

ارزیابی رفتار سنگ های گرانیتی حفره دار در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی

علی اکبر مومنی*^۱، مینگ تاو^۲

پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۲۲

دریافت مقاله: ۹۸/۰۵/۲۲

چکیده

وجود حفرات طبیعی یا مصنوعی موجود در توده سنگ می تواند بر روی رفتار مقاومتی آن تاثیر گذار باشد. این موضوع زمانی اهمیت می یابد که این حفرات، که عمدتاً کم عمق نیز هستند، دارای کاربری های حساسی نظیر مترو و یا اهداف نظامی باشند. لذا هدف از این پژوهش ارزیابی تاثیر وجود حفره بیضوی بر رفتار سنگ تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی است. به منظور ارزیابی تاثیر حفره در برابر شرایط تنش استاتیکی دو گروه از مغزه های گرانیتی حفره دار و بدون حفره فراهم شده و توسط دستگاه سروکنترل هیدرولیکی تحت آزمون بارگذاری فشاری تک محوری قرار گرفتند. در حین آزمون علاوه بر ثبت تنش، با بکار بردن کرنش سنج، سنسور ثبت انتشار امواج صوتی و دوربین، آسیب و تغییر شکل پذیری نمونه ها ثبت گردید. برای انجام آزمون بارگذاری دینامیکی از دستگاه میله فشار هاپکینسون استفاده شد. به علاوه روند آسیب دیدگی با استفاده از دوربین با سرعت بالا با نرخ یک عکس در ۱۰ میکروثانیه، ثبت گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که وجود حفره باعث کاهش مقاومت سنگ تا ۵۰ درصد مقاومت اولیه در برابر تنش های استاتیکی می شود. بعلاوه حفره باعث افزایش کرنش و در نتیجه کاهش قابل توجه در مدول الاستیسته نیز شده است. نتایج آزمون های دینامیکی نشان می دهد که مقاومت سنگ می تواند بسته به نرخ بارگذاری تا بیش از ۴/۳ برابر مقدار اولیه افزایش یابد. همچنین تصاویر گرفته نشان می دهد که در صورت بالا بودن تنش اعمالی، گسیختگی برشی غالب بوده و در صورتی که تنش اعمالی کاهش قابل ملاحظه ای یابد، مکانیسم برشی به مکانیسم کششی تبدیل می شود.

کلید واژه ها: گرانیت حفره دار، بارگذاری دینامیک، کرنش، انتشار موج صوتی

۱. عضو هیات علمی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود Ali_moomeni@yahoo.com

۲. عضو هیات علمی دانشکده مهندسی منابع و ایمنی دانشگاه مرکزی جنوب چین mingtao@csu.edu.cn

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

گرانیت فراوان ترین سنگ آذرین درونی بوده و کاربرد های فراوانی به عنوان منابع قرضه یا میزبان کانسارهای فلزی داشته و بسیاری از پروژه های مهندسی بر روی یا درون این تیپ سنگی اجرا می شوند. بنابراین محققین بسیاری رفتار این تیپ سنگی را مطالعه نموده اند (خراسانی و همکاران، ۱۳۹۷ و قبادی و رسولی ۱۳۹۱). با این وجود عمده این مطالعات بر روی رفتار مهندسی گرانیت بکر در برابر بار های استاتیکی و یا فرایند های تابع زمان نظیر هوازگی و خستگی بوده است (Momeni et al., 2015 and 2017) و رفتار این نوع سنگ در شرایط بار دینامیکی و یا زمانی که حاوی حفره و فضای خالی است، کمتر بررسی شده است. این درحالی است که به علت فراوان بودن و گسترش سطحی زیاد و همچنین پتانسیل بالای معدنی این نوع سنگ، حفاری تونل های معدنی و عمرانی در سنگ گرانیت بسیار معمول است. هوانگ و همکاران (۲۰۱۷) رفتار گرانیت حاوی سه حفری دایره ای را در برابر تنش تراکمی تک محوری با استفاده از آزمون آزمایشگاهی و مدل سازی عددی بررسی نمودند و الگوی توسعه ترک در سنگ دربرگیرنده حفره را مشخص و به چند رده تقسیم نمودند. میسرا و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از نرم افزار آباکوس خرابی تونل های کم عمق را تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی بررسی نمودند و دریافتند که در بارگذاری دینامیکی به علت سرعت زیاد بارگذاری، زون های آسیب پذیر کاملا خرد شده در حالیکه در بارگذاری استاتیکی ترک های طویل ایجاد می گردد.

سنگ ها ممکن است به دفعات زیاد تحت بارگذاری دینامیک ناشی از زلزله و یا انفجار قرار بگیرند. لذا شناخت رفتار دینامیکی سنگ برای طراحی ایمن سازه ها ضروری است. این موضوع بخصوص در مورد فضاهای زیرزمینی که می توانند موجب آرایش مجدد و تمرکز تنش در اطراف حفره گردند، بارزتر است. پرکاربردترین فناوری مورد استفاده به منظور تعیین رفتار دینامیکی مواد در نرخهای کرنش متوسط و بالا آزمایش میله فشاری هاپکینسون است. این آزمایش برای

اولین بار به وسیله کولسکی (Kolsky, 1949) مورد استفاده قرار گرفت. لی و همکاران (Li et al., 2008) این دستگاه را بهسازی نمودن به طوری که قابلیت اعمال تنش اولیه استاتیکی را داشته و همچنین موج ایجاد شده در آن به صورت نیمه سینوسی بوده که باعث نرخ کرنش ثابت می گردد. لی و همکاران (Li et al., 2017) مشاهده نمودند که مقاومت در برابر جدایش گرانیت های تحت فشار اولیه در برابر موج کششی با افزایش فشار همه جانبه، افزایش می یابد. ژائو و همکاران (Zhou et al., 2014) رفتار کشش دینامیکی سنگ گرانیتی را با استفاده از این دستگاه اصلاح شده در شرایطی که تحت تنش استاتیکی اولیه محوری بوده، مطالعه نمودند. در سال های اخیر تاو و همکاران (Tao et al., 2017 and 2018) با استفاده از آزمایش میله فشاری هاپکینسون اصلاح شده و شبیه سازی عددی، تاثیر فشار جانبی و شرایط فشار اولیه را بر رفتار دینامیکی گرانیت حاوی حفره دایره ای با قطر ۱ سانتیمتر را بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که شرایط تنش اولیه استاتیکی، بر روی رفتار سنگ در برابر بار دینامیکی تاثیر بسزایی دارد. در این پژوهش رفتار مقاومتی سنگ گرانیتی حاوی حفره بیضوی تحت بار فشاری استاتیکی و دینامیکی مورد مطالعه قرار می گیرد.

