



بررسی پارامترهای شکست سنگ در نمونه دیسک ترک دار با سوراخ مرکزی تحت شرایط بارگذاری شبه استاتیکی

حسن احمدیان^۱، علیرضا باغبانان^۲، حمید هاشم الحسینی^۳

- ۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی معدن، مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

(دریافت ۱۳۹۷/۰۷/۱۷، پذیرش ۱۳۹۷/۱۱/۱۶)

چکیده

آزمایش‌ها نشان داده است که پارامترهای شکست سنگ با نرخ بارگذاری تغییر می‌کنند. در این مطالعه خواص میکروساختاری دو نوع مرمیت با استفاده از سه روش میکروسکوپی شامل مقطع نازک پتروگرافی، تکنیک جایگزینی رنگ فلورسنت و روش پراکنش میکروسکوب الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش آزمایشگاهی رفتار شکست دو نوع سنگ کریستالین با تغییر خواص میکروساختاری مطالعه شد. نمونه دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی برای تعیین پارامترهای شکست سنگ انتخاب شد و برای اعمال بارگذاری متغیر دستگاه تراکم هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای شکست سنگ با استفاده از دوربین سرعت بالا و مدار الکترونیکی برای پایش ترک اندازه‌گیری و محاسبه شد. تغییرات چقرمگی، سرعت گسترش ترک و بازشدگی نوک ترک با تغییر نرخ بارگذاری در محدوده بارگذاری شبه استاتیکی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. تفاوت خواص میکروساختاری مرمیت‌ها با تعیین ابعاد دانه‌بندی و فراوانی میکروتورها در هر سه روش در دو نوع مرمیت مشخص شد. افزایش چقرمگی شکست و سرعت گسترش ترک با افزایش نرخ بارگذاری در دو مرمیت با خواص میکروساختاری متفاوت از نتایج این مطالعه است. همچنین نتایج این کار نشان داد چقرمگی شکست نمونه‌های باغات (درشت دانه‌تر و با میکروتورک کمتر) از چقرمگی شکست نمونه‌های مارون (ریز دانه‌تر و با میکروتورک بیشتر) بالاتر است و اختلاف در میزان چقرمگی با افزایش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی

چقرمگی شکست، تکنیک عکس‌برداری با سرعت بالا، پارامترهای شکست، بارگذاری شبه استاتیکی.

۱- مقدمه

رویکرد مکانیک شکست در کاربری‌های مهندسی سنگ اهمیت زیادی دارد. شکست سنگ یکی از محبوب‌ترین محورهای پژوهش در ژئومکانیک است، کاربری‌های مهندسی سنگ مانند ارزیابی پایداری شیروانی‌های سنگی، طراحی سیستم نگهداری تونل و پیش‌بینی نفوذ جریان سیال می‌تواند به درک بیشتری از رفتار شکست سنگ با استفاده از آزمایش‌های ژئومکانیکی در مقیاس‌های مختلف منجر شود [۱].

هدف اصلی از آزمایش‌های مکانیک شکست اندازه‌گیری مقادیر شاهد پارامترهای شکست سنگ است که چقرمگی شکست یکی از پارامترهای اساسی شکست و بیانگر مقاومت ذاتی سنگ در حوزه میدان تنش نوک ترک در مقابل گسترش ترک است. اندازه‌گیری چقرمگی شکست سنگ در بارگذاری شبه استاتیکی یک موضوع رایج در مکانیک شکست است. اندازه‌گیری پارامترهای شکست سنگ از جمله چقرمگی، سرعت گسترش ترک، بازشدگی نوک ترک و همچنین بررسی وابستگی آن‌ها منجر به شناسایی رفتار شکست سنگ خواهد شد. با وجود پژوهش‌های متعدد انجام شده در بارگذاری شبه استاتیکی، رفتار شکست سنگ به طور کامل بررسی نشده است. مشخص شده است که پارامترهای شکست سنگ با آزمون‌های آزمایشگاهی به وسیله تجهیزات اندازه‌گیری با دقت بالا مانند تکنولوژی عکس‌برداری سریع قابل اندازه‌گیری خواهد بود. تکنولوژی عکس‌برداری با سرعت بالا برای تحقیقات در موضوع هندسه از دهه ۱۹۵۰ میلادی به کار گرفته شد و تکنیک‌های عکس‌برداری متعدد در این رابطه معرفی شد. اگرچه به دلیل مشکلاتی مانند اندازه‌گیری و ذخیره وقایع در مدت زمان کوتاه و عدم مشاهده چشمی، پارامترهای شکست مواد در یک دوره زمانی طولانی قابل ثبت نیست اما با وجود این موضوع، تکنولوژی عکس‌برداری با سرعت بالا در کاربری مهندسی ژئوتکنیک مانند بررسی حرکت شن‌های روان، تعیین پارامترهای شکست استاتیکی و دینامیکی مواد، آتشباری، ضربه و خردایش در تحقیقات متعددی به کار گرفته شد [۲].

سرعت ترک کششی پارامترهای شکست بتن و وابستگی آن به رفتار مکانیکی در مطالعات متعددی بررسی شده است. ونگ^۱ و همکاران رفتار ترک نمونه‌هایی شامل ترک مجرد با تکنیک اندازه‌گیری با سرعت بالا را مورد بررسی قرار دادند [۳]. سونگ^۲ با به کار بردن دوربین با سرعت بالا، شروع ترک، گسترش، توقف و در نهایت شکست مرمیت پیش شکاف

خورده تحت شرایط بارگذاری و باربرداری را بررسی کرد [۴]. در کار تحقیقاتی لیم^۳ و همکاران رابطه چقرمگی شکست و سرعت گسترش ترک نمونه‌های دیسک ترک‌دار تحت بارگذاری شبه استاتیکی مشخص شد. نتایج این کار نشان داد که هیچ وابستگی بین چقرمگی شکست و سرعت گسترش ترک در نرخ کرنش ثابت (۰/۰۰۲ میلی‌متر/ثانیه) وجود ندارد اما سرعت گسترش ترک در سنگ با چقرمگی بالاتر مانند گابرو بیشتر از سرعت گسترش ترک در سنگ‌های با چقرمگی کمتر مانند مرمیت است [۵، ۶].

بررسی سرعت گسترش ترک در شرایط بارگذاری مختلف در محیط سنگ نیز مورد توجه پژوهشگران مختلفی قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی بیناوسکی^۴ نشان داد سرعت گسترش ترک یک پارامتر مهم در شکست ترد مواد است [۷، ۸]. در بارگذاری دینامیکی مطالعات آزمایشگاهی متعددی برای اندازه‌گیری سرعت گسترش ترک در نمونه‌های مختلف تحت شرایط موج ضربه و انفجار انجام گرفته است و حد سرعت گسترش ترک در سنگ‌های مختلف در بارگذاری دینامیکی بین ۰/۲ تا ۰/۵۷ سرعت گسترش موج رایلی برآورد شده است [۵]. با روش عددی المان مرزی فاتحی و همکاران به تحلیل تنش و تغییر شکل نوک ترک پرداخته‌اند [۹]. همچنین مکانیزم رشد میکرو ترک‌ها در مطالعات عددی و آزمایشگاهی نمونه‌های مشابه سنگ تحت بارگذاری شبه استاتیکی در مطالعات حائری و همکاران بررسی شده است [۱۰].

چقرمگی شکست به صورت آزمایشگاهی در نمونه‌های مختلف در شرایط بارگذاری متعددی قابل اندازه‌گیری شد. انجمن بین المللی مکانیک سنگ استفاده از سه نوع نمونه دیسک برزیلی ترک‌دار^۵، نمونه شکاف‌دار تحت خمش^۶ و نمونه میله کوتاه^۷ برای تعیین چقرمگی شکست سنگ را پیشنهاد داد اما پیچیدگی‌های اعمال پیش شکاف در نمونه دیسک برزیلی ترک‌دار از انگیزه‌های جستجو برای تعیین نمونه جایگزین شد. نمونه‌های نیم دیسک تحت خمش سه نقطه، نمونه دیسک برزیلی مسطح تحت بار فشاری، نمونه دیسک برزیلی با ترک مرزی و نمونه دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی از نتایج مطالعات برای ارایه نمونه جایگزین بود. مغزی شکل بودن و سادگی آماده‌سازی آن‌ها، از مزایای استفاده از این نمونه‌ها عنوان شد. نمونه دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی علاوه بر دارا بودن تمام منافع نمونه‌های دیسک برزیلی ترک‌دار قابلیت آماده‌سازی ساده‌تری نیز دارد. نمونه‌های دیسک ترک‌دار با

میکروساختاری متفاوت در محدوده بارگذاری شبه استاتیکی بررسی شد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- شناسایی میکروساختاری

مطالعات میکروسکوپی ایزاری متداول برای شناسایی میکروساختارهای مواد از قبیل دانه‌بندی و میکروتورها است. در این مطالعه از روش مقاطع نازک پتروگرافی با میکروسکوپ پلاریزان برای محاسبه دانه‌بندی مرمیت‌ها استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزارهای گرافیکی ابتدا تمام سطح مقطع نازک عکس‌برداری و سپس مورد آنالیز قرار گرفت و مرزهای دانه تعیین شد.

