

تأثیر نرخ بارگذاری بر مکانیزم شکست سنگ تحت بارگذاری کشش غیر مستقیم

حمیدرضا نجاتی*؛ عبدالهادی قزوینیان

دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی مکانیک سنگ

پذیرش: ۹۵/۱۱

دریافت: ۹۴/۱۲

چکیده

شناسایی مکانیزم شکست سنگ‌ها در شرایط مختلف بارگذاری، یکی از مهمترین نیازهای طراحی سازه‌های سنگی است. در سال‌های اخیر، از یک سو توسعه روزافزون سازه‌های سنگی و از سوی دیگر افزایش طیف بارهای دینامیک باعث شده تا اهمیت این مساله بیش از پیش مطرح شود. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر آهنگ بارگذاری بر مکانیزم شکست سنگ است. برای این منظور تعدادی نمونه برزلی از یک نوع ماسه سنگ همسان و همگن تهیه شده و این نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه بارگذاری جابه‌جایی - کنترل تحت بار یکنواخت با شش نرخ بارگذاری متفاوت (۰/۳، ۰/۶، ۱/۲، ۲/۴، ۴/۸، ۹/۶ میلی‌متر بر دقیقه) قرار داده می‌شود، همچنین به منظور رفتارنگاری فرآیند شکست سنگ در حین بارگذاری، سیستم ثبت امواج صوتی ساطع شده (AE) از سنگ نیز مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تغییر در نرخ بارگذاری باعث تغییر اساسی در مکانیزم شکست سنگ می‌شود به طوری که افزایش نرخ بارگذاری باعث می‌شود تا درصد ترک‌های کششی ایجاد شده در نمونه کاهش یابد و به تعداد ترک‌های برشی اضافه شود.

کلمات کلیدی

مکانیزم شکست، آهنگ بارگذاری، امواج صوتی، فرکانس بارگذاری

۱- مقدمه

سازه‌های سنگی در عملیات‌های حفاری، آتشیاری، انفجارهای نظامی و یا در مواجهه با پدیده‌هایی مانند زلزله، زمین‌لغزه و عبور وسایل نقلیه در معرض طیف وسیعی از آهنگ‌های بارگذاری‌اند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که اگر چه رفتار مکانیکی سنگ‌ها در آهنگ‌های بارگذاری مختلف، متفاوت است ولی شکست سنگ در همه آهنگ‌های بارگذاری هر چند با مکانیزم‌های متفاوت، اتفاق می‌افتد [۱۴]. بنابراین مطالعه شکست سنگ، رفتار مکانیکی و روش انتشار ترک در سنگ‌ها تحت فرکانس و آهنگ بارگذاری متفاوت بسیار مهم است.

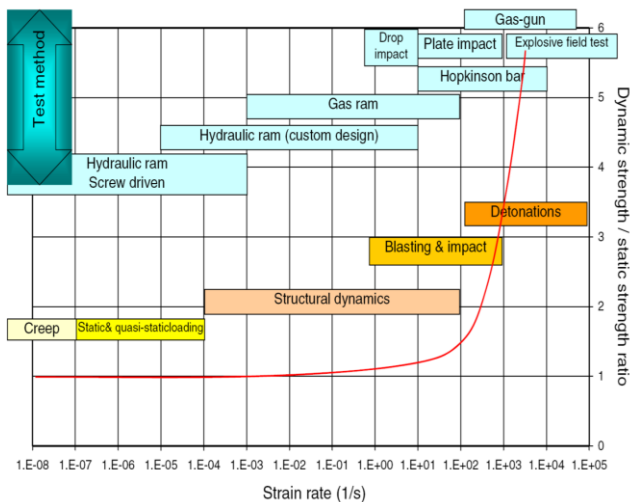
مکانیزم متفاوت شکست سنگ با آهنگ‌های بارگذاری مختلف اهمیت مطالعه مکانیزم شکست سنگ به‌وسیله آهنگ بارگذاری مختلف را نشان می‌دهد. در یک تقسیم‌بندی کلی‌تر مکانیزم شکست سنگ‌ها در دو حیطه شکست استاتیک و شکست دینامیک مورد بررسی قرار می‌گیرند. طبق تعریف، هر نوع باری که حداقل یکی از پارامترهای مقدار، جهت و یا نقطه اثر آن در طول زمان تغییر کند به عنوان بار دینامیک شناخته می‌شود. بر اساس این تعریف تقریباً همه بارهای موجود در طبیعت از نوع بار دینامیک یا وابسته به زمان‌اند. در شرایطی که آهنگ تغییر بزرگی بار نسبت به زمان کم باشد می‌توان آن را به عنوان بار استاتیک یا شبه استاتیک در نظر گرفت. نتایج مطالعات متعددی که در این زمینه انجام شده است، نشان می‌دهد که رفتار سازه‌ها در محدوده بار استاتیک تقریباً ثابت و با ورود به محدوده دینامیک تغییر رفتار مکانیکی سازه کاملاً مشهود است. اگر چه همه مطالعات به وجود چنین آستانه‌ای بین محدوده بارگذاری استاتیک و دینامیک اشاره می‌کنند ولی نمی‌توان آهنگ بارگذاری و یا فرکانس معینی را به عنوان آستانه بار دینامیک برای همه سازه‌ها معرفی کرد زیرا این مقدار به شدت تحت تأثیر دوره تناوب سازه مورد نظر است.

در این مطالعه مکانیزم شکست سنگ با آهنگ بارگذاری مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور تعدادی نمونه برزیلی از یک نوع ماسه سنگ تهیه شد و با آهنگ‌های مختلف بارگذاری تحت بار کشش غیر مستقیم قرار گرفت.

۲- تأثیر نرخ بارگذاری بر شکست سنگ

مطالعات متعددی برای بررسی تأثیر آهنگ بارگذاری بر مکانیزم شکست سنگ، نحوه انتشار ترک، مقدار چقرمگی شکست سنگ

و نظایر آن انجام شده است. همان‌طور که اشاره شد، یکی از پارامترهای مهم در تقسیم‌بندی بارهای اعمالی به سازه‌ها و یا نمونه‌های آزمایشگاهی آهنگ بارگذاری است که برای ایجاد آن به منظور انجام آزمون‌های آزمایشگاهی ابزارهای متفاوتی مورد نیاز است. در شکل ۱ تجهیزات مورد نیاز برای اعمال بارهای با آهنگ‌های مختلف و همچنین طبقه‌بندی نوع بارها بر اساس آهنگ آن‌ها نشان داده شده است.



