دیسکی مورد نیاز برای انجام آزمایش



Fig. 1. Prepared specimen for experimental tests.

گرانیت‌ها عموماً دارای دانه‌بندی متوسط تا درشت و جزء سنگ‌های کریستالی آذرین هستند که به وسیله سرد شدن تدریجی ماگما کریستاله شده‌اند. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده گرانیت عبارتند از کوارتز، فلدسپار پلاژیوکلاز و آلکالی فلدسپار و مقداری بیوتیت، مسکویت و یا هورنبلند [13]. گرانیت غنی از عناصری با ایزوتوپ‌های رادیواکتیو (K, TH, U) تولیدکننده حرارت است و بنابراین عموماً با آنومالی‌های دما و گرادیان‌های زمین گرمایی بالا در پوسته در ارتباط است. این ویژگی باعث می‌شود که گرانیت مخازن بسیاری از انرژی‌های زمین گرمایی باشد. همچنین گرانیت‌ها دارای نفوذپذیری بسیار پایین و مقاومت بالایی هستند که سبب می‌شود این سنگ‌ها مکان‌های مناسبی برای ذخیره زباله‌های هسته‌ای نیز باشند [14].

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- ساخت و آماده سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های مربوطه

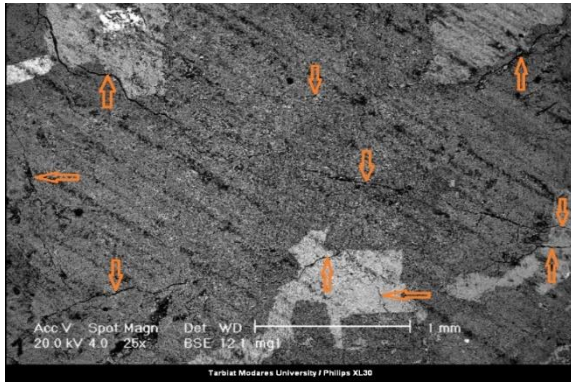
برای انجام آزمایش‌ها، تعدادی نمونه بلوکی از نواحی مختلف معدن گرانیت زنجان تهیه شده است. سپس در آزمایشگاه برای انجام آزمایش‌های مربوطه از این بلوک‌ها مغزه‌های استوانه‌ای به قطر ۵۴ میلی متر (NX) و با نسبت طول به قطر ۲/۵ تهیه شده است. در مجموع ۱۲ نمونه استوانه‌ای و ۱۲ دیسک برزیلی آماده شده که به شش گروه چهار تایی تقسیم شده اند (هر گروه شامل دو نمونه استوانه‌ای و دو دیسک برزیلی).

۲-۲- فرآیند انجام آزمایش

ابتدا، مشخصات هندسی و فیزیکی هر یک از نمونه‌ها شامل طول، قطر، چگالی، تخلخل و رطوبت در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از دستگاه اولتراسونیک، سرعت موج طولی در هر گروه از نمونه‌ها اندازه‌گیری شده

۳- نتایج آزمایش‌های انجام شده

۱-۳- شناسایی ترک‌های ناشی از حرارت



ب

Fig. 2. SEM images of granite: thin section (a) at room temperature; (b) heated to 800° C

۲-۳- آزمایش اندازه‌گیری سرعت موج فشاری

قبل و بعد از قرار گرفتن نمونه‌ها در کوره زمان عبور موج فشاری از داخل نمونه اندازه‌گیری شده و سپس با تقسیم طول نمونه بر این زمان، سرعت موج فشاری مربوط به هر نمونه بدست آمد. نمودار درصد تغییرات سرعت موج فشاری در مقابل دما در شکل (۳) آورده شده است. منظور از درصد تغییرات سرعت موج فشاری (DF) عبارت $100 \left(\frac{v_p - v_p'}{v_p} \right)$ است که در آن v_p و v_p' به ترتیب مربوط به سرعت موج فشاری قبل و بعد از حرارت دیدن نمونه‌ها است.

همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود میزان تغییرات سرعت موج فشاری در نمونه‌های حاوی ریزترک، بیشتر است.