پلی‌گون‌های دانه‌های هر یک از مرمیت‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

مقادیر تقریبی میانگین و انحراف معیار شعاع ذرات در مرمیت‌های باغات و مارون به ترتیب برابر $1,879 \pm 0,526$ و $0,809 \pm 0,527$ میلی‌متر به دست آمد. برای افزایش دقت در تشخیص میکروساختارها از سه روش میکروسکوپی، میکروسکوپ پلاریزان، تکنیک جایگزینی فلورسنت و روش پراش الکترونی استفاده شد. با استفاده از این سه تکنیک میکروسکوپی روی ۱۰ نمونه از مرمیت‌های باغات و مارون تمامی میکروتورها شامل درون‌دانه‌ای، برون‌دانه‌ای و مرز دانه‌ای به صورت مشاهده‌ای شناسایی شد. برای مثال نتایج میکروتورک‌های شناسایی شده با تکنیک‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق نتایج ارایه شده در جدول ۱، میزان طول‌شدگی، فراوانی و اندازه متوسط میکروتورک‌ها در مرمیت‌های مارون بزرگتر از مرمیت‌های باغات است. طول و

سوراخ مرکزی هنگامی که تحت کشش خالص قرار می‌گیرد، دو ترک آن تحت بارگذاری باز می‌شود. شیروی و کوتکیس^۸ از مورد اول این نمونه برای محاسبه چقرمگی شکست سنگ‌ها استفاده کردند [۱۱].

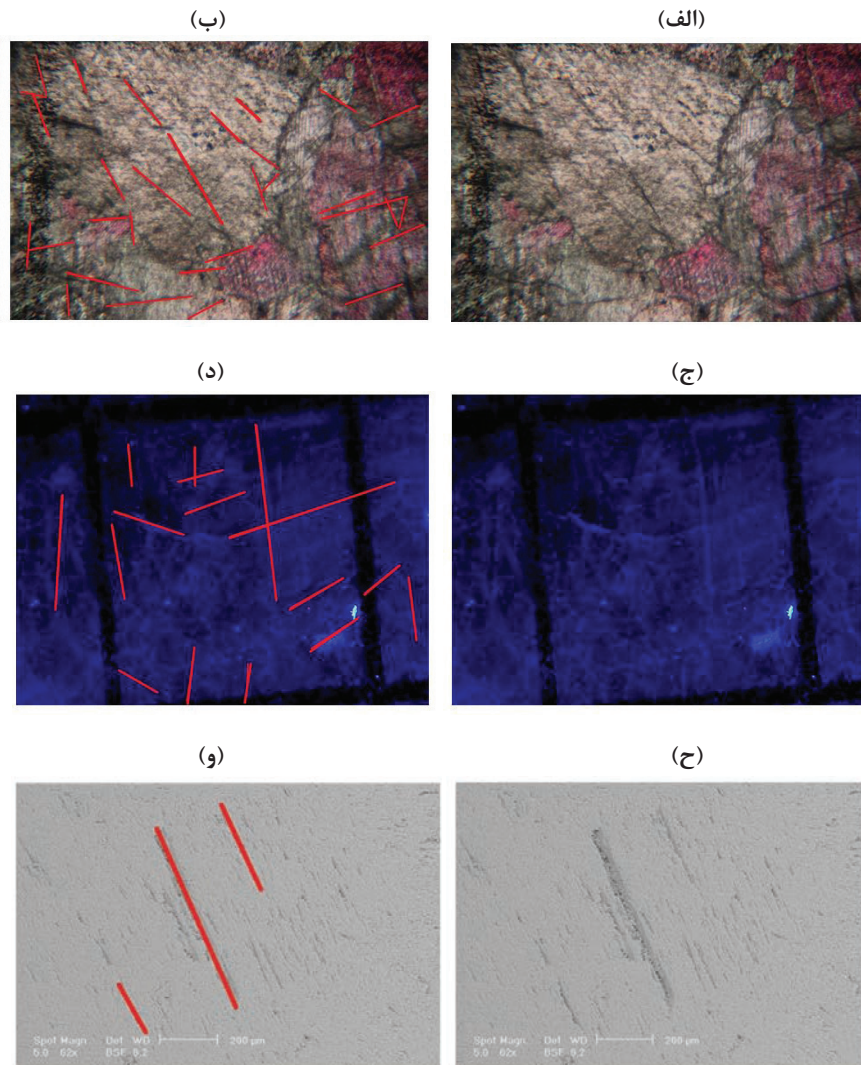
خواص مکانیکی و رفتار شکست سنگ‌ها تحت تاثیر نرخ بارگذاری است، بنابراین چقرمگی شکست در بارگذاری شبه استاتیکی نیز می‌تواند تابعی از خواص شکست سنگ مانند سرعت گسترش ترک، بازشدگی نوک ترک و یا نرخ بارگذاری باشد. این تابع و یا رابطه در بارگذاری دینامیکی مورد تحقیق واقع شده است اما در بارگذاری شبه استاتیکی مطالعات گسترده‌ای در این موضوع انجام شده است. از آنجا که بارگذاری شبه استاتیکی در محدوده معینی از نرخ بارگذاری (نرخ کرنش 10^{-5} تا 10^{-1}) واقع می‌شود، بنابراین بررسی اثر تغییرات نرخ بارگذاری در محدوده شبه استاتیکی بر پارامترهای شکست سنگ در نمونه‌های دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی قابل انجام خواهد بود. جنبه‌ای ماکروسکوپی و میکروسکوپی رفتار شکست سنگ کاملاً به یکدیگر مرتبط است از این رو تفسیر رفتار ماکروسکوپی شکست تنها از طریق شناسایی مکانیزم شکست در مقیاس میکروسکوپی امکان‌پذیر خواهد بود. با توجه به این مطلب در این کار پژوهش، مطالعات میکروسکوپی روی خواص ساختاری دو نمونه مرمیت از سنگ‌های ساختمانی متداول ایران با ترکیب کانی‌شناسی یکسان و توزیع میکروساختاری متفاوت انجام گرفت. با اندازه‌گیری دقیق سرعت گسترش ترک و میزان بازشدگی نوک ترک با استفاده از تکنولوژی عکس‌برداری با سرعت بالا و مدار الکترونیکی، اثر تغییرات نرخ بارگذاری بر میزان چقرمگی شکست، سرعت گسترش ترک و بازشدگی نوک ترک در دو مرمیت با خواص



شکل ۱: بخشی از پلی‌گون‌ها در موزاییک‌های باغات (چپ) و مارون (راست)

اندازه‌گیری شد. مطابق شکل ۳ در هر سه روش اندازه‌گیری، بعد فراکتال میکروترک‌های اندازه‌گیری شده در مرمیت‌های مارون ۲۰ درصد بزرگتر از مرمیت‌های باغات است.

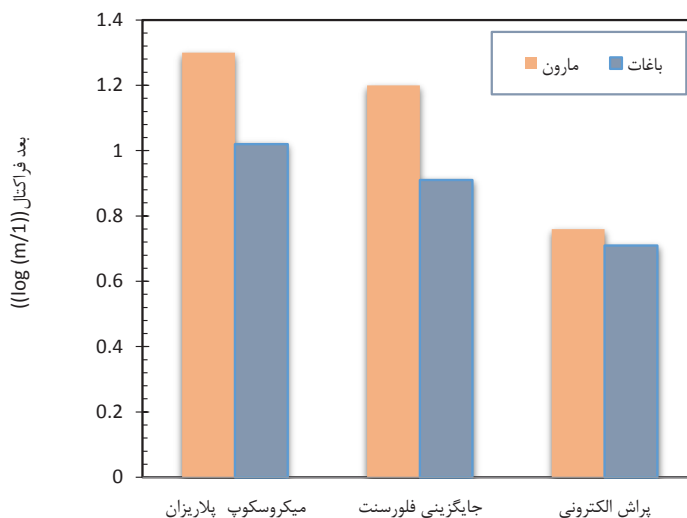
فراوانی پارامترهای هندسی با بعد فراکتال آن پارامترها مشخص می‌شود که در این کار تحقیقاتی، بعد فراکتال میکروترک‌های هر یک از مرمیت‌ها با روش شمارنده جعبه‌ای^۱ در هر سه روش



شکل ۲: شناسایی میکروترک‌های مرمیت‌ها با استفاده از الف، ب) میکروسکوپ‌های پلاریزان، ج، د) جایگزینی فلورسنت و ح، و) پراش الکترونی

جدول ۱: طول فرکانس و اندازه متوسط میکروترک‌ها در سه روش مختلف

روش	نوع مرمیت	کشیدگی (میکرومتر)	فرکانس (میکرومتر/۱)	اندازه متوسط (میکرومتر)
میکروسکوپ پلاریزان	باغات	۳۹۹,۳۷	۴۰۶۳,۱۸	۶۸,۰۴
	مارون	۹۰۵,۴۷	۸۹۴۰,۵۳	۶۲,۷۸
جایگزینی فلورسنت	باغات	۶۴۲۳,۹۲	۶۳۳,۱۳	۴۴۵,۹۰
	مارون	۷۵۸۵,۴۸	۲۱۰۴,۷۵	۲۵۱,۰۴
پراش الکترونی	باغات	۱۱۱۹۹,۱۲	۱۵,۲۷	۷۲,۹۶
	مارون	۸۴۳۲,۹۱	۳۸,۵۸	۹۱,۲۲



شکل ۳: مقایسه بعد فراکتال میکرتک‌های مرمریت در روش‌های مختلف اندازه‌گیری

۲-۲- اعمال ساز و کار شکست شبه استاتیکی

ابزارهای مختلفی برای اندازه‌گیری سرعت گسترش ترک و بازشدگی نوک ترک در حین شکست سنگ وجود دارد. از آنجا که مسیر گسترش ترک در آزمون شکست غیرقابل پیش‌بینی و سریع است، ابزارهای قدیمی اندازه‌گیری قادر به اندازه‌گیری دقیق طول ترک نخواهند بود.

