

رفتار خستگی سنگ‌های سخت تحت بارگذاری سیکلی

علی اکبر مؤمنی^{۱*}؛ غلامرضا خانلری^۲؛ مجتبی حیدری^۳؛ مرات کاراکوس^۴ و علیرضا طالب بیدختی^۵

- ۱- استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۲- استاد گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا
- ۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا
- ۴- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه آدلاید استرالیا
- ۵- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی

دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۱۰ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۱۰

چکیده

هدف از این پژوهش ارزیابی رفتار خستگی سنگ‌های مقاوم و سخت گرانیتوئیدی تحت بارگذاری چرخه‌ای تک‌محوره می‌باشد. بدین منظور ۴ نمونه مغزه تحت بارگذاری استاتیکی و ۶ نمونه مغزه تحت بارگذاری دینامیک از نوع بارگذاری نیرو کنترل و جابجایی کنترل قرار گرفت. آزمون‌های نیرو کنترل در ترازهای تنش متغییر و دامنه بارگذاری ثابت (۶۸٪ مقاومت فشاری تک‌محوری) و فرکانس یک هرتز انجام گردید. آزمون جابجایی کنترل به صورت پله‌ای با افزایش حد بالای جابجایی و دامنه بارگذاری ثابت انجام شد. به منظور ارزیابی نتایج آزمون‌های خستگی پارامترهای کرنش بیشینه و کمینه محوری، کرنش بیشینه و کمینه جانبی، مدول‌های مماسی و متقاطع، چقرمگی و انرژی وارفتگی بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که این تیپ سنگی حساسیت کمی به آسیب خستگی نشان می‌دهد چراکه رفتار غالب آن الاستیک است. از بین پارامترهای آسیب خستگی، پارامتر کرنش جانبی آسیب سه مرحله‌ای خستگی را بهتر نشان می‌دهد. بعلاوه مشاهده گردید که حلقه وارفتگی عملاً برای این تیپ سنگی تشکیل نشده و شکست سنگ به صورت انفجاری است. همچنین، آزمون جابجایی کنترل نشان داد که این تیپ سنگی رفتار کرنش نرم شونده ضعیفی را نشان می‌دهد

واژگان کلیدی

خستگی، فرکانس بارگذاری، چقرمگی، حلقه وارفتگی، کرنش نرم شونده

۱- مقدمه

در گذشته تحقیقاتی به منظور ارزیابی این نکته که آیا سنگ‌ها هم در معرض خستگی می‌باشند یا خیر، انجام شده است که عمدتاً در ارتباط با بهبود حفاری معدنکاری بوده است. با این وجود، تلاش‌های انجام گرفته برای مطالعه خصوصیات

خستگی سنگ‌ها محدود بوده و نتایج به دست آمده قاطع نبوده و بعضاً به دلیل شرایط گسترده بارگذاری و ویژگی‌های زمین‌شناختی مواد، نتایج به دست آمده باهم مغایرت دارند [۱]. بوردین [۲] برای اولین بار نشان داد که تراکم سیکلی سنگ، منجر به ضعیف‌شدگی این مصالح می‌گردد. وی ماسه‌سنگ‌های بریا را تحت بارگذاری تک‌محوری و سه محوری چرخه‌ای قرار

همانند شرایط تک‌محوری وجود دارد. مؤمنی و همکاران [۱۲] رفتار خستگی مونوزوگرانیتهای الوند را در شرایط مختلف بارگذاری سیکلی مورد ارزیابی قراردادند و مشاهده کردند که در اثر پدیده خستگی مقاومت این نوع گرانیتهای تا ۷۵ درصد مقاومت اولیه آنها کاهش می‌یابد.

مروری بر تاریخچه مکانیک سنگ نشان می‌دهد که پیشرفت‌هایی در زمینه توصیف رفتار سنگ در بارگذاری دینامیکی و چگونگی آزادسازی انرژی در حین تغییر شکل، حاصل شده است. باین‌وجود اطلاعات و دانش موجود برای پاسخ‌گویی به نیازهای کاربردی و پیش‌بینی انفجار سنگ و زمین‌لرزه و تدوین یک برنامه علمی برای حل این مشکلات کافی نیست. بعلاوه سنگ‌های مطالعه شده عمدتاً سنگ‌های با مقاومت متوسط تا بالا بوده و عملاً سنگ‌های با مقاومت بسیار بالا که رفتار شکننده‌ای دارند (سنگ‌هایی با رفتار غالب الاستیک-شکست قبل از پیک و همراه با آزاد کردن انرژی بعد از نقطه پیک مقاومتی)، مطالعه نشده‌اند. با توجه به موارد گفته‌شده، بر روی رفتار خستگی سنگ‌ها کارهای محدودی صورت گرفته است. لذا ضرورت ارزیابی عملکرد بارگذاری چرخه‌ای بر روی خصوصیات مهندسی این گروه از سنگ‌ها، احساس می‌گردد.

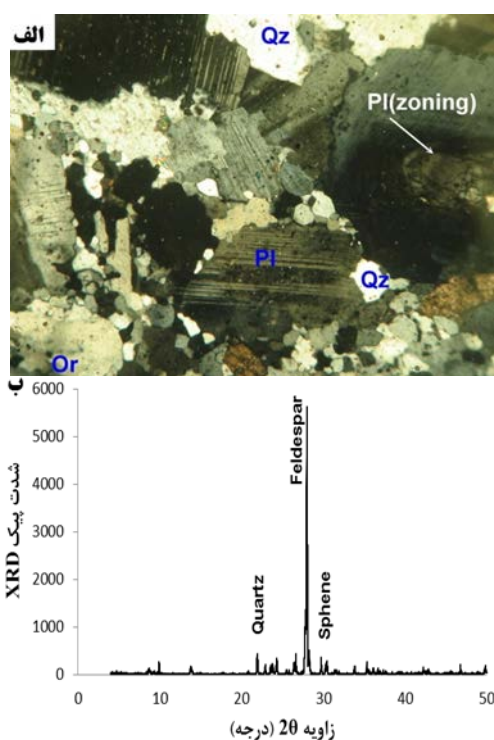
۲- مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر بر روی سنگ‌های گرانودیوریتی انجام شده است. بدین منظور بلوک مناسبی از این سنگ‌ها انتخاب شد و سپس برای تهیه مغزه‌های لازم به آزمایشگاه انتقال داده شد. در ابتدا به منظور تشخیص کانی‌شناسی این سنگ‌ها مقاطع نازک مناسب از آن تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت. بعلاوه جهت تکمیل مطالعات سنگ‌شناسی آزمایش XRD بر روی این نمونه‌ها انجام گردید. مغزه‌های تهیه‌شده به منظور انجام آزمون‌های خستگی، دارای نسبت طول به قطر $۲/۵$ و قطر ۵۴ میلی‌متر بوده‌اند. سطوح انتهایی این مغزه‌ها مطابق با استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ [۱۳] آماده گردیدند. همچنین به منظور ثبت رفتار تغییر شکل‌پذیری این سنگ‌ها در طول آزمایش چهار عدد کرنش‌سنج الکترونیکی با طول ۲۰ میلی‌متر، با آرایش دو کرنش‌سنج قائم و دو کرنش‌سنج افقی بر روی نمونه‌ها چسبانیده شدند. قبل از انجام آزمایش‌های خستگی، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این سنگ‌ها اندازه‌گیری گردید.

داد و به این نتایج رسید که: درتنشی برابر ۷۴ درصد مقاومت فشاری تک‌محوری در شرایط استاتیکی، شکست در کمتر از ۱۰۶ سیکل اتفاق می‌افتد. ایشیزاکا و همکاران [۳] گزارش نموده‌اند که اگرچه خستگی برای سنگ‌ها طبیعی است، اما کاهش مقاومت سنگ، ناشی از تکرار بارگذاری بشدت متغیر است. همچنین ارزیابی آنها از تأثیر فرکانس، مشخص کرد که در شرایط تنش اعمالی مشابه، افزایش فرکانس باعث افزایش عمر خستگی (مدت‌زمان یا تعداد چرخه‌های بارگذاری سیکلی) می‌شود. یاماشیتا [۴] یک سری تست خستگی و خزش بر روی سنگ‌های نرم و سخت انجام داد. وی به این نتیجه رسید که فرآیند گسیختگی و مکانیسم بارگذاری در آزمون خزش/خستگی و بارگذاری فشاری تک‌محوری، ارتباط تنگاتنگی با یکدیگر دارد. ریو همکاران [۵] اثر نرخ کرنش بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری و تنش خستگی ماسه‌سنگ‌ها را مطالعه نمودند. مطابق با نتایج کار آنها، تنش خستگی و مدول یانگ با افزایش نرخ کرنش، افزایش می‌یابد. همچنین کرنش گسیختگی در شرایط نرخ کرنش متفاوت، با افزایش تعداد چرخه‌ها، افزایش نشان می‌دهد. گرانیماه وانقی و همکاران [۶] رفتار زوال‌پذیری مقاومتی ماسه‌سنگ و گرانودیوریت را در اثر بارگذاری چرخه‌ای تک‌محوری مورد مطالعه قراردادند و به این نتیجه رسیدند که دامنه بارگذاری، بیشترین تأثیر را در پاسخ خستگی این‌گونه سنگ‌ها دارد.

باجده و پتروس [۷و۸] خصوصیات خستگی و دینامیکی ماسه‌سنگ را تحت بارگذاری سیکلی مطالعه کرده‌اند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش فرکانس بارگذاری، پارامترهایی نظیر مقاومت خستگی، انرژی آزادشده و مدول دینامیکی کاهش می‌یابد. از طرفی آنها نشان دادند که ریزساختار نمونه‌ها بر روی خصوصیات خستگی مؤثر است. فوننکاجورن و فوننکفام [۹] تأثیر بارگذاری چرخه‌ای را بر روی خصوصیات سنگ‌های نمکی مطالعه نمودند. مطابق با نتایج کار آنها، مقاومت خستگی با افزایش تعداد چرخه‌های بارگذاری به صورت تابع توانی کاهش می‌یابد. لیو و هی [۱۰] و لیو و همکاران [۱۱] به منظور ارزیابی تأثیر تنش محصورکننده بر روی خصوصیات خستگی سنگ، یک سری آزمایش خستگی سه محوری بر روی ماسه‌سنگ‌ها انجام دادند که نشