[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

بررسی تأثیر جهت‌یابی حفره روی پاسخ ماسه سنگ‌های حفره‌دار در برابر بارهای استاتیکی تراکمی و دینامیکی کششی

علی اکبر مومنی*؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکدهٔ علوم زمین،
مینگ تااو؛ دانشگاه CSU چین، دانشکدهٔ مهندسی منابع و ایمنی،
علیرضا طالب بیدختی؛ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)،
دانشکدهٔ علوم پایه گروه زمین‌شناسی

تاریخ: دریافت ۹۸/۰۸/۱۵ پذیرش ۹۹/۰۱/۱۵

چکیده

تونل‌های کم‌عمق نقش حیاتی در برنامه‌ریزی شهری و خطوط حمل و نقل ریلی و جاده‌ای دارند. وجود این حفرات زیرسطحی می‌تواند باعث تمرکز تنش شده و ناپایداری این فضاها را در برابر بارهای استاتیکی و به‌ویژه دینامیکی، در پی داشته باشد. از این‌رو، هدف از این پژوهش ارزیابی تأثیر وجود حفره بیضوی و جهت‌یابی آن بر رفتار ماسه سنگ تحت بارهای استاتیکی فشاری و دینامیکی کششی است. به‌منظور ارزیابی تأثیر حفره در برابر شرایط تنش استاتیکی دو گروه از مغزه‌های ماسه سنگی بدون حفره و حفره‌دار با جهت‌یابی ۰، ۳۰، ٦۰ و ۹۰ درجه فراهم شده و تحت آزمون بارگذاری فشاری تک‌محوری قرار گرفتند. حین آزمون علاوه بر ثبت تنش، با به‌کار بردن کرنش سنج، سنسور ثبت انتشار امواج صوتی و دوربین، آسیب و تغییر شکل‌پذیری نمونه‌ها ثبت شد. برای انجام آزمون بارگذاری دینامیکی از دستگاه میلهٔ فشار هاپکینسون استفاده شد. به‌علاوه روند گسترش آسیب با استفاده از دوربین با سرعت زیاد با نرخ یک عکس در ۱۰ میکروثانیه، ثبت شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که وجود حفره باعث کاهش مقاومت سنگ در بیش‌ترین حالت (θ=۰) تا ۵۵ درصد و در کم‌ترین حالت (θ=۹۰) تا ۷۷ درصد مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود. آزمون بارگذاری دینامیکی کششی نشان می‌دهد که حفره بیضوی نزدیک‌تر به مرز انعکاس موج فشاری به کششی به‌علت قرارگیری در منطقه سوپر پوزیشن سالم مانده در حالی‌که

*نویسنده مسئول ali_moomeni@yahoo.com

حفره موجود در خارج از این منطقه با هر جهت یابی دچار گسیختگی ورقه‌ای شده است. بررسی سطح شکست با استفاده از بررسی میکرسکوپ الکترونی و مقطع نازک نشان داد که شکستگی غالب از نوع مرز بلوری بوده است و سیمان اکسید آهن نقش کلیدی در توسعه این نوع شکستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: ماسه سنگ، حفره بیضوی، تمرکز تنش، بارگذاری دینامیکی، گسیختگی ورقه‌ای

مقدمه

در مقایسه با سنگ‌های آذرین و دگرگونی، بخش زیادی از سطح زمین با ضخامت نازکی از سنگ‌های رسوبی پوشیده شده است. ماسه سنگ‌ها یکی از انواع سنگ‌های رسوبی تخریبی بوده است که رخنمون قابل توجه‌ای دارند. بنابراین بسیاری از پروژه‌های مهندسی با این نوع سنگ درگیر هستند. با توجه به رشد سریع جمعیت و شهرها، توسعهٔ فضاهای زیرزمینی کم عمق به‌منظور ساخت پناهگاه، تونل‌های مترو، تونل‌های راه و راه آهن، زاغه‌های مهمات و غیره، یکی از اصول مهم برنامه‌ریزی شهری و زیرساخت‌های لازم برای توسعهٔ پایدار است. تاریخچهٔ ادبیات مکانیک سنگ نشان می‌دهد که محققان بسیاری رفتار ماسه سنگ‌ها را بررسی کرده‌اند. بررسی این کارهای پژوهشی نشان می‌دهد که عمده این پژوهش‌ها روی رفتار مهندسی ماسه سنگ بکر در برابر بارهای استاتیکی و خستگی بوده است [۱]، [۲]، [۳] و رفتار این نوع سنگ در شرایط بار دینامیکی و یا زمانی که حاوی حفره و فضای خالی است، کم‌تر بررسی شده است.

به‌علت رخداد مکرر بارگذاری دینامیکی طبیعی یا مصنوعی ناشی از زلزله یا انفجار بر روی تونل‌های کم‌عمق، در دو دههٔ گذشته برخی از محققان به‌منظور ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر حفره در تمرکز تنش و مکانیک شکست، بر رفتار دینامیکی سنگ‌های حفره‌دار متمرکز شده‌اند. پرکاربردترین فناوری استفاده شده به‌منظور تعیین رفتار دینامیکی سنگ‌ها در نرخ‌های کرنش متوسط و زیاد آزمایش میلهٔ فشاری هاپکینسون است. لی و همکاران این دستگاه را بهسازی کردند و با به‌کار بردن یک ضربه زننده دوکی شکل توانستند موج نیمه‌سینوسی ایجاد کنند که باعث نرخ کرنش ثابت می‌شود [٤]. ژائو و همکاران با استفاده از میلهٔ فشاری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

هاپکینسون مقاومت کششی سنگ‌های گرانیتی را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی بررسی و مشاهده کردند که با افزایش تنش محصورکننده استاتیکی، مقاومت کششی کاهش می‌یابد [۵]. دایی و همکاران با استفاده از این دستگاه، مقاومت فشاری و کششی دینامیکی سنگ را ارزیابی کردند [٦]. نتایج بررسی آنها نشان داد که مقاومت فشاری و کششی سنگ با افزایش نرخ بارگذاری، افزایش می‌یابد. فخیمی و همکاران با انجام یک سری آزمون‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، رفتار دینامیکی نوعی ماسه سنگ را ارزیابی کردند [۷]. آنها ضریبی تحت عنوان ضریب تقویت مقاومتی را برای هم‌خوانی بهتر نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، معرفی کردند. پژوهش‌های ذکر شده همگی روی سنگ بکر انجام شده‌اند. این در حالی است که وجود حفره باعث تغییر در وضعیت تنش‌ها شده و اطراف حفره یک زون تمرکز تنش ایجاد می‌شود. این تمرکز تنش می‌تواند باعث ایجاد آسیب جدی و حتی گسیختگی سنگ شود. هوانگ و همکاران رفتار گرانیت حاوی سه حفری دایره‌ای را در برابر تنش تراکمی تک‌محوری با استفاده از آزمون آزمایشگاهی استاتیکی و مدل‌سازی عددی بررسی کردند و الگوی توسعه ترک در سنگ دربرگیرنده حفره را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که مدل‌سازی PFC توانایی زیادی در ارزیابی شکست ناشی از تمرکز تنش در اطراف حفره دارد [۸]. تااو و همکاران با استفاده از آزمایش میله فشاری هاپکینسون اصلاح شده و شبیه‌سازی عددی، تأثیر فشار جانبی و شرایط فشار اولیه را بر رفتار دینامیکی گرانیت حاوی حفره دایره‌ای با قطر ۱ سانتی‌متر را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که شرایط تنش اولیه استاتیکی، بر رفتار سنگ در برابر بار دینامیکی تأثیر به‌سزایی دارد [۹]، [۱۰]. نادی و همکاران با استفاده از آزمایش هاپکینسون رفتار دینامیکی ماسه سنگ بکر را بررسی کرده و دریافتند که به‌علت نرخ کرنش زیاد، مقاومت دینامیکی سنگ به مقدار چشم‌گیری افزایش می‌یابد [۱۱].

معمولاً فضاهای زیر سطحی در برابر بارهای لرزه ای پایداری بیش‌تری نسبت به سازه‌های سطحی دارد. هم‌چنین فضاهای زیرسطحی در برابر بارهای دینامیکی فشاری معمول، کم و بیش پایدار بوده است هرچند چنان‌چه بار دینامیکی وارده شدید باشد، مانند بارگذاری دینامیکی ناشی از زلزله‌های بزرگ، ناپایداری رخ می‌دهد. با این وجود به‌دلیل کم

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

بودن مقاومت کششی سنگ در برابر مقاومت فشاری آن، تنش‌های دینامیکی کششی می‌توانند حتی در رخدادهای لرزه‌ای نه چندان شدید، باعث آسیب به فضاهای زیرسطحی شوند که اصطلاحاً به آن گسیختگی ورقه‌ای (اسپالینگ) گفته می‌شود. اسپالینگ به گسیختگی مواد تحت کشش ایجاد شده به‌دلیل بازتاب موج فشاری در محل تغییر یک ماده به ماده‌ای دیگر با امپدانس صوتی کم‌تر، گفته می‌شود [۱۲]. سنگ‌ها از جمله مصالحی هستند که تحت بارگذاری دینامیکی مستعد گسیختگی اسپالینگ است و در بسیاری از پروژه‌های مهندسی مانند دیواره تونل‌ها و مغارهای زیرزمینی نیز گزارش شده است [۱۳]. اخیراً استفاده از میله فشاری هاپکینسون برای ارزیابی گسیختگی اسپالینگ مصالح سنگی یا شبه سنگ مانند بتن، به‌طور چشم‌گیری توسعه یافته است. لی و همکاران رفتار اسپالینگ سنگ گرانیتی تحت تنش محصور کننده اولیه بررسی کردند و نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت اسپالینگ سنگ با افزایش تنش محصور کننده کاهش می‌یابد [۱۳]. ژائو و همکاران با استفاده از میله فشاری هاپکینسون، بر ماسه سنگ‌های تحت فشار اولیه آزمون اسپالینگ را انجام دادند و نتایج مشابهی با پژوهش لی و همکاران گزارش کردند [١٤].

بررسی کارهای قبلی نشان می‌دهد که عمده آزمون‌های اسپالینگ انجام شده بر سنگ بکر یا سنگ حاوی حفره دایره‌ای انجام شده است. در این پژوهش رفتار مقاومتی ماسه سنگ حاوی حفره بیضوی تحت بار استاتیکی فشاری و دینامیکی کششی بررسی می‌شود. هم‌چنین در هر دو گروه آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی حفره بیضوی حداقل در ٤ جهت مختلف نسبت به امتداد بارگذاری تست شده تا تأثیر جهت‌یابی حفره روی مقاومت استاتیکی و دینامیکی ماسه سنگ‌ها بررسی شود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور انجام این پژوهش یک بلوک ماسه سنگی از معدنی در شهر لین‌یی واقع در استان شاندونگ چین تهیه شد و برای تهیهٔ مغزه‌ها و تیرهای سنگی مناسب به آزمایشگاه دانشگاه CSU[1] انتقال داده شد. مغزه‌های تهیه شده به‌منظور انجام آزمون‌های فشاری

1. Central South University

استاتیکی دارای نسبت طول به قطر ۲ و قطر ۵۰ میلی‌متر بوده‌اند. سطوح انتهایی این مغزه‌ها مطابق با استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ[1] آماده و در دو گروه دست‌نخورده و حفره‌دار تقسیم شدند [۱۵]. حفره ایجاد شده در این مغزه‌ها بیضوی با محور بلند ۱/۵ سانتی‌متر و محور کوتاه ۱ سانتی‌متر است که نسبت به محور مغزه، محور بلند بیضی در چهار جهت با زاویهٔ ۰، ۳۰، ٦۰ و ۹۰ درجه آرایش یافته است. به‌منظور ایجاد این حفرات بیضوی در نمونه‌ها از جت آب استفاده شد. قبل از انجام آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری، بر این مغزه‌ها کرنش سنج الکترونیکی و سنسور ثبت انتشار امواج صوتی نصب شد تا رفتار کرنشی و روند توسعه آسیب به هنگام بارگذاری ثبت و ارزیابی شود. به‌علاوه از یک دوربین با نرخ فریم بالا برای ثبت روند توسعه ترک در نمونه‌ها استفاده شد. لازم به ذکر است که آزمون‌های استاتیکی به‌وسیلهٔ یک دستگاه سروکنترل MTS و به‌روش جابه‌جایی کنترل انجام شد (شکل ۱).

به‌منظور ارزیابی مقاومت دینامیکی کششی و تأثیر جهت‌یافتگی حفره بر آن تعدادی تیر سنگی با سطح مقطع مربعی با اندازه اضلاع ٤ سانتی‌متری و طول ٦۵ سانتی‌متر تهیه شد. به مانند آزمون استاتیکی، این تیرهای سنگی نیز به دو گروه سالم و حفره‌دار تقسیم شدند. در هر تیر حفره‌دار، دو حفره بیضوی با محور بلند ۱۰ میلی‌متر و محور کوتاه ۲ میلی‌متر در چهار راستای ۰، ۳۰، ٦۰ و ۹۰ درجه نسبت به محور تیر ایجاد شد. جانمایی این حفرات به این صورت است که یکی از حفرات در فاصله ۸ سانتی‌متری از انتهای آزاد نمونه و دیگری در فاصله ۲۸ سانتی‌متری از انتهای متصل به میله دستگاه، قرار دارد. در این پژوهش از دستگاه میله فشاری هاپکینسون دانشگاه CSU استفاده شد. چنان‌که در شکل ۲ دیده می‌شود این سیستم شامل مخزن گاز نیتروژنی است که گاز از آن وارد تفنگ گازی می‌شود. هنگام باز کردن شیر تفنگ، فشار گاز باعث به حرکت در آمدن ضربه زننده[2] دوکی شکل شده و متناسب با سرعت حرکت آن، ضربه‌ای بـه میلهٔ ورودی وارد شده که تولید موج نیم‌سینوسی

1. ISRM
2. Striker

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

فشاری[1] می‌کند. هنگام رسیدن این موج به نمونه، به‌علت تفاوت در دانسیته میلهٔ فولادی و سنگ، بخشی از این انرژی به‌صورت موج کششی منعکس شده[2] و بخش دیگری از آن وارد