۲. مواد و روش ها

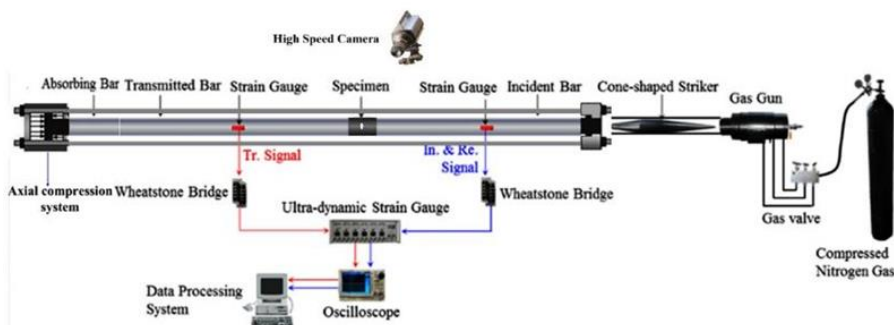
این پژوهش بر روی گرانیت های معدن دینگری واقع در شهر چانگشای استان هونان در چین، انجام گردیده است. بدین منظور بلوک مناسبی از این سنگها انتخاب شد و سپس برای تهیه مغزه های مناسب به آزمایشگاه دانشگاه CSU انتقال داده شد. در ابتدا به منظور تشخیص کانی شناسی این سنگ ها مقاطع نازک مناسب از آن تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت. مغزه های تهیه شده به منظور انجام آزمون های استاتیکی و دینامیکی، دارای نسبت طول به قطر ۲ و قطر ۵۰ میلیمتر بوده اند. سطوح انتهایی این مغزه ها مطابق با استاندارد انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) آماده گردیدند. تعداد ۸ نمونه مغزه برای انجام آزمون استاتیکی در نظر گرفته شده که

رفتار کرنشی و روند توسعه آسیب به هنگام بارگذاری ثابت و ارزیابی گردد. بعلاوه از یک دوربین با نرخ فریم بالا برای ثبت روند توسعه ترک در نمونه ها استفاده گردید. لازم به ذکر است که آزمون های استاتیکی توسط یک دستگاه سروکنترل MTS و به روش جابه جایی کنترل انجام گردید (شکل ۱).

نیمی از آنها حاوی حفری بیضوی در مرکز مغزه بوده است. این حفرات بیضوی دارای قطر بلند ۱/۵ سانتیمتر و قطر کوچک یک سانتیمتر بوده که توسط جت آب حفاری شده به طوری که راستای قطر بزرگ بیضوی عمود بر محور مغزه بوده است. بر روی نمونه های آزمون استاتیکی کرنش سنج الکترونیکی و سنسور ثبت انتشار امواج صوتی نصب گردید تا



شکل ۱. تجهیزات مورد استفاده در آزمون مقاومت فشار تک محوری استاتیکی



شکل ۲. اجزای آزمون میله فشاری هاپکینسون اصلاح شده مورد استفاده در این پژوهش

تنش کرنش سنگ را بدست آورد. در این مقاله دو نمونه سنگ گرانیتی حاوی حفره بیضوی تحت بارگذاری دینامیکی قرار گرفت و عملاً یکی از این آزمون ها با فشار گاز پایین و دیگری با فشار بالا و در نتیجه سرعت بالای ضربه زننده، آزمایش شد. علاوه بر تحلیل رفتار دینامیکی و توسعه گسیختگی توسط عکس های دوربین با سرعت بالا، سطح گسیختگی از طریق تهیه مقطع نازک و همچنین آنالیز SEM مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱. آزمون های استاتیکی

نتایج آزمایش های مقاومت فشاری تک محوری استاتیکی در جدول ۱ و شکل ۳ نشان داده شده است. میانگین مقاومت فشاری تک محوره (σ_c) و مدول الاستیسیته (E_r) گرانیت های مورد مطالعه به ترتیب ۹۵/۳۸ مگاپاسکال و ۳۳/۴۳ گیگاپاسکال بدست آمد. این در حالی است که مقادیر میانگین این پارامترها برای مغزه های حاوی حفره بیضوی ۶۶/۲۰ مگاپاسکال و ۱۹/۹۵ گیگاپاسکال اندازه گیری گردید. همانطور که ملاحظه می شود حضور حفره به دلیل ایجاد تمرکز تنش، باعث می گردد که مقاومت فشاری این سنگ ها تحت بار استاتیکی، بیش از ۵۰ درصد کاهش یابد. مدول الاستیسیته در مقایسه با مقاومت فشاری تاثیر پذیری کمتری نسبت به حفره داشته ولی با این وجود، ایجاد فضای مناسب برای جابجایی ذرات سنگ و کرنش محوری در اثر وجود این حفره باعث گردیده تا این پارامتر تا حد ۵۹ درصد مقدار اولیه خود کاهش یابد. بررسی منحنی های تنش کرنش نشان می دهد که برای تمامی نمونه های حاوی حفره بیضوی، نمودارهای به دست آمده دارای یک پله بوده که این پله به طور میانگین در تراز تنشی در حدود ۸۰ درصد مقاومت نهایی اتفاق می افتد. در واقع افقی شدن نمودار یا شیب منفی گرفتن آن در این پله ها نشان از ایجاد آسیب و رخداد ترک مرتبط با وجود حفره دارد.

همانطور که ذکر گردید، در این پژوهش از دستگاه میله فشاری هاپکینسون استفاده گردید. این دستگاه در دانشگاه CSU توسط گروه تحقیقاتی لی و همکاران بهسازی گردید. در واقع آنها با تغییر شکل ضربه زننده به میله، موج نیم سینوسی ایجاد نمودند که مهمترین حسن آن نرخ کنش ثابت آن است. همچنین با اضافه نمودن سلول های فشار به این دستگاه، توانایی اعمال تنش محوری یا جانبی استاتیکی را قبل از اعمال تنش دینامیکی ایجاد نمودند. همانطور که در شکل ۲ دیده می شود این سیستم شامل مخزن گاز نیتروژنی است که گاز از آن وارد تفنگ گازی می شود. به هنگام باز کردن شیر تفنگ، فشار گاز باعث به حرکت در آمدن ضربه زننده دوکی شکل شده و متناسب با سرعت حرکت آن، ضربه ای به میله ورودی وارد شده که تولید موج نیم سینوسی فشاری می نماید.

به هنگام رسیدن این موج به نمونه، به علت تفاوت در دانسیته میله فولادی و سنگ، بخشی از این انرژی به صورت موج کششی در میله ورودی منعکس شده و بخش دیگری از آن وارد نمونه شده و از آن عبور می نماید. به محض رسیدن موج به استرین گیج نصب شده در میله ورودی، دستگاه سیگنال را دریافت نموده و از طریق اسیلوسکوپ به دوربین با سرعت بالا دستور فیلم برداری را می دهد. این فیلم ها قابلیت تبدیل به عکس را دارند و به علت سرعت خیلی بالای آن، عملاً در هر ۱۰ میکروثانیه یک عکس (۱۰۰۰۰۰ عکس در ثانیه) تهیه می گردد. با توجه به بالا بودن نرخ کرنش، به منظور بررسی روند توسعه گسیختگی در نمونه لازم است که سرعت عکس برداری تا این حد بالا باشد.

