

بررسی تأثیر اندازه نمونه بر شکست دینامیکی نمونه‌های سنگی ترک‌دار

جواد اکبردوست*

استادیار، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، akbardoust@khu.ac.ir

(دریافت ۳ خرداد ۱۳۹۴، پذیرش ۸ اسفند ۱۳۹۴)

چکیده

در بسیاری از شرایط واقعی، توده‌های سنگی تحت اثر بارهای ضربه‌ای همانند زلزله، انفجار معادن و برخورد پرتابه‌های مختلف قرار می‌گیرند. بنابراین، برای شکست آسان‌تر توده‌های سنگی برای حفاری معادن و یا جلوگیری از فروپاشی آن‌ها باید شرایط شکست مواد سنگی تحت بارهای دینامیکی و ضربه‌ای را مورد توجه قرار داد. برای این منظور می‌توان از مفاهیم علم مکانیک شکست استفاده کرد. در علم مکانیک شکست، پارامتری به نام چقرمگی شکست دینامیکی وجود دارد که به نوعی مقاومت شکست قطعات سنگی ترک‌دار در برابر بارهای دینامیکی را بیان می‌کند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقدار چقرمگی شکست دینامیکی به ابعاد قطعه وابستگی دارد و برای تخمین شکست قطعات سنگی با ابعاد مختلف باید ارتباط بین مقدار چقرمگی شکست دینامیکی با ابعاد قطعه را دانست. هدف از این مقاله، بررسی اثرات اندازه در مقدار چقرمگی شکست دینامیکی مواد سنگی است. در این راستا، معیاری که مبانی آن بر اساس معیار بیشینه تنش محیطی اصلاح شده می‌باشد، پیشنهاد می‌گردد. در معیار پیشنهادی، برای محاسبه تنش‌های دینامیکی اطراف ترک، علاوه بر جملات تکین، از جملات مرتبه بالاتر نیز استفاده می‌شود. همچنین، پارامترهای مورد نیاز در این معیار همانند استحکام کششی و فاصله بحرانی، با توجه به شرایط بارگذاری دینامیکی محاسبه و جاگذاری می‌شوند. به منظور صحت‌گذاری این معیار، از نتایج آزمایشگاهی موجود در مراجع علمی که در آن مقدار چقرمگی شکست دینامیکی یک نوع سنگ مرمریت با استفاده از قطعات دیسکی شکل تخت شده دارای سوراخ و ترک مرکزی با ابعاد مختلف محاسبه شده است، استفاده می‌شود. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که معیار پیشنهادی علی‌رغم سادگی، می‌تواند تخمین مناسبی از مقدار چقرمگی شکست دینامیکی قطعات سنگی با ابعاد مختلف داشته باشد.

کلمات کلیدی

چقرمگی شکست دینامیکی، بارگذاری ضربه‌ای، سنگ مرمریت سفید، قطعه‌ی دیسک برزیلی سوراخ‌دار تخت شده با ترک

مرکزی

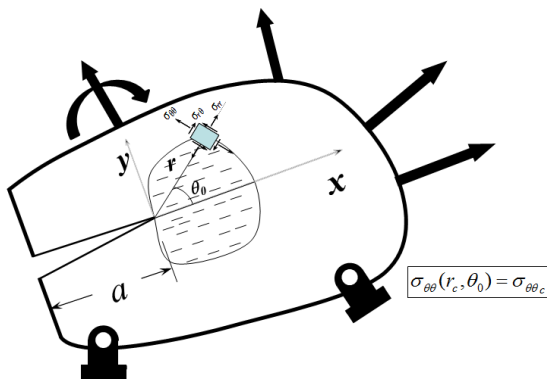
۱-مقدمه

در بسیاری از پروژه‌های عمرانی و معادن همچون حفاری معادن، شکست هیدرولیکی، ساختن تونل‌ها و غیره، بررسی شکست توده‌های سنگی اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به خواص ذاتی سنگ که یک ماده متخلخل و ترد است، احتمال حضور ترک در سنگ بسیار بالا بوده و شرایط شکست قطعات سنگی را بحرانی‌تر می‌کند. بنابراین، اهمیت بررسی شکست سنگ‌ها، زمانی که ترک در آن‌ها وجود دارد، دو چندان می‌شود. در این راستا، علم مکانیک شکست که یکی از شاخه‌های علوم مهندسی مکانیک است، بارها برای بررسی شکست توده‌های سنگی و تخمین بار شکست آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۱-۴]. پرواضح است که به‌منظور بررسی شکست مواد سنگی و تخمین بار شکست آن‌ها، نیاز به برخی از خواص مکانیکی مواد سنگی است که این خواص مکانیکی با استفاده از آزمایش‌های تعریف شده و استاندارد به‌دست می‌آیند. یکی از خواص مکانیکی بسیار مهم مواد سنگی که بیان‌گر میزان مقاومت آن‌ها نسبت به رشد ترک است، چقرمگی شکست^۱ (K_{Ic}) است. این خاصیت ماده را می‌توان با استفاده از مغزه‌هایی که از توده‌های سنگی تهیه می‌شوند و فقط یک ترک در آن‌ها به‌صورت مصنوعی ایجاد شده است، به‌دست آورد [۵، ۶]. به‌عنوان مثال، انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ دنیا^۲ (ISRM) دو نمونه برای محاسبه مقدار چقرمگی شکست مواد سنگی ارائه کرده‌اند: اولی قطعه دیسک برزلی با ترک مرکزی که تحت اثر بار فشاری قطری قرار دارد [۵] و دومی قطعه نیم‌دیسک با ترک لبه‌ای که در اثر بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای شکسته می‌شود [۷]. با دانستن مقدار چقرمگی شکست سنگ و با استفاده از معیارهای مکانیک شکست همانند بیشینه تنش محیطی^۳ [۸]، کمینه چگالی انرژی کرنشی^۴ [۹]، بیشینه نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی^۵ [۱۰] و غیره به تخمین بار شکست قطعات سنگی پرداخت. نکته حائز اهمیت در مورد به‌دست آوردن چقرمگی شکست مواد سنگی، اثرات ابعاد قطعه بر نتایج آزمایشگاهی است. نتایج آزمایشگاهی بر روی قطعات سنگی ترک‌دار با ابعاد مختلف نشان می‌دهد که مقدار چقرمگی شکست به ابعاد قطعه‌ی آزمایش شده وابسته بوده و با بزرگ شدن ابعاد قطعه، مقدار چقرمگی شکست نیز بیشتر می‌شود [۱۱-۱۳]. بنابراین برای تحلیل درست از شکست قطعات سنگی باید ارتباط بین چقرمگی شکست و ابعاد قطعه را دانست.