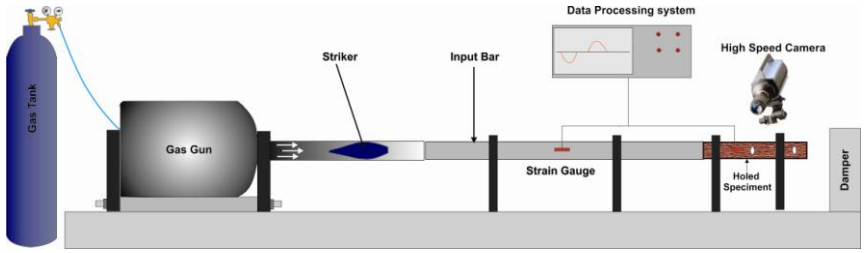
شکل ۱. تجهیزات استفاده شده در آزمون مقاومت فشار تک‌محوری استاتیکی

نمونه شده و از آن عبور می‌کند[3]. به محض رسیدن موج به استرین گیج نصب شده در میله ورودی، دستگاه سیگنال را دریافت کرده و از طریق اسیلوسکوپ به دوربین با سرعت زیاد

1. Incident wave
2. Reflected wave
3. Transmitted wave

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

دستور فیلم‌برداری را می‌دهد. دوربین با سرعت زیاد به‌کار برده شده در این پژوهش (FASTCAM SA 1.1) توانایی گرفتن ۱۰۰۰۰۰ فریم در ثانیه با رزولوشن 176×320 را دارا بوده و علارغم نرخ کرنش بالا در این آزمایش، این امکان را فراهم می‌کند تا روند توسعه آسیب در نمونه ثبت شود. لازم به ذکر است که علاوه بر تحلیل رفتار دینامیکی و توسعه گسیختگی به‌وسیلهٔ عکس‌های دوربین با سرعت زیاد، سطح گسیختگی از طریق تهیه مقطع نازک و هم‌چنین آنالیز SEM ارزیابی شد.



شکل ۲. اجزای آزمون میله فشاری‌هاپکینسون اصلاح شده استفاده شده در این پژوهش

نتایج و بحث

آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری استاتیکی

آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری استاتیکی روی نمونه‌های دست نخورده و حفره‌دار انجام شده که نتایج آن در جدول ۱ و شکل ۳ ارائه شده است. میانگین مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول الاستیسیته برای ماسه سنگ سالم به‌ترتیب ٦٧/٩ مگاپاسکال و ۱۲/۱ گیگاپاسکال به‌دست آمد. این در حالی است که مقادیر میانگین این پارامترها برای مغزه‌های حاوی حفره بیضوی کاهش چشم‌گیری از خود نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود کم‌ترین مقاومت به‌دست آمده با میانگین ۳۰/٦ مگاپاسکال برای حالتی است که قطر بزرگ بیضوی افقی و عمود بر محور مغزه بوده (حالت صفر درجه) است. در این وضعیت به‌علت این‌که محدوده تحت تنش کششی ناشی از توزیع مجدد تنش اطراف حفره نسبت به بقیه آرایش‌های حفره بیش‌تر است، مقاومت سنگ به مقدار ۵۵ درصد مقاومت حالت بدون حفره، کاهش می‌یابد. با افزایش زوایهٔ چرخش قطر بزرگ بیضوی مقاومت سنگ بالا رفته

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

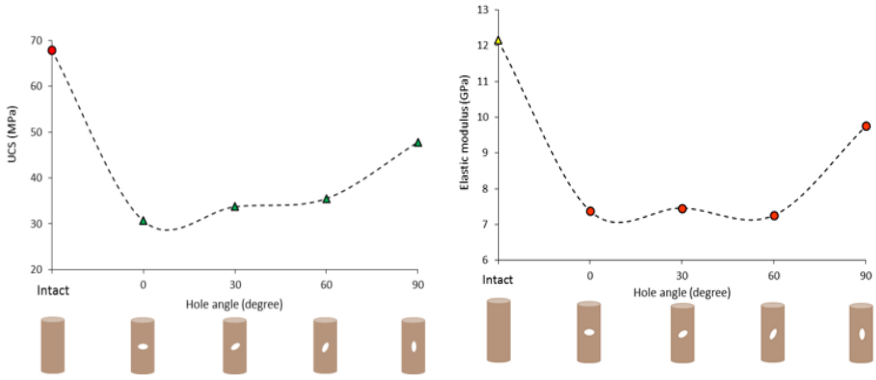
به‌طوری که در حالتی که قطر بزرگ بیضی به موازات محور بارگذاری و عمود بر سطح افق است (حالت ۹۰ درجه) این مقاومت به ٤٧/٨ مگاپاسکال رسیده که برابر با ۷۰ درصد مقاومت سنگ سالم است. بررسی تغییرات مدول الاستیسیته نشان می‌دهد که در صورت نادیده گرفتن نتایج نمونه‌های ۱ و ۲ مغزه‌های حاوی حفره ٦۰ درجه، روند تغییرات مدول الاستیسیته کاملاً منطبق بر روند تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری بوده است و کم‌ترین مقدار برای حالت صفر درجه به‌دلیل زیاد بودن شعاعی انحنای سقف حفره و بیش‌ترین مقدار برای حالت ۹۰ درجه با کم‌ترین شعاع انحنای سقف حفره، است. نتایج نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته در مقایسه با مقاومت فشاری تأثیرپذیری کم‌تری نسبت به حفره داشته ولی با این وجود ایجاد فضای مناسب برای جابه‌جایی ذرات سنگ و کرنش محوری در اثر وجود حفره باعث شده تا این پارامتر در بازه ۲۰ تا ۳٦ درصد مقدار اولیه خود در سنگ بکر، کاهش یابد.

جدول ۱. نتایج آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت استاتیکی

شماره نمونه	وضعیت نمونه	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
S1	مغزه دست‌نخورده	63.9	10.5
S2		74.7	13.1
S3		67.7	14.2
S4		68.14	11.8
S5		65.2	10.9
S-0-1	مغزه با بیضوی ۰ درجه	29.5	7.2
S-0-2		31.6	8.4
S-0-3		30.8	7.6
S-30-1	مغزه با بیضوی ۳۰ درجه	37.3	8.5
S-30-2		35.4	7.3
S-30-3		30.6	6.8
S-30-4		30.1	8.1
S-30-5		35.1	6.6
S-60-1	مغزه با بیضوی ٦۰ درجه	20.8	4.5
S-60-2		25.2	5.6
S-60-3		45.4	7.5
S-60-4		40.0	8.1
S-60-5		45.9	10.3
S-90-1	مغزه با بیضوی ۹۰ درجه	47.4	9.8
S-90-2		50.0	11.3
S-90-3		46.9	10.4
S-90-4		47.0	7.5

به‌منظور ارزیابی روند باربری مغزه‌ها در حالت حفره‌دار یا بدون حفره، نمودار تنش–زمان به‌همراه داده‌های انتشار امواج فراصوتی در شکل ٤ نشان داده شده است. در این شکل، رفتار