تکنولوژی عکس‌برداری سریع و فاصله‌سنج لیزری دو ابزار رایج برای پایش پارامترهای اندازه‌گیری در سرعت بالا است. در این مطالعه برای اندازه‌گیری سرعت گسترش ترک، مدار الکترونیکی برای پایش آن مدلسازی و ساخته شد. در مدار الکترونیکی ساخته شده این پژوهش دارای شش مدار در یک طرف و سه مدار در طرف دیگر نمونه در فاصله ثابتی از نوک ترک جانمایی شده است. زمان قطع هر مدار با تغییر در میزان اختلاف پتانسیل الکتریکی ثبت و اندازه‌گیری خواهد شد. از مزایای این مدار الکترونیکی قابلیت برداشت زمان قطع مدار تا دقت یک نانو ثانیه و ثبت و برداشت سرعت گسترش ترک در دو طرف نمونه به طور مستقل است.

در این آزمایش یک دوربین با سرعت بالا (مدل 1200 hs PCO) با سرعت ۸۰۰۰ فریم بر ثانیه در رزولیشن ۱۲۸۰ در ۶۴ پیکسل در جلوی نمونه برای ثبت تصاویر استفاده شد. تامین شدت روشنایی یکی از مسایل اصلی در کیفیت تصاویر اخذ شده با دوربین‌های با سرعت بالاست که در این راستا یک لامپ SMD با شدت روشنایی ۳۰ لوکس در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

آماده‌سازی نمونه‌ها با برش‌کاری با ضخامت مناسب در مرمریت‌های باغات و مارون آغاز شد و در گام بعدی سوراخ مرکزی به وسیله ابزارهای ماشین‌کاری در هر یک از نمونه‌ها پیاده شد سپس دو پیش‌شکاف، از محیط سوراخ مرکزی به سمت محیط خارجی نمونه با استفاده از اره نازک به صورت دقیق ایجاد شد. در گام آخر برای تخمین سرعت گسترش ترک با مدار الکترونیکی، شیارهایی با طول مشخص و عمق ۲ میلی‌متر در دو طرف نمونه اعمال شد. فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها در شکل ۴ و مشخصات هندسی نمونه‌های دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی^{۱۰} در جدول ۲ قابل مشاهده است.

برای انجام آزمایش بارگذاری مورد اول چقرمگی شکست، هر نمونه دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی را بین دو فک تخت در پایین و بالای آن قرار دادند و بار فشاری هم‌راستا با امتداد پیش‌شکاف‌ها به نمونه ($\theta=0$) مطابق شکل ۵ اعمال شد. تراکم محوری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جک هیدرولیکی (ELE) با قابلیت کنترل نرخ بارگذاری محقق شد. چقرمگی شکست مود اول نمونه‌های دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی از رابطه یک محاسبه می‌شود.

$$K_I = \frac{P_{max}}{t(R_o - R_i)} \sqrt{\pi a} Y_I \quad (1)$$

که در آن:

Y_I : ضریب بی‌بعد هندسی (با مدلسازی انجام شده، مقدار آن ۰٫۵۳۵ محاسبه شد).
 P_{max} : نیرو در لحظه شکست نمونه

هر فریم شناسایی و میزان گسترش شکست با کمک تکنیک پردازش تصویر اندازه‌گیری شد. با تقسیم آن بر اختلاف زمانی فریم‌ها، سرعت شکست در هر نمونه مطابق شکل ۷ به دست آمد. ارتباط بین چقرمگی شکست و نرخ بارگذاری، سرعت شکست و نرخ بارگذاری، چقرمگی شکست و سرعت شکست، سرعت شکست و بازشدگی نوک ترک بررسی و این روابط در هر دو مرمیت با یکدیگر مقایسه شد. مطابق شکل ۸ چقرمگی شکست در مرمیت‌های باغات بزرگتر از مرمیت‌های مارون است که این در مطابقت با نتایج مطالعات قبلی است [۱۲]. مطابق شکل ۸ اختلاف چقرمگی شکست در دو مرمیت‌ها در

t : ضخامت نمونه

a : طول ترک

R_0 : شعاع نمونه

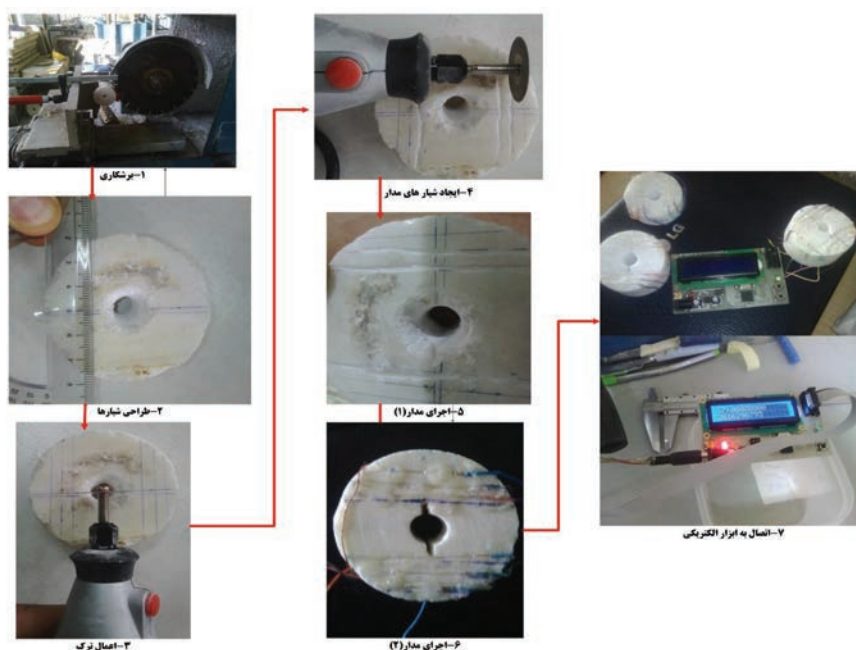
R_i : شعاع سوراخ مرکزی است.

۳- نتایج

با مقایسه تصاویر متوالی از لحظه گسیختگی در حین بارگذاری مرمیت‌ها، با استفاده از تکنیک پردازش تصویر، بازشدگی نوک ترک و سرعت گسترش ترک اندازه‌گیری شد. از آنجا که دوربین مورد استفاده قابلیت تصویربرداری به صورت سیاه و سفید داشته است، بنابراین مسیر مقابل ترک‌ها کاملاً با رنگ مشکی پوشانده شد و با انعکاس نور با شدت روشنایی ۳۰ لوکس هرگونه بازشدگی در مسیر رشد ترک قابل تشخیص شد و در ادامه بالا و پایین دو ترک در هر نمونه با فاصله یکسان نشان‌گذاری و با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و کالیبره کردن مرکز محل‌های نشان‌گذاری شده مطابق شکل ۶ فاصله عمودی دو محل نشانه در هر ترک در هر فریم از لحظه آغاز بارگذاری تا لحظه شکست اندازه‌گیری شد. با توجه به پوشش رنگ مشکی در مسیر رشد ترک و بازتاب نور هرگونه تغییر رنگ از سیاه به رنگ روشن‌تر در حین بارگذاری تا لحظه گسیختگی و بعد آن در

جدول ۲: پارامترهای هندسی نمونه‌های دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی

مقدار	نماد	توضیح
۵۴	$2R_0$	قطر (میلی‌متر)
۱۰	$2R_i$	سوراخ مرکزی (میلی‌متر)
۵	a	طول ترک (میلی‌متر)
۲۷	t	ضخامت (میلی‌متر)
۰٫۱۸۵	R_i/R_0	پارامتر بی‌بعد اول
۰٫۲۲۷	a/R_0-R_i	پارامتر بی‌بعد دوم



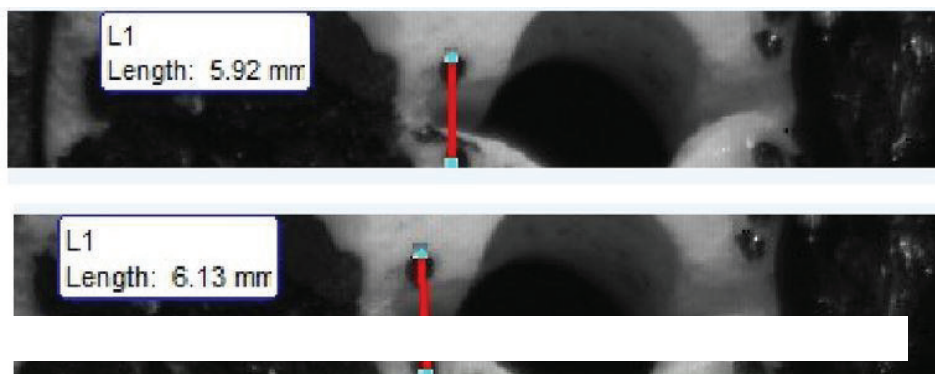
شکل ۴: فرآیند آماده‌سازی نمونه‌های دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی

در دو مرمیت است. مطابق شکل ۹ نرخ سرعت گسترش ترک با افزایش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد. نرخ افزایش در سرعت گسترش ترک در مرمیت‌های باغات ۱٫۶۴ و در مرمیت‌های مارون ۲٫۶ محاسبه شد. این امر نشان می‌دهد که سرعت گسترش ترک در محدوده نرخ بارگذاری شبه استاتیکی نیز وابسته به نرخ بارگذاری است. سرعت گسترش ترک در مرمیت‌های باغات بیشتر از مرمیت‌های مارون است و این اختلاف با افزایش نرخ بارگذاری تشدید می‌شود.