از سویی دیگر، توده‌های سنگی تحت اثر بارگذاری‌های مختلفی قرار می‌گیرند که تخمین بار شکست آن‌ها باید متناسب با بار اعمالی انجام شود. برخی از بارگذاری‌های به‌صورت استاتیکی به قطعه وارد می‌شود و برخی دیگر همانند زلزله، انفجار در معادن و غیره به‌صورت ضربه‌ای و ناگهانی به قطعات سنگی اعمال می‌شوند. از آنجا که نرخ بارگذاری بر روی خواص مکانیکی مواد اثرات قابل ملاحظه‌ای دارد، برای تخمین دقیق‌تر بار شکست قطعات سنگی، باید مقدار چقرمگی شکست را نیز متناسب با نرخ بارگذاری محاسبه کرد. بنابراین، تحقیقات نسبتاً زیادی که اغلب به‌صورت آزمایشگاهی بوده، برای محاسبه چقرمگی شکست در بارگذاری ضربه‌ای صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود. چن و همکارانش [۱۴] با استفاده از قطعه‌ی نیم دیسک با ترک لبه‌ای که توسط تست میله هاپکینسون^۶ تحت بارگذاری ضربه‌ای قرار گرفته است، مقدار چقرمگی شکست دینامیکی^۷ (K_{IId}) سنگ گرانیت لارنتیان^۸ را محاسبه نمودند. تانگ و شوو [۱۵] نیز مقدار چقرمگی شکست دینامیکی سنگ مرمریت را با استفاده از تست سقوط آزاد چکش بر روی نمونه‌ی خمش سه‌نقطه با ترک لبه‌ای، به‌دست آوردند. دای و همکارانش [۱۶] در تحقیقات دیگری، مقدار چقرمگی شکست دینامیکی سنگ گرانیت لارنتیان را، این بار توسط قطعه‌ی دیسک برزلی با ترک مرکزی چورون^۹ به‌دست آورده‌اند. تمامی این تحقیقات نشان داده‌اند که نرخ بارگذاری اثر زیادی بر مقدار چقرمگی شکست دارد و با افزایش نرخ بارگذاری، مقدار چقرمگی شکست به‌طور چشمگیر افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در تحقیقات دای و همکارانش [۱۶] نشان داده شده است که با افزایش نرخ بارگذاری از $50 \text{ GPa}\cdot\sqrt{\text{m/s}}$ به $97 \text{ GPa}\cdot\sqrt{\text{m/s}}$ مقدار چقرمگی شکست از $3/7 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ به $5/4 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ افزایش می‌یابد. بنابراین، باید اثرات نرخ کرنش را در محاسبه و تخمین بار شکست قطعات واقعی سنگی مورد توجه قرار داد.

موضوع بررسی اثرات اندازه در مورد چقرمگی شکست دینامیکی نیز صادق بوده و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با بزرگ شدن ابعاد قطعه مقدار چقرمگی شکست دینامیکی مواد سنگی نیز افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، ونگ و همکارانش [۱۷] نشان دادند که مقدار چقرمگی شکست دینامیکی سنگ مرمریت سفید^{۱۰}، به‌دست آمده از قطعه‌ی دیسک برزلی سوراخ‌دار تخت شده^{۱۱} (HCFBD) با ابعاد مختلف، به اندازه‌ی قطعه وابسته بوده و همانند حالت استاتیکی با افزایش ابعاد قطعه، مقدار چقرمگی شکست نیز افزایش می‌یابد. نتایج آزمایشگاهی مشابهی نیز را می‌توان در بررسی‌های

هنگامی که یک قطعه‌ی ترک‌دار، طوری تحت بارگذاری قرار گیرد که لبه‌های ترک بدون لغزشی از هم باز شوند، اصطلاحاً گفته می‌شود که تحت شرایط بارگذاری مود I و یا مود بازشوندگی قرار گرفته است. در این حالت، در مواد سنگی ناحیه‌ای از میکروتُرک‌ها در نوک ترک اصلی ایجاد می‌شود، که به آن ناحیه آسیب^{۲۳} (FPZ) گفته می‌شود. زمانی که ناحیه آسیب به‌طور کامل شکل بگیرد، ترک اصلی رشد کرده و ادامه پیدا می‌کند. در مواد سنگی، به دلیل خاصیت شبه‌ترد بودن آن، با رشد اولیه‌ی ترک اصلی، قطعه دچار شکست نهایی شده و دیگر نمی‌تواند باری تحمل کند. به دلیل خاصیت مادی مواد شبه‌ترد که در برابر تنش‌های کششی ضعیف هستند، رشد ترک اغلب در راستایی که بیشترین تنش کششی وجود دارد، رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، پس از شکل‌گیری ناحیه آسیب، ترک در راستایی رشد می‌کند که بیشترین تنش کششی وجود داشته باشد. در حالت بارگذاری مود I، راستای بیشینه کشش، همان راستای ترک است و بنابراین، ترک در راستای اولیه‌ی خودش رشد می‌کند. اساس معیار بیشینه تنش محیطی (MTS) که توسط اردوگان و سیه [۲۸] ارائه شده است، نیز اینگونه بوده و طبق این معیار، شکست در راستای بیشینه تنش محیطی (θ_0) رشد می‌کند. همچنین بر اساس این معیار، ترک زمانی رشد می‌کند که مقدار تنش محیطی ($\sigma_{\theta\theta}$) در فاصله بحرانی از نوک ترک (r_c) به مقدار بحرانی مشخصه ماده، $\sigma_{\theta\theta_{max}} = \sigma_{\theta\theta_c}$ برسد. در شکل ۱ شماتیکی از اساس معیار MTS برای حالت بارگذاری مود I نشان داده شده است.



شکل ۱: شماتیکی از معیار MTS

آیت‌اللهی و اکبردوست [۳۲] اخیراً معیاری ارائه کرده‌اند که اصلاح شده‌ی معیار MTS است و از آن برای بررسی اثرات اندازه در چقرمگی شکست مواد سنگی استفاده می‌شود. در این معیار، که معیار بیشینه تنش محیطی اصلاح شده (MMTS)

سایر محققین همانند [۱۸]، [۱۹] و [۲۰] مشاهده کرد. بنابراین، برای تخمین دقیق‌تر از شکست قطعات سنگی در بارگذاری ضربه‌ای، باید ارتباط بین چقرمگی شکست دینامیکی و ابعاد قطعه را دانست. در حالت بارگذاری استاتیکی، معیارهای متنوعی برای بررسی اثرات اندازه ارائه شده است. وایبول^{۱۲} [۲۱]، بازانت^{۱۳} [۲۲]، کارپنتری^{۱۴} [۲۳]، هو و دوآن^{۱۵} [۲۴]، کاریهالو^{۱۶} [۲۵]، کورنتی و همکارانش^{۱۷} [۲۶]، ژنکیو و شاه^{۱۸} [۲۷]، لی و زانگ^{۱۹} [۲۸]، سائوما^{۲۰} و همکارانش [۲۹] از جمله محققینی هستند که معیارهایی برای بررسی اثرات اندازه در چقرمگی شکست استاتیکی ارائه کرده‌اند. در مورد تخمین بار شکست قطعات سنگی ترک‌دار تحت بارگذاری دینامیکی با در نظر گرفتن ابعاد قطعه، تحقیقات نسبتاً کمی انجام شده است و برخلاف بارگذاری استاتیکی که معیارهای متعددی برای بررسی اثرات اندازه ارائه شده‌اند، معیاری برای بارگذاری دینامیکی در مراجع علمی مشاهده نمی‌شود. بنابراین، وجود یک معیار ساده، برای بیان ارتباط بین چقرمگی شکست دینامیکی با ابعاد قطعه نیاز است تا بتوان بار شکست قطعات واقعی سنگی را تخمین زد. هدف از این مقاله نیز ارائه یک معیار جدید برای بیان اثرات اندازه در مقدار چقرمگی شکست دینامیکی مواد سنگی است. معیاری پیشنهادی، تعمیمی از معیار بیشینه تنش محیطی اصلاح شده^{۲۱} (MMTS) که قبلاً توسط اکبردوست و همکارانش برای بارگذاری استاتیکی مطرح شده بود [۳۰-۳۲]، است. اساس هر دو معیار MMTS و معیار پیشنهادی، همانند معیار بیشینه تنش محیطی که توسط اردوگان و سیه^{۲۲} [۸] ارائه شده بود، است، با این تفاوت که اثرات جمله‌های مرتبه بالاتر از بسط سری ویلیامز در آن لحاظ شده است. نکته قابل توجه در استفاده از معیار پیشنهادی، محاسبه‌ی فاصله بحرانی از نوک ترک (r_c) متناسب با بارگذاری دینامیکی و اندازه قطعه می‌باشد. برای این منظور، از یک رابطه نیمه تجربی برای بیان ارتباط بین اندازه‌ی قطعه و فاصله بحرانی استفاده شده است. همچنین، در معیار پیشنهادی، مقادیر استحکام کششی ماده متناسب با نرخ بارگذاری جاگذاری می‌شود. در انتها، معیار ارائه شده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ونگ و همکارانش [۱۷] ارزیابی شده و نشان داده می‌شود که معیار MMTS قادر به تخمین شرایط شکست قطعات سنگی در حالت بارگذاری دینامیکی و متناسب با ابعاد قطعه است.