نمونه S2 به‌عنوان نماینده سنگ بکر نشان می‌دهد که پس از گذشت حدود ۱۰۰ ثانیه از بارگذاری، منحنی تجمعی انتشار امواج صوتی به‌آرامی شروع به افزایش کرده و از محور افقی جدا می‌شود. این تغییر می‌تواند نشان‌دهندهٔ این مطلب باشد که در این زمان سنگ وارد فاز پلاستیک شده و ایجاد ریزترک‌ها شروع شده است. با وجود این تا لحظهٔ شکست نمونه در تنش حداکثر، پیک چشم‌گیری در داده انتشار امواج صوتی مشاهده نمی‌شود. روند تغییرات تنش با زمان نیز به‌طور پیوسته تا لحظه پیک تنش افزایش یافته و پس از رخداد گسیختگی با شیب بسیار زیادی کاهش می‌یابد. هم‌چنین حداکثر پیک منحنی تعداد AE و پیک مقدار تنش تقریباً برهم منطبق است و نشان می‌دهد که بیش‌ترین تعداد صدای ترک خوردگی و گسیختگی در لحظهٔ تراز تنش حداکثر اتفاق افتاده است.



شکل ۳. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های ماسه سنگی در آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری استاتیکی

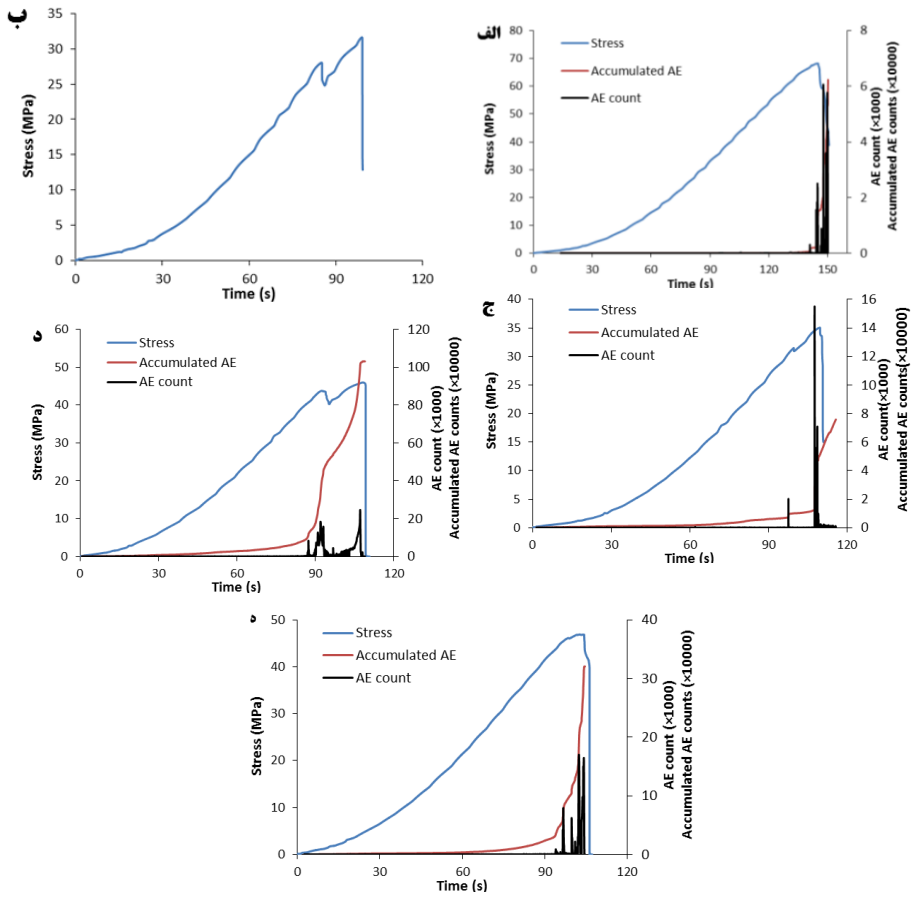
منحنی تنش-زمان برای سنگ بکر به‌صورت تک قله‌ای است (شکل ٤ الف). این در حالی است که منحنی‌های تنش-زمان برای نمونه‌های حفره‌دار تماما دو قله‌ای است. برای نمونه‌های با حفره صفر درجه داده برداری انتشار امواج صوتی با شکست مواجه شده و تنها منحنی تنش زمان نشان داده شده است (شکل ٤ ب). بررسی نمودار تغییرات تنش با زمان برای نمونه S-0-2 به‌عنوان نمایندهٔ نمونه‌های حاوی حفره صفر درجه نشان می‌دهد که در تراز تنشی معادل ۸۸ درصد مقاومت نهایی نمونه سنگ یک شکست اولیه‌ای را متحمل شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

و پس از کاهش باربری به اندازهٔ ٤ مگاپاسکال دوباره نمونه تا نقطه مقاومت نهایی باربری داشته است. شکل (٤ ج) مربوط به نمونهٔ S-30-5 است و چنان‌که دیده می‌شود پس از ٦٠ ثانیه از شروع بارگذاری منحنی تجمعی AE از محور افقی جدا شده و با شیب نسبتاً ثابت و کمی شروع به افزایش می‌کند. در ۹۷ ثانیه پس از بارگذاری و در تراز ۸۹ درصد مقاومت نهایی، منحنی تنش به ناگهان کاهش یافته و شیب منفی از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که میزان کاهش تنش این نمونه نسبت به دیگر نمونه‌های با حفره ۳۰ درجه کم‌تر بوده است. هم‌زمان با این کاهش تنش، سنسور AE تعداد ۲۰۱۷ پالس موج صوتی ثبت کرده و نشان از رخداد شکست اولیه سنگ دارد. شکل (٤ د) مربوط به نمونه S-60-5 است و نشان می‌دهد که منحنی تجمعی AE پس از ٤٠ ثانیه از شروع آزمایش از محور افقی جدا شده و به آرامی زیاد می‌شود تا در زمانی نزدیک به ۹۰ ثانیه پس آزمایش ناگهان افزایش چشم‌گیری از خود نشان داده به‌طوری‌که منحنی دارای نقطه عطف تغییر شیب است. منحنی تنش-زمان نیز در این لحظه که معادل ۹۲ درصد مقاومت نهایی سنگ است، کاهشی ناگهانی نشان داده و به شکست رخداد اولیه گواهی می‌دهد. ۱۰۷ ثانیه پس از آزمایش تعداد ٢٤٤٥٢ پالس AE ثبت شده و باعث می‌شود که منحنی تجمعی AE با شیب نزدیک به قائم شروع به افزایش نماید و نقطه عطف دوم ظاهر شود. بدین‌معنی که چنان‌چه دو بخش خطی منحنی تجمعی را ادامه دهیم در یک نقطه یک‌دیگر را قطع می‌کنند که تراز تنش مربوط به زمان این نقطه، تنش شروع اتصال ترک‌های ایجاد شده است. شکل (٤ ه) مربوط به نمونهٔ S-90-3 است و نشان می‌دهد در لحظهٔ زمانی ۱۰۰ ثانیه یک پالس نسبتاً قوی از AE ثبت شد. منحنی تنش در این لحظه که در تراز ۹۸ درصدی مقاومت نهایی است نیز یک کاهش خفیفی نشان داده و از رخداد شکست اولیه ضعیف و کرنش پیوسته حکایت دارد. در بازهٔ ۱۰۲ تا ۱۰٤ ثانیه نیز چند پالس قوی ثبت شد و تنش در تراز حداکثر ثابت ماند. در واقع در این مرحله رشد ترک‌ها و اتصال آنها به‌هم رخ داده تا در نهایت در لحظه ۱۰٤ ثانیه نمونه گسیخته می‌شود. علاوه بر داشتن دو قله تنش برای نمونه‌های حاوی حفره، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویهٔ جهت‌یابی حفره نسبت به افق، تراز تنش مربوط به قله اول نسبت به مقاومت نهایی، افزایش یافته و هم‌چنین شدت کاهش تنش در قله اول نیز کاهش می‌یابد.