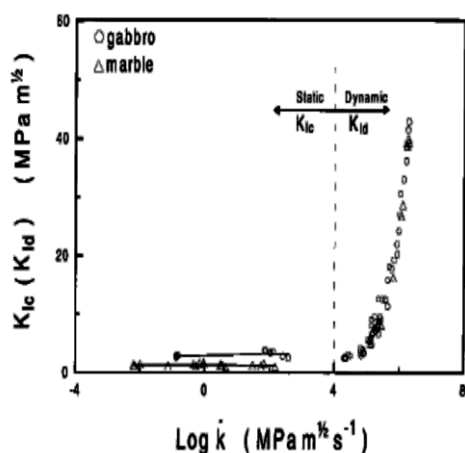
شکل ۱: طبقه‌بندی آهنگ بارگذاری مختلف و تجهیزات لازم برای ایجاد آن [۴]

۲-۱- تأثیر نرخ بارگذاری بر چقرمگی شکست سنگ

یکی از مهمترین پارامترهای مکانیکی برای مطالعه رفتار شکست مواد مهندسی چقرمگی شکست^۱ است که طبق تعریف به مقاومت جسم در برابر رشد ترک گفته می‌شود. مقدار چقرمگی شکست ماده در توسعه ترک‌های موجود و انشعاب^۲ آن‌ها به ترک‌های بیشتر موثر است. بر این اساس یکی از مباحث مورد علاقه محققان بررسی مقدار چقرمگی شکست سنگ در آهنگ بارگذاری‌های مختلف است.

بر این اساس در منابعی مانند [۱۲، ۶، ۳] مقدار چقرمگی شیل، مرمر، گرانیت و سنگ آهک را با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای اندازه‌گیری کرده‌اند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار چقرمگی شکست چهار نوع سنگ مورد مطالعه با افزایش آهنگ بارگذاری، کمی افزایش می‌یابد. ولی با این همه این محققان به علت محدودیت موجود در شرایط آزمایش رابطه‌ای را برای تعیین مقدار کمی تغییرات چقرمگی با تغییر آهنگ بارگذاری ارائه نکرده‌اند.

و بنابراین برای تقویت آن‌ها و افزایش دامنه آن‌ها از تقویت‌کننده استفاده می‌شود.



شکل ۲: رابطه بین چقرمگی درزه و آهنگ بارگذاری [۱۴]

سیگنال‌های منتشر شده از سنگ توسط تقویت‌کننده‌های متصل به سنسور تقویت شده و یک آستانه ۳۸ dB برای حذف نویزهای محیط و دستگاه بارگذاری برای دستگاه تعریف می‌شود. بدین ترتیب کلیه امواج ساطع شده از سنگ با دامنه بیش از ۳۸ dB ثبت می‌شوند. شکل ۳ نمایی از دستگاه بارگذاری و سنسور ثبت امواج صوتی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: دستگاه بارگذاری خودکنترل الکتریکی و سنسور ثبت امواج صوتی

در ادامه ژانگ و همکاران مطالعاتی را روی دو نوع سنگ مرمر و گابرو در محدوده وسیعی از آهنگ بارگذاری $\dot{k} = 10^{-2} - 10^6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ انجام دادند. در این مطالعات برای اعمال بار دینامیکی از دستگاه هایپکینسون استفاده شده است.

مجموعه آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های گابرو و مرمر نشان می‌دهد که تغییرات چقرمگی شکست سنگ در محدوده بارگذاری استاتیکی (K_{Ic}) چندان وابسته به آهنگ بارگذاری نیست ولی چقرمگی شکست سنگ با افزایش آهنگ بارگذاری در محدوده بارگذاری دینامیکی (K_{IId}) افزایش می‌یابد. در شکل ۲ تغییرات مقدار چقرمگی شکست سنگ نسبت به آهنگ بارگذاری‌های مختلف نشان داده شده است.

با وجود مطالعات متعددی که در زمینه تأثیر آهنگ بارگذاری بر مکانیزم شکست سنگ انجام شده است، هنوز هم ابهاماتی در این زمینه وجود دارد که نیازمند بررسی‌های بیشتر و مطالعات آزمایشگاهی دقیق‌تر است. در این مطالعه سعی می‌شود تا با بهره‌گیری از سیستم ثبت امواج صوتی ساطع شده (AE) در حین بارگذاری بر روی نمونه‌های سنگی با آهنگ‌های مختلف مکانیزم شکست نمونه‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

۳- مطالعات آزمایشگاهی

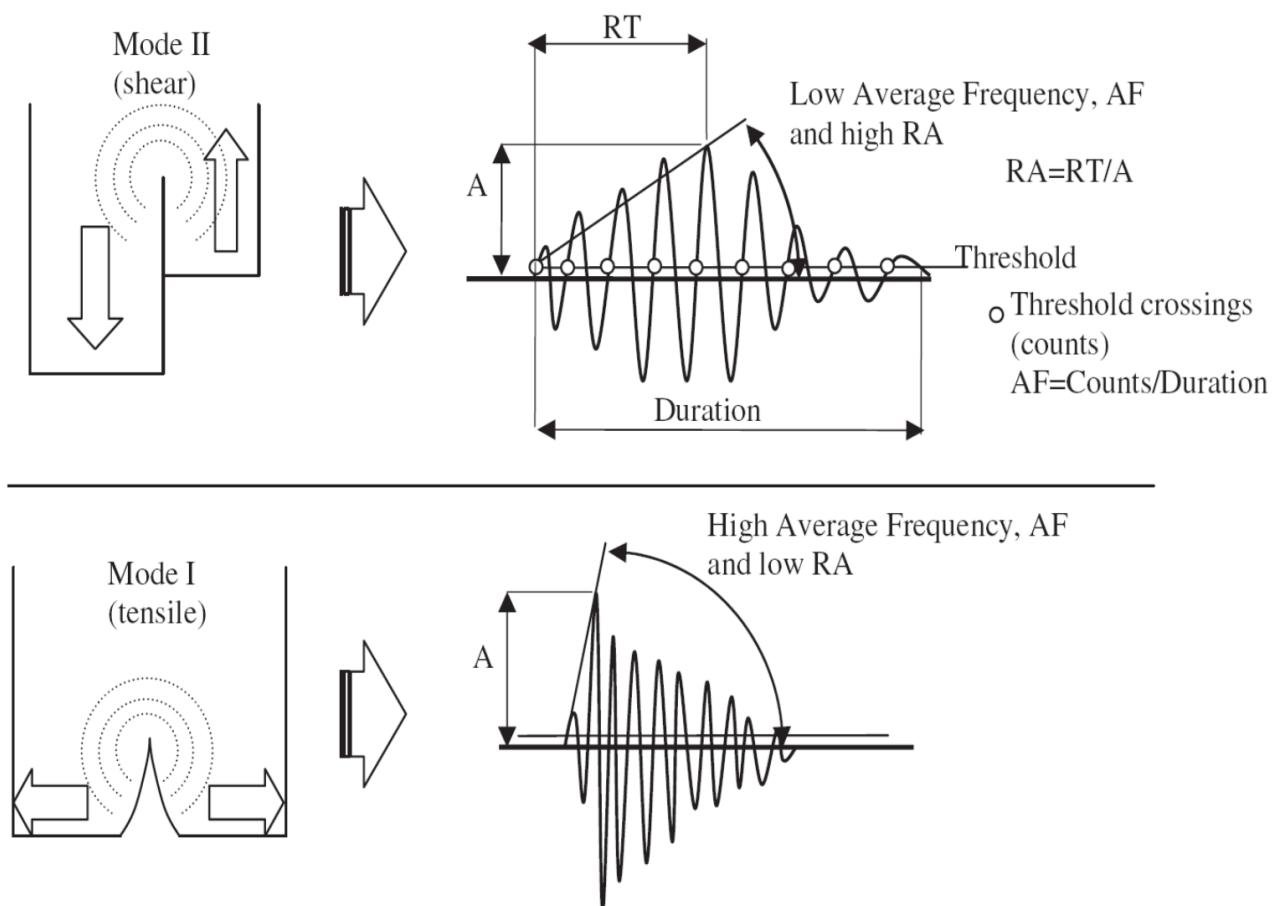
به منظور بررسی تأثیر آهنگ بارگذاری بر مکانیزم شکست سنگ یک نوع ماسه سنگ همگن و همسان انتخاب و تعداد زیادی نمونه برزلی تهیه شده است. برای انجام آزمایش‌های مورد نظر از دستگاه خودکنترل الکتریکی شرکت اینسترون^۴ با ظرفیت ۲۰ تن استفاده شده است همچنین به منظور پایش فرآیند شکست سنگ در حین بارگذاری از سیستم ثبت امواج صوتی ساطع شده از سنگ نیز استفاده شده تا همزمان با اعمال بارگذاری، امواج صوتی ناشی از ایجاد ریزترک‌ها و درشت ترک‌های القا شده ثبت شوند. سیستم ثبت امواج صوتی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است ساخت شرکت والن^۵ آلمان است. سنسورهای ثبت صدا در این دستگاه با کد مشخصه VS150-L، محدوده فرکانسی ۱۰۰ تا ۴۵۰ کیلو هرتز و با فرکانس رزونانس ۱۵۰ کیلو هرتز دارند.