۲- معیار بیشینه تنش محیطی اصلاح شده

(K_I) تاکنون روش‌های عددی و تجربی زیادی ارائه شده است که می‌توان برخی از آن‌ها را در مراجع [۳۵-۴۴] دنبال کرد. اما در مورد محاسبه‌ی ضریب A_3 تنها چند روش وجود دارد [۳۹،۴۵،۴۶] که روش المان محدود فرا معین^{۲۴} [۴۵] یکی از ساده‌ترین این روش‌ها است و می‌تواند با دقت خوبی ضرایب جملات بسط سری ویلیامز را محاسبه کند. در مورد این روش در بخش ۴ به طور تفصیلی توضیح داده خواهد شد. همان‌طور که اشاره شد، ضرایب K_I و A_3 در بارگذاری دینامیکی متناسب با زمان می‌باشند. بنابراین، برای محاسبه این ضرایب متناسب با زمان، نیروی P را به صورت تابعی از زمان تعریف می‌کنند و منحنی تغییرات بار بر حسب زمان را در این دو رابطه قرار می‌دهند [۱۵،۱۸،۱۹،۴۷].

با جاگذاری روابط ۳ و ۴ و قرار دادن اندازه فاصله‌ی بحرانی r_c در رابطه ۲، می‌توان شرایط بیشینه تنش محیطی در فاصله‌ی بحرانی را به دست آورد:

$$\sigma_{\theta\theta}(r_c)|_{\theta=0} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_c}} \left(1 + 3 \frac{A_3^* r_c}{K_I^* R} \right) \quad (5)$$

با توجه به معیار MMTS، شکست زمانی اتفاق می‌افتد که بیشینه تنش محیطی با استحکام کششی ماده f_t برابر شود [۳۰]. در حالت بارگذاری دینامیکی نیز می‌توان فرض کرد که شکست زمانی رخ می‌دهد که بیشینه تنش محیطی برابر با استحکام کششی دینامیکی ماده گردد. به عبارت دیگر، شرایط شکست در بارگذاری دینامیکی را می‌توان مطابق با رابطه ۶ بیان کرد:

$$\frac{K_{Id}}{\sqrt{2\pi r_c}} \left(1 + 3 \frac{A_3^* r_c}{K_I^* R} \right) = f_{td} \quad (6)$$

که در این رابطه K_{Id} چقرمگی شکست دینامیکی و f_{td} استحکام کششی دینامیکی ماده می‌باشد که مقدار f_{td} را به صورت مستقل می‌توان از تست میله هاپکینسون محاسبه نمود [۱۷،۴۸]. البته باید دقت داشت که مقدار f_{td} متناسب با نرخ بارگذاری سایر آزمایش‌ها استخراج شود تا اثرات نرخ بارگذاری و محتوی فرکانسی در جواب‌ها دخیل نشود. با انجام کمی عملیات ریاضی، رابطه ۶ به صورت رابطه زیر که می‌توان از آن برای بیان ارتباط بین چقرمگی شکست دینامیکی و ابعاد قطعه استفاده کرد، بازنویسی می‌شود:

نام دارد، علاوه بر جملات تکین بسط سری تنش در اطراف ترک، از جملات مرتبه بالاتر نیز استفاده می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، معیار پیشنهادی در این مقاله، تعمیمی از معیار MMTS است که در آن اثرات نرخ بارگذاری و تنش‌های دینامیکی لحاظ شده است. به منظور استفاده از معیار MMTS در حالت بارگذاری دینامیکی، رابطه تنش محیطی دینامیکی در حالت بارگذاری مود I مورد نیاز است. در بسیاری از مقالات و تحقیقات گذشته بیان کرده‌اند که از همان روابط بسط سری ویلیامز می‌توان در حالت بارگذاری دینامیکی استفاده نمود و فقط باید ضرایب جملات بسط سری را متناسب با زمان، محاسبه و جاگذاری شود [۳۳]. با توجه به حل ویلیامز [۳۴] برای روابط تنش‌های الاستیک اطراف ترک در مختصات قطبی، می‌توان مؤلفه‌ی تنش محیطی را برای بارگذاری مود I این‌گونه نوشت:

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{2} r^{\frac{n}{2}-1} \left[\left(\frac{n}{2} + 1 \right) \cos \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \theta - \left(\frac{n}{2} + (-1)^n \right) \cos \left(\frac{n}{2} + 1 \right) \theta \right] \quad (1)$$

که در این رابطه r و θ مختصات قطبی نوک ترک است. ضرایب A_n نیز ضرایب بسط سری ویلیامز هستند که به شرایط بارگذاری و ابعاد قطعه بستگی دارند. در حالت بارگذاری دینامیکی ضرایب A_n وابسته به زمان بوده و باید متناسب با نرخ بارگذاری در لحظات مختلف بارگذاری محاسبه شوند. با توجه به این‌که در حالت بارگذاری مود I، به دلیل تقارن، بیشینه تنش در راستای ترک اتفاق می‌افتد، زاویه شروع شکست صفر است ($\theta_0=0^\circ$). با در نظر گرفتن سه جمله‌ی اول و قرار دادن $\theta_0=0^\circ$ ، رابطه ۱ را می‌توان این‌گونه بازنویسی کرد:

$$\sigma_{\theta\theta}(r)|_{\theta=0} = \frac{A_1}{\sqrt{r}} + 3A_3\sqrt{r} \quad (2)$$

در این رابطه، ضریب A_1 ، با ضریب شدت تنش K_I به صورت $A_1 = K_I / \sqrt{2\pi}$ ارتباط دارند. ضرایب K_I و A_3 را می‌توان بر اساس ضرایب بی‌بعد K_I^* و A_3^* به صورت زیر نوشت:

$$K_I = \frac{P}{RB} \sqrt{2\pi R} K_I^* \quad (3)$$

$$A_3 = \frac{P}{RB} \frac{1}{\sqrt{R}} A_3^* \quad (4)$$

که در این روابط R بُعد نامی قطعه، B ضخامت قطعه و P بار اعمالی به قطعه می‌باشد. برای محاسبه‌ی ضریب شدت تنش