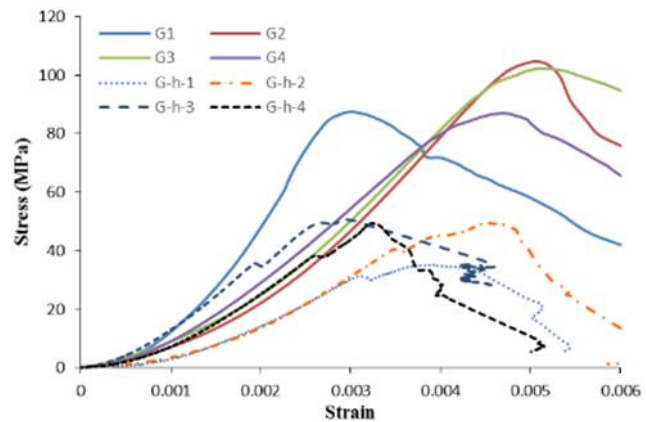
لازم به ذکر است که در انتهای میله خروجی، به سیستم اعمال فشار استاتیکی قرار داشته و از طریق جک های روغنی، نمونه را در حالت پیش تنیدگی قرار داده که در این آزمون، به علت شبیه سازی تونل های کم عمق، میزان این پیش تنیدگی ۱ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. با توجه به داده های کرنش سنج های نصب شده بر روی میله ها می توان وضعیت تنش نسبت به زمان در هر کدام از میله ها و همچنین نمودار

نمودار فراوانی تجمعی انتشار امواج صوتی از محور افقی جدا شده و با شیب نسبتاً ثابت و کمی شروع به افزایش می کند. در بازه زمانی ۷۵ تا ۸۰ ثانیه، تعداد پیک های AE افزایش نشان داده ولی شدت افزایش آن شدید نیست. این مرحله نشان از رشد ریز ترک های ایجاد شده داشته که در نمونه سنگی نیز با تغییر رنگ و روشن تر شدن زون های تحت تنش برشی مشخص می شود. در این مرحله منحنی تجمعی روند نمایی به خود می گیرد. پس از گذشت حدود ۸۰ ثانیه از آزمون، منحنی تعداد AE به شدت افزایش یافته و نشان از شروع اتصال ترک های رشد کرده و شکل گیری الگوی سطح گسیختگی دارد. منحنی تجمعی AE در این مرحله در نقطه عطف تغییر شیب قرار دارد. بدین معنی که چنانچه دو بخش خطی منحنی تجمعی را ادامه دهیم در یک نقطه یکدیگر را قطع می نمایند که تراز تنش مربوط به زمان این نقطه، تنش شروع اتصال ترک های ایجاد شده خواهد بود.

بررسی تصویر مغزه در این مرحله نشان می دهد که یکسری ترک های منفصل بر روی مغزه دیده می شود ولی این ترک ها سطح جدایش نشان نداده و تنها از تغییر رنگ و سفید شدن خطی مسیر گسیختگی قابل تشخیص است. پس از گذشت حدود ۱۰ ثانیه پس از آغاز اتصال ترک ها، منحنی به مقدار پیک خود رسیده و عملاً سطح شکست توسعه می یابد. روند منحنی تجمعی AE در این بازه تقریباً ثابت با شیب زیاد است. حداکثر پیک منحنی تعداد AE و پیک مقدار تنش برهم منطبق بوده و نشان می دهد که بیشترین تعداد صدای ترک خوردگی و گسیختگی در لحظه تراز تنش حداکثر اتفاق افتاده است. بررسی چشمی نمونه در این لحظه نشان می دهد که در همان راستای تغییر رنگ های اتفاق افتاده در مرحله قبل ترک ها توسعه یافته و سطوح جدایش آنها با بازشدگی دهانه سطح گسیختگی کاملاً واضح می باشند. پس از نقطه پیک منحنی به صورت ناگهانی مقداری کاهش نشان داده ولی چون سطح گسیختگی به صورت کامل توسعه نیافته دوباره مقداری تنش اضافه شده تا نهایتاً گسیختگی کامل اتفاق افتاده و عملاً سنگ باربری خود را از دست می دهد. این روند کاهش بعد از

جدول ۱. نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری در حالت استاتیکی

Sample No.	Core situation	σ_c (MPa)	E_t (GPa)
G1	Intact core	87.48	45.83
G2		104.72	31.16
G3		102.26	30.28
G4		87.06	26.47
G-h-1	Hole-bearing core	35.27	14.87
G-h-2		49.37	18.43
G-h-3		50.84	25.32
G-h-4		49.34	21.2