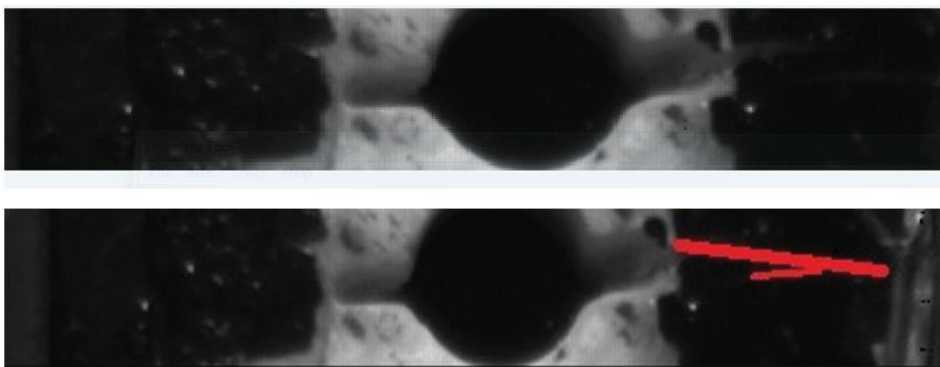
نرخ بارگذاری پایین ۰٫۴۲ درصد و در چقرمگی شکست در نرخ بارگذاری بالا به ۱۴٫۷۸ درصد می‌رسد که نشان می‌دهد چقرمگی شکست وابسته به نرخ بارگذاری است و این وابستگی در مرمیت‌های باغات و مارون متفاوت است. در مرمیت‌های باغات با ۱٫۸ برابر شدن نرخ بارگذاری، چقرمگی شکست ۱٫۲۷ برابر رشد می‌کند اما در مرمیت‌های مارون با ۱٫۸۵ برابر شدن نرخ بارگذاری، چقرمگی شکست ۱٫۱ برابر رشد می‌کند. این تفاوت در میزان رشد، ناشی از اختلاف قابل توجه خواص میکروساختاری مرمیت‌ها در ابعاد دانه‌بندی و میکروتورهاها



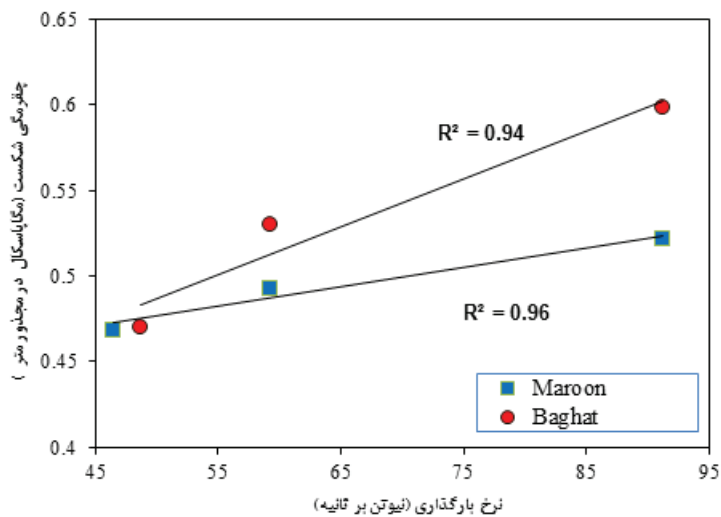
شکل ۵: تعیین پارامترهای شکست نمونه‌ای دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی با استفاده از تکنیک عکس‌برداری با سرعت بالا در بارگذاری شبه استاتیکی



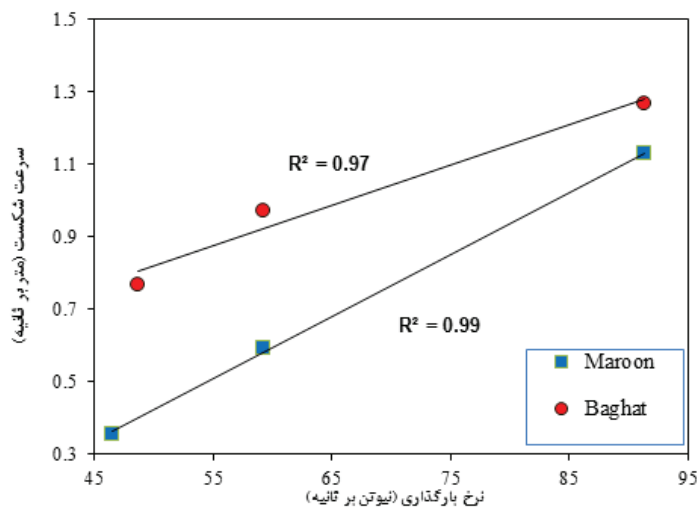
شکل ۶: اندازه‌گیری بازشدگی نوک ترک در مرمیت‌های مارون قبل و بعد بارگذاری در مرمیت‌های مارون



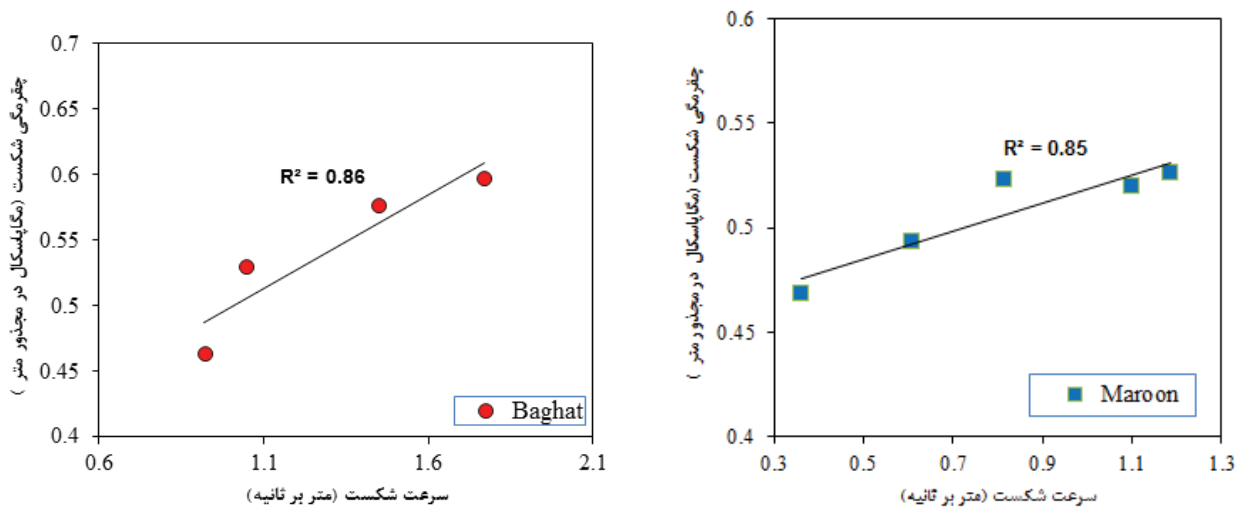
شکل ۷: اندازه‌گیری سرعت گسترش ترک با استفاده از تکنولوژی عکس‌برداری سریع قبل و بعد بارگذاری در مرمیت‌های باغات



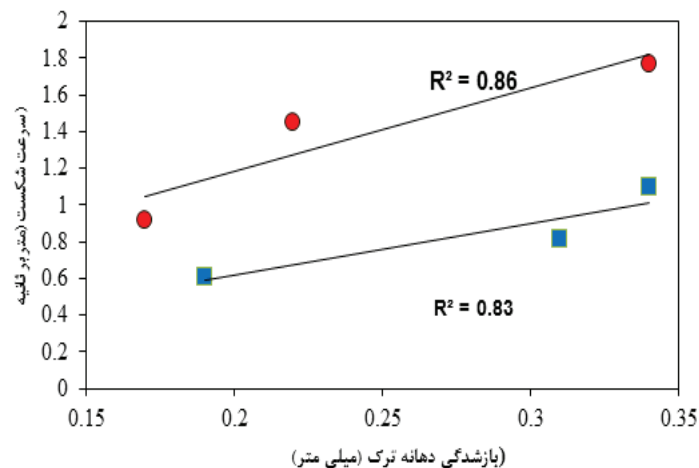
شکل ۸: چقرمگی شکست در نرخ بارگذاری مختلف مرمیت‌ها



شکل ۹: سرعت گسترش ترک در نرخ بارگذاری مختلف مرمیت‌های چقرمگی شکست



شکل ۱۰: چقرمگی شکست مرمیت‌های باغات و مارون در برابر سرعت گسترش ترک در نرخ بارگذاری مختلف



شکل ۱۱: نمودار سرعت گسترش ترک در مرمیت‌های باغات و مارون در مقابل بازشدگی نوک ترک در نرخ بارگذاری مختلف

چقرمگی شکست، سرعت گسترش ترک $1/9$ برابر می‌شود. نسبت رشد چقرمگی در مرمیت‌های باغات 12 درصد است. اگرچه بازشدگی نوک ترک پیش از این در مطالعات شکست کششی مواد بحث شده است اما در حالت کششی غیرمستقیم این کار، نمونه‌ها تحت شرایط بارگذاری مورد اول قرار داشته و تنش کششی بر نوک ترک‌ها اعمال و بازشدگی نوک ترک اندازه‌گیری شده است. مطابق نمودار شکل ۱۱ در سرعت گسترش ترک پایین میزان بازشدگی نوک ترک کمتر است، در حالی که در سرعت گسترش بالاتر، میزان بازشدگی نوک ترک رشد می‌کند. اختلاف در ارتباط این دو پارامتر به اختلاف میکروساختاری مابین مرمیت‌ها مرتبط است.