وظیفه سنسورها دریافت امواج الاستیک ناشی از فرایندهای مختلف ایجاد امواج صوتی و تبدیل آن به امواج الکتریکی است. سیگنال‌های دریافتی سنسورها ولتاژ و دامنه بسیار پایینی دارند

در این بخش ابتدا تأثیر آهنگ بارگذاری یکنواخت بر مقاومت شکست و مکانیزم شکست ماسه سنگ مورد بررسی قرار گرفته و در مرحله بعد تأثیر فرکانس بار سیکلی بر طول عمر خستگی سنگ گرانیت، مرمر و نمونه‌های شبه سنگی ساخته شده با گچ و سیمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی تأثیر آهنگ بارگذاری بر مکانیزم شکست سنگ، تعدادی نمونه برزلی با قطر ۵۴ میلی‌متر و ضخامت ۴۴ میلی‌متر تهیه شده و آزمایش برزلی بر روی نمونه‌ها در شش آهنگ بارگذاری متفاوت انجام شده است. آزمایش‌ها با دستگاه جابه‌جایی- کنترل الکتریکی انجام شده و آهنگ‌های بارگذاری انتخاب شده ۰٫۳، ۰٫۶، ۱٫۲، ۲٫۴، ۴٫۸، ۹٫۶ میلی‌متر بر دقیقه است. در حین انجام آزمایش امواج صوتی ساطع شده از نمونه‌های سنگی با استفاده از دستگاه AE ثبت شده است.

تحلیل و تفسیر امواج AE ثبت شده اطلاعات بسیار مفیدی را از مکانیزم شکست سنگ‌ها ارائه می‌دهد. به عنوان مثال دامنه امواج ثبت شده می‌تواند به عنوان معیاری برای تعیین ابعاد ترک‌ها مورد استفاده قرار گیرد به طوری که امواج با دامنه کم مربوط به ریز ترک‌ها است و هر چه دامنه موج ثبت شده بیشتر باشد مقیاس آن بزرگتر می‌شود [۲، ۸].

همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داده است که ترک‌های نوع کششی در مقایسه با ترک‌های برشی امواجی با فرکانس متوسط^۴ (AF) و زاویه خیز^۵ (RA) بالا تولید می‌کنند [۹، ۱۰]. در شکل ۴ تفاوت امواج صوتی ثبت شده در اثر شکست نوع کشش و برش به صورت شماتیک نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵ محدوده تغییرات فرکانس متوسط و زاویه خیز برای ترک‌های نوع کشش و برش به تصویر کشیده شده است.



شکل ۴: منابع مختلف تولید موج صوتی و شکل موج متناظر آن [۱]

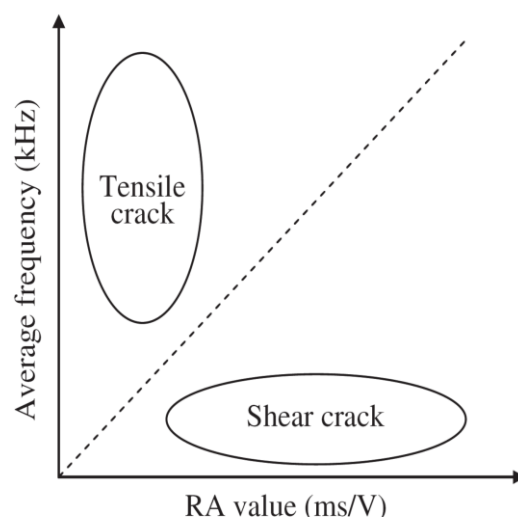
بسیاری از مطالعات گذشته افزایش مقاومت شکست سنگ در آهنگ‌های بارگذاری بالاتر را همین ایجاد شکستگی‌ها و خردشدگی بیشتر نمونه‌ها ذکر کرده‌اند اما این تنها دلیل افزایش مقاومت دینامیک سنگ‌ها نسبت به مقاومت استاتیک آن‌ها نیست، در ادامه با بررسی مکانیزم ایجاد ریز ترک‌ها در آهنگ بارگذاری مختلف سایر دلایل افزایش مقاومت سنگ با افزایش آهنگ بارگذاری تشریح می‌شود.

۳-۲- مکانیزم ایجاد ریز ترک در نرخ بارگذاری مختلف

برای مطالعه دقیق فرآیند آسیب و مکانیزم گسیختگی سنگ‌ها در سطوح مختلف تنش، بررسی مکانیزم ایجاد ریز ترک‌ها اهمیت زیادی دارد. زیرا از یک طرف ایجاد ریز ترک‌ها باعث اتلاف انرژی شده و از طرف دیگر اتصال^۸ ریز ترک‌ها به یکدیگر باعث ایجاد ترک‌های بزرگتر شده و در نهایت به گسیختگی نمونه منجر می‌شود. بنابراین بررسی آماری و توصیفی میکرو ترک‌های ایجاد شده در سطوح مختلف تنش می‌تواند در شناسایی مکانیزم آسیب نمونه‌های سنگی بسیار مفید باشد.