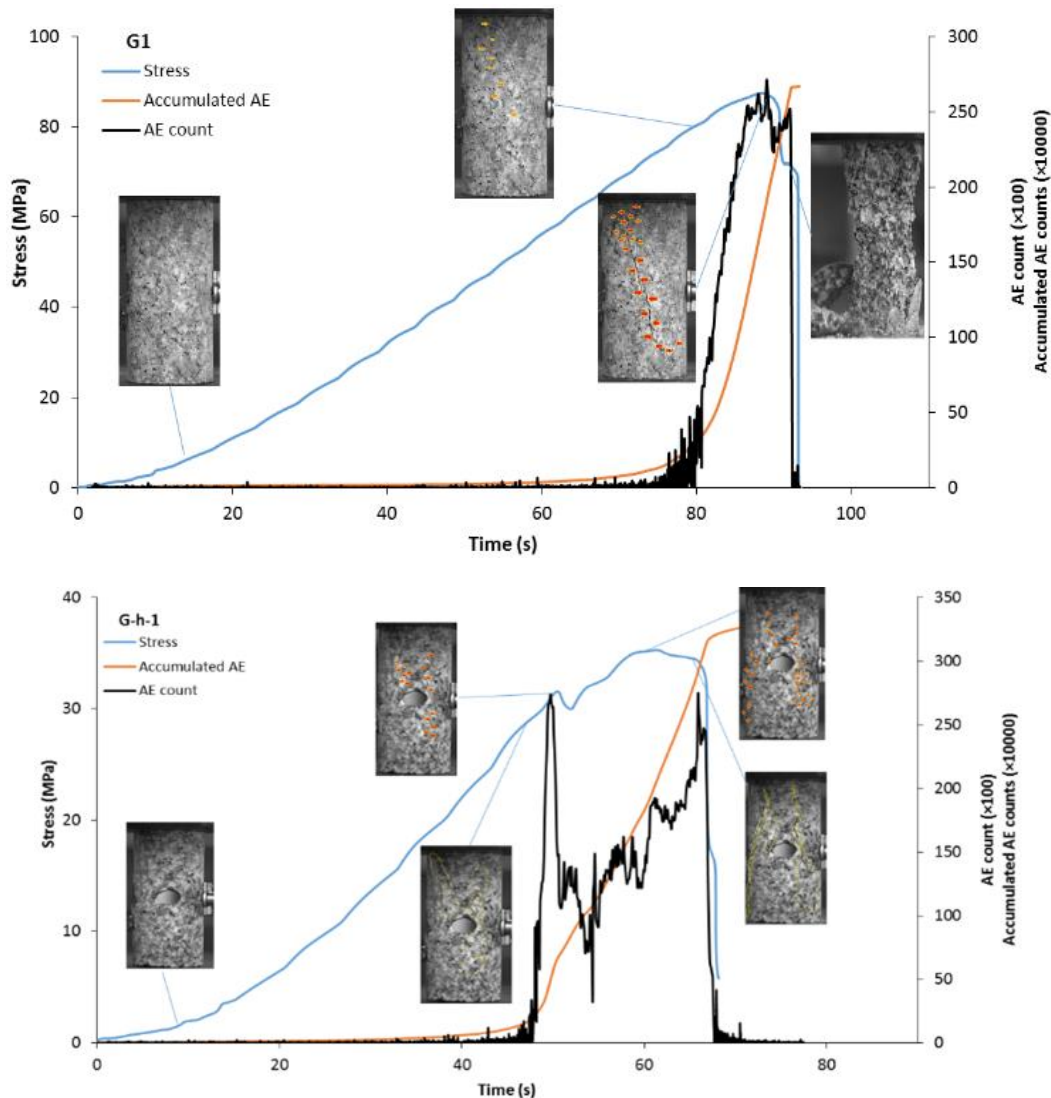


شکل ۳. نمودار تنش-کرنش نمونه های گرانیتی در آزمون مقاومت فشاری تک محوری استاتیکی

به منظور ارزیابی بهتر روند باربری مغزه ها در حالت حفره دار یا بدون حفره، نمودار تنش-زمان به همراه داده های انتشار امواج فراصوتی و تصاویر نمونه در طول فازهای مختلف آسیب در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل، رفتار نمونه G1 به عنوان نماینده سنگ بکر و نمونه G-h-1 به عنوان سنگ حاوی حفره نشان داده شده است. همانطور که در نمودار G1 دیده می شود تا ۲۳ ثانیه بعد از شروع آزمایش ۳ پیک بسیار کوتاه در تعداد پالس های انتشار امواج صوتی دیده می شود که مربوط به تراکم و بسته شدن میکروترک های موجود در سنگ است. در بازه زمانی ۵۰ تا ۷۵ ثانیه بعد از شروع آزمایش، تعداد پیک های ریز زیاد شده و نشان از شروع هسته زایی ریزترک ها در سنگ دارد. در این بازه

برشی ایجاد شده در دو طرف مغزه در این لحظه از آن جدا می شود.

پیک، افزایش دوباره و نهایتاً کاهش شدید در منحنی تعداد AE نیز کاملاً مشخص است. بررسی تصویر نمونه در لحظه از دست دادن باربری خود نشان می دهد که گوه های زون



شکل ۴. نمودار تنش و داده های انتشار امواج فراصوتی در برابر زمان و همچنین تصویر مربوط به آسیب سنگ در زمانهای

مختلف برای نمونه های G1 و G-h-1

مشخص بوده که در محدوده زرد رنگ نشان داده شده در شکل مشخص هستند. در حدود ۴۸ ثانیه پس از شروع آزمایش، ترک های ایجاد شده در پیرامون حفره به ناگهان متصل شده و منحنی تعداد AE پیک شدید نشان داده که شبیهی بیش از پیک AE در نمونه سنگ بکر دارد. همچنین در این لحظه منحنی تجمعی AE دارای کمترین شعاع انحنا می باشد. بررسی نمونه مغزه در لحظه پیک اول نشان می دهد که

بررسی این منحنی برای نمونه حفره دار G-h-1 نشان می دهد که تا لحظه شروع اتصال ریزترک ها، رفتار مشابه نمونه سنگ بکر است. بدین معنی که شامل پالس های اولیه کوتاه ناشی از بسته شدن نقاط ضعف موجود در سنگ، مرحله بدون تغییر و مرحله شروع هسته زایی ترک های جدید بوده تا اینکه به آرامی شروع به رشد نموده که با بزرگتر شدن پیک ها AE مشخص است. زون های برشی در این مرحله با تغییر رنگ

ثابت امواج ورودی و برگشتی از کرنش سنج های نصب شده بر روی میله ورودی و به منظور ثبت موج عبوری نیز از یک کرنش سنج نصب شده روی میله عبوری استفاده می شود. با فرض تعادل نیروهای دینامیکی در نمونه در طول انجام آزمایش و با داشتن داده های کرنش سنج و منحنی امواج، می توان داده های تنش کرنش نمونه را از طریق روابط زیر محاسبه نمود.

$$\sigma = \frac{A_b}{2A_s} E_b [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{C_b}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] dt \quad (2)$$

در این روابط σ تنش و ε کرنش نمونه سنگی، A_b سطح مقطع میله الاستیک، C_b سرعت سیر موج در این میله ها و E_b مدول یانگ آنها، A_s و L_s به ترتیب سطح مقطع و طول نمونه می باشند.

در شکل ۵ روند تغییرات موج نیم سینوسی ورودی، انعکاسی و عبوری در محل نصب کرنش سنج ها برای نمونه GD2 و همچنین منحنی تنش کرنش مربوط به هر دو آزمون دینامیکی نشان داده شده است. در آزمون SHPB انجام شده بر روی نمونه های GD1 و GD2 به دلیل متفاوت بودن فشار گاز موجود در تفنگ گازی، سرعت ضربه زننده متفاوت بوده که بر اساس نتایج دستگاه لیزر نصب شده در حد فاصل بین انتهای لوله حاوی ضربه زننده و میله ورودی، سرعت این ضربه زننده برای این دو نمونه به ترتیب ۷/۰۴ و ۱۱/۸۸ متر بر ثانیه اندازه گردید. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، با افزایش سرعت ضربه زننده مقاومت نهایی و شیب منحنی تنش-کرنش به شدت افزایش می یابد. بررسی ها نشان می دهد که افزایش مقاومت فشاری دینامیکی وابسته به نرخ بارگذاری در این دو آزمون از ۹۱ تا ۲۴۸ مگاپاسکال بوده است. این در حالی است که مدول الاستیسیته دینامیک از ۵۷ تا ۱۴۵ گیگاپاسکال تغییر نموده است.

ترک های با سطح جدایش واضح در زون های برشی ضربدری پیرامون حفره تشکیل شده است.

پس از نقطه پیک اول، کاهش ناگهانی در تراز تنش و تعداد AE دریافت شده دیده می شود که ناشی از کرنش شدید در لحظه پیک و در نتیجه، کاهش باربری نمونه می باشد. پس از این مرحله به دلیل وجود ترک های قبلی و رشد آنها و همچنین بالا بودن تراز تنش و ایجاد ترک های جدید، شدت پیک تعداد AE شروع به افزایش نموده تا نمونه گسیخته شده و پیک دوم که به لحاظ تعداد AE مشابه پیک اول است، نمایان می شود. در لحظه تراز تنش حداکثر ترکی در زون برشی سمت چپ پایین نمونه نیز ظاهر شده و عملاً زون های برشی ضربدری در هر چهار بخش دیده می شود. نکته قابل توجه این است که منحنی تنش در لحظه بعد از پیک، افت شدید نداشته و تقریباً حالت افقی به خود گرفته تا در لحظه ۶۷ ثانیه بعد از آزمون، گسترش ترک های مذکور در سرتاسر نمونه باعث از بین رفتن باربری کامل نمونه و افت ناگهانی در پیک تنش و تعداد AE می شود. در تمامی نمونه های حفره دار منحنی های تنش و تعداد AE دارای دو پیک بوده و منحنی تجمعی AE پس از عبور از محدوده دارای شعاع انحنا حداکثر، از حالت خطی منظم خارج می شود.