شکل ۳. تغییرات سرعت موج طولی در نمونه‌های استوانه‌ای

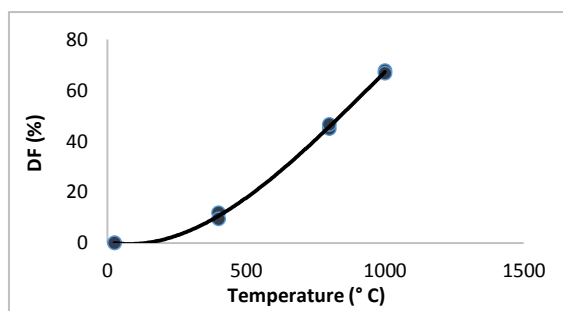


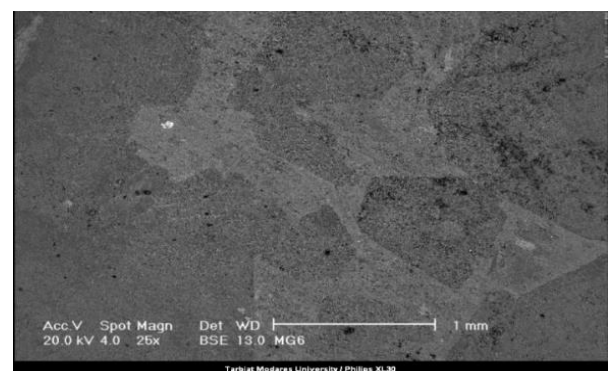
Fig. 3. Variation of DF with heating temperature.

در این مطالعه، نمونه موجود در دمای اتاق و نمونه‌هایی که تا دمای ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه حرارت داده شده‌اند با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی ارزیابی شدند. برای این کار مقاطع نازکی از این نمونه‌ها تهیه شده و سطح آنها با استفاده از پوشش طلا رسانا شده است. سپس نمونه‌ها را زیر میکروسکوپ قرار داده و با بزرگنمایی‌های مختلف ریزترک‌های القا شده در نمونه‌ها در اثر دما شناسایی شده‌اند. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد فقط در نمونه‌هایی که تا ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه حرارت دیده‌اند ریزترک‌هایی ایجاد شده است. در شکل (۲) ریزترک‌های القا شده در نمونه در نتیجه حرارت نشان داده شده است.

دلیل ایجاد ریزترک‌ها در نمونه ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه را می‌توان ناشی از تفاوت ضریب انبساط حرارتی کانی‌ها، تغییر شکل کریستالی کانی‌ها و واکنش‌های شیمیایی ساختاری دانست. همان‌گونه که در مقدمه نیز اشاره شد در نمونه‌هایی که تا ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه حرارت دیده‌اند، هیچ‌گونه ترکی با استفاده از میکروسکوپ مورد استفاده مشاهده نشد. به همین دلیل نمونه‌های مورد آزمایش به دو گروه نمونه ۲۵ و ۴۰۰ درجه (بدون ریزترک)، نمونه ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه (دارای ریزترک) تقسیم بندی شد. سایر تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش بر اساس مقایسه این دو گروه نمونه انجام شده است.

شکل ۲. سطح نمونه بعد از حرارت دیدن (الف) نمونه در دمای اتاق؛

(ب) نمونه ۸۰۰ درجه



الف

ب

۳-۳- تاثیر ریزترک‌های القایی بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در اثر حرارت و القاء ریزترک در نمونه‌ها، مقاومت نمونه‌ها کاهش و مقدار کرنش در لحظه شکست نیز افزایش می‌یابد. با توجه به نمودارهای شکل (۴) به وضوح دیده می‌شود که با افزایش ریزترک‌های ناشی از تنش حرارتی به وسیله افزایش دما، مقاومت فشارشی تک محوره (UCS) و مدول یانگ نمونه‌ها به شدت کاهش می‌یابد و کرنش محوری مربوط به مقاومت پیک افزایش می‌یابد. درضمن، با افزایش ریزترک‌ها، قسمت غیر خطی در ابتدای نمودار تنش-کرنش افزایش می‌یابد.

۳-۳-۲- مقاومت کششی غیرمستقیم

بر خلاف آزمایش مقاومت فشارشی تک محوره که کل سطح نمونه تحت بار قرار می‌گیرد، در آزمایش برزلی فقط یک ناحیه باریک در امتداد قطر نمونه تحت تاثیر بارگذاری قرار دارد و به همین دلیل شرایط نمونه در این ناحیه مقاومت کششی نمونه و الگوی شکست نمونه را مشخص می‌کند.

همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ریزترک به صورت مشهودی از نمونه بکر کمتر است. در مورد نمونه ۸۰۰ درجه این کاهش تقریباً ۳۲ درصد و در نمونه ۱۰۰۰ درجه ۴۲ درصد است. با توجه به اینکه در آزمایش برزلی تاثیر ترک‌های کششی نسبت به ترک‌های برشی در فرآیند شکست بیشتر است، مشاهده می‌شود که با افزایش دما به دلیل ایجاد ریزترک‌هایی در نمونه، شکست به ازای مقدار بار کمتری رخ داده است.

شکل ۵. تاثیر ریزترک‌های القایی بر مقاومت کششی نمونه‌ها

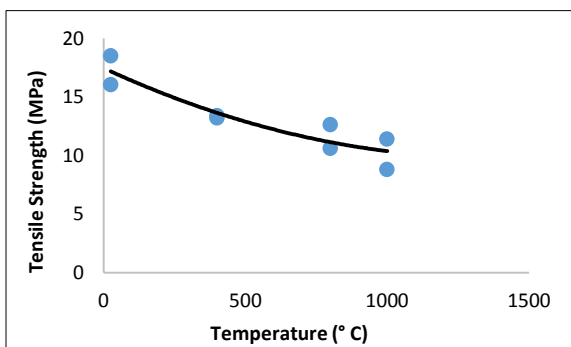


Fig. 5. Variation of tensile strength with heating temperature.

در این بخش تاثیر ریزترک‌های القایی بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها از جمله منحنی تنش-کرنش، مدول الاستیسته، مقاومت برزلی، کرنش متناظر با مقاومت پیک و همچنین شکل شکست نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۳-۱- منحنی تنش-کرنش

همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش احتمال حضور ریزترک در نمونه‌ها، مقاومت تک محوره نمونه کاهش یافته است. این موضوع به این دلیل است که شکست سنگ تحت بارگذاری فشارشی تک محوره به گونه‌ای است که در ابتدای بارگذاری انرژی موجود صرف ایجاد ترک‌های کششی و تضعیف چسبندگی در نمونه می‌شود و در مرحله بعدی این ترک‌ها به یکدیگر متصل شده و تشکیل ماکروترک می‌دهند و در نهایت موجب شکست نمونه می‌شوند. با افزایش تعداد ریزترک‌ها، انرژی کمتری صرف ایجاد ریزترک‌های اولیه در نمونه می‌شود، بنابراین انرژی موجود بیشتر صرف اتصال ریزترک‌های موجود به یکدیگر شده و باعث می‌شود نمونه در سطح بار کمتری نسبت به نمونه بکر بشکند. علاوه بر این ممکن است تمرکز تنش در نوک ریزترک‌های موجود نیز به این مسئله کمک کند. نمودار مقاومت تک محوری فشارشی نمونه‌های مورد آزمایش در شکل (۴) آورده شده است.

شکل ۴. منحنی تنش-کرنش نمونه‌های حرارت دیده تا دماهای مختلف

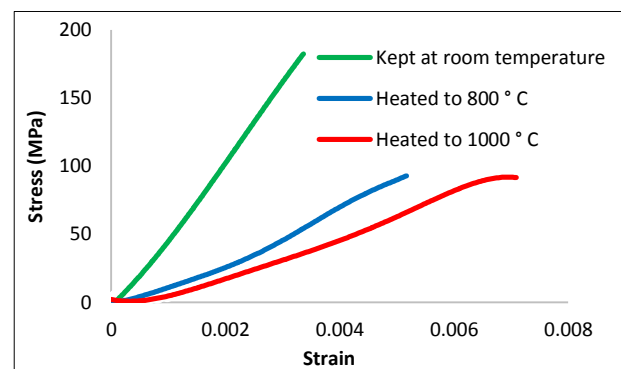


Fig. 4. Stress-strain curves of specimens at different heating temperatures.

۳-۴- شکنندگی نمونه

نمونه‌ای را نشان می‌دهد که تا ۸۰۰ درجه حرارت دیده است. شکل شکست نمونه بکر به صورت جدایش محوری^۱ بوده در حالیکه شکل شکست نمونه حرارت داده شده تا ۸۰۰ درجه به صورت شکست برشی است. لازم به ذکر است که اختلاف رنگ نمونه‌های نشان داده شده در شکل (۷) ناشی از حرارت دادن یکی از نمونه‌ها شکل (۷ ب) تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

شکل ۷. الگوی شکست نمونه‌های (الف) دمای اتاق (ب) ۸۰۰ درجه



Fig. 7. Failure mode of specimens: (a) kept at room temperature (b) heated to 800°