دیسک برزیلی سوراخ دار تخت شده (HCFBD) از جنس سنگ مرمریت سفید و با ابعاد مختلف انجام داده اند، استفاده می شود. شکل ۲ شماتیکی از هندسه نمونه های آزمایش شده را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، قطعه ای آزمایش شده، یک دیسک دایروی بوده که در محل بارگذاری صاف شده است. همچنین در مرکز این دیسک یک سوراخ تعبیه شده است و ترک های اولیه در دو طرف این سوراخ قرار دارند. چنانچه ترک اولیه در راستای بارگذاری قرار بگیرد، لبه های ترک بدون هیچ لغزشی باز شده و در نتیجه حالت مود I پدیدار می شود. تمامی نمونه های آزمایش شده، نسبت های یکسان $R_1/R=0.2$ ، $a/R=0.5$ و $B/R=0.8$ را دارند و با همین نسبت ها ابعاد قطعه بزرگ می شود. همچنین زاویه ای 2β برای تمامی نمونه ها ۲۰ درجه بود. در جدول ۱ ابعاد نمونه های آزمایش شده به طور مفصل تر بیان شده است.

برای بارگذاری دینامیکی بر روی این قطعات، از تست میله ای هایپکینسون استفاده می شود. در شکل ۳ شماتیکی از دستگاه تست میله هایپکینسون نشان داده شده است. نحوه ای انجام تست میله هایپکینسون به این صورت است که یک ضربه زننده با سرعت کنترل شده به میله ای اول برخورد کرده و یک موج تنش در آن ایجاد می کند. زمانی که این موج تنشی به نمونه ای آزمایش می رسد، قسمتی از موج به میله ای اول برگشته و قسمت دیگر آن از طریق نمونه وارد میله ای دوم می شود. میزان موج تنشی در هر لحظه توسط دو کرنش سنج که بر روی دو میله متصل شده است، اندازه گیری می شود. با استفاده از کرنش های اندازه گیری شده و همچنین با کمک روابط انتشار موج الاستیک در اجسام، می توان نمودار بار بر حسب زمان را به دست آورد. برای جزئیات بیشتر از آزمایش میله هایپکینسون می توان به مرجع [۵۰] مراجعه کرد. برای محاسبه مقدار چقرمگی شکست دینامیکی دو روش در مراجع علمی بیان شده است. روش اول جاگذاری بار بحرانی از نمودار بار بر حسب زمان در رابطه (۳) و محاسبه مقدار چقرمگی شکست دینامیکی است [۱۴، ۱۵]. در این روش پارامتر بی بعد K_I^* نسبت به زمان ثابت در نظر گرفته شده و می توان با استفاده از یک حل ساده-ی استاتیکی در نرم افزارهای المان محدود آن را به دست آورد. اما روش دوم که پیچیدگی بیشتری دارد، نمودار بار بر حسب زمان را به عنوان شرایط بارگذاری به قطعه وارد کرده و در هر بازه ای زمانی، متناسب با تغییر شکل قطعه ضریب شدت تنش K_I محاسبه می شود. سپس نمودار ضریب شدت تنش بر حسب زمان را ترسیم کرده و ضریب شدت تنشی را که در لحظه زمان شکست (t_f) به دست می آید، به عنوان مقدار چقرمگی شکست

$$K_{Id} = \frac{f_{id} \sqrt{2\pi r_c}}{\left(1 + 3 \frac{A_3^* r_c}{A_1^* R}\right)} \quad (7)$$

برای استفاده از رابطه ۷ باید مقدار r_c را دانست. برای دانستن مقدار r_c بیان دو نکته الزامی است: اول این که چگونه می توان تخمینی از r_c با استفاده از نتایج آزمایشگاهی داشت، و دوم آیا ارتباطی بین r_c با ابعاد قطعه وجود دارد؟ برای محاسبه مقدار r_c از نتایج آزمایشگاهی، آیت الهی و اکبردوست [۳۰] رابطه ای بر اساس معیار اشمیت [۴۹] ارائه کردند. در حالت بارگذاری دینامیکی، به جای استفاده از استحکام کششی و چقرمگی شکست در حالت استاتیکی، از پارامترهای f_{id} و K_{Id} که مربوط به بارگذاری دینامیکی هستند، استفاده کرد و رابطه را این گونه اصلاح و بازنویسی کرد:

$$r_c = \left[\frac{f_{id} \sqrt{2\pi} \pm \sqrt{2\pi f_{id}^2 - 12 \frac{A_3^* K_{Id}^2}{A_1^* R}}}{6 \frac{A_3^* K_{Id}}{A_1^* R}} \right]^2 \quad (8)$$

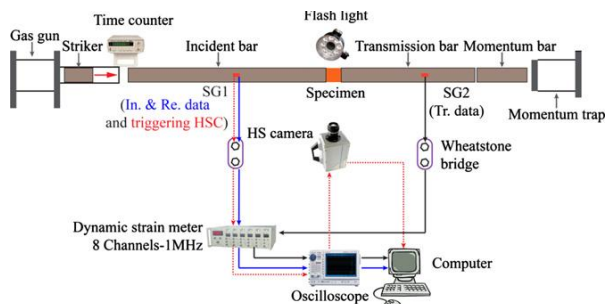
آیت الهی و اکبردوست [۳۰] برای بیان ارتباط بین r_c و ابعاد قطعه نیز رابطه ای نیمه تجربی ارائه کردند:

$$r_c = \frac{A}{1 + \frac{B}{R}} \quad (9)$$

که در این رابطه دو پارامتر A و B به طور مستقیم از نتایج آزمایشگاهی به دست می آیند. به عبارت دیگر، برای دو یا سه نمونه با ابعاد مختلف مقدار r_c از رابطه ۸ محاسبه شده و سپس با برازش خطی ضرایب A و B محاسبه می شوند. در این مقاله نیز پیشنهاد می شود برای بیان ارتباط بین r_c و ابعاد قطعه در حالت بارگذاری دینامیکی نیز از رابطه ۹ استفاده کرد. در بخش های بعدی، معیار پیشنهادی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ونگ و همکارانش [۱۷] ارزیابی می شود تا صحت این معیار بررسی شود.