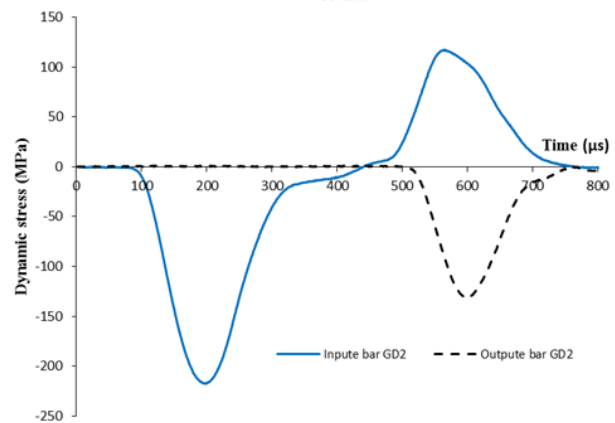
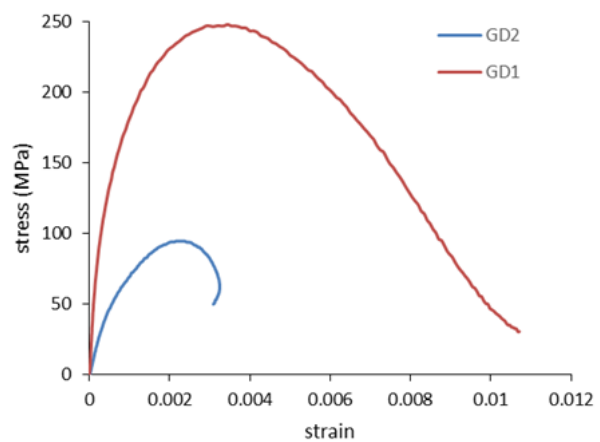
۲-۳. آزمون های دینامیکی

همانطور که گفته شد پس از باز کردن شیر تفنگ گازی که دارای فشار مشخصی می باشد، میله ضربه زن به سمت جلو رانده شده و به سطح مقطع میله ورودی برخورد می کند و متناسب با شدت برخورد یک موج فشاری با دامنه مشخص در میله ورودی منتشر می شود و در طول این میله به سمت نمونه حرکت می کند. وقتی موج منتشر شده به حد فاصل میله و نمونه می رسد، به دو قسمت تقسیم می شود که قسمت اول به داخل میله ورودی به صورت موج کششی بازگشته و به آن موج برگشتی گفته می شود. قسمت دوم موج از داخل نمونه عبور کرده و در داخل میله عبوری منتشر خواهد شد که به نام موج عبوری شناخته می شود. به منظور

تراز تنش، کرنش نیز کم می شود. با توجه به نصب بودن کرنش سنج ها بر روی میله های فولادی، احتمال آسیب دیدگی کرنش سنج خیلی پایین بوده و احتمالاً در این نمونه، گسیختگی کامل روی نداده است.

نتایج فرایند گسیختگی ثبت شده توسط دوربین با سرعت بالا در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این تصاویر از لحظه رسیدن موج به کرنش سنج تا گسیختگی نمونه بوده ولی به علت تعداد زیاد عکس های گرفته شده برای هر آزمون (۸۰۵ عکس) در این بازه زمانی، امکان آوردن تمامی آنها مقدور نبوده و تنها در زمان هایی که تغییر قابل توجه در آسیب وارده به نمونه روی داده است، بخصوص آسیب ناشی از اولین موج انتقالی، آورده می شود. لازم به ذکر است که زمان های مشخص شده بر روی این شده لحظه رسیدن موج به نمونه بوده که در حدود ۵۰۰ میکروثانیه بعد از رسیدن موج به کرنش سنج نصب شده بر روی میله ورودی (زمان شروع ثبت تصویر توسط دوربین) می باشد.

همانطور که در شکل ۶ دیده می شود بعد از گذشت ۷۰ میکرو ثانیه اولین ترک در راستای قطر کوچک حفره بیضوی ظاهر شده است. تمرکز تنش ها به دلیل وجود این حفره و راستای تنش اعمالی به نحوی است که در امتداد قطر بزرگ بیضی تمرکز تنش فشاری و در راستای قطر کوچک تنش کششی اعمال میگردد. تمرکز تنش در بخش فشاری باعث شده تا پدیده جدایش که شبیه انفجار سنگ است رخ داده و قطعات کوچکی از دیواره حفره جدا شده و به داخل حفره پرتاب شود که در شکل با پیکان آبی رنگ مشخص شده است. با این وجود به دلیل پایین بودن سطح تراز تنش فشارشی در این لحظه، ترک در راستای مناطق برشی رخ نداده است ولی به دلیل مقاومت کششی پایین تر سنگ نسبت به مقاومت برشی، تراز تنش کششی در این لحظه به حدی بوده است که باعث ایجاد ترک گردد. با گذشت زمان و در بازه ای حدود ۱۲۰ میکرو ثانیه پس از رسیدن اولین پالس



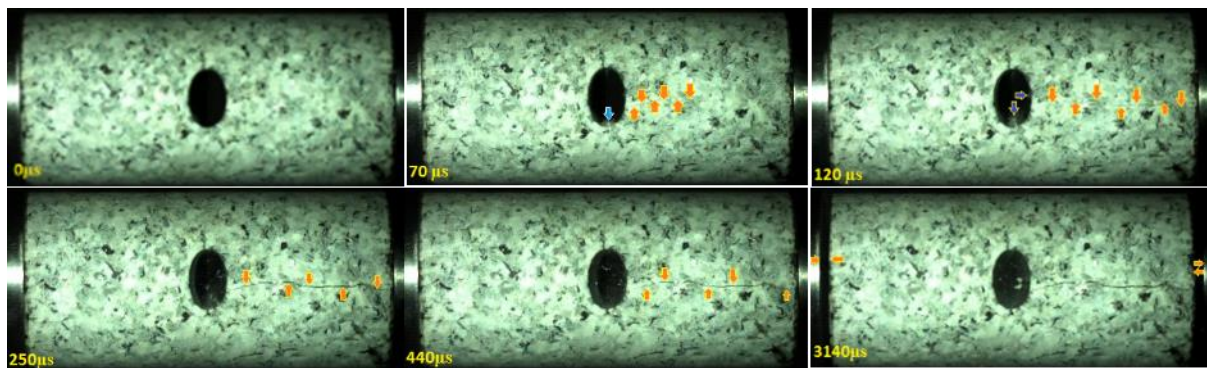
شکل ۵. منحنی تنش-کرنش مربوط به دو نمونه آزمون

مقاومت فشاری دینامیکی و همچنین روند تغییرات تنش - زمان امواج ورودی، انعکاسی و عبوری مربوط به نمونه GD2