با توجه به تأثیر جهت‌یابی حفره بر مقاومت ماسه سنگ‌های بررسی شده، احتمال این‌که الگوی شکست نیز از این پارامتر متأثر شود، وجود داشت. از این‌رو، در شکل ۵ روند ظاهر شدن ترک تا گسیختگی نمونه نشان داده شده است. برای نمونه‌های با حفره افقی (S-0-3) وقتی تراز تنش به مرحله ایجاد ترک می‌رسد، ابتدا در محل تمرکز تنش فشاری در دیواره‌ها ترک ظاهر می‌شود. در ادامه با رشد این ترک‌ها که ماهیت برشی دارند، در کف حفره و در محدودهٔ کششی یک ترک کششی به موازات محور بارگذاری ظاهر می‌شود. با افزایش تنش



شکل ٤. نمودار تنش و AE در برابر زمان برای نمونه‌های مختلف الف) S2، ب) S-0-2، ج) S-30-5، د) S-60-5، ه) S-90-3

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

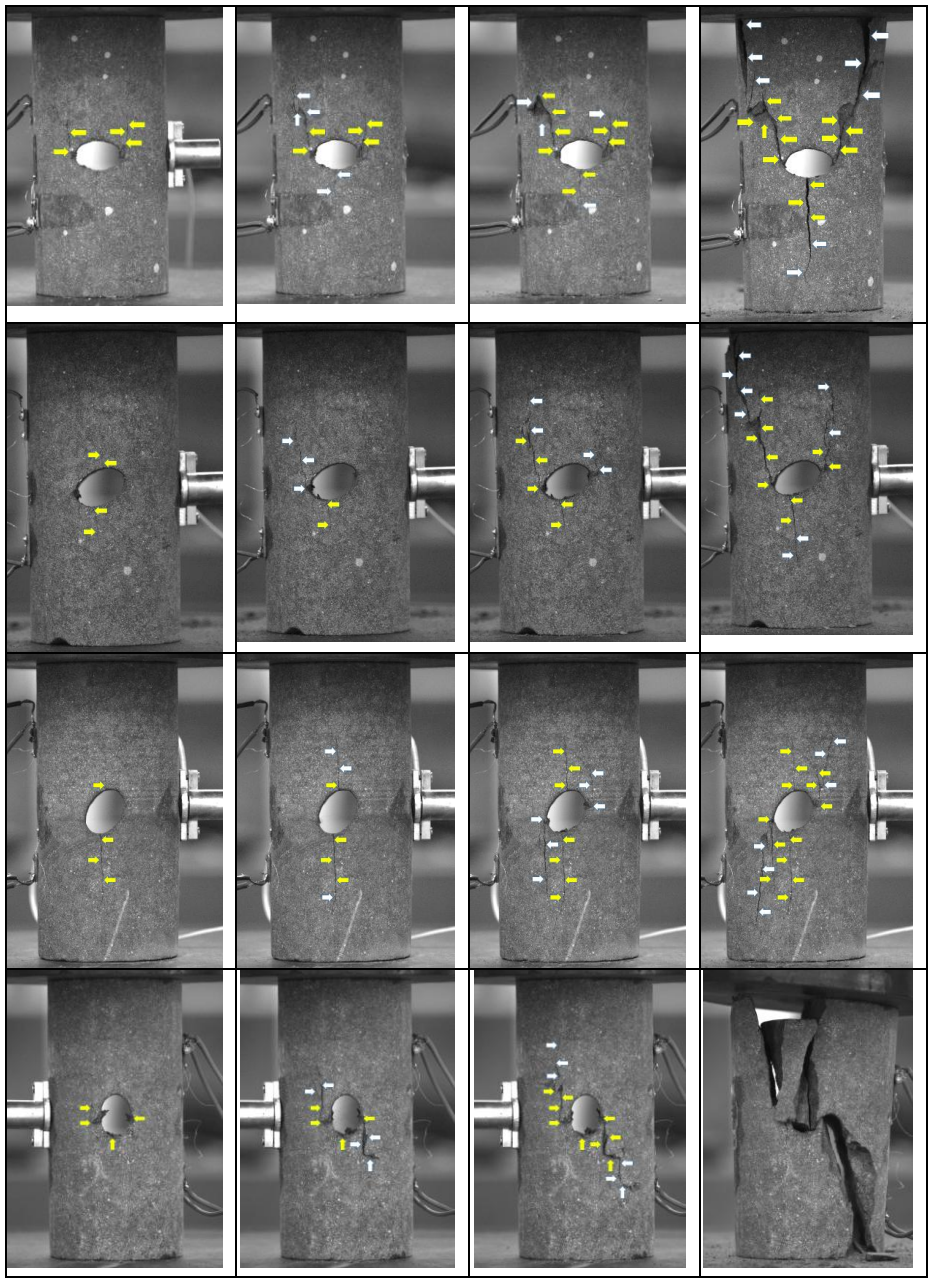
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

این سه ترک اصلی رشد کرده و الگوی شکست Y شکل کامل می‌شود. روند گسترش ترک در نمونه با جهت یافتگی ۳۰ درجه برای حفره بیضوی کم و بیش مشابه با نمونه با حالت صفر درجه است. با افزایش تنش ابتدا در محل دیواره چپ ترک برشی و در کف حفره ترک کششی ظاهر می‌شوند. در ادامه با رشد این ترک‌ها، در محل دیواره سمت راست نیز ترک برشی دوم ظاهر می‌شود. برعکس نمونه با حفره صفر درجه، در این نمونه الزاماً ترک‌های برشی در محلی که حفره کم‌ترین شعاع انحنا را داشته ظاهر نشده و هم‌چنین ترک کششی در محلی که بیش‌ترین شعاع انحنا وجود دارد ایجاد نشده است. در نهایت الگوی Y ناقص نشان‌دهنده سطوح گسیختگی است. با افزایش جهت یافتگی حفره به ٦۰ درجه (S-60-2)، الگوی گسیختگی تغییر می‌یابد. ابتدا امتداد محور نمونه دو ترک کششی ظاهر شده و شروع به رشد می‌کنند. با افزایش سطح تنش وارده به سنگ، تمرکز تنش در دیواره به مقدار لازم رسیده و ترک برشی در دیواره سمت راست ظاهر شده و با رشد این ترک‌ها نمونه گسیخته شده و باربری خود را از دست می‌دهد. در حالتی که امتداد بیضوی در امتداد محور مغزه قرار دارد (S-90-3) با رسیدن تراز تنش به نقطه تسلیم و گذر از آن، به‌علت تمرکز تنش در دیواره، قطعاتی از دیواره به‌سمت داخل حفره، شبیه به آن‌چه که در اثر پدیده انفجار سنگ[1] اتفاق می‌افتد، پرتاب شده و هم‌چنین حالتی شبیه اسپالینگ در کف حفره مشاهده می‌شود. در ادامه با افزایش تراز تنش، ترک‌های برشی تشکیل شده در دیواره شروع به رشد کرده و خود را به لبه مغزه می‌رسانند. در نهایت گسیختگی تک صفحه مانند آن‌چه در اغلب آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر دیده می‌شود، تشکیل می‌شود.