۳- بررسی آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی معیار MMTS در حالت بارگذاری دینامیکی، از نتایج آزمایشگاهی ونگ و همکارانش [۱۷] که بر قطعات



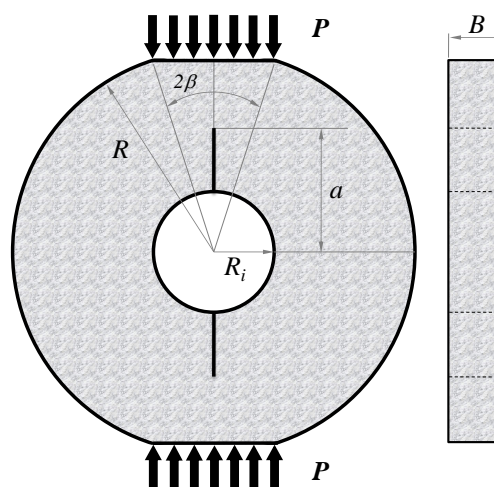
شکل ۳: شماتیکی از دستگاه تست میله هاپکینسون [۵۲]

۴. ارزیابی نتایج شکست سنگ مرمریت سفید با استفاده

از معیار MMTS

در گام اول برای استفاده از معیار پیشنهادی، محاسبه پارامترهای بی‌بعد مربوط به ضرایب بسط سری ویلیامز یعنی K_I^* و A_3^* برای نمونه HCFBD محاسبه شود. در این تحقیق، برای محاسبه این کمیت‌های بی‌بعد، از حل عددی و روش المان محدود فرا معین [۴۵] استفاده شده است. در روش FEOD ابتدا حوزه جابجایی اطراف ترک با استفاده از روش المان محدود برای تعداد زیادی گره در اطراف ترک محاسبه می‌شود. سپس مختصات این گره‌ها در روابط حوزه جابجایی که توسط ویلیامز [۳۴] محاسبه شده‌اند، جاگذاری می‌شوند. با جاگذاری مختصات نقاط در روابط ویلیامز و داشتن مؤلفه‌های جابجایی این نقاط از تحلیل المان محدود، تعدادی معادله به دست می‌آید که مجهولات این معادلات ضرایب بسط سری ویلیامز هستند. چنانچه تعداد نقاط در نظر گرفته شده، از تعداد مجهولات بیشتر باشد، یک دسته معادلات فرامعین به وجود می‌آید که با استفاده از روش حداقل مربعات می‌توان مجهولات آن را محاسبه نمود. سپس با استفاده از روابط ۳ و ۴ کمیت‌های بی‌بعد K_I^* و A_3^* که فقط به نسبت‌های هندسی وابستگی دارد و مستقل از اندازه‌ی بار و ابعاد قطعه می‌باشند، از نتایج حل معادلات به دست می‌آیند. مقادیر این دو کمیت برای قطعه‌ی HCFBD با نسبت‌های یکسان $a/R=0.5$ ، $R_i/R=0.2$ و زاویه‌ی $2\beta=20^\circ$ ، به ترتیب برابر با $K_I^*=0.282$ و $A_3^*=-0.106$ به دست می‌آیند. در اینجا ذکر این نکته الزامی است که مقادیر K_I^* و A_3^* به صورت استاتیکی محاسبه شده‌اند و تغییرشکل قطعه در اثر بارگذاری دینامیکی برای محاسبه‌ی این دو ضریب لحاظ نشده است. همان‌طور که در قسمت قبلی اشاره شد، روش دقیق‌تر و البته پیچیده‌تر، این است که منحنی بار بر حسب زمان به صورت گام به گام به قطعه اعمال شود و در هر مرحله این دو ضریب با استفاده از روش FEOD محاسبه

دینامیکی گزارش می‌کند [۱۸،۴۷،۵۱]. ونگ و همکارانش [۱۷] از روش دوم برای محاسبه چقرمگی شکست دینامیکی سنگ مرمریت سفید استفاده کرده و مقدار آن را متناسب با ابعاد قطعه گزارش کرده‌اند که در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقدار چقرمگی شکست دینامیکی با بزرگ شدن قطعه افزایش می‌یابد. در بخش بعدی، سعی بر این خواهد بود تا با استفاده از داده‌های سه اندازه‌ی اول در جدول ۱، مقدار چقرمگی شکست دینامیکی مربوط به اندازه‌ی چهارم، به کمک معیار MMTS پیش‌بینی شود.



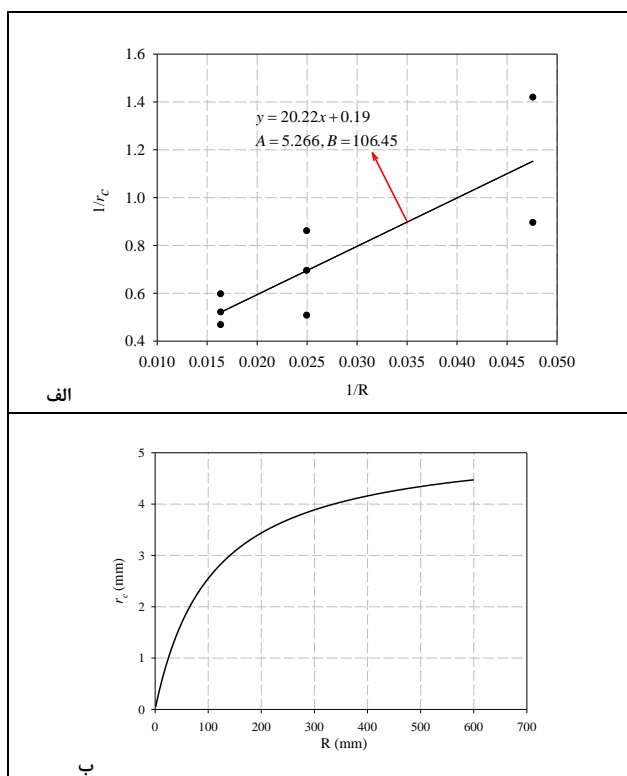
شکل ۲: شماتیکی از قطعه دیسک برزیلی سوراخ‌دار تخت شده با ترک مرکزی (HCFBD)

جدول ۱: مشخصات نمونه و مقدار چقرمگی شکست دینامیکی برای نمونه‌های مرمریت سفید [۱۷]

R (mm)	R _i (mm)	B (mm)	a (mm)	2β	K _{Id} (MPa.√m)
۲۱	۴/۲	۱۶/۸	۱۰/۵	۲۰°	۱/۷۳
۲۱	۴/۲	۱۶/۸	۱۰/۵	۲۰°	۲/۲۳
۴۰	۸	۳۲	۲۰	۲۰°	۲/۹۱
۴۰	۸	۳۲	۲۰	۲۰°	۲/۴۸
۴۰	۸	۳۲	۲۰	۲۰°	۲/۲۱
۶۱	۱۲/۲	۴۸/۸	۳۰/۵	۲۰°	۲/۶۵
۶۱	۱۲/۲	۴۸/۸	۳۰/۵	۲۰°	۳/۰۲
۶۱	۱۲/۲	۴۸/۸	۳۰/۵	۲۰°	۲/۸۵
۷۷/۵	۱۵/۵	۶۲	۳۸/۷۵	۲۰°	۲/۹۳
۷۷/۵	۱۵/۵	۶۲	۳۸/۷۵	۲۰°	۳/۱۵
۷۷/۵	۱۵/۵	۶۲	۳۸/۷۵	۲۰°	۳/۲۷

با توجه به رابطه (۱۰)، با رسم مقادیر $1/r_c$ بر حسب $1/R$ و سپس با عبور دادن یک خط از میان داده‌ها ضرایب A و B را می‌توان محاسبه کرد. در شکل ۴ خط عبور داده شده از نتایج آزمایشگاهی و ضرایب مربوط به رابطه ۹ و همچنین منحنی فاصله بحرانی بر حسب شعاع قطعه نشان داده شده است. با دانستن تغییرات r_c با ابعاد قطعه، می‌توان ارتباط بین چقرمگی شکست دینامیکی با ابعاد قطعه را توسط رابطه ۷ بیان نمود. با جاگذاری رابطه ۹ در رابطه ۷، تغییرات چقرمگی شکست دینامیکی با ابعاد قطعه به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$K_{Id} = \frac{f_{td} \sqrt{2\pi A} \left(1 + \frac{B}{R}\right)}{\left(1 + 3 \frac{A_3^*}{K_I^*} \frac{A}{R+B}\right)} \quad (11)$$