در این بخش، مکانیزم ایجاد شکست در نمونه‌های ماسه سنگ تحت آهنگ بارگذاری مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور سیگنال‌های ثبت شده با استفاده از دستگاه AE، مورد تحلیل قرار می‌گیرند. همانطور که اشاره شد، یکی از مشخصه‌های اصلی سیگنال‌های صوتی ثبت شده زاویه خیز و فرکانس متوسط سیگنال‌ها است. زاویه خیز و فرکانس متوسط برای هر سیگنال ثبت شده قابل محاسبه است. در شکل ۹ تغییرات زاویه خیز و فرکانس متوسط سیگنال‌های ثبت شده در آهنگ‌های بارگذاری مختلف نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است فرکانس متوسط سیگنال‌ها با تغییر آهنگ بارگذاری تغییر چندانی نمی‌کند ولی مقدار زاویه خیز با افزایش آهنگ بارگذاری افزایش می‌یابد. برآیند این دو تصویر بیانگر این واقعیت است که احتمالاً افزایش آهنگ بارگذاری باعث می‌شود تا درصد ترک‌های کششی ایجاد شده در نمونه کاهش یابد و به تعداد ترک‌های برشی اضافه شود. این مساله می‌تواند اصلی‌ترین دلیل افزایش مقاومت دینامیکی سنگ‌ها نسبت به مقاومت استاتیکی آن‌ها باشد.



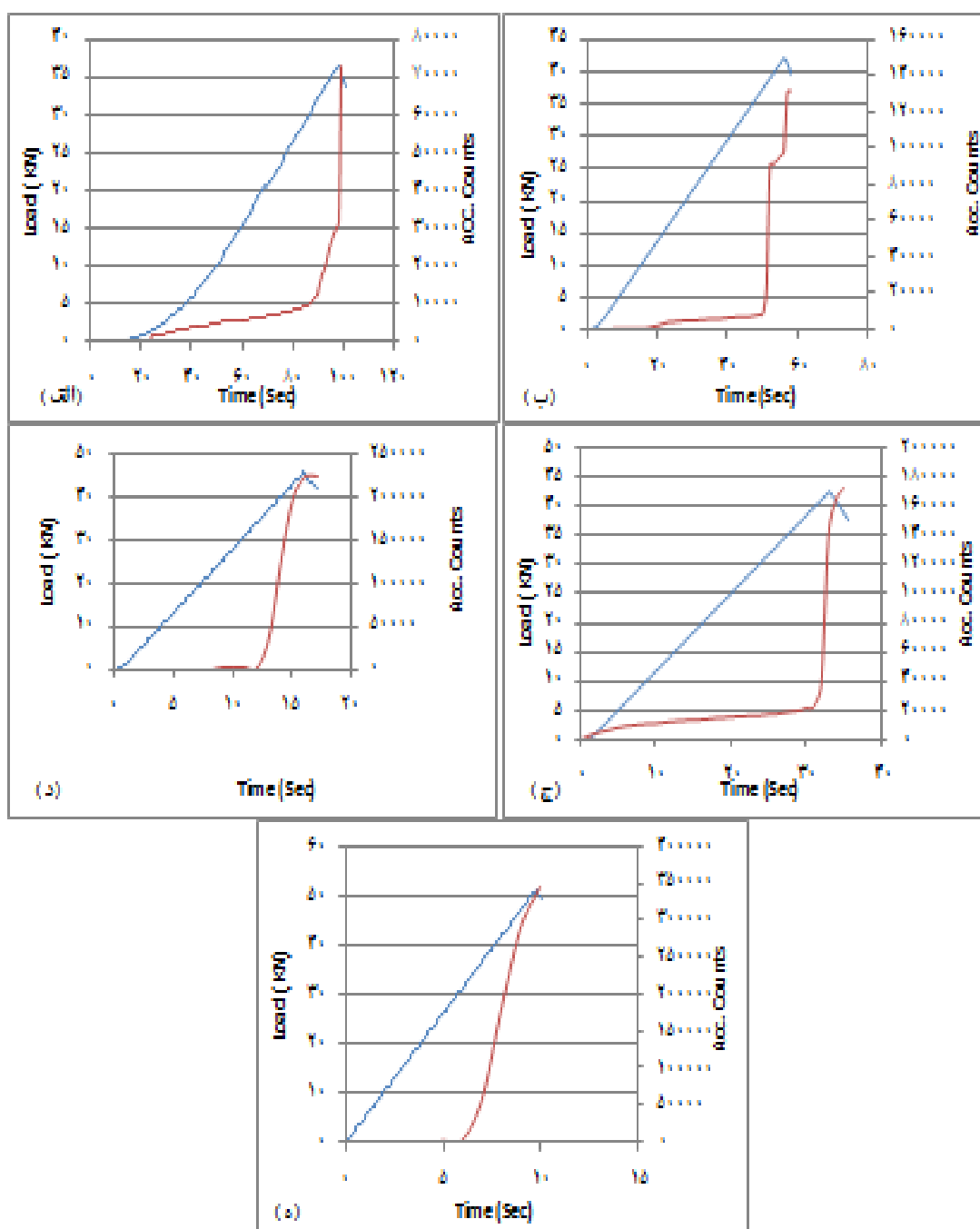
شکل ۵: تغییرات فرکانس متوسط به زاویه خیز و تفکیک نوع شکست [۹]