رابطه مستقیم مابین چقرمگی شکست و سرعت گسترش ترک در محدوده بارگذاری شبه استاتیکی مطابق شکل ۱۰ وجود دارد به طور دقیق با افزایش میزان چقرمگی شکست، سنگ در زمان کوتاه (سرعت گسترش بالاتر) می‌شکند اما با کاهش چقرمگی شکست زمان گسیختگی طولانی می‌شود (سرعت گسترش پایین‌تر).

در مرمیت‌های مارون با افزایش نرخ بارگذاری سرعت گسترش ترک افزایش می‌یابد. چقرمگی شکست وابسته به نرخ بارگذاری است، بنابراین با رشد $1/45$ مرتبه در مقدار چقرمگی شکست، سرعت گسترش ترک $2/54$ برابر می‌شود، همچنین مطابق شکل ۸ در مرمیت‌های باغات با رشد $1/3$ برابری

۴- نتیجه گیری

بازشدگی نوک ترک و در سرعت‌های بالاتر گسترش ترک، میزان بازشدگی نوک ترک افزایش می‌یابد.

۵- مراجع

- [1] Gdoutos, E. (2005). "Fracture Mechanics An Introduction". Springer. ISBN 978-1-4020-3153-3.
- [2] Xing, H. Z., Zhang, Q. B., Braithwaite, C. H., Pan, B., and Zhao, J. (2017). "High-Speed Photography and Digital Optical Measurement Techniques for Geomaterials: Fundamentals and Applications". Rock Mechanics and Rock Engineering, 50(6): 1611-1659.
- [3] Wong, L. N. Y., Zou, C., and Cheng, Y. (2014). "Fracturing and failure behavior of Carrara marble in quasi-static and dynamic Brazilian disc tests". Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(4): 1117-1133.
- [4] Song, B., Chen, W., and Frew, D. J. (2004). "Dynamic compressive response and failure behavior of an epoxy syntactic foam". Journal of composite materials, 38(11): 915-936.
- [5] Zhang, Q. B., and Zhao, J. (2014). "Quasi-static and dynamic fracture behaviour of rock materials: phenomena and mechanisms". International Journal of Fracture, 189(1): 1-32.
- [6] Lim, I. L., Johnston, I. W., and Choi, S. K. (1993). "Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending". Engineering Fracture Mechanics, 44(3): 363-382.
- [7] Bieniawski, Z. T. (1967). "Mechanism of brittle fracture of rock: Part I—theory of the fracture process". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 4(4): 395-406.
- [8] Bieniawski, Z. T. (1967). "Stability concept of brittle fracture propagation in rock". Engineering Geology, 2(3): 149-162.
- [9] Fatehi Marji, M. (2013). "On the use of power series solution method in the crack analysis of brittle materials by indirect boundary element method". Engineering Fracture Mechanics, 98: 365-382.
- [10] Haeri, H., Khaloo, A., and Marji, M. F. (2015). "Experimental and Numerical Simulation of the Microcrack Coalescence Mechanism in Rock-Like Materials". Strength of Materials, 47(5):740-755.
- [11] Shiryaev, A., and Kotkis, M. (1982). "Methods for determining fracture toughness of brittle porous materials". Industrial Laboratory, 48(9): 917-918.
- [12] Amrollahi, H., Baghbanan, A., and Hashemolhosseini,

هدف اصلی در این مطالعه اندازه‌گیری پارامترهای شکست و بررسی ارتباط مابین آن‌ها در دو نوع مرمیت با میکروساختار متفاوت در بارگذاری شبه استاتیکی بود. تفسیر رفتار ماکروسکوپی در شناسایی مکانیزم شکست در مقیاس میکروسکوپی ضروری است. بنابراین در این کار میکروساختارهای دو نوع مرمیت باغات و مارون با استفاده از روش‌های مقاطع نازک پتروگرافی، تکنیک جایگزینی فلورسنت و روش پراش الکترونی شناسایی و اندازه‌گیری شد. پارامترهای شکست مرمیت‌ها با تغییرات نرخ بارگذاری در محدوده بارگذاری شبه استاتیکی با استفاده از طراحی و ساخت مدار الکترونیکی و تکنولوژی عکس‌برداری با سرعت بالا مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

وابستگی متقابل پارامترهای شکست شامل چقرمگی شکست، سرعت گسترش ترک، نرخ بارگذاری و بازشدگی نوک ترک در این دو مرمیت با استفاده از تکنیک برازش نموداری داده‌های آزمایشگاهی بررسی و ارتباط خوبی مابین پارامترهای شکست در شرایط بارگذاری شبه استاتیکی میان نتایج مشاهده شد. نتایج اصلی حاصل شده از این کار به شرح زیر است:

- نتایج مطالعات میکروسکوپی مشخص کرد که طول کلی و فراوانی میکروتُرک‌ها در مرمیت‌های باغات بزرگتر از مرمیت‌های مارون است همچنین توزیع میکروتُرک‌ها در سطح دانه‌ها در مرمیت‌های ریز دانه (مارون) بیشتر از مرمیت‌های درشت دانه (باغات) است.

- بعد فراکتال میکروتُرک‌ها به روش شمارنده جعبه‌ای نشان داد، این پارامتر برای میکروتُرک‌های مارون ۲۰ درصد بزرگتر از مرمیت‌های باغات است.

- برای اندازه‌گیری سرعت شکست از مدار الکترونیکی با دقت برداشت تا حد نانو ثانیه و توانایی اندازه‌گیری سرعت شکست در دو طرف نمونه‌های دیسک ترک‌دار با سوراخ مرکزی به طور مستقل استفاده شد.

- در مرمیت‌های باغات با افزایش نرخ بارگذاری تا ۱٫۸ برابر چقرمگی شکست با ضریب ۱٫۲۷ رشد کرد اما در مرمیت‌های مارون با افزایش نرخ بارگذاری تا ۱٫۸۵ برابر، چقرمگی شکست تنها ۱٫۱ مرتبه رشد کرد که علت در اختلاف میکروساختاری این دو نوع مرمیت قابل تفسیر است.

- بازشدگی نوک ترک اما با این حال در حالت کششی غیرمستقیم این کار، در سرعت‌های پایین گسترش ترک میزان

- ⁴ Bieniawski
- ⁵ Cracked chevron-notched Brazilian disc (CCNBD)
- ⁶ Chevron-notched bending (CB)
- ⁷ Short road (SR)
- ⁸ Shiryaev and Kotkis
- ⁹ box-counting
- ¹⁰ Hollow center cracked disc (HCCD)

H. (2011). "Measuring fracture toughness of crystalline marbles under modes I and II and mixed mode I-II loading conditions using CCNBD and HCCD specimens". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48(7): 1123-1134.

¹ Wong

² Song

³ Lim



DOI: 10.30479/jmre.2019.9429.1182

Investigation Of Rock Fracture Parameters With Hollow Center Cracked Disc Under Quasi-Static Loading Condition

Ahmadian H.¹, Baghbanan A.^{2*}, Hashemolhosseini H.³

1- PhD Student, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
H.Ahmadian@mi.iut.ac.ir

2- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
bagh110@cc.iut.ac.ir

3- Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
h.hamid@cc.iut.ac.ir

(Received: 09 Oct. 2018, Accepted: 05 Feb. 2019)

Abstract: Experiments have indicated that the fracture properties of rocks change with variations of loading rate. In this study, the microstructural properties of two marbles are characterized by three different microscopic techniques including petrographic thin sections method, fluorescent replacement technique, and scanning electron microscopy (SEM). An experimental investigation is conducted to study the quasi-static fracture behavior in different microstructural features of crystalline rocks. The hollow center cracked disc (HCCD) method is employed to determine the fracture parameters with variations of loading rates using a hydraulic machine. Microscopic studies on microstructure deficits reveal that fractal dimension in Maroon marble is higher than in Baghat marble. Variations of toughness, crack propagation speed, and crack tip opening displacement (CTOD) with changes of loading rate are also investigated. The results indicate that toughness and crack propagation speed increase with loading rate, but the effect of microstructure in two marbles reduces the rate of growth. The fracture toughness in Baghat marbles is higher than in Maroon marble, and difference of fracture toughness is magnified with the loading rate.