شکل ۴: عبور دادن خط برای محاسبه ضرایب A و B ، (الف) منحنی r_c بر حسب شعاع قطعه (ب)

شکل ۵ نشان‌دهنده نحوه تغییرات مقدار چقرمگی شکست دینامیک سنگ مرمریت سفید با شعاع قطعه HCFBD است. همچنین مقدار چقرمگی شکست دینامیکی مربوط به قطعه با شعاع ۷۷/۵ م.م. نیز در این شکل نشان داده شده است. با توجه به نمودار معیار MMTS مقدار مربوط به این شعاع 3.05

شوند. اما به منظور سادگی کار، در این مقاله پیشنهاد می‌شود تا از همان مقادیر ابتدایی استفاده شود و از تغییرات ضرایب K_I^* و A_3^* با زمان صرف نظر شود. البته باید توجه داشت که برای محاسبه‌ی این ضرایب به صورت دینامیکی باید نمودار تغییرات بار بر حسب زمان وجود داشته باشد. چون هدف این مقاله تخمین شرایط شکست قطعات سنگی با ابعاد مختلف است، بنابراین نمودار بار بر حسب زمان برای قطعه واقعی و آزمایش نشده وجود ندارد. به عبارت دیگر، فرض محاسبه‌ی ضرایب K_I^* و A_3^* به صورت استاتیکی علاوه بر سادگی به نوعی اجتناب‌ناپذیر نیز است.

در گام بعدی باید مقدار r_c را برای سه اندازه‌ی اول محاسبه نمود تا بتوان با استفاده از برازش خطی، ضرایب A و B در رابطه ۹ را محاسبه کرد و تغییرات r_c با ابعاد قطعه را توصیف کرد. برای این منظور، از رابطه ۸ استفاده شده است. در رابطه ۸، مقدار استحکام کششی دینامیکی سنگ مرمریت سفید برابر با ۲۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. این مقدار توسط ونگ و همکارانش [۴۸] که با استفاده از نمونه دیسک برزیلی تخت شده‌ی بدون سوراخ و ترک در دستگاه میله هاپکینسون به دست آورده‌اند، گزارش شده است. با جاگذاری مقادیر بی‌بعد K_I^* و A_3^* ، استحکام کششی f_t و مقدار چقرمگی شکست دینامیکی K_{Id} متناسب با هر آزمایش، در رابطه (۸)، مقدار r_c مطابق با جدول ۲ محاسبه می‌شود.

جدول ۲: مقدار r_c به دست آمده از هر آزمایش

R (mm)	K_{Id} (MPa.Vm) [۱۷]	r_c (mm)
۲۱	۱/۷۳	۰/۷۰۵
۲۱	۲/۲۳	۱/۱۱۸
۴۰	۲/۹۱	۱/۹۷۵
۴۰	۲/۴۸	۱/۴۴۱
۴۰	۲/۲۱	۱/۱۶۳
۶۱	۲/۶۵	۱/۶۷۸
۶۱	۳/۰۲	۲/۱۴۱
۶۱	۲/۸۵	۱/۹۲۳

پس از محاسبه اندازه ناحیه آسیب برای هر نمونه، باید نحوه تغییرات اندازه ناحیه آسیب با ابعاد قطعه را به دست آورد. به عبارت دیگر، باید مقادیر A و B در رابطه ۹ را محاسبه کرد. با کمی عملیات ریاضی، می‌توان رابطه ۹ را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{r_c} = \frac{1}{A} + \frac{1}{A R} \quad (10)$$

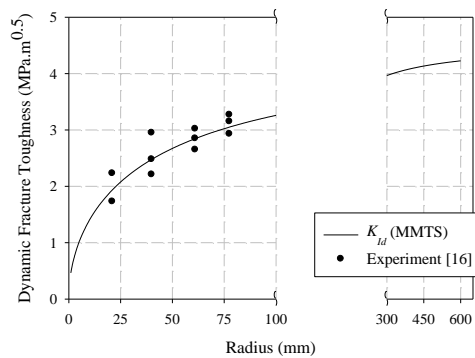
$$K_{ID} = f_{id} \sqrt{2\pi r_{coo}} \quad (12)$$

در این رابطه r_{coo} اندازه ناحیه آسیب برای قطعه بسیار بزرگ می باشد که می تواند از رابطه ۹ و یا نمودار شکل ۴-ب استخراج گردد. با توجه به رابطه ۹، مقدار r_{coo} همان ضریب A که برابر با 5.266 mm است، می شود. با جاگذاری $r_{coo}=5.266 \text{ mm}$ و $f_{id}=25 \text{ MPa}$ در رابطه ۱۲، مقدار K_{ID} برابر با $4.55 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ به دست می آید. نکته قابل توجه در اینجا است که مقدار چقرمگی شکست استاتیکی سنگ های مرمریت برای ابعاد بسیار بزرگ در حدود $1.5 \sim 2 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ است [۵۳] که این مقدار در مقایسه با مقدار K_{ID} به دست آمده برای سنگ مرمریت سفید در حدود یک سوم است. به عبارت دیگر، نرخ بارگذاری اثر بسیار زیادی در مقدار چقرمگی شکست مواد سنگی دارد و برای محاسبه بار بحرانی شکست توده های سنگی در ابعاد بسیار بزرگ باید اثرات نرخ بارگذاری و نوع بارگذاری مورد توجه قرار گیرد تا از خسارات ناشی از طراحی نادرست جلوگیری شود.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، به بررسی اثرات اندازه در مقدار چقرمگی شکست دینامیکی (K_{ID}) مواد سنگی پرداخته شد و یک معیار برای بیان ارتباط مقدار K_{ID} با ابعاد قطعه پیشنهاد گردید. معیار پیشنهادی، تعمیمی از معیار بیشینه تنش محیطی اصلاح شده (MMTS) که قبلاً برای بیان ارتباط بین ابعاد قطعه و مقدار چقرمگی شکست استاتیکی مواد شبه ترد همانند سنگ، بتن، گرافیت و غیره مورد استفاده قرار گرفته بود، است. در معیار پیشنهادی، برای محاسبه تنش اطراف ترک، علاوه بر جملات تکین، از جملات مرتبه بالاتر بسط سری ویلیامز استفاده شده است. همچنین ضرایب مربوط به هر جمله، متناسب با بار شکست، محاسبه می شود و نیازی به محاسبه تغییرات ضرایب جملات با زمان نیست. همچنین برای بیان شرایط شکست از مقدار استحکام کششی دینامیکی سنگ استفاده می گردد. به عنوان یک پارامتر مهم در معیار MMTS، اندازه فاصله بحرانی برای هر قطعه متناسب با مقدار چقرمگی شکست دینامیکی آن محاسبه می گردد. در انتها نیز معیار پیشنهادی با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی موجود در مقالات علمی، ارزیابی شد و نتایج ارزیابی نشان داد که معیار پیشنهادی، می تواند تخمین مناسبی برای مقدار چقرمگی شکست دینامیکی سنگ ها در ابعاد بزرگ تر را داشته باشد. همچنین، نشان داده شده

می باشد که با میانگین مقادیر آزمایشگاهی بیان شده در جدول (۱) ($3.12 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$) در حدود ۳٪ خطا دارد. بنابراین، می توان بیان کرد که معیار MMTS علاوه بر حالت استاتیکی، قادر به تخمین مناسبی از مقدار چقرمگی شکست دینامیکی با توجه به ابعاد قطعه است.