۳-۱- تأثیر آهنگ بارگذاری بر مقاومت شکست سنگ

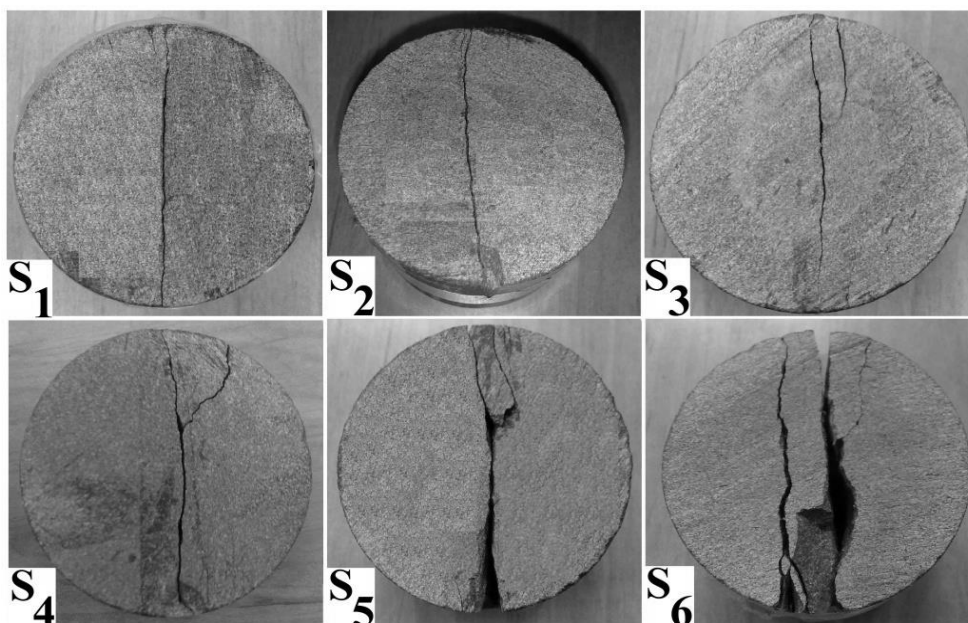
تقریباً همه بررسی‌های انجام شده در زمینه تأثیر آهنگ بارگذاری بر مقاومت شکست سنگ‌ها بر این نکته تأکید داشته‌اند که افزایش آهنگ بارگذاری مقاومت شکست سنگ‌ها را افزایش می‌دهد. در این مطالعه نیز آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های برزلی ماسه‌سنگ نشان می‌دهد که افزایش آهنگ بارگذاری، مقاومت شکست نمونه را افزایش می‌دهد. شکل ۶ نمودار بار- زمان آزمایش‌های انجام شده در آهنگ‌های بارگذاری مختلف را نشان می‌دهد.

شکل شکست نمونه‌های برزلی ماسه سنگ در شکل ۷ نشان داده شده است. میزان خردشدگی بیشتر نمونه‌ها در آهنگ‌های بارگذاری بالاتر، کاملاً در شکل نشان داده شده مشهود است.

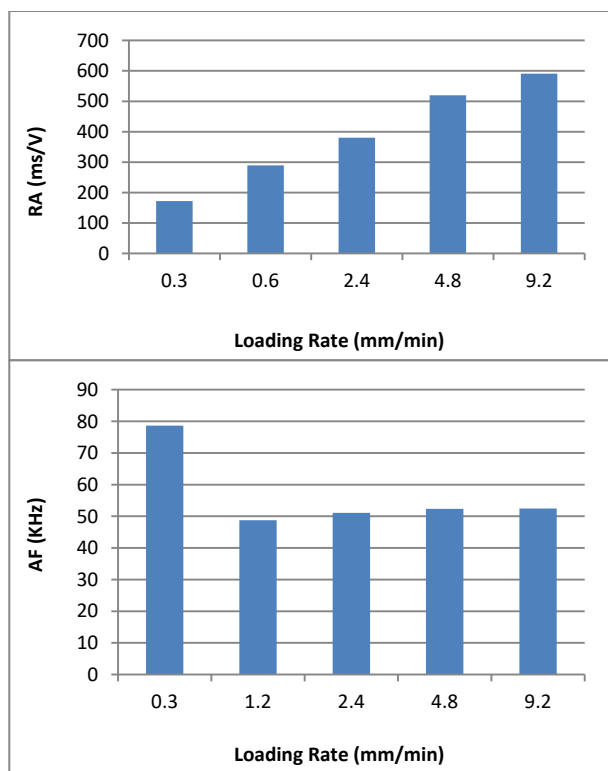
همچنین نمودار تجمعی تعداد شمارش‌های ثبت شده با دستگاه AE در طول بارگذاری در این شکل نمایش داده شده است. با افزایش آهنگ بارگذاری علاوه بر اینکه بار لحظه شکست نمونه‌ها افزایش می‌یابد، تعداد شمارش‌های ایجاد شده در نمونه تا لحظه شکست نیز به شدت افزایش می‌یابد. شکل ۸ نمودار میله‌ای بار شکست و تعداد تجمعی شمارش‌ها تا لحظه شکست را در آهنگ‌های بارگذاری مختلف نشان می‌دهد. شکل ۸ گویای این واقعیت است که افزایش آهنگ بارگذاری علاوه بر اینکه مقاومت شکست نمونه‌ها را افزایش می‌دهد تعداد ریز ترک‌ها و در واقع میزان خردشدگی سنگ را نیز افزایش می‌دهد.



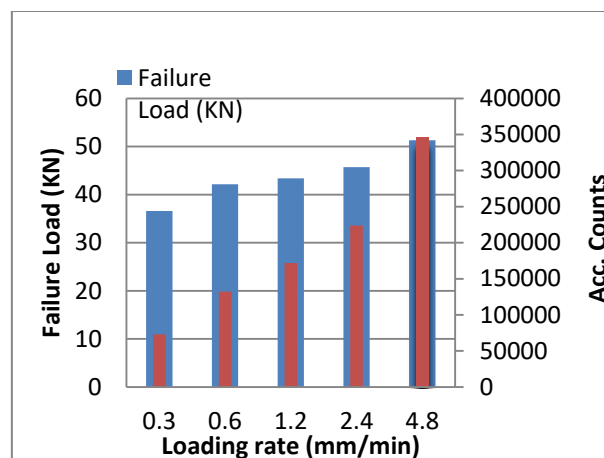
شکل ۶: نمودار بار - زمان و شمارش - زمان نمونه ماسه سنگ در آهنگ‌های بارگذاری مختلف (الف) ۰٫۳ (ب) ۰٫۶ (ج) ۱٫۲ (د) ۲٫۴ (ه) ۴٫۸ میلی‌متر بر دقیقه، خطوط آبی رنگ معرف منحنی بار - زمان بوده و خطوط قرمز رنگ توزیع تجمعی شمارش‌های ثبت شده با دستگاه AE را نشان می‌دهد.



شکل ۷: شکل شکست نمونه‌های ماسه سنگ در آهنگ بارگذاری مختلف به ترتیب نمونه‌های S1 تا S6 تحت آهنگ‌های بارگذاری ۰/۳، ۰/۶، ۱/۲، ۲/۴، ۴/۸ و ۹/۶ میلی‌متر بر دقیقه



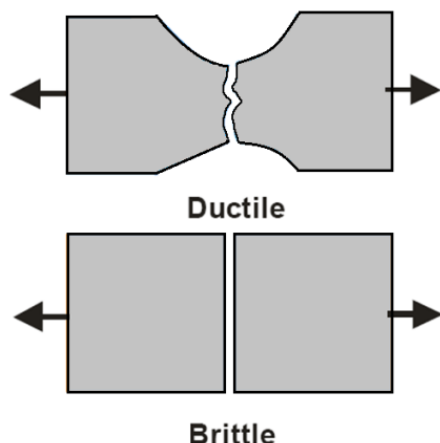
شکل ۹: تغییرات زاویه خیز و فرکانس متوسط سیگنال‌های ثبت شده بر حسب آهنگ بارگذاری



شکل ۸: تغییرات بار و شمارش‌های تجمعی لحظه شکست نسبت به آهنگ بارگذاری

هر چند آزمایش‌های انجام شده از نوع آزمایش‌های برزلی بوده است و نمونه‌ها تحت بارگذاری کشش غیرمستقیم قرار می‌گیرند ولی توزیع تنش‌های ایجاد شده می‌تواند به گونه‌ای باشد که ترک‌های برشی هم در نمونه ایجاد شود. افزایش آهنگ بارگذاری به احتمال ایجاد ترک‌های برشی می‌افزاید و از آنجایی که مقاومت برش سنگ‌ها بیش از مقاومت کشش آن است، افزایش آهنگ بارگذاری باعث افزایش مقاومت شکست سنگ می‌شود.