Keywords: Fracture toughness, High-speed imaging technology, Fracture properties, Quasi-static loading.

INTRODUCTION

Fracture mechanics approaches are have been gaining importance in rock engineering applications. Fracture in rocks is one of the most popular research focuses in geomechanics as a large number of engineering designs and implementations including rock slope stability assessments, tunnel support design, and fluid flow prediction can improve with a greater understanding of fracture. It is particularly useful in geomechanical tests given the scales and frame rates involved.

The fundamental goal of fracture mechanics testing is to obtain a representative value of rock fracture properties. Fracture toughness is known as a fundamental fracture property which represents the potential

intrinsic ability of rocks to withstand a given stress field at the tip of a crack and to resist progressive crack extension [1]. Measuring rock fracture toughness under quasi-static loading is a topic of extensive research in fracture mechanics. Measuring fracture properties of rocks such as toughness, crack propagation speed, and crack tip opening displacement (CTOD) and investigating their interdependencies contribute to identifying the rock fracture behavior. In spite of a large number of reported research works about the quasi-static behavior of rocks, rock fracture behavior under quasi-static loading has not been fully characterized.

It has been observed that the fracture parameters of rocks can be performed by high-precision laboratory testing equipment such as high-speed imaging technology. High-speed imaging technology has been used for geometrical research since the 1950s, and various imaging techniques have been applied in parallel. However, due to the difficulties associated with measuring and recording events with short durations, particularly those that are not adequately observable with the naked eye, the dynamic properties of geomaterials have not been well understood for a long period. High-speed imaging technology has been used by numerous researchers in geomaterials engineering application including sand Movement, penetration, static and dynamic fracturing, blasting and impacts, spalling, and fragmentation [2].

Crack speed of the tensile fracture properties of concrete and the dependencies on mechanics' behavior have been investigated in several studies. Wong and Einstein (2006, 2009) examined the crack behavior of prismatic specimens with single flaws via high-speed imaging technology [3,4]. Song et al (2014, 2015) by applying a high-speed camera investigated crack initiation, propagation, coalescence, and final failure of pre-cracked marble samples under loading and unloading conditions [5].

Also, Lim et al. (1993) determined the fracture toughness and crack propagation speed of NSCB specimens under quasi-static loading conditions. Their results indicate no interdependence between the fracture toughness and crack propagation speed at a constant loading rate (0.002 mm/s). However, the crack propagation speed in rocks with higher toughness like Gabbro was faster than that in rocks with lower toughness like marble [6,7] (Lim et al. 1993; Zhang and Zhao 2014). Crack propagation speed of rocks under different loading conditions has been investigated by various researchers. Bieniawski's laboratory studies showed that the crack propagation speed is an important parameter in the brittle fracture of materials [8,9]. In dynamic loading, several laboratory studies have been done to measurement of the crack propagation speed in different samples under shock and explosion loading conditions. The crack propagation speed in different rocks is estimated to range from 0.2 to 0.57 Rayleigh wave speed (Cr).

Fracture toughness can be assessed experimentally using different testing specimens and loading configurations. The International Society for Rock Mechanics (ISRM) suggested use of Cracked Chevron-Notched Brazilian Disc (CCNBD), Chevron-Notched Bending (CB), and Short Road (SR) to determine fracture toughness of rocks. However, the complexity of chevron notch making is another motivation to seek for alternative methods such as Semi-Circular specimens under three-point Bending (SCB) and Flattened Brazilian Disc (FBD) specimen in diametrical compression to determine mode I fracture toughness (KIC) of rocks. Double Edge Cracked Brazilian Disc (DECBD) and Hollow Centre Cracked Disc (HCCD) are other disc-type specimens which are core-based and enjoy comparatively simple preparation and testing. HCCD samples both possess CCNBD's merits and have a far simpler preparation procedure.

Regarding the HCCD, sample, when it is placed under the pure tension mode, two cracked sections are opened with loading. Shiryayev and Kotkis used Mode I of this piece to estimate the magnitude of the mode I fracture toughness (KIC) of rocks [10].

The mechanical properties and fracture behavior of rock materials are influenced by loading rate. Rock fracture toughness in quasi-static loading can also be a function of the fracture properties including crack propagation speed, crack tip opening displacement (CTOD), and the loading rate. This relation or function has been researched in dynamic loading; however, in quasi-static loading no study has been conducted so far.

Since quasi-static loading is achieved within a specific range of loading rate, variations of loading rate can be used to investigate the effect of fracture parameters in a hollow center cracked disc (HCCD) sample.

The macroscopic and microscopic aspects of fracture behavior are closely linked, and thus it is essential to interpret the macroscopic behavior by identifying the failure mechanisms on a microscopic scale (RaviChandar and Knauss 1984b)[11]. Hence, in this study, two crystalline construction marble stones in Iran, Baghat and Maroon, which have a unique mineral composition with different microstructure distributions, were selected as test samples (Figure 1 to 3).

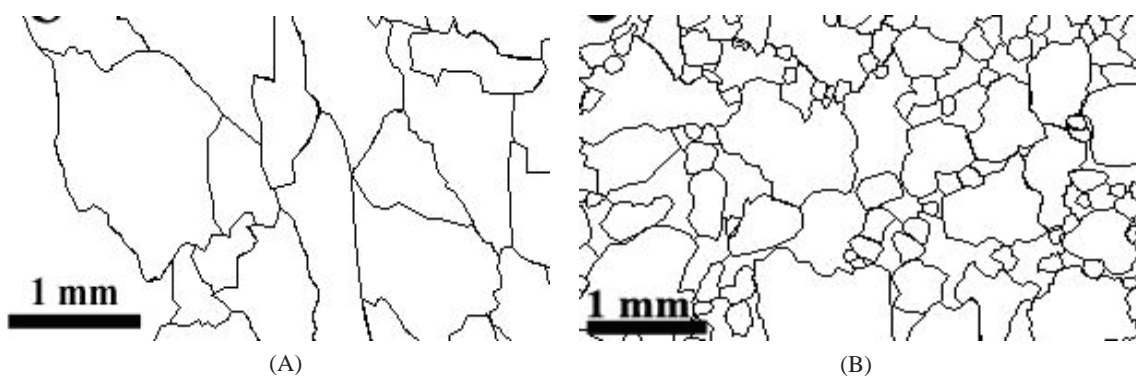


Figure 1. Parts of the polygons of the mosaic of A: Baghat and B: Maroon

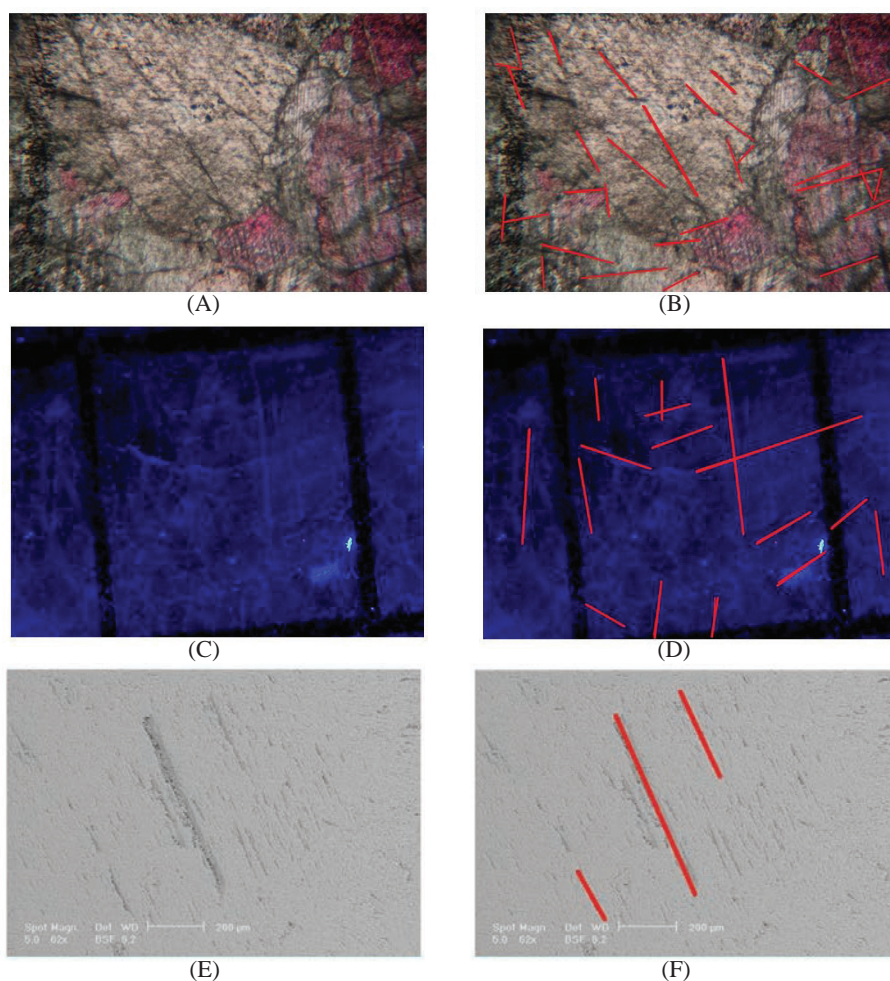


Figure 2. Characterization of micro cracks (red lines) in marbles using A, B: polarizing microscopic FLR

For precise measurement of crack propagation speed and CTOD using high-speed imaging technology and electronic circuitry, the effect of loading rate variation was examined on toughness, crack propagation speed, and CTOD in the two marbles with different microstructures under quasi-static loading conditions.