آزمون‌های دینامیکی

به‌منظور بارزتر شدن اثر جهت یابی حفره بر رفتار دینامیکی سنگ، قطر بزرگ بیضوی ۱۰ میلی‌متر و قطر کوچک آن ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. هم‌چنین فشار گاز ۰/۳۲ بار در نظر گرفته شده تا شدت موج ایجاد شده به اندازه‌ای نباشد که نمونه را تحت موج فشاری بشکند. پس از باز کردن شیر تفنگ گازی با فشار ۰/۳۲ بار، میله ضربه زن به‌سمت جلو رانده شده و به سطح مقطع میلهٔ ورودی برخورد کرده و متناسب با شدت برخورد موجی فشارشی با دامنهٔ مشخص در میله ورودی منتشر می‌شود و در طول این میله به‌سمت نمونه حرکت می‌کند.

1. Rock burst



شکل ۵ . الگوی توسعهٔ ترک در نمونه‌های ماسه سنگی با جهت‌یافتگی متفاوت حفره

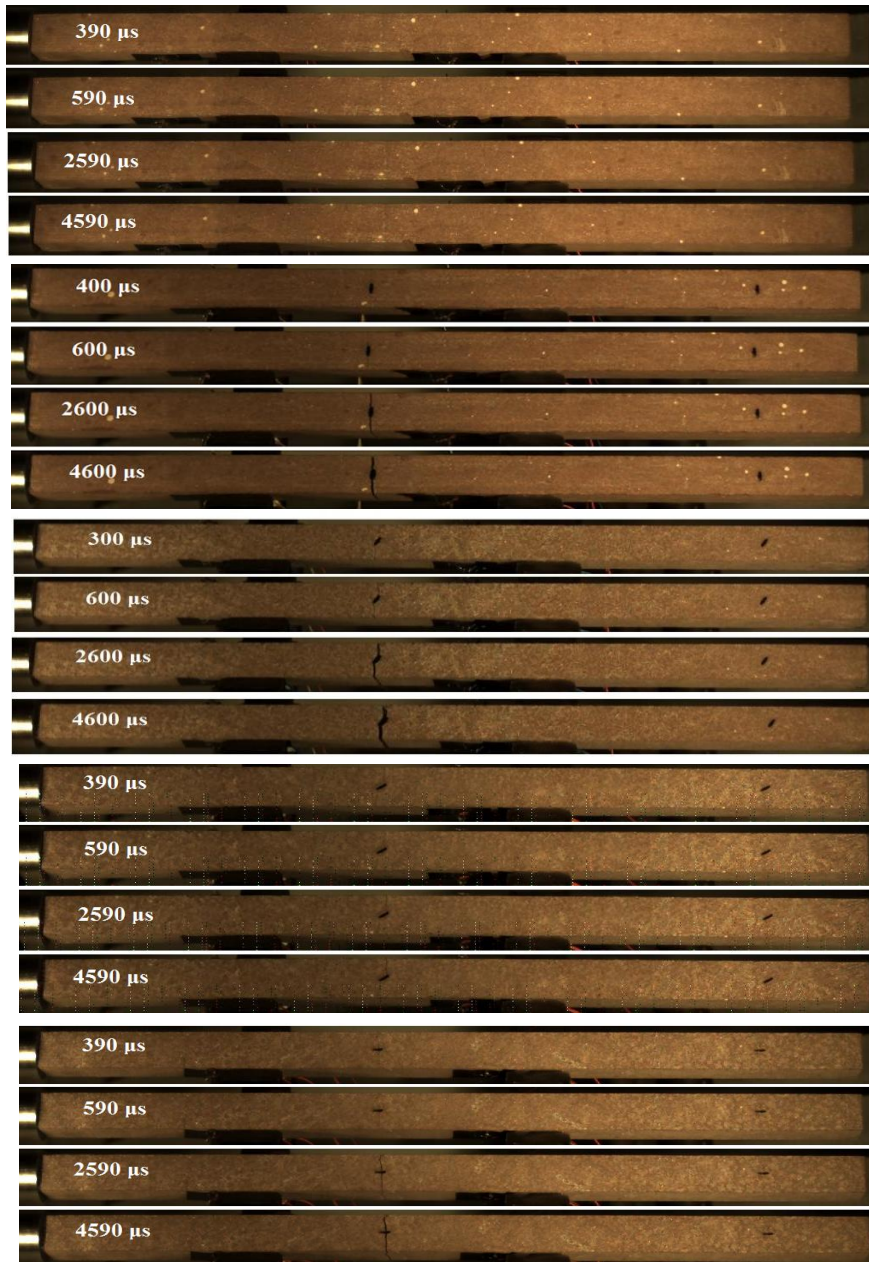
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

وقتی موج منتشر شده به حد فاصل میله و نمونه می‌رسد، به دو قسمت تقسیم می‌شود که قسمت اول به داخل میله ورودی به‌صورت موج کششی بازگشته که به آن موج برگشتی گفته می‌شود. قسمت دوم موج بدون تغییر ماهیت از داخل نمونه عبور کرده و وقتی به انتهای نمونه می‌رسد، به‌دلیل پایین بودن دانسیته و امپدانس صوتی هوا در مقابل نمونه سنگی، به مانند مرز میله فولادی و سنگ، موج فشاری به‌صورت موج کششی بازتاب شده و در طول نمونه حرکت می‌کند. علی‌رغم کم بودن شدت موج کششی بازتاب شده در برابر موج فشاری اولیه، کم‌تر بودن مقاومت کششی سنگ می‌تواند باعث شود تا موج انعکاسی شدت لازم برای گسیختگی اسپالینگ سنگ داشته باشد.