۱۷- مدل‌سازی عددی

۴-۱- نرم‌افزار مکانیک شکست سنگ

در سال‌های اخیر علاقه پژوهشگران به مدل‌سازی عددی مکانیک شکست و گسیختگی سنگ بیشتر شده است. تلاش‌ها در این زمینه برای آگاهی از سازوکار شکست، بهبود امکانات آنالیز و توسعه روش‌های عددی برای مهندسين، بسیار ضروری است. مشاهده ساختارهای داخلی و خارجی سنگ، فهم بسیار خوبی از رفتار شکست آن فراهم می‌کند [16]. به طور عمومی پذیرفته شده‌است که تغییر شکل سنگ

با وجود تعریف جامعی که برای اجسام شکننده و شکل‌پذیر ارائه شده است ولی متأسفانه شاخصی استاندارد برای تعیین شکنندگی سنگ‌های مختلف ارائه نشده است [15]. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای تقسیم بندی شکنندگی سنگ‌ها، نسبت مقاومت فشارشی تک محوره به مقاومت کششی $(\frac{\sigma_c}{\sigma_t})$ نمونه‌های سنگی است. بر اساس آزمایش‌های انجام شده مقدار این شاخص محاسبه شده و تغییرات آن با افزایش دما در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۶) بر می‌آید در نتیجه حضور ریزترک‌ها در سنگ نسبت $(\frac{\sigma_c}{\sigma_t})$ به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.

به عبارت دیگر، هر چه تعداد ریز ترک‌ها در نمونه بیشتر باشد از میزان شکنندگی نمونه کاسته می‌شود. این مطلب ناشی از این حقیقت است که هرچه سنگ شکننده‌تر باشد میزان ترک‌های کششی ایجاد شده در آن طی فرآیند شکست بیشتر است؛ اما با توجه به اینکه در نمونه‌های حاوی ریزترک مقداری از این ترک‌های کششی در اثر تنش‌های حرارتی ایجاد شده‌اند، بنابراین از میزان ترک‌های کششی کاسته شده و همین باعث می‌شود تا شکست نهایی در این نمونه‌ها نرم‌تر باشد.

شکل ۶. نمودار نسبت مقاومت فشارشی به کششی در مقابل دما

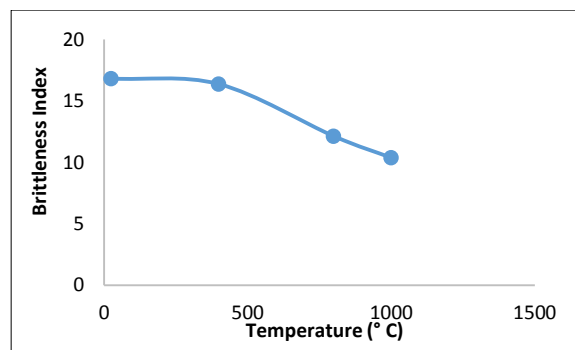


Fig. 6. Variation of brittleness index with heating temperature of specimens.

شکل شکست نهایی نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری تک محوره مؤید این مطلب است. شکل (۷) الگوی شکست نهایی نمونه‌ها در آزمایش تک محوره را نشان می‌دهد. شکل (۷ الف) مربوط به نمونه بکر (۲۵ درجه) و شکل (۷ ب)

۴-۲- بررسی الگوی شکست نمونه‌های حاوی ریزترک

همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد تنش‌های حرارتی به وسیله تفاوت در ضریب انبساط گرمایی کانی‌ها، تغییر شکل کریستالی کانی‌ها و واکنش‌های شیمیایی ساختاری باعث القای ریزترک‌هایی در داخل نمونه می‌شوند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی شکل (۹) مشاهده شد که در نتیجه حضور ریزترک‌ها در داخل نمونه الگوی شکست از جدایش محوری به شکست برشی تغییر می‌کند. در این قسمت، علت این مسأله با استفاده از نرم افزار المان محدود RFPA بررسی شده است. برای مدلسازی تاثیر حضور ریزترک‌ها بر الگوی شکست نمونه‌های استوانه‌ای علاوه بر اینکه از نتایج آزمایش‌های مربوط به نمونه‌های حاوی ریزترک در آزمایشگاه استفاده شده، تاثیر پارامتر m نیز در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که بیان شد با افزایش مقدار m ، توزیع پارامتر تخصیص داده شده همگن‌تر خواهد بود، با توجه به اینکه حضور ریزترک‌ها در داخل نمونه به صورت همگن نبوده، همین عامل سبب می‌شود تا توزیع پارامترهایی مثل مقاومت تا حدی زیادی ناهمگن شود. چرا که حضور ریزترک‌ها باعث تمرکز تنش در نوک ریزترک‌های موجود می‌شود و همین عامل سبب می‌شود تا مقدار پارامتر m کمتر در نظر گرفته شود. با توجه به اینکه برای m های بزرگتر از ۱۰ توزیع پارامترها تقریباً همگن در نظر گرفته می‌شود بنابراین در این پژوهش مقدار پارامتر m در نمونه‌های حاوی ریز ترک ۹ در نظر گرفته شده است.