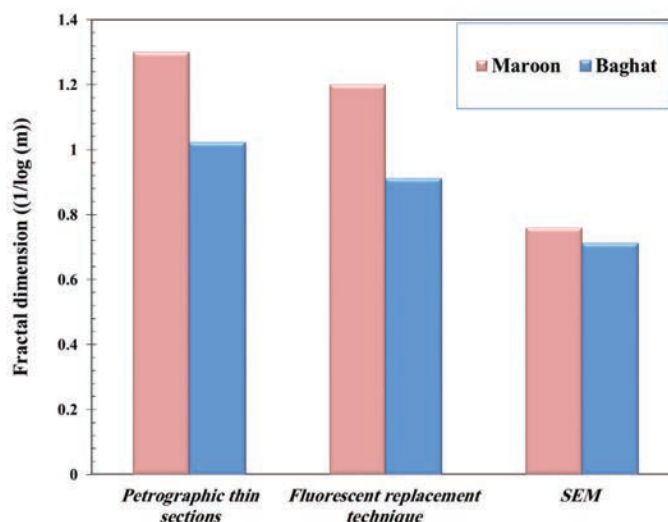


Figure 3. Comparison between fractal dimension of micro cracks in Baghat and Maroon marbles in different measuring techniques

FINDINGS AND ARGUMENT

By comparing consecutive images from the failure time to rock fracturing, using image processing techniques, the CTOD and the crack propagation speed were measured (Figures 4 and 5). Also, the values of the crack propagation speed were verified against the results of the electronic circuitry.

The relationships between fracture toughness (KI) and loading rate, crack propagation speed (v) and loading rate, fracture toughness (KI) and crack propagation speed (v), crack propagation speed (v) and CTOD were investigated and also compared between the two marbles. According to Figure 6, the fracture toughness in Baghat marbles is higher than that of Maroon marble, which was obtained in previous studies [12]. According to Table 1, the difference of fracture toughness in the two marbles, under the low loading rate condition, was 0.42%. However, with elevation of the loading rates, the difference grew and under high loading rate conditions, the difference was 14.78%. The fracture toughness depended on the loading rate,

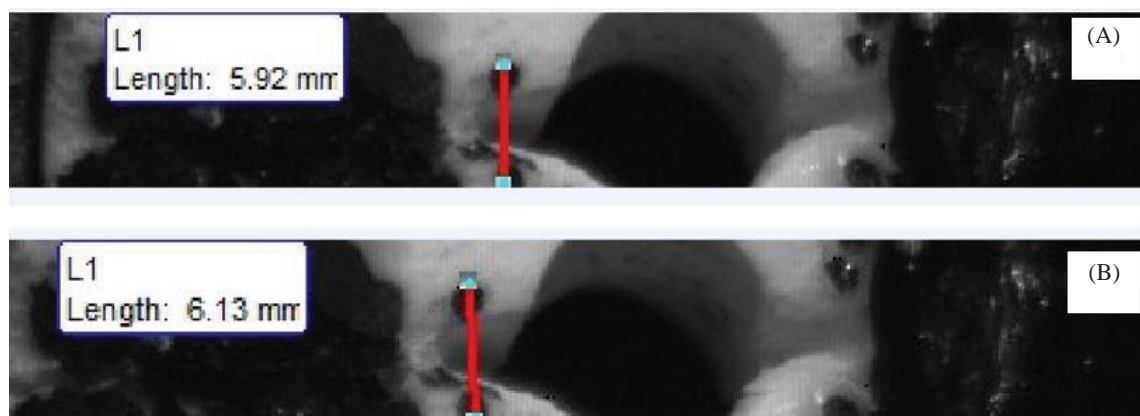


Figure 4. Measuring crack tip opening displacement using high-speed image processing in Maroon marbles in before and after loading

with this dependence being different for Baghat and Maroon marbles. In Baghat marbles, with in the rise of loading rate by 1.8 times, the fracture toughness grew by 1.27 times. However, in Maroon marbles, with an increase in the loading rate by 1.85 times, the fracture toughness was augmented by 1.1 times.

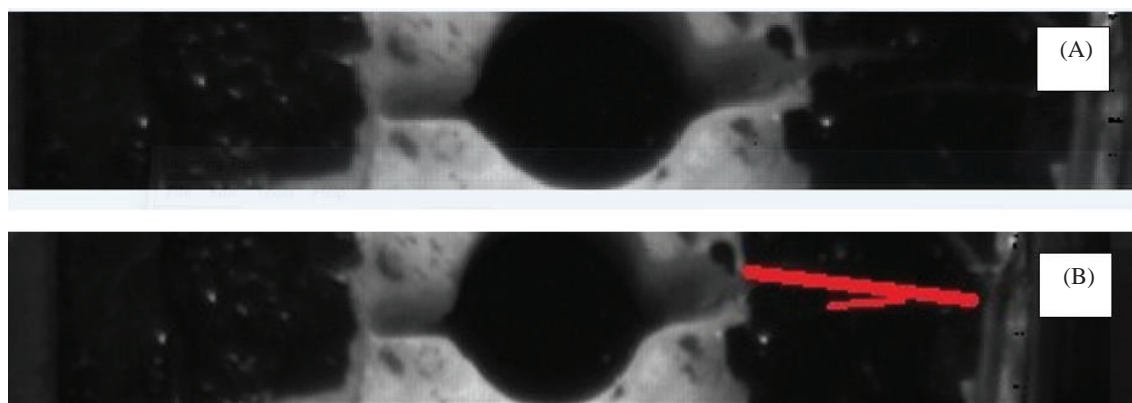


Figure 5. Measuring the crack propagation speed using high-speed image processing in Baghat marbles

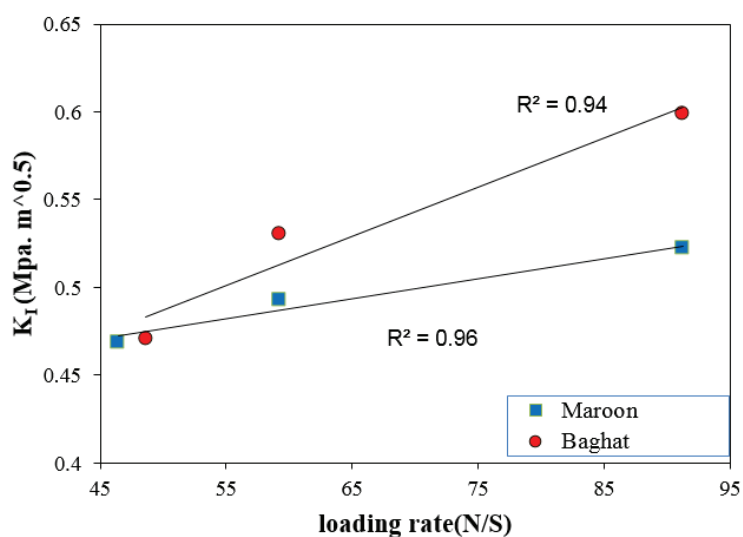


Figure 6. Fracture toughness of Maroon and Baghat versus loading rate

Table 1. Detail of variation of K_{IC} versus loading rate in Maroon and Baghat marbles

Marbles type	Loading rate	\bar{K}_{IC}	Repeatability	Error (%)
Baghat	48.62	0.47	2	0.64
	59.29	0.53	3	-2.75
	91.29	0.598	3	0.92
Maroon	46.49	0.468	2	1.41
	59.293	0.493	3	-1.49
	91.29	0.521	3	0.58

According to Figure 7, the rate of crack propagation speed grew with increasing the loading rates on both rocks. The rate of crack propagation in Baghat marble was 1.64 and in Maroon was 2.6. This suggests that the crack propagation speed within the quasi-static loading range depended on the loading rate. The propagation speed in Baghat marble has been more than that of Maroon marble. The difference between them grows with raising the loading rates.

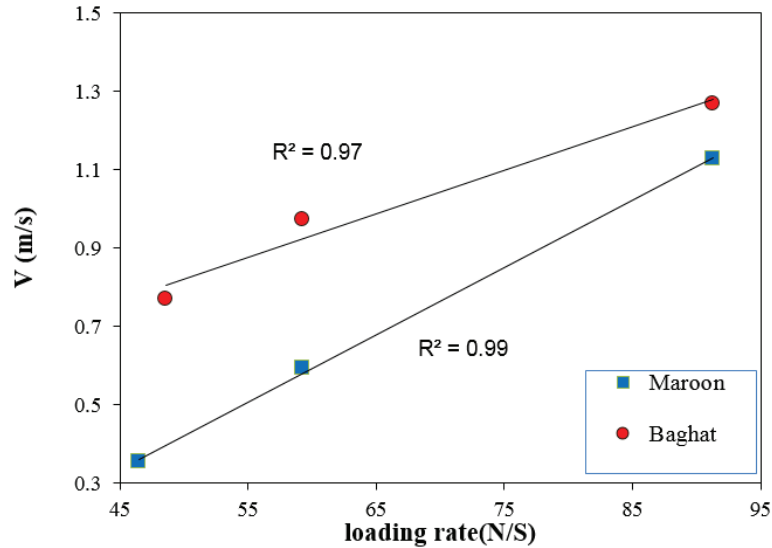


Figure 7. Crack propagation speed of Baghat and Maroon versus loading rate

There is a direct relationship between the fracture toughness and crack propagation speed within the quasi-static loading range, as displayed in Figure 8. Clearly, with the growth of toughness, rocks were fractured within a shorter time (higher rate), but with toughness reduction, the failure time lengthened (lower rate).