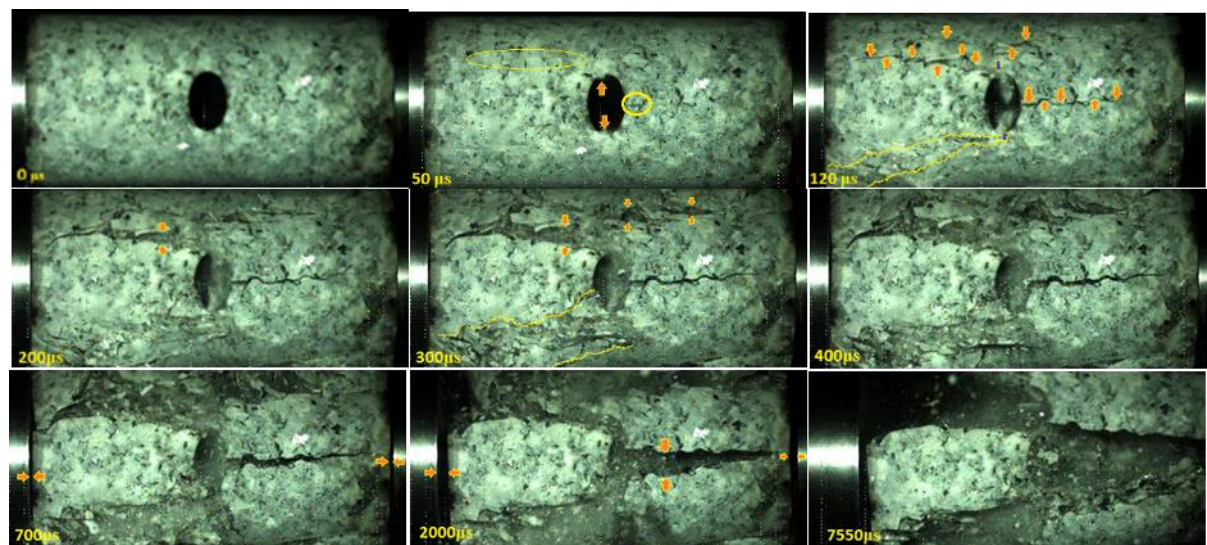
هرچه سرعت ضربه زننده زیاد و در نتیجه نرخ بارگذاری بالاتر رود، به دلیل تأثیر عامل اینرسی مقاومت سنگ نیز افزایش می یابد. به بیان دیگر، در نرخ های بارگذاری بالا، عامل اینرسی منجر به افزایش ناگهانی فشار داخلی سنگ شده که این افزایش فشار داخلی همچون یک نیروی محدود کننده جانبی، محوریت مرکزی نمونه سنگ را با قدرت بیشتری حفظ کرده و همین امر موجب بالا رفتن مقاومت کلی سنگ شده و مانع گسیختگی آنی نمونه می گردد و در نهایت مقاومت نهایی سنگ افزایش می یابد. به عبارت دیگر به دلیل نبودن زمان کافی برای رشد ترک ها، توسعه شکستگی به کندی انجام شده و باربری سنگ افزایش می یابد. یک آنومالی در منحنی تنش-کرنش نمونه GD1 بعد از نقطه پیک مشاهده شده و ملاحظه می گردد که در انتهای این منحنی با کاهش

روند گسترش ترک در نمونه GD2 که دارای نرخ بارگذاری سریعتری است نشان می دهد که پس از گذشت ۵۰ میکروثانیه، مشابه نمونه قبل ترک در دیواره حفره و در بخش کششی ایجاد می گردد. در واقع به دلیل نرخ بارگذاری سریعتر در این نمونه، پس از گذشت ۵۰ میکروثانیه به تراز تنشی نزدیک با تراز تنش موجود پس از ۷۰ میکروثانیه در نمونه قبل رسیده و به حدی است که می تواند باعث ایجاد ترک کششی در دیواره حفره گردد. برعکس نمونه قبل، آثار خطی سفید رنگ که نشان از هسته زایی ترک در زون برشی بوده، در نمونه ظاهر شده که توسط بیضوی زرد رنگ نشان داده شده است. در این لحظه از هر دو منطقه تحت فشار در امتداد محور بزرگ حفره جدایش دیواره حفره آغاز می گردد. پس از گذشت ۱۲۰ میکرو ثانیه از دریافت موج، دو زون برشی در سمت رو به میله ورودی حفره تشکیل شده است. در واقع وقتی تنش به مقدار ماکزیمم نزدیک می گردد به اندازه کافی زیاد بوده تا موجب گسیختگی برشی شود. به علاوه در این زمان ترک کششی ایجاد شده در مرحله قبل نیز مقداری گسترش می یابد. پس از گذشت ۲۰۰ میکرو ثانیه تنش در سمت کاهشی منحنی تنش قرار داشته ولی به دلیل وجود ترک ها در مراحل قبل و همچنین وجود انرژی ذخیره شده، سطوح گسیختگی قبلی گسترش یافته و بازشدگی دهانه این ترک ها زیاد شده است. در بازه ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرو ثانیه عملا تغییرات آنچنان واضحی در نمونه رخ نداده و این نشان می دهد در این بازه نمونه تحت تنش قابل ملاحظه ای نبوده و تنها انرژی ذخیره شده باعث گسترش و بازشدگی ترک ها در نمونه شده است. در تصویر مربوط به نمونه در لحظه ۷۰۰ میکروثانیه جدایش نمونه از میله ها آغاز شده و معلوم است فاز دوم بارگذاری نیز اعمال شده و شدت آسیب سنگ در زون برشی شدت یافته است. در تصاویر مربوط به زمان های ۲۰۰۰ و ۷۵۵۰ میکروثانیه به دلیل اعمال تنش فازهای بعدی، فاصله گرفتن فک های بارگذاری و آسیب تجمعی مراحل قبل، نمونه به گوه های تقسیم شده و در اثر حرکت این گوه ها عملا شکل بیضوی حفره از بین رفته است.

موج ایجاد شده به مغزه، تقریباً موج تنش داخل مغزه در مقدار ماکزیمم خود بوده و باعث می شود تا ترکی که از نزدیک حفره ایجاد شده تا انتهای مغزه گسترش یابد. در این لحظه شدت جدایش از دیواره حفره نیز بیشتر شده و در سمت تحت کشش نیز این اتفاق شروع به رخ دادن می نماید. از این بازه تا فاصله زمانی ۲۵۰ میکروثانیه، علی رغم اینکه تراز تنش در نمونه روند کاهشی دارد ولی به دلیل اینکه ترک در مراحل قبل ایجاد شده است و گسترش و بازشدگی آن به تنش کمتری نیاز دارد، مشاهده می گردد که دهانه ترک نسبت به تراز تنش حداکثر بیشتر باز شده است و به نوعی انرژی جمع شده در سنگ با جابجایی قطعات اطراف ترک آزاد می شود. تصویر مربوط به نمونه پس از گذشت ۴۴۰ میکروثانیه از دریافت موج نشان می دهد که دهانه شکستگی نسبت مرحله قبل بسته تر شده است. در واقع در این زمان امواج عبوری یا انعکاسی در میله های ورودی و خروجی قرار داشته و نمونه تحت تنش نیست. تصویر ثبت شده در لحظه ۳۱۴۰ میکروثانیه نشان می دهد دوباره دهانه درزه باز شده و مهمتر از آن اینکه مغز از میله ورودی و خروجی فاصله گرفته است. در واقع پس از اینکه موج عبوری از مغزه وارد میله خروجی می شود در طول میله حرکت کرده و پس از آنکه به انتهای میله می رسد، بخشی از آن به صورت موج کششی منعکس شده و به سمت مغزه حرکت می کند. در حد فاصل میله خروجی و سنگ چون موج کششی می خواهد از یک جسم با دانسیته بیشتر به یک جسم با دانسیته کمتر وارد شود، دوباره بخشی از آن به صورت موج فشاری منعکس شده و در میله حرکت می کند. این تبدیل موج کششی به فشار باعث می شود میله خروجی مقدار حرکت به سمت انتهای دستگاه داشته و لذا سنگ از بین دو فک بارگذاری جدا می شود. با این وجود موج فشاری فاز دوم که از انعکاس موج کششی منعکس شده از فاز اول در میله ورودی حرکت می کند زودتر به مغزه رسیده و قبل از جدایش مغزه از فک های بارگذاری میله های ورودی و خروجی، نمونه را تحت تنش قرار می دهد.