عبارت دیگر مواد شکل‌پذیر در مواجهه با بارهای دینامیک رفتاری ترد و شکننده دارند بنابراین مقاومت شکست دینامیک آن‌ها کمتر از مقاومت استاتیکی آن‌ها است ولی در مواد ترد مانند سنگ، افزایش آهنگ بارگذاری تأثیر چندانی بر میزان تردی آن‌ها ندارد و عواملی همچون چند تکه شدن نمونه تحت بار و بر هم خوردن توزیع تنش‌های اعمالی باعث افزایش مقاومت شکست دینامیک سنگ‌ها در مقایسه با مقاومت شکست استاتیکی آن‌ها می‌شود.



شکل ۱۰: اختلاف شکست مواد شکننده و شکل‌پذیر

البته پدیده انشعاب ترک‌ها در مواجهه با بارهای دینامیک در مورد مواد شکل‌پذیر هم اتفاق می‌افتد اما تغییر شکل پلاستیک مواد شکل‌پذیر انرژی قابل توجهی را جذب می‌کند که در صورت اعمال بار دینامیک به نمونه این تغییر شکل اتفاق نیافتاده و انرژی آن صرف شکست نمونه می‌شود.

۵- تأثیر فرکانس بار سیکلی بر طول عمر خستگی

سنگ‌ها

یکی دیگر از انواع تغییر در آهنگ بارگذاری‌ها، تغییر در فرکانس بار سیکلی وارد بر نمونه‌ها است. مطالعات متعددی در زمینه تأثیر فرکانس بارهای سیکلی بر طول عمر خستگی فلزات انجام شده و ثابت شده است که به جز برخی از فلزات تقریباً طول عمر همه آن‌ها به فرکانس بار سیکلی وابسته نیست و در واقع تعداد سیکل‌های لازم برای ایجاد شکست در نمونه با افزایش فرکانس بارگذاری ثابت باقی می‌ماند. معمولاً نرم‌افزارهایی که برای تحلیل شکست خستگی توسعه یافته‌اند به گونه‌ای طراحی شده‌اند که فرکانس بارگذاری تأثیری بر طول عمر خستگی قطعه طراحی شده ندارد. با این وجود، تأثیر فرکانس بار سیکلی بر طول عمر خستگی سنگ‌ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

به هم خوردن توزیع تنش‌ها با افزایش آهنگ بارگذاری می‌تواند یکی از دلایل ایجاد شکستگی‌های بیشتر در نمونه‌ها باشد، زیرا اگر بار با آهنگ بارگذاری کم به نمونه‌ها اعمال شده و توزیع تنش‌ها در نمونه به آرامی صورت گیرد بیشتر شکست‌های ایجاد شده به صورت کششی و در راستای شکست اصلی نمونه است، اگر ریز ترک‌های ایجاد شده در راستای شکست اصلی سنگ نباشد برای ایجاد شکست در سنگ ریز ترک‌های بیشتری ایجاد خواهد شد که این مساله با افزایش تعداد شمارش‌های AE در شکل ۷ نشان داده شده است.

۴- مکانیزم شکست مواد شکل‌پذیر و شکننده

مواد شکننده^۹ مانند بیشتر سنگ‌ها به موادی گفته می‌شود که اگر میزان باری بیش از حد تسلیم به آن‌ها وارد شود، سهم عمده آن بار صرف ایجاد سطح جدید در نمونه می‌شود و در مقابل مواد شکل‌پذیر^{۱۰} مانند اکثر فلزات، موادی هستند که بعد از مرحله تسلیم بدون تولید سطح جدید در نمونه انرژی قابل ملاحظه‌ای را برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک در خود جذب می‌کنند. میزان شکل‌پذیری مواد یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیکی در مطالعه مکانیک شکست و مکانیزم گسترش ترک در مواد مختلف است به طوری که برای مطالعه مکانیزم شکست مواد مهندسی، شکست این مواد به دو دسته کلی شکست نرم و ترد تقسیم می‌شود.

نکته بسیار مهمی که در مبحث شکست دینامیک مواد مختلف مطرح است این است که افزایش آهنگ بارگذاری در همه مواد باعث افزایش مقاومت شکست نمی‌شود، به عنوان مثال مقاومت شکست دینامیک فلزات به عنوان مواد شکل‌پذیر کمتر از مقاومت شکست استاتیکی آن‌ها است. دلیلی که برای کاهش مقاومت دینامیک شکست فلزات نسبت به مقاومت استاتیکی آن‌ها بیان می‌شود ترد یا شکننده شدن فلزات در آهنگ‌های بارگذاری بالا است. همان‌طور که اشاره شد فلزات در مقایسه با سنگ‌ها دارای رفتاری نرم و شکل‌پذیراند. شکل ۱۰ تفاوت شکست مواد شکننده و شکل‌پذیر را به طور شماتیک نشان می‌دهد.

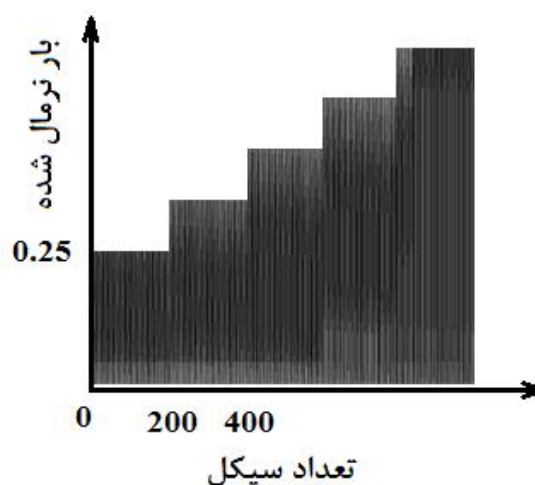
سهم عمده‌ای از انرژی بارهای استاتیک در مواجهه با مواد شکل‌پذیر صرف ایجاد تغییر شکل پلاستیک در این مواد می‌شود و به همین دلیل مقاومت شکست مواد شکل‌پذیر بیشتر از مواد شکننده است. اصلی‌ترین پیامد افزایش آهنگ بارگذاری در مواد شکل‌پذیر کاهش شکل‌پذیری مواد است، به

جعفری و همکاران [۷] با مطالعه رفتار برشی درزه‌های یک نمونه شبه سنگی تحت بارگذاری سیکلی نشان دادند که با افزایش فرکانس بار اعمالی به نمونه‌ها مقاومت برشی درزه‌ها کاهش می‌یابد. این مطالعه در محدوده فرکانسی صفر تا یک هرتز انجام شده و کاهش مقاومت برشی درزه‌ها با افزایش فرکانس بارگذاری با شیب ملایمی انجام می‌گیرد.