برای بررسی الگوی شکست‌های مشاهده در نمونه‌های آزمایشگاهی مدل‌هایی در نرم افزار RFPA ساخته شده است. مقدار پارامترهای مربوط به مدلسازی هر کدام از نمونه‌های حاوی سنگ بکر و ریزترک در جدول (۱) آورده شده است. برای بررسی عددی رفتار نمونه‌های سنگی، مدل‌هایی با ابعاد ۵۴ میلی‌متر در ۱۱۰ میلی‌متر و حاوی حدود ۲۳۷۶۰ یانگ ۲۱۰ گیگاپاسکال و مقاومت فشاری ۸۰۰ مگاپاسکال به صورت همگن مدلسازی شده‌اند. در ادامه با دستورات موجود در برنامه، مطابق شکل (۸ الف) نمونه مستطیلی برای انجام تست

شامل پدیده‌های بسیار پیچیده‌ای با عنوان شروع^۲، گسترش^۳ و بهم پیوستن^۴ ریزترک‌ها است [17]. روش‌های عددی بسیاری مانند المان محدود، المان مجزا و المان مرزی برای مدلسازی تغییر شکل پذیری و شکست سنگ استفاده شده است. نکته قابل تأمل دقت به تأثیر گذارترین پارامتر در رفتار شکست سنگ با عنوان ناهمگنی^۵ است. مکانیک شکست الاستیک خطی امروزه ابزار اصلی برای آنالیز مسائل گسترش ترک در جامدات است. اما مکانیک شکست الاستیک خطی فقط برای مواد همگن با یک ترک یا چند ترک منظم قابل استفاده است نه برای مواد ناهمگن با رفتار شبه شکننده مانند سنگ و بتن و سرامیک [18]. بنابراین برای مدلسازی سازوکار شکست این قبیل مواد، نیازمند برنامه با قابلیت در نظرگرفتن ناهمگنی نمونه‌هاست. از این رو یک مدل میکرومکانیکی برای مطالعه تغییر شکل‌پذیری و فرایند شکست سنگ بر مبنای در نظرگرفتن ناهمگنی سنگ در حد مزوسکوپی ارائه شده است. در این مدل عددی، ناهمگنی سنگ با فرض توزیع ویال برای ویژگی‌های مختلف سنگ مانند مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و چگالی اعمال شده است. مکانیک شکست الاستیک به عنوان قانون اصلی برای المان-های مزو و روش المان محدود به عنوان ابزار اصلی تحلیل تنش است. معیار تنش کششی ماکزیمم و موهر-کولمب به عنوان معیارهای شکست اعمال شده‌اند. بر اساس این مدل یک برنامه عددی با عنوان تحلیل فرایند شکست سنگ توسط تانگ و هادسون توسعه داده شده است. همان‌گونه که اشاره شد در این نرم‌افزار از توزیع ویال با توزیع چگالی مطابق رابطه (۱) برای مدلسازی نمونه‌های ناهمگن استفاده می‌شود [19].

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp \left(- \frac{u}{u_0} \right)^m \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن u پارامتر تخصیص داده شده به المان‌ها همچون مقاومت یا مدول الاستیسیته، u_0 پارامتر مقیاس و m به عنوان شاخص همگنی ماده تعریف می‌شود.

- 2 Initiation
- 3 propagation
- 4 Coalescence
- 5 Heterogeneity

فشارشی تک محوره ساخته می شود. نرخ بارگذاری ۰/۰۰۲ میلی متر در هر مرحله بارگذاری است.

نمونه های مدل سازی شده نشان داده شده است. ترک های کششی به رنگ قرمز و ترک های برشی به رنگ سفید مشاهده می شوند. شعاع هر دایره معرف بزرگی ترکها و انرژی آن نسبت به سایر رخدادهای است.