شکل ۵: نمودار تغییرات چقرمگی شکست ظاهری با شعاع قطعه

نکته قابل توجه در مورد معیار پیشنهادی این است که نیازی به روابط پیچیده و یا شبیه سازی های متناسب با زمان برای محاسبه ضرایب بسط سری ویلیامز نیست و می تواند با دقت خوبی شرایط شکست قطعات بزرگ تر را پیش بینی کند. همچنین، تنها داده ی آزمایشگاهی مورد نیاز در این معیار، مقدار چقرمگی شکست دینامیکی برای چند نمونه (حداقل سه نمونه) با ابعاد مختلف است که می توان با جاگذاری مقدار بار شکست در روابط مربوط به محاسبه ضرایب شدت تنش، آن را به دست آورد. این نکته، از مزایا و سادگی معیار MMTS می باشد. البته چنانچه منحنی بار بر حسب زمان برای قطعات آزمایش شده وجود داشته باشد، می توان با انجام تحلیل های المان محدود در گام های زمانی متعدد، مقدار چقرمگی شکست دینامیکی را به صورت دقیق تر محاسبه کرد. لیکن برای محاسبه ی ضرایب بی بعد K_I^* و A_3^* در روش پیشنهادی نیازی به تحلیل های دینامیکی نیست.

در حالت واقعی، توده های سنگی اغلب در ابعاد بسیار بزرگ قرار دارند و برای محاسبه بار شکست آن ها، باید شرایط شکست برای قطعات بسیار بزرگ را پیش بینی کرد. برای این منظور، لازم است تا مقدار چقرمگی شکست دینامیکی (K_{ID}) که به ابعاد قطعه وابستگی ندارد، را به دست آورد. با استفاده از رابطه ۷ می توان مقدار K_{ID} را با در نظر گرفتن $R \rightarrow \infty$ به صورت زیر محاسبه کرد:

Specimen, Rock Mech Rock Eng, Vol:47, p:267-274.

[8] Erdogan, F. and Sih, G.C.; 1963; *On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear*. Journal of Basic Engineering, Transactions of ASME, Vol:85, p:519-525.

[9] Sih, G.C.; 1974; *Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems*. International Journal of Fracture, Vol:10, p:305-321.

[10] Hussain, M.A., Pu, S.L. and Underwood, J.; 1974; *Strain energy release rate for a crack under combined mode I and Mode II Fracture Analysis*. ASTM STP 560. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p:2-28.

[11] Aliha, M.R.M., Ayatollahi, M.R., Smith, D.J. and Pavier, M.J.; 2010; *Geometry and size effects on fracture trajectory in a limestone rock under mixed mode loading*. Engineering Fracture Mechanics, Vol:77, p:2200-2212.

[12] Bazant, Z.P., Gettu, R. and Kazemi, M.T.; 1991; *Identification of nonlinear fracture properties from size effect tests and structural analysis based on geometry-dependent R-curves*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and, Vol:28, p:43-51.

[13] Khan, K. and Al-Shayea, N.A.; 2000; *Effect of specimen geometry and testing method on mixed Mode I-II fracture toughness of a limestone rock from Saudi Arabia*. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol:33, p:179-206.

[14] Chen, R., Xia, K., Dai, F., Lu, F. and Luo, S.N.; 2009; *Determination of dynamic fracture parameters using a semi-circular bend technique in split Hopkinson pressure bar testing*. Engineering Fracture Mechanics, Vol:76, p:1268-1276.

[15] Tang, C. and Xu, X.; 1990; *A new method for measuring dynamic fracture toughness of rock*. Engineering Fracture Mechanics, Vol:35, p:783-791.

[16] Dai, F., Chen, R., Iqbal, M.J. and Xia, K.; 2010; *Dynamic cracked chevron notched Brazilian disc method for measuring rock fracture parameters*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol:47, p:606-613.

که مقدار چقرمگی شکست دینامیکی سنگ‌ها در ابعاد بسیار بزرگ تقریباً دو تا سه برابر مقدار چقرمگی شکست استاتیکی آن‌هاست و باید این اختلاف زیاد را برای پیش‌بینی بار شکست توده‌های سنگی مورد توجه قرار داد تا از خسارات ناشی از طراحی نادرست جلوگیری شود.

۶- تقدیر و تشکر

نویسنده مقاله بر خود لازم می‌داند تا از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه خوارزمی به خاطر حمایت‌های مالی از این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشد.

مراجع

[1] Al-Shayea, N.A.; 2005; *Crack propagation trajectories for rocks under mixed mode I-II fracture*. Engineering Geology, Vol: 81, p:84-97.

[2] Ayatollahi, M.R. and Aliha, M.R.M.; 2008; *On the use of Brazilian disc specimen for calculating mixed mode I-II fracture toughness of rock materials*. Engineering Fracture Mechanics, Vol:75, p:4631-4641.

[3] Ayatollahi, M.R., Hosseinpour, G.R. and Aliha M.R.M.; 2010; *Using a new tensile-shear cracked specimen for investigating fracture behavior of rock materials*. Proceedings of ICEM2010 conference, Malaysia.

[4] Bazant, Z.P.; 1982; *Crack Band Model for Fracture of Geomaterials*. in: Z. Eisenstein (Ed.) 4th International Conference of Numerical Methods in Geomechanics, Edmonton, Alberta., p:1137-1152.

[5] Fowell, R.J.; 1995; *Suggested method for determining mode I fracture toughness using Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD) specimens*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol:32, p:57-64.

[6] Ouchterlony, F.; 1988; *ISRM Suggested methods for determining fracture toughness of rocks*. Int J Rock Mech Min Sci Geomech. Abstr, vol:25, p:71-96.

[7] Kuruppu, M.D., Obara, Y., Ayatollahi, M.R., Chong, K.P., Funatsu, T.; 2014; *ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend*