فرایند گسیختگی نمونه با حفرات بیضوی در جهات مختلف به‌وسیلهٔ دوربین با سرعت زیاد ثبت شده است (شکل ٦). لازم به ذکر است که زمان ثبت شده روی این تصاویر از لحظه رسیدن موج به کرنش سنج است و به‌علت تعداد زیاد عکس‌های گرفته شده برای هر آزمون (۳۰۹۲ عکس)، امکان آوردن تمامی آنها مقدرو نیست و تنها در چهار زمان آورده می‌شود. چنان‌که در شکل ٦ دیده می‌شود، نمونه سنگ بکر فاقد حفره در برابر این بار گسیخته نشده است، در حالی که نمونه‌های حاوی حفره همگی از دیواره حفره دوم (حفره نزدیک به میله ورودی) دچار گسیختگی شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که این حفرات باعث تمرکز تنش و افزایش آن تا بیش از مقاومت کششی سنگ شده‌اند. در نمونه‌هایی که امتداد قطر بزرگ حفره بیضوی به موازات و عمود بر جهت امتداد بارگذاری (امتداد طولی نمونه) هستند، سطح شکست به‌صورت مستقیم و عمود بر محور طولی نمونه، در جایی‌که

حفره به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین شعاع انحنا را دارد، تشکیل شده است. نمونه‌های با ۳۰ و ٦۰ درجه امتداد قطر بزرگ بیضی نسبت به جهت انتشار موج، سطح شکست خطی نیست و به‌صورت پله‌ای است. در واقع محل ایجاد ترک در جایی است که حفره بیضوی کم‌ترین شعاع انحنا را دارد اتفاق افتاده و با توجه به‌این‌که این محل‌ها به موازات قطر بزرگ بیضی بوده است و این راستا به‌صورت زاویه‌دار نسبت به انتشار موج آرایش یافته است، شکست پله‌ای تشکیل شده است. نکته قابل توجه در نتایج به‌دست آمده این است که حفره اول که در نزدیکی انتهای آزاد نمونه قرار دارد دچار شکست نشده در حالی که حفره دوم گسیخته شده است.



شکل ٦. نحوهٔ گسیختگی اسپالینگ نمونه‌ها در آزمون بارگذاری دینامیکی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

علت این تفاوت رفتار در حفرات هم‌سان، ناشی از محل قرارگیری آنها است. حفره گسیخته نشده در انتهای آزاد نمونه یعنی جایی که موج فشاری به موج کششی تبدیل می‌شود قرار دارد. با توجه به این‌که موج نیمه سینوسی ایجاد شده داری یک طول موج است، زمانی که جبهه موج به انتهای نمونه رسیده و به‌صورت موج کششی بازمی‌گردد، بخش عقبی موج هنوز در فاز فشاری است. بنابراین در بخش انتهای نمونه بخشی از موج به‌صورت کششی است و بخشی فشاری تا جایی که قسمت عقبی موج نیز به انتها رسیده و به‌صورت موج کششی بازتاب شود.

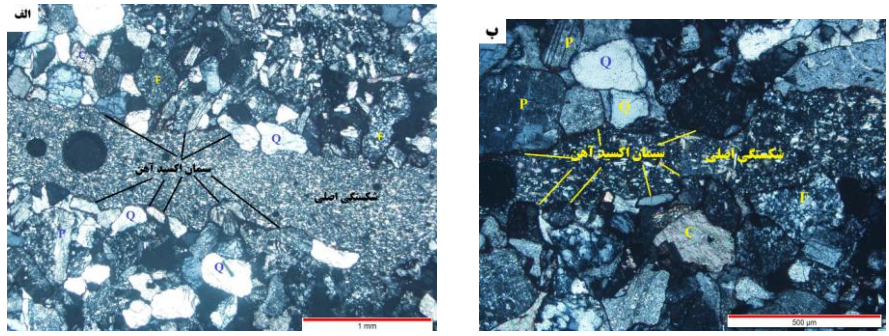
از آن‌جاکه موج فشاری و کششی اثر هم‌دیگر را خنثی می‌کنند، در این منطق که هر دو موج حضور دارند، شدت تنش کششی از مقاومت کششی سنگ کم‌تر است و علی‌رغم ایجاد تمرکز تنش در اطراف حفره، به ترازی که باعث گسیخته شدن نمونه شود، نمی‌رسد. به این بخش از انتهای نمونه، منطقه ایمن یا سوپر پوزیشن می‌گویند.

برای بررسی رفتار کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ این ماسه سنگ‌ها تحت بارگذاری دینامیکی و چگونگی گسترش ترک در آنها، سطح شکست با استفاده از پژوهش‌های میکروسکوپ الکترونی و نوری بررسی شد. بررسی مقاطع نازک حاوی سطح شکست نشان می‌دهد که سیمان در سنگ‌های بررسی شده نقش بارزی در توسعه ترک بازی می‌کند. سه تیپ سیمان شامل سیمان کربناته، سیلیسی و اکسید آهن در این ماسه سنگ‌ها حضور دارند. در این بین اکسید آهن نقش بسیار کلیدی در کنترل مسیر رشد ترک‌ها دارد. این نوع سیمان غالباً به‌صورت نوار باریکی دور قطعات آواری که عمدتاً از کوارتز، فلدسپات و خرده سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده است را پوشانده است (شکل ۷). از آن‌جاکه مقاومت سیمان اکسید آهن در مقایسه با دیگر سیمان‌ها و اجزای آواری تشکیل‌دهندهٔ سنگ ضعیف‌تر است، ترک‌ها و شکستگی‌های تشکیل شده در طول سیمان اکسید آهن توسعه یافته و باعث شده تا شکستگی غالب سنگ به‌صورت شکستگی‌های مرز بلوری بوده و جلوه مضرسی داشته باشد.

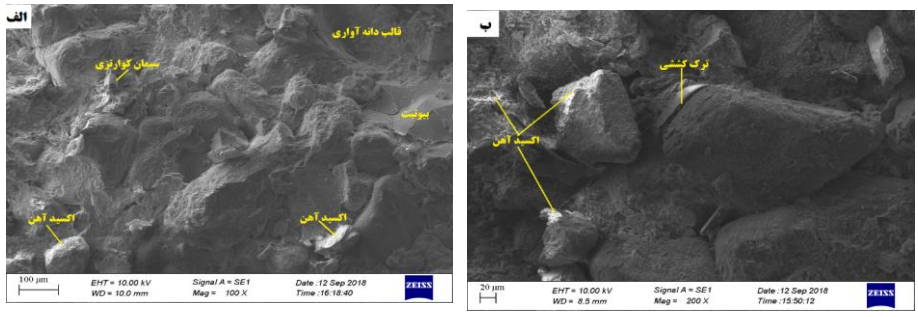
مشاهدات میکروسکوپ الکترونی بر سطح شکست نتایج مشابهی با بررسی‌های پتروگرافی مقاطع نازک در پی داشت. نکته قابل توجه در درشت نمایی‌های کم سطح شکست سنگ، حضور قطعات آواری برجسته با گرد شدگی خوب و یا غالب این قطعات که به‌صورت فرورفتگی مقعر است (شکل ۸). این مطلب تأییدکنندهٔ توسعه شکستگی به‌صورت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

مرز بلوری است. با وجود این برخی از کانی‌های که دارای رخ بوده است مانند میکا، در امتداد رخ گسیخته شده‌اند.