جدول ۱. پارامترهای مربوط به مدل سازی نمونه ها

Parameter	At room temp.	1000 °C
Elastic Modulus (Gpa)	45	22
Uniaxial compression strength	182.5	91
Poisson's ratio	0.25	0.28
Homogeneity Index	50	9
Brittleness Index	17.2	10

Table.1. Properties of specimens used in numerical modelling

همان گونه که اشاره شد، این نرم افزار قابلیت مدل سازی تولیدهای آکوستیک نمونه ها در طول فرایند بارگذاری را دارد. در شکل (۸-ج) نمونه ای از تولیدات AE برای یکی از

همان گونه که مشاهده می شود در نمونه بکر الگوی شکست به صورت جدایش محوری و در نمونه حاوی ریزترک به صورت برشی است. با توجه به تولیدات آکوستیک ایجاد شده در شکل های (۸ و ۹) می توان مشاهده کرد که تعداد ترک های برشی در نمونه های حاوی ریزترک نسبت به ترک های کششی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است و احتمالاً همین عامل سبب تغییر الگوی شکست از جدایش محوری در نمونه بکر به شکست برشی در نمونه حاوی ریزترک شده است.

شکل ۸. الگوی شکست نمونه بکر (الف) هندسه اولیه (ب) الگوی شکست محوری (ج) تولیدات AE

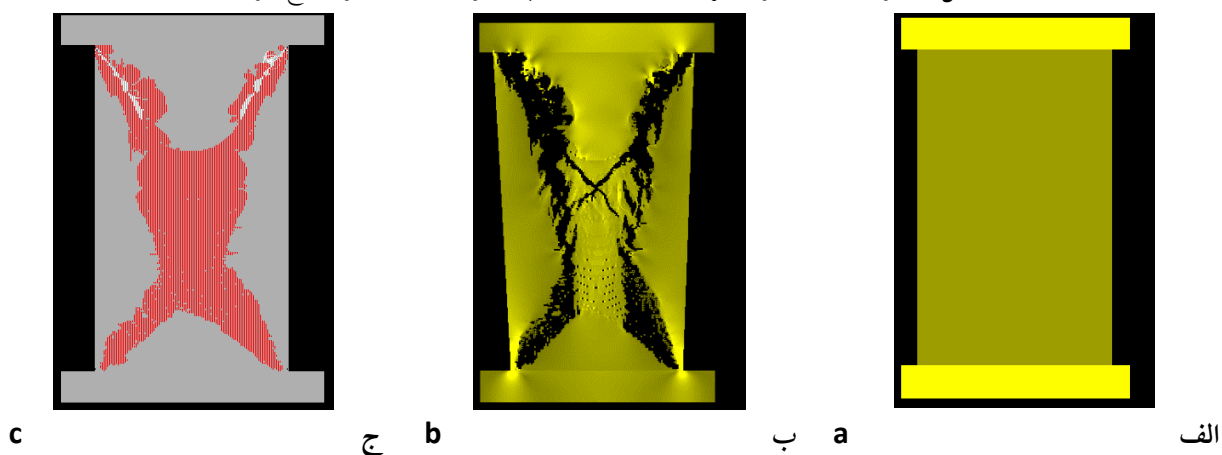


Fig. 8. Failure mode of specimen; (a) Basic geometry (b) axial splitting (c) fracture event source locations

شکل ۹. الگوی شکست نمونه حاوی ریزترک (الف) هندسه اولیه (ب) الگوی شکست برشی (ج) تولیدات AE

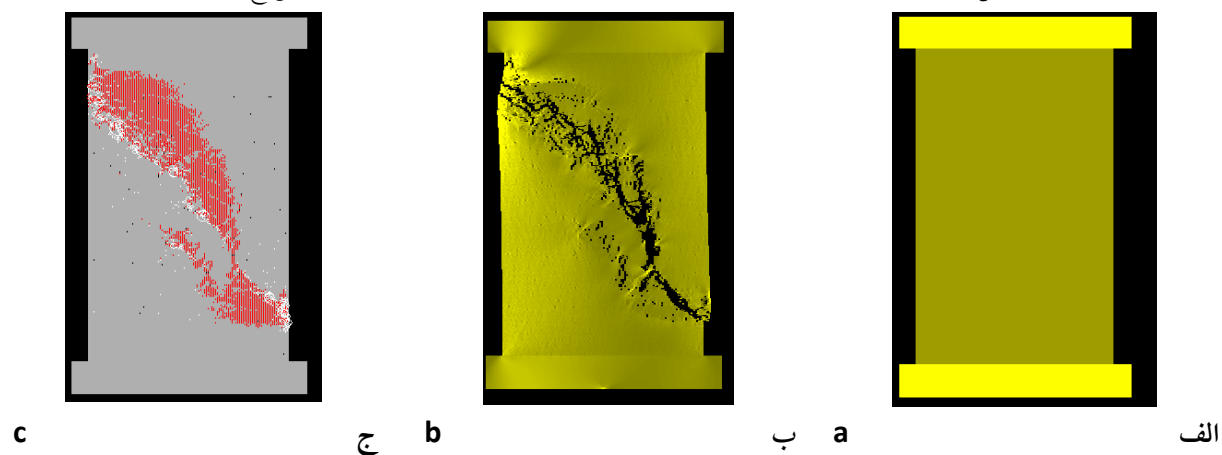


Fig. 9. Failure mode of specimen; (a) Basic geometry (b) shearing (c) fracture event source locations