- effect. Strength, Fracture and Complexity*, Vol:3, p:205-215.
- [29] Saouma, V., Natekar, D. and Hansen, E.; 2003; *Cohesive stresses and size effects in elasto-plastic and quasi-brittle materials*. International Journal of Fracture, Vol:119, p:287-298.
- [30] Ayatollahi, M.R. and Akbardoost, J.; 2012; *Size effects on fracture toughness of quasi-brittle materials - A new approach*. Engineering Fracture Mechanics, Vol:92, p:89-100.
- [31] Akbardoost, J. and Ayatollahi, M.R.; 2014; *Experimental analysis of mixed mode crack propagation in brittle rocks: the effect of non-singular terms*. Engineering Fracture Mechanics, Vol:129, p:77-89.
- [32] Ayatollahi, M.R. and Akbardoost, J.; 2013; *Size effects in mode II brittle fracture of rocks*. Engineering Fracture Mechanics, Vol:112-113, p:165-180.
- [33] Freund, L.B.; 1990; *Dynamic fracture mechanics*. Cambridge University Press, UK.
- [34] Williams, M.L.; 1957; *On the stress distribution at the base of a stationary crack*. Journal of Applied Mechanics, vol:24, p:109-114.
- [35] Chen, C.S., Krause, R., Pettit, R.G., Banks-Sills, L., Ingraffea, A.R.; 2001; *Numerical assessment of T-stress computation using a p-version finite element method*. International Journal of Fracture, Vol:107, p:177-199.
- [36] 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, Vol: 98, p:365-382.
- [37] Fatehi Marji, M.; 2014; *Numerical analysis of quasi-static crack branching in brittle solids by a modified displacement discontinuity method*. International Journal of Solids and Structures, Vol:51, p:1716-1736.
- [38] Haeri, H., Shahriar, K., Fatehi Marji, M., Moarefvand, P.; 2015; *A coupled numerical-experimental study of the breakage process of brittle substances*. Arab J Geosci, Vol:8, p:809-825.
- [39] Karihaloo, B.L., Xiao, Q.Z.; 2001; *Accurate determination of the coefficients of elastic crack tip asymptotic field by a hybrid crack element with p-adaptivity*. Engineering Fracture Mechanics, Vol:68, p:1609-1630.
- [17] Wang, Q.Z., Zhang, S. and Xie, H.P.; 2010; *Rock Dynamic Fracture Toughness Tested with Holed-Cracked Flattened Brazilian Discs Diametrically Impacted by SHPB and its Size Effect*. Exp Mech, Vol:50, p:877-885.
- [18] Wang, Q.Z., Feng, F., Ni, M. and Gou, X.P.; 2011; *Measurement of mode I and mode II rock dynamic fracture toughness with cracked straight through flattened Brazilian disc impacted by split Hopkinson pressure bar*. Engineering Fracture Mechanics, Vol:78, p:2455-2469.
- [19] Mamun, M. and Bindiganavile, V.; 2014; *Specimen Size Effects and Dynamic Fracture Toughness of Cement-Based Foams*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol:26, p:143-151.
- [20] Kobayashi, R., Matsuki, K. and Otsuka, N.; 1986; *2. Size effect in the fracture toughness of Ogino tuff*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol:23, p:13-18.
- [21] Weibull, W.; 1939; *Phenomenon of rupture in solids*. Ingenioersvetenskaps Akad. Handl, Vol:153, p:1-55.
- [22] Bazant, Z.P.; 1984; *Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal*. Journal of Engineering Mechanics, Vol:110, p:518-535.
- [23] Carpinteri, A.; 1989; *Decrease of apparent tensile and bending strength with specimen size: Two different explanations based on fracture mechanics*. International Journal of Solids and Structures, Vol:25, p:407-429.
- [24] Hu, X. and Duan, K.; 2005; *Size effect on fracture of MEMS materials*. Journal of Materials Science and Technology, Vol:21, p:47-50.
- [25] Karihaloo, B.L.; 1999; *Size effect in shallow and deep notched quasi-brittle structures*. International Journal of Fracture, Vol:95, p:379-390.
- [26] Cornetti, P., Pugno, N., Carpinteri, A. and Taylor, D.; 2006; *Finite fracture mechanics: A coupled stress and energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, Vol:7, p:2021-2033.
- [27] Jenq, Y.S. and Shah, S.P.; 1985; *A two parameter fracture model for concrete*. J Engng Mech, Vol:111, p:1227-1241.
- [28] Li, J. and Zhang, X.B.; 2005; *A criterion study for non-singular stress concentrations with size*

[51] Wang, Q.Z., Jia, X.M. and Wu, L.Z.; 2004; *Wide-range stress intensity factors for the ISRM suggested method using CCNBD specimens for rock fracture toughness tests*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol:41, p:709-716.

[52] Zhang, Q.B. and Zhao, J.; 2013; *Determination of mechanical properties and full-field strain measurements of rock material under dynamic loads*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol:60, p:423-439.

[53] Ayatollahi, M.R. and Akbardoost, J.; 2013; *Size effects on fracture behavior of rock materials under combined tension-shear loading*. Iranian Journal of Mining Engineering, Vol:8, p:67-7

پی نوشت

-
- 1 - fracture toughness
 - 2 - International Society of Rock Mechanics
 - 3 - Maximum Tangential Stress (MTS)
 - 4 - Minimum Strain Energy Density (SED)
 - 5 - Maximum Energy Release Rate (G)
 - 6 - split Hopkinson pressure bar
 - 7 - dynamic fracture toughness
 - 8 - Laurentian granite
 - 9 - cracked chevron notch Brazilian disc
 - 10 - white marble
 - 11 - Holed-cracked flattened Brazilian disks
 - 12 - Wiebull
 - 13 - Bazant
 - 14 - Carpinteri
 - 15 -Hu and Duan
 - 16 - Karihaloo
 - 17 - Cornetti
 - 18 - Jenq and Shah
 - 19 - Li and Zhang
 - 20 - Saouma
 - 21 -Modified Maximum Tangential Stress (MMTS) criterion
 - 22 - Erdogan and Sih
 - 23 - Fracture Process Zone (FPZ)
 - 24 - Finite element over-deterministic (FEOD) method

[40] Kfourri, A.P.; 1986; *Some evaluations of the elastic T-term using Eshelby's method*. International Journal of Fracture, Vol:30, p:301-315.

[41] Nakamura, T., Parks, D.M.; 1992; *Determination of elastic T-stress along three-dimensional crack fronts using an interaction integral*. International Journal of Solids and Structures, Vol:29, p:1597-1611.

[42] Rice, J.R.; 1968; *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. ASME Journal of Applied Mechanics, Vol:35, p:379-386.

[43] Shih, C.F., Asaro, R.J.; 1988; *Elastic-Plastic Analysis of Cracks on Bimaterial Interfaces: Part I-Small Scale Yielding*, Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME, Vol:55, p:299-316.

[44] Su, R.K.L., Fok, S.L.; 2007; *Determination of coefficients of the crack tip asymptotic field by fractal hybrid finite elements*. Engineering Fracture Mechanics, Vol:74, p:1649-1664.

[45] Ayatollahi, M.R. and Nejati, M.; 2011; *An over-deterministic method for calculation of coefficients of crack tip asymptotic field from finite element analysis*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, vol:34, p:159-176.

[46] Chao, Y.J., Liu, S., Broviak, B.J.; 2001; *Brittle fracture: Variation of fracture toughness with constraint and crack curving under mode I conditions*, Exp Mech, Vol: 41, p:232-241.

[47] Wang, Q.Z., Jia, X.M., Kou, S.Q., Zhang, Z.X. and Lindqvist, P.A.; 2004; *The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol:41, p:245-253.

[48] Wang, Q.Z., Li, W. and Xie, X.P.; 2009; *Dynamic split tensile test of Flattened Brazilian Disc of rock with SHPB setup*. Mechanics of Materials, Vol:41, p:252-260.

[49] Schmidt, R.A.; 1980; *A microcrack model and its significance to hydraulic fracturing and fracture toughness testing*. Proc. 21st US Symp. On Rock Mech., p:581-590.

[50] Kolsky, H.; 1949; *An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading*. Proceedings of the Physical Society. Section B, vol:62, p:676-700.