وانگ^{۱۱} و همکاران [۱۱] بسته شدن^{۱۲} درزه‌های سنگی تحت بارگذاری دینامیکی با فرکانس‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات وانگ و همکاران حاکی از آن است که جابه‌جایی قائم درزه‌های با زبری مشخص با افزایش فرکانس بارگذاری کاهش می‌یابد.

چن^{۱۳} و همکاران [۵] پاسخ دینامیکی و رفتار شکست سنگ‌ها تحت بار دینامیکی در محدوده فرکانس ۰/۵ تا ۵ هرتز را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که آهنگ کرنش بدست آمده با افزایش فرکانس بارگذاری افزایش می‌یابد.

در این بخش با طراحی تعدادی آزمایش خستگی تحت بارگذاری سیکلی مشخص، تأثیر فرکانس بار سیکلی بر طول عمر خستگی سنگ‌ها، مورد بررسی قرار می‌گیرد. انجام این آزمایش‌ها با استفاده از بار سیکلی با دامنه ثابت بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است، به همین دلیل در این بخش بار سیکلی با دامنه متغیر برای انجام آزمایش‌های خستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۱۱ طرح شماتیکی از بار سیکلی مورد استفاده در این بخش، نشان داده شده است. دستگاه مورد استفاده برای اعمال بار سیکلی به نمونه‌ها از نوع دستگاه خود کنترل هیدرولیکی است.



شکل ۱۱: بارگذاری سیکلی با دامنه متغیر

شکل ۱۱ طرح بار سیکلی با دامنه متغیر را نشان می‌دهد. مقدار بار در شکل ۱۱ نسبت به مقاومت استاتیک نمونه‌ها هنجار (نرمال) شده است. در این طرح بارگذاری، تعداد ۲۰۰ سیکل با دامنه‌ای برابر ۲۵ درصد بار شکست به نمونه اعمال شده و پس از آن با ثابت نگه داشتن بار حداقل، بار حداکثر اعمالی تا ۳۰ درصد بار شکست نمونه افزایش می‌یابد. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که نمونه تحت بار بشکند. این آزمایش برای سه نوع سنگ اونیکس، گرانیت و نمونه شبه سنگی ساخته شده با گچ و سیمان در فرکانس‌های یک، دو، چهار، شش و هشت هرتز انجام می‌شود. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این بخش، در جدول ۱ خلاصه شده است.

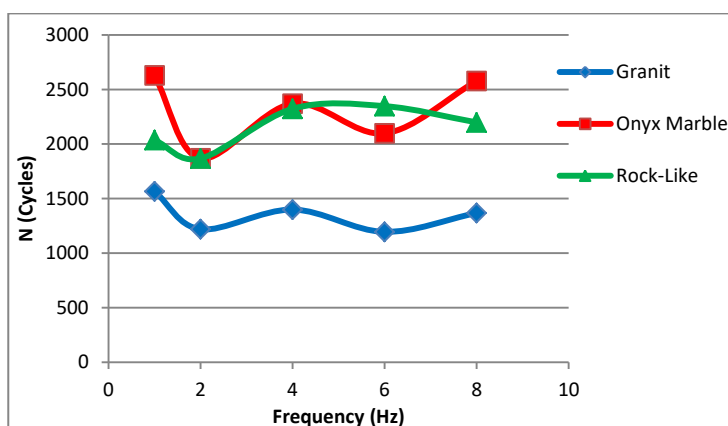
در شکل ۱۲ تغییرات محدود طول عمر خستگی نمونه‌های مختلف نسبت به فرکانس بارگذاری نشان داده شده است. همانطور که از داده‌های جدول ۱ و شکل ۱۲ برمی‌آید فرکانس بارگذاری سیکلی تأثیر چندانی بر طول عمر خستگی نمونه‌های آزمایش شده ندارد. این مساله در مورد هر سه نوع سنگ صادق است و شکنندگی سنگ‌ها هم تأثیری بر روی این موضوع ندارد.

علی‌رغم تأثیر آهنگ بارگذاری بر مقاومت شکست نمونه‌های سنگی تحت بارگذاری یکنواخت، نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که فرکانس بارهای سیکلی تأثیری بر طول عمر خستگی سنگ‌ها ندارد. از طرف دیگر، افزایش فرکانس بارگذاری سیکلی، برخلاف افزایش آهنگ بارگذاری یکنواخت، تغییر چندانی در شکل شکست و میزان خردشدگی نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند. این مساله می‌تواند به این دلیل باشد که افزایش مقدار بار اعمالی به نمونه‌ها در بارگذاری سیکلی کاملاً کنترل شده است و از حد معینی فراتر نمی‌رود ولی در بارگذاری یکنواخت بار اعمالی به نمونه تا لحظه شکست سنگ به سرعت افزایش می‌یابد.

مکانیزم شکست خستگی کاملاً متفاوت از مکانیزم شکست تحت بارگذاری یکنواخت است و برای شناسایی دقیق علت عدم تأثیر فرکانس بارگذاری سیکلی بر طول عمر خستگی سنگ‌ها لازم است تا مطالعات و آزمایش‌های بیشتری در این زمینه انجام شود.

جدول ۱: طول عمر خستگی نمونه‌های مختلف با فرکانس‌های مختلف

نوع سنگ	فرکانس بارگذاری (هرتز)	تعداد سیکل شکست	نوع سنگ	فرکانس بارگذاری (هرتز)	تعداد سیکل شکست	نوع سنگ	فرکانس بارگذاری (هرتز)	تعداد سیکل شکست
	۱	۲۶۲۹		۱	۲۳۷۳		۱	۲۰۳۵
	۲	۱۸۶۹		۲	۲۵۱۱		۲	۱۸۶۸
مرمر	۴	۲۳۷۰	گرانیت	۴	۲۷۹۸	سنگ	۴	۲۳۲۳
اونیکس	۶	۲۰۹۹		۶	۲۳۹۰	مصنوعی	۶	۲۳۴۷
	۸	۲۵۷۸		۸	۲۷۳۶		۸	۲۱۹۸



شکل ۱۲: تغییرات طول عمر خستگی نمونه‌های مختلف نسبت به فرکانس بارگذاری

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تلاش شده تا با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی تأثیر نرخ بارگذاری بر مکانیزم شکست سنگ تحت بارگذاری کشش غیر مستقیم مورد بررسی قرار گیرد. برخی از مهمترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

-افزایش آهنگ بارگذاری علاوه بر اینکه مقاومت شکست نمونه‌ها را افزایش می‌دهد تعداد ریزترک‌ها و در واقع میزان خردشدگی سنگ را نیز افزایش می‌دهد که این مساله یکی از عوامل افزایش مقاومت دینامیکی سنگ‌ها نسبت به مقاومت استاتیکی است.