۵- نتایج

یافته و الگوی شکست آن به شکست برش تغییر خواهد یافت.

بارگذاری حرارتی در نمونه‌ها به دلیل تفاوت در ضریب انبساط حرارتی دانه‌ها، واکنش‌های شیمیایی در سنگ گرانیت و بخار شدن رطوبت موجود در نمونه باعث القای ریزترک‌هایی در نمونه می‌شود.

۶- منابع

References

[1] Jing, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(3), 283-353.

[2] Homand-Etienne, F., Hoxha, D., & Shao, J. F. (1998). A continuum damage constitutive law for brittle rocks. *Computers and Geotechnics*, 22(2), 135-151.

[3] Dragon, A., Halm, D., & Désoyer, T. (2000). Anisotropic damage in quasi-brittle solids: modelling, computational issues and applications. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 183(3), 331-352.

[4] Nasser, M. H. B., Mohanty, B., & Robin, P. Y. (2005). Characterization of microstructures and fracture toughness in five granitic rocks. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 42(3), 450-460.

[5] Martin, C. D., & Stimpson, B. (1994). The effect of sample disturbance on laboratory properties of Lac du Bonnet granite. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(5), 692-702.

[6] Chernis, P. J. (1984). Comparison of the pore-microcrack structure of shallow and deep samples of the Lac du Bonnet granite. *Whiteshell Nuclear Research Establishment*.

[7] Nur, A., & Simmons, G. (1970, May). The origin of small cracks in igneous rocks. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 7, No. 3, pp. 307-314). Pergamon.

[8] Nadan, B. J., & Engelder, T. (2009). Microcracks in New England granitoids: A record of thermoelastic relaxation during exhumation of intracontinental crust. *Geological Society of America Bulletin*, 121(1-2), 80-99.

[9] Lim, S. S., & Martin, C. D. (2010). Core diking and its relationship with stress magnitude for Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(2), 254-264.

[10] Tapponnier, P., & Brace, W. F. (1976, April). Development of stress-induced microcracks in

حضور ریزترک در داخل نمونه‌های سنگی بر رفتار مکانیکی آن تاثیر می‌گذارد. در اثر حضور ریزترک‌ها سرعت موج فشارشی، مقاومت فشارشی تک محوره، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی غیر مستقیم کاهش و کرنش متناظر با مقاومت پیک افزایش می‌یابد. علت این امر ضعیف شدن نمونه سنگی در اثر حضور ریزترک‌ها و تمرکز تنش در نوک ریزترک‌های موجود است.

با افزایش مقدار ریزترک‌ها در نمونه از میزان شکنندگی آن کاسته می‌شود. برای بررسی این موضوع از نسبت مقاومت فشارشی به مقاومت کششی غیر مستقیم استفاده شده و مشاهده شد که در نمونه‌های حاوی ریزترک این نسبت به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

الگوی شکست در نمونه بکر به شکل جدایش محوری است و در صورت القای ریزترک در نمونه، الگوی شکست نهایی نمونه به برش تغییر خواهد یافت. مدلسازی‌های عددی انجام شده نیز تغییر الگوی شکست نمونه‌ها از حالت جدایش محوری به حالت برش را تایید می‌کند.

برای مدلسازی نمونه‌های حاوی ریزترک از پارامترهای ژئومکانیکی به دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی و تغییر پارامتر ناهمگنی m استفاده شده است. نتایج مدلسازی عددی نشان می‌دهد که تعداد ترک‌های کششی در نمونه حاوی ریزترک نسبت به نمونه بکر کاهش یافته و در مقابل تعداد ترک‌های برشی افزایش می‌یابد.