In Maroon marbles, with the increase in the loading rate, the crack propagation speed rose. The fracture toughness depended on the loading rate, so with a growth of 1.45 times in the magnitude of fracture toughness, the crack propagation was elevated by 2.54 times. Also, according to Figure 9, in Baghat marbles, with a growth of 1.3 times in fracture toughness, the crack propagation increased by 1.9 times.

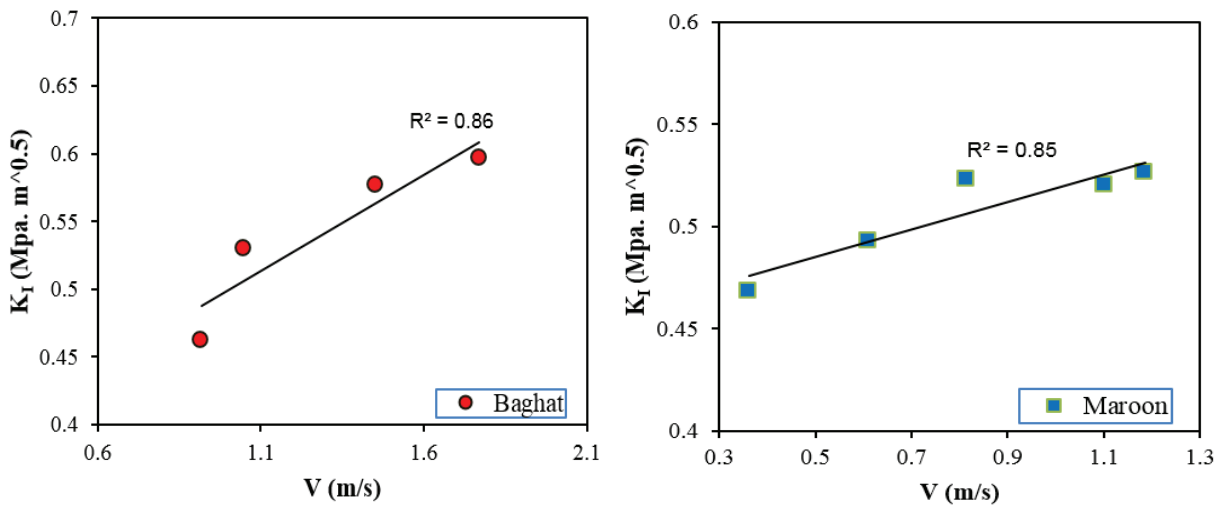


Figure 8. Fracture toughness of Maroon and Baghat, versus crack propagation speed at variable loading rate

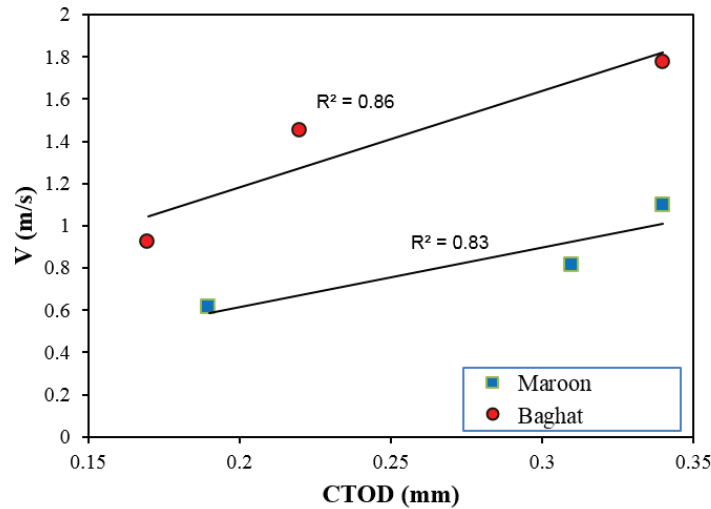


Figure 9. Crack propagation speed of Maroon and Baghat, versus crack-Tip-opening- displacement (CTOD) at variable loading rate

The ratio of toughness growth in Baghat marbles has been 12%, which is lower than the growth percentage of Maroon marbles.

Although CTOD in the tensile failure of materials was discussed earlier, in this study, the specimens were placed under modes I loadings and tensile stress was applied to the tip of cracks, and CTOD was measured. According to the diagram in Figure 8, at lower crack propagation speeds, crack tip opening was less, while at higher crack propagation speed, the crack tip opening grew. The discrepancy of the relationship between these two parameters is related to the microstructural difference of the two marbles.

CONCLUSIONS

The goal of this study has been measuring the rock fracture properties and investigating their relationships in two types of marble with different microstructures under quasi-static loading. Interpretation of the macroscopic behavior is essential by identifying failure mechanisms on a microscopic scale. Thus in this work, the microstructures of two types of marble, Baghat and Maroon, were measured by petrographic thin sections method, fluorescent replacement, and scanning electron microscopy (SEM) techniques. Also, the rock fracture properties of marbles were measured at quasi-static loading conditions in wide range of loading rates with electronic circuitry and high-speed imaging technology.

The interdependency of fracture properties was investigated including toughness, crack propagation speed, loading rate and CTOD in crystalline rocks were investigated by fitting experimental data using a high-speed imaging technology and electronic circuitry. A good correlation was observed between the fracture properties under quasi-static loading among the test results.

The following results were achieved:

- The results of microscopic studies revealed that total elongation and frequency of opened micro cracks were greater in Maroon marbles than in Baghat marbles. It was also observed that the distribution of micro cracks in the surface of grains was greater in fine-grained marbles (Maroon) than in coarse-grained marbles (Baghat).
- The fractal dimension measured by box-counting method indicated that the opened micro cracks were 20% larger in Maroon marbles than in Baghat marbles.
- To measure the crack propagation speed, electronic circuitry with the harvesting capability as precise as 10⁻⁹ s was used along with measurement of crack propagation speed on both sides of the central hole in HCCD samples independently.
- In Baghat marbles, with an increase in the loading rate by 1.8 times, fracture toughness grew by

1.27 time. However, in Maroon marbles, with increase in the loading rate by 1.85 times, fracture toughness was augmented by 1.1 times.

REFERENCES

- [1] Gdoutos, E. (2005). *“Fracture Mechanics An Introduction”*. Springer. ISBN 978-1-4020-3153-3.
- [2] Xing, H. Z., Zhang, Q. B., Braithwaite, C. H., Pan, B., and Zhao, J. (2017). *“High-Speed Photography and Digital Optical Measurement Techniques for Geomaterials: Fundamentals and Applications”*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50(6): 1611-1659.
- [3] Wong, L. N. Y., Zou, C., and Cheng, Y. (2014). *“Fracturing and failure behavior of Carrara marble in quasi-static and dynamic Brazilian disc tests”*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(4): 1117-1133.
- [4] Song, B., Chen, W., and Frew, D. J. (2004). *“Dynamic compressive response and failure behavior of an epoxy syntactic foam”*. Journal of Composite Materials, 38(11): 915-936.
- [5] Zhang, Q. B., and Zhao, J. (2014). *“Quasi-static and dynamic fracture behaviour of rock materials: phenomena and mechanisms”*. International Journal of Fracture, 189(1): 1-32.
- [6] Lim, I. L., Johnston, I. W., and Choi, S. K. (1993). *“Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending”*. Engineering Fracture Mechanics, 44(3): 363-382.
- [7] Bieniawski, Z. T. (1967). *“Mechanism of brittle fracture of rock: Part I—theory of the fracture process”*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 4(4): 395-406.
- [8] Bieniawski, Z. T. (1967). *“Stability concept of brittle fracture propagation in rock”*. Engineering Geology, 2(3): 149-162.
- [9] Fatehi Marji, M. (2013). *“On the use of power series solution method in the crack analysis of brittle materials by indirect boundary element method”*. Engineering Fracture Mechanics, 98: 365-382.
- [10] Haeri, H., Khaloo, A., and Marji, M. F. (2015). *“Experimental and Numerical Simulation of the Microcrack Coalescence Mechanism in Rock-Like Materials”*. Strength of Materials, 47(5): 740-755.
- [11] Shiryayev, A., and Kotkis, M. (1982). *“Methods for determining fracture toughness of brittle porous materials”*. Industrial Laboratory, 48(9): 917-918.
- [12] Amrollahi, H., Baghbanan, A., and Hashemolhosseini, H. (2011). *“Measuring fracture toughness of crystalline marbles under modes I and II and mixed mode I-II loading conditions using CCNBD and HCCD specimens”*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48(7): 1123-1134.