-فرکانس متوسط سیگنال‌های صوتی ساطع شده از سنگ‌های تحت بار، با تغییر آهنگ بارگذاری تغییر چندانی نمی‌کند ولی مقدار زاویه خیز با افزایش آهنگ بارگذاری افزایش می‌یابد. برآیند این دو نکته می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که افزایش آهنگ بارگذاری احتمالاً باعث می‌شود تا درصد ترک‌های کششی ایجاد شده در نمونه کاهش یافته و به تعداد ترک‌های برشی اضافه شود. این مساله می‌تواند یکی از مهمترین دلایل

افزایش مقاومت دینامیکی سنگ‌ها نسبت به مقاومت استاتیکی آن‌ها باشد.

-اصلی‌ترین پیامد افزایش آهنگ بارگذاری در مواد شکل‌پذیر کاهش شکل‌پذیری مواد است، بنابراین مقاومت شکست دینامیک آن‌ها کمتر از مقاومت استاتیکی آن‌ها است ولی در مواد ترد مانند سنگ، افزایش آهنگ بارگذاری تأثیر چندانی بر میزان تردی آن‌ها ندارد و عواملی همچون چند تکه شدن نمونه تحت بار و بر هم خوردن توزیع تنش‌های اعمالی باعث افزایش مقاومت شکست دینامیک سنگ‌ها در مقایسه با مقاومت شکست استاتیکی آن‌ها می‌شود. به عبارت دیگر افزایش آهنگ بارگذاری برای همه مواد مهندسی باعث افزایش مقاومت شکست نمی‌شود و در واقع مهم‌ترین مشخصه‌ای که بر روی این مساله تأثیر می‌گذارد میزان شکنندگی مواد است.

-فرکانس بارگذاری سیکلی تأثیر چندانی بر طول عمر خستگی سنگ‌های گرانیت، اونیکس و نمونه شبه‌سنگ ساخته شده با گچ و سیمان ندارد.

۷- مراجع

Health Monit 5 (1):69-81

[9] Ohno, K, Ohtsu M (2010) Crack classification in concrete based on acoustic emission. *Construction and Building Materials* 24(12): 2339-2346.

[10] Philippidis TP, Nikolaidis VN, Anastassopoulos AA (1998) Damage characterization of carbon/carbon laminates using neural network techniques on AE signals. *NDT&E Int.* 31(5):329-40.

[11] Wang WH, Li XB, Zhang YP, Zuo YJ (2007) Closure behavior of rock joint under dynamic loading. *Journal of Central South University of Technology* 14(3): 408-412.

[12] Wu MB (1986) Effects of loading rates on fracture toughness of rock. *Mech Practice*; 10(2):21±3.

[13] Zhang ZX, Kou SQ, Jiang LG, Lindqvist PA (2000) Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37 (5):745-762.

[14] Zhang ZX, Kou SQ, Yu J, Yu Y, Jiang LG, Lindqvist PA (1999) Effects of loading rate on rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36 (5):597-611.

[15] Zhang ZX, Yu J, Kou SQ, Lindqvist PA (2001) Effects of high temperatures on dynamic rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38 (2):211-225.

[1] Aggelis DG, Soulioti DV, Barkoula NM, Paipetis AS, Matikas TE (2012) Influence of fiber chemical coating on the acoustic emission behavior of steel fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* 34 (1):62-67.

[2] Aggelis DG, Soulioti DV, Sapouridis N, Barkoula NM, Paipetis AS, Matikas TE (2011) Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete. *Constr Build Mater* 25:4126-4131.

[3] Bazant ZP, Bai SP, Gettu R (1993) Fracture of rock: effect of loading rate. *EngFractMech*; 45:393±8.

[4] Cai M, Kaiser PK, Suorineni F, Su K (2007) A study on the dynamic behavior of the Meuse/Haute-Marne argillite. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 32 (8-14):907-916.

[5] Chen F, Ma CD, Xu JC (2005) Dynamic response and failure behavior of rock under static-dynamic loading. *Journal CSUT* 12(3): 354-358.

[6] Costin LS (1981) Static and dynamic fracture behaviour of oil shale. *Fracture mechanics for ceramics, rock and concrete*. ASTM STP745, p. 169±84.

[7] Jafari MK, Pellet F, Boulon M, AminiHosseini K (2004) Experimental study of mechanical behaviour of rock joints under cyclic loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 37: 3-23.

[8] Kurz JH, Finck F, Grosse CU, Reinhardt HW (2006) Stress drop and stress redistribution in concrete quantified over time by the “b-value” analysis. *Struct*

-
- 1-Fracture toughness
 - 2 -Bifurcation
 - 3- Acoustic Emission (AE)
 - 4 -INSTRON
 - 5 -Vallen
 - 6 -Average Frequency
 - 7 -Raise Angle
 - 8 -Coalescence
 - 9 -Brittle
 - 10 -Ductile
 - 11 -Wang
 - 12 -closure
 - 13 -Chen

Effect of Loading Rate on the Failure Mechanism of Rocks under Indirect Tensile Loading

Nejati, H. R; Ghazvinian, A.

Rock Mechanics Department, School of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: March 2016

Accepted: February 2017

KEYWORDS

Failure Mechanism
Loading Rate
Acoustic Emission
Load Frequency

ABSTRACT

Summary

Failure mechanism of rocks is one of the fundamental aspects to study rock engineering stability. The macroscopic deformation and failure of rock is a dynamic, gradual and cumulative process of nucleation, growth, penetration, coalescence of micro-cracks, which is a non-equilibrium, non-linear evolutionary process. In the present study, the effect of loading rate on rock

failure mechanism was considered. For this purpose, some experimental tests were conducted on Brazilian disk specimens of a homogeneous and isotropic sandstone at six different loading rate (0.3, 0.6, 1.2, 2.4, 4.8 and 9.6 mm/min). During the tests, acoustic emission (AE) sensors were used to monitor the fracturing process.

AE monitoring showed that micro-crack density induced by the applied loads during different stages of the failure processes increases as loading rate increases. Also, it is found that loading rate influences the mode of induced fracture, so that the number of tensile fractures decreases when loading rate increases.