علت تغییر الگوی شکست نمونه بکر و نمونه حاوی ریزترک، تغییر در نسبت تعداد ترک‌های برشی به کششی است. به طوری که میزان شکنندگی نمونه حاوی ریزترک کاهش

- [15] Nejati, H. R., & Ghazvinian, A. (2014). Brittleness effect on rock fatigue damage evolution. *Rock mechanics and rock engineering*, 47(5), 1839-1848.
- [16] Nazerigivi, A., Nejati, H. R., Ghazvinian, A., & Najigivi, A. (2017). Influence of nano-silica on the failure mechanism of concrete specimens. *Computers and Concrete*, 19(4), 429-434.
- [17] Bobet, A., & Einstein, H. H. (1998). Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(7), 863-888.
- [18] Carpinteri, A., Chiaia, B., & Nemati, K. M. (1997). Complex fracture energy dissipation in concrete under different loading conditions. *Mechanics of Materials*, 26(2), 93-108.
- [19] Tang, C. A., & Hudson, J. A. (2010). *Rock failure mechanisms: explained and illustrated* (pp. 229-236). CRC.
- Westerly granite. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 13, No. 4, pp. 103-112). Pergamon.
- [11] Lim, S. S., Martin, C. D., & Åkesson, U. (2012). In-situ stress and microcracking in granite cores with depth. *Engineering Geology*, 147, 1-13.
- [12] Ghazvinian, A., Nejati, H. R., Sarfarazi, V., & Hadei, M. R. (2013). Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(11), 4435-4444.
- [13] Chen, Y. L., Ni, J., Shao, W., & Azzam, R. (2012). Experimental study on the influence of temperature on the mechanical properties of granite under uni-axial compression and fatigue loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, 62-66.
- [14] Shao, S., Ranjith, P. G., Wasantha, P. L. P., & Chen, B. K. (2015). Experimental and numerical studies on the mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite at high temperatures: an application to geothermal energy. *Geothermics*, 54, 96-108.

Experimental and numerical investigation of the effect of micro-cracks on the mechanical behavior of rock specimens

Amin Khodayar¹, Hamid Reza Nejati^{*2}

1- M.Sc Graduate, School of Eng, Rock Mechanics Division, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Assist. Prof., School of Eng, Rock Mechanics Division, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

It is seldom possible that rock engineering structures found without joints, cracks, or discontinuities. On the other hand, the application range of these structures are steadily increasing in recent years and includes bridges, tunnels, slopes, underground gas storage and etcetera. Thereby, their impact is to be considered in the rock structure design. In the present study, it is intended to evaluate the effect of induced micro-cracks on the mechanical behavior of rock specimens. For this purpose, 24 cylindrical specimens of Granite were prepared and some of them heated up to 800 degrees Celsius to induce micro-crack in the specimens. In the next, uniaxial compression test for determination of stress-strain curve of heated and unheated specimens were performed based on International Society for Rock Mechanics (ISRM) suggested method on a cylindrical specimen with 110 mm and 54 mm in length and diameter, respectively. The tests were conducted using a load controlled testing machine and the loading rate was kept at 0.5 MPa/Sec. Results of experimental tests indicate that mechanical properties of heated specimens change with increasing the temperature. For example elastic modulus, uniaxial compression strength, tensile strength of the fractured specimens is smaller than the intact ones and the strain corresponding to the failure increases with inducing the micro-cracks in the specimens. Also, it should be noted that tensile strength compared to the compression strength is more sensitive to thermal stress and induced micro-cracks. Therefore, brittleness index of the specimens (ratio of compression strength to tensile strength) decreases with increasing the fracture density. Further, induced micro-cracks influence on the failure pattern of specimens. The failure pattern of unheated specimen is axial splitting mode, while the failure pattern of heated specimen up to 800 degree Celsius changes to shear mode failure. In the next step, numerical modeling of the uniaxial compression test was provided to evaluate the reasons for changing of the failure pattern of heated specimens compared to the unheated ones. Numerical simulation was conducted using rock failure process analysis (RFPA) tool as a finite element code which has been developed on the basis of elastic damage model. The heterogeneity of rocks at a mesoscopic level is considered by assuming that the material properties follow the Weibull distribution. Elastic damage mechanics is used for describing the constitutive law of the meso-level element. The numerical models were adopted using mechanical properties of heated and unheated specimens extracted from laboratory tests. On the basis of numerical modeling results, it is found that in the specimen with induced micro-cracks, ratio of the number of shear cracks to tensile ones increases, under loading sequences. With increasing the fracture density in the specimens, the index of brittleness reduces and consequently the probability of nucleation and propagation of shear cracks, under uniaxial compression, increases. This is the main cause for changing of the type of specimen failure mode from axial splitting to shearing.

Keywords: failure mode, micro-crack, mechanical behavior, Granite