شکل ۷. تصاویر مقطع نازک تهیه شده حاوی سطح شکست. Q: کوارتز، F: خرده سنگ آتشفشانی، P: پلاژیوکلاز، C: سیمان کربناته



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

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار ماسه سنگ‌های حفره‌دار با جهت حفره متفاوت در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی ارزیابی شده واین نتایج به‌دست آمده است:

۱. مقاومت فشاری سنگ حفره‌دار در شرایطی که قطر بزرگ بیضی عمود بر محور مغزه است با بیش‌ترین کاهش به ۵۵ درصد مقاومت حالت بدون حفره و در حالتی که قطر بزرگ به موازات محور مغزه است با کم‌ترین کاهش به ۷۰ درصد مقاومت سنگ بکر می‌رسد. روند کاهش مدول الاستیسیته مشابه مقاومت فشاری تک‌محوره بوده است و این پارامتر در بازه ۲۰ تا ۳۶ درصد مقدار اولیه خود کاهش یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

۲. منحنی تنش- زمان و AE –زمان نمونه‌های سنگ بکر دارای یک قله منطبق بر لحظه شکست نمونه بوده است در حالی‌که وجود حفره باعث ایجاد پله در منحنی تنش- کرنش یا تنش زمان شده و منحنی تعداد انتشار امواج صوتی به‌صورت دو قله‌ای بوده است که قله اول در لحظهٔ اولیه ایجاد ترک ناشی از تمرکز تنش در اطراف حفره و قلهٔ دوم در لحظه گسیختگی نمونه دیده می‌شود. علاوه بر داشتن دو قله تنش برای نمونه‌های حاوی حفره، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویهٔ جهت‌یابی حفره، تراز تنش مربوط به قلهٔ اول نسبت به مقاومت نهایی، افزایش یافته و هم‌چنین شدت کاهش تنش در قله اول نیز کاهش می‌یابد.

۳. بررسی الگوی شکست نشان می‌دهد که در حالتی که محور بزرگ بیضی عمود بر محور مغزه است، الگوی شکست به‌صورت Y است و نشان از دو سطح شکست برشی (تیپ II) و یک سطح شکست کششی (تیپ I) دارد. در حالت ۳۰ درجه الگوی شکست Y ناقص بوده است و با افزایش جهت‌یابی حفره به ٦۰ درجه، الگوی آسیب نمونه شامل دو سطح شکست کششی ناقص به موازات محور مغزه و دو شکستگی برشی توسعه یافته است. در حالت ۹۰ درجه شکست نمونه به‌صورت برش خالص توسعه می‌یابد.

۴. نتایج آزمون دینامیکی اسپالینگ نشان داد که در شدت بار دینامیکی مشابه، سنگ بکر دچار آسیب نشده ولی تمامی نمونه‌های حاوی حفره گسیخته شدند. در سنگ‌های حاوی حفره، تمامی حفرات نزدیک به انتهای آزاد نمونه سالم بوده است در صورتی که حفره نزدیک به میله بارگذاری با هندسه یک‌سان حفره، تماماً گسیخته شده و نشان می‌دهد در منطقه سوپرپوزیشن به‌علت تداخل امواج فشاری و کششی موج ضعیف شده و تنش متناظر با آن به کم‌تر از مقاومت کششی سنگ کاهش یافته و منطقهٔ ایمنی در این بخش وجود دارد. در نمونه‌هایی که امتداد قطر بزرگ حفره بیضوی به موازات و عمود بر جهت امتداد بارگذاری (امتداد طولی نمونه) است، سطح شکست به‌صورت مستقیم و عمود بر محور طولی نمونه بوده در حالی که نمونه‌های با جهت یابی ۳۰ و ٦۰، سطح شکست خطی نبوده و به‌صورت پله‌ای است و شکستگی آنها در جایی است که حفره بیضوی کم‌ترین شعاع انحنا را دارد.

۵. ارزیابی رفتار کانی‌ها در برابر بارگذاری دینامیکی با استفاده از آنالیز SEM و بررسی مقطع نازک بر سطح شکست نشان می‌دهد که ترک‌های توسعه یافته از نوع ترک مرز

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

بلوری بوده است و در گسترش این نوع ترک، حضور نوار نازکی از سیمان اکسید آهن در مرز بلورها نقش کلیدی ایفا می‌کند.

تشکر و قدردانی

از پروفسور خیبینگ لی ریس گروه مهندسی معدن دانشگاه مرکزی جنوب چین، به‌دلیل همکاری در انجام این پژوهش، هم‌چنین از آقایان اوما و وانگ برای همکاری در آزمایشگاه و انجام آزمایش‌ها تشکر می‌کنیم.

منابع

1. Khanlari G. H., Rafiei B., Abdilor Y., "An experimental investigation of the Brazilian tensile strength and failure patterns of laminated sandstones", Rock Mech Rock Eng, 48 (2) (2015) 843-852.
2. Heidari M., Momeni A., Rafiei B., Khodabakhsh S., Torabi-Kaveh M., "Relationship Between Petrographic Characteristics and the Engineering Properties of Jurassic Sandstones, Hamedan, Iran", Rock Mech Rock Eng. 46 (2013) 1091-1101.
3. Liu E., He S., "Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions", Engineering Geology, 125 (2012) 81-91.
4. Li X. B., Zhou Z. L., Lok T., Hong L., Yin T. B., "Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads", Int J Rock Mech Min Sci, 45 (5) (2008) 739-48.
5. Zhou Z., Li X., Zou Y., Jiang Y., Li G., "Dynamic Brazilian tests of granite under coupled static and dynamic loads", Rock Mech Rock Eng, 47 (2) (2014) 495-505.
6. Dai F., Huang S. H., Xia K., Tan Z. H., "Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar)", Rock Mech Rock Eng, 43 (6) (2010) 657-666.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.6.0]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.729]

7. Fakhimi A., Azhdari P., Kimberley J., "Physical and numerical evaluation of rock strength in Split Hopkinson Pressure Bar testing", Computers and Geotechnics, 102 (2018) 1-11.
8. Huang Y.H., Yang S. Q., Ranjith P. G., Zhao J., "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 (2017)182-198.
9. Tao M., Zhao H., Li X. B., Li X., Du K., "Failure characteristics and stress distribution of pre-stressed rock specimen with circular cavity subjected to dynamic loading", Tunnelling and Underground Space Technology, 81 (2018) 1-15.
10. Tao M., Ma A., Cao W., Li X., Gong F., "Dynamic response of pre-stressed rock with a circular cavity subject to transient loading", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 99 (2017) 1-8.
11. Nadi A., Goshtasbi K., Naghdabadi R., Arghavani J., Ashrafi M. J., "Experimental investigation of dynamic behavior of sandstone under high strain rates", Modares Civil Engineering journal, 15 (3) (2015)119-128(In Persian).
12. Weerheijm J., VanDoormaal J., "Tensile failure of concrete at high loading rates: newtest data on strength and fracture energy from instrumented spalling tests", Int. J. Impact. Eng, 34 (2007) 609-26.
13. Li X. B., Tao M., Chengqing W., Du K., Qiuhong W., "Spalling strength of rock under different static pre-confining pressures", International Journal of Impact Engineering, 99 (2017) 69-74.
14. Zhao H., Tao M., Li X. B., Cao W., Wu C., "Estimation of spalling strength of sandstone under different pre-confining pressure by experiment and numerical simulation", International Journal of Impact Engineering, 133, (2019) 103359.
15. ISRM, Brown E. T., editor, "Rock characterization testing and monitoring-ISRM suggested methods", Oxford: Pergamon, (1981) 211.