شکل ۶. روند گسترش ترک و گسیختگی نمونه GD1



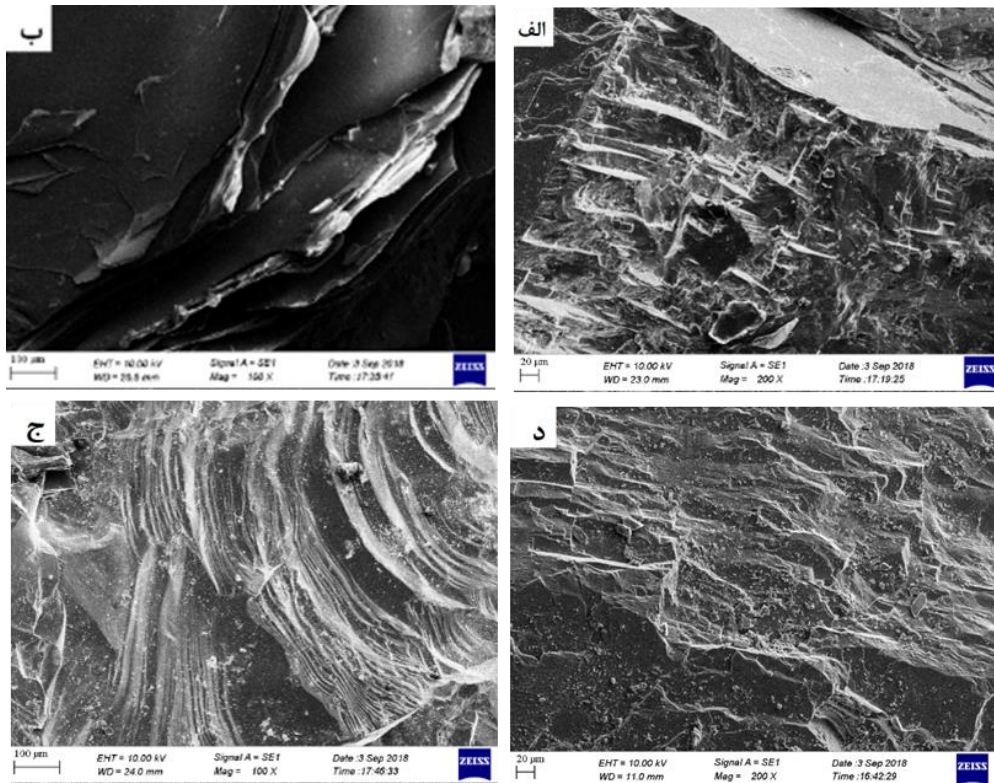
شکل ۷. روند گسترش ترک و گسیختگی نمونه GD2

گسیختگی برشی در بارگذاری دینامیکی، علاوه بر سطح گسیختگی اصلی، تعدادی شکستگی با راستای تقریباً موازی با شکستگی اصلی روی می‌دهد. وجود این شکستگی‌ها در تصاویر شکل ۷ واضح تر است. با این وجود مطالعات مقطع نازک نشان می‌دهد که علاوه بر ترک‌های ماکروسکوپی مشاهده شده در شکل ۷ و ترک مشخص شده با پیکان‌های سفید در شکل ۹ ب، بخش‌هایی که به ظاهر سالم دیده می‌شوند نیز حاوی این شکستگی‌های فرعی برشی هستند (پیکان‌های سیاه در شکل ۹ ب). ترک طولی در نمونه GD1 با مکانیسم کششی ایجاد شده ولی روند توسعه آن مشخص نیست که تحت چه شرایطی بوده است. بررسی رفتار کانی-

به منظور بررسی ویژگی‌های سطح شکست تحت بار دینامیکی، سطوح شکست این دو نمونه با استفاده از مطالعات میکروسکوپ الکترونی و نوری مورد بررسی قرار گرفت. شکست نمونه GD2 برشی بوده که این موضوع از روی تصاویر گرفته شده توسط دوربین سرعت بالا نیز با وجود نشانه‌هایی از قبیل وجود زون شکست به جای یک شکست واحد و فرارگیری زون شکست در منطقه زون برشی، مشخص است. همانطور که از شکل ۸ د مشاهده می‌شود، گسیختگی برشی نمونه GD2 در تصاویر SEM شامل تعداد بسیار زیاد از قطعات کوچک ایجاد شده در زون برشی بر روی سطح گسیختگی می‌باشد. شکل ۹ ب نشان می‌دهد که در

(بیرون کشیدگی ورقه های میکا) و برشی (لهیدگی لبه ورقه-های میکا) در آن دیده می شود. رفتار کانی کوآرتز در سطح شکست به صورت شکست صدفی بوده و به علت شکننده تر بودن، حاوی مقدار بیشتری از ذرات ریز نسبت به دو کانی دیگر می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که هر دو تنش کششی و برشی در رخداد این نوع شکستگی نقش دارد.

های غالب این سنگ در سطح شکست نشان می دهد که سطح شکست یه سطح تمیز نبوده ولی با این حال، شدت حضور خرده کانی های موجود در سطح شکست به شدت شکستگی برشی نیست. سطح شکست فلدسپات به صورت نردبانی بوده (شکل ۸-الف) و پله های شدن آن به خاطر وجود دو جهت رخ موجود در این کانی بوده و حضور مقدار ذرات ریز بر روی آن نشان از عملکرد تنش فشاری دارد. میکاها در امتداد سطح رخ جدا شده (شکل ۸-ب) و نشان هایی از تنش های کششی



شکل ۸. تصاویر SEM از سطح شکست نمونه GD1 (الف-ج) و نمونه GD2 (د)

دچار شکستگی درون بلوری نشده و هنگامی که سطح شکست به این کانی ها می رسد با توجه به جهت رخ، ممکن است تغییر جهت ناگهانی نیز بدهد. لازم به ذکر است هر سه نوع ترک های درون بلوری، مرز بلوری و بین بلوری در کانی ها دیده می شود.

بررسی رفتار کانی ها تحت بار دینامیکی در تصاویر مقطع نازک نشان می دهد که شکستگی اصلی به صورت بین بلوری بوده و به صورت موضعی در اثر عملکرد متفاوت کانی های مختلف، تغییر جهت نیز داده است. همانطور که از شکل ۹الف دیده می شود، میکاها به دلیل رفتار شکل پذیرشان

۴- نتیجه گیری

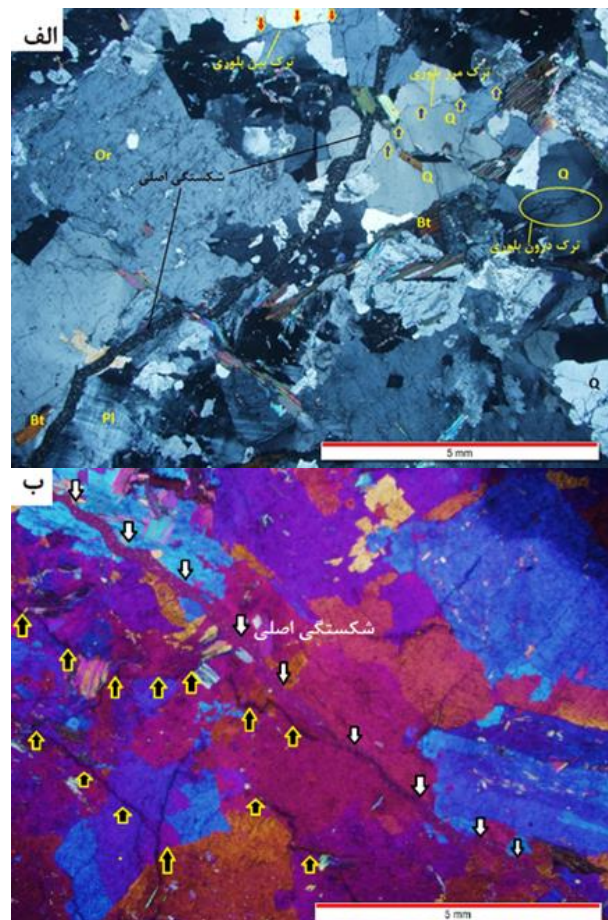
در این پژوهش، رفتار سنگ گرانیتی حفره دار در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل شده است.

- حضور حفره بیضوی باعث گردیده تا مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سنگ تحت بارهای استاتیکی به ترتیب در حدود ۵۱ و ۴۱ درصد کاهش یابد. در واقع وجود حفره باعث تمرکز تنش در اطراف آن و در نتیجه بالا رفتن موضعی سطح تنش شده و منجر به گسیختگی زودتر سنگ شده است.

- وجود حفره باعث ایجاد پله در منحنی تنش- کرنش یا تنش زمان شده و منحنی تعداد انتشار امواج صوتی به صورت دو قله ای بوده که قله اول در لحظه اولیه ایجاد ترک ناشی از تمرکز تنش در اطراف حفره و قله دوم در لحظه گسیختگی کامل نمونه دیده می شود. لازم به ذکر است تراز AE این دو قله کم و بیش مشابه اند. همچنین لحظه شروع اتصال ترک ها در منحنی تجمعی AE در نقطه بیشترین شعاع انحنای خود قرار دارد.

- به دلیل نرخ بارگذاری زیاد در بارگذاری دینامیکی و همچنین وجود اینرسی و نبود زمان کافی برای گسترش ترک، مقاومت دینامیک سنگ افزوده شده و این افزایش در حدی است که مقاومت دینامیک نمونه حفره دار در بازه ای برابر تا بیش از $2/5$ برابر مقاومت فشاری استاتیکی سنگ بکر بدست آمد. همچنین مدول الاستیسته دینامیک سنگ حفره دار در حدود $1/7 - 4/3$ برابر مدول الاستیسته استاتیک سنگ بکر و $2/8 - 7/2$ برابر مدول الاستیسته استاتیک سنگ حفره دار افزایش یافته است.

- با توجه به تصاویر روند آسیب دیدگی سنگ در حین بارگذاری دینامیک، شروع ترک در اطراف حفره و بخصوص در امتداد محور کوچک بیضی بوده و چنانچه تراز تنش به اندازه کافی زیاد باشد زون های برشی توسعه یافته و گسیختگی سنگ را کنترل می کنند. در صورت پایین بودن تراز تنش، تنها ترک کششی ایجاد شده



شکل ۹. تصاویر مقطع نازک تهیه شده در راستای عمود

بر شکستگی اصلی الف: نمونه GD1 و ب: نمونه GD2

در واقع می توان گفت که در ابتدا شکستگی های درون بلوری در کوارتز ایجاد شده و به تدریج با رشد این ریزترک ها به شکستگی های مرزبلوری و بین بلوری تبدیل می شود. کوارتز به خاطر الاستیسته بالاتر بیشترین شدت ترک خوردگی را نشان می دهد. مقایسه تصاویر الف و ب در شکل ۹ نشان می دهد که در شکل الف ریزشکستگی های موازی با شکستگی اصلی دیده نمی شود که می تواند از غالب بودن تنش کششی و پایین بودن شدت تنش اعمالی حکایت کند.

گسترش می یابد.

واحد گسترش می یابد.

- بررسی سطح شکست و رفتار کانی های مختلف نشان می دهد که در کانی های رخ دار مانند فلدسپات ها و میکاها، سطوح رخ نقش بارزی در توسعه شکستگی داشته و شکستگی ها از حالت درون بلوری آغاز شده و با توسعه شکستگی به صورت بین بلوری ادامه می یابد. شکستگی های برشی دارای سطح حاوی ذرات ریز بوده و به صورت چند رشته ای می باشد. این در حالی است که سطح شکستگی کششی تمیز بوده و به صورت شکستگی

تشکر و قدردانی

نویسندگان کمال تشکر را از پرفسور لی ریس گروه مهندسی معدن دانشگاه مرکزی جنوب (Central South University) چین را به خاطر همکاری در انجام این پژوهش دارند. همچنین از آقایان اوما و ژائو به خاطر همکاری در آزمایشگاه و انجام آزمایشات تشکر می گردد.

منابع

- خراسانی، ر.، اجل لوئیان، ر.، جمشیدی، ا.، ۱۳۹۷. برآورد شکنندگی سنگ های گرانیتی مناطق تواندشت و گوشه (شهرستان بروجرد) از سختی و اجتهشی اشमित و خصوصیات پتروگرافی. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران. جلد ۱۱، شماره ۴، ۵۵-۶۷.
- قبادی، م.ح.، رسولی فرح، م.ر.، ۱۳۹۱. مطالعه خصوصیات زمین شناسی مهندسی گرانیت های بروجرد. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد ۵، شماره ۱ و ۲، ۱-۱۶.
- Huang, Y.H., Yang, S.Q., Ranjith, P.G., Zhao, J., 2017. Strength failure behavior and crack evolution mechanism of granite containing pre-existing non-coplanar holes: Experimental study and particle flow modeling. *Computers and Geotechnics*, 88: 182–198.
- International Society for Rock Mechanics., 1981. Rock characterization testing and monitoring. In: Brown ET (ed) ISRM suggested methods. Pergamon press, Oxford.
- Kolsky, H., 1949. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading,” *Proceedings of the Physical Society. Section B* 62 (11):pp. 676.
- Li, X.B., Tao, M., Chengqing, W., Du, K., Qiuhong, W., 2017. Spalling strength of rock under different static pre-confining pressures. *International Journal of Impact Engineering*, 99: 69-74
- Li, X.B., Zhou, Z.L., Lok, T., Hong, L., Yin, T.B., 2008. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads. *Int J Rock Mech Min Sci*, 45(5): 739–48.
- Mishra, S., Rao, K.S., Gupta, N.K., Kumar, A., 2018. Damage to shallow tunnels in different geomaterials under static and dynamic loading *Thin-Walled Structures*, 126: 138–149.
- Momeni, A., Karakus, M., Khanlari, G.R., Heidari, M., 2015. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 77: 89–96.
- Momeni, A., Hashemi, S.S., Khanlari, G.R., Heidari, M., 2017. The effect of weathering on durability and deformability properties of granitoid rocks. *Bull Eng Geol Environ*, 76 (3): 1037-1049.
- Tao, M., Zhao, H., Li, X.B., Li, X., Du, K., 2018. Failure characteristics and stress distribution of pre-stressed rock specimen with circular cavity subjected to dynamic loading. *Tunnelling and Underground Space Technology* 81: 1–15.
- Tao, M., Ma, A., Cao, W., Li, X., Gong, F., 2017. Dynamic response of pre-stressed rock with a circular cavity subject to transient loading. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 99: 1–8.
- Zhou, Z., Li, X., Zou, Y., Jiang, Y., Li, G., 2014. Dynamic Brazilian tests of granite under coupled static and dynamic loads. *Rock Mech Rock Eng*, 47 (2): 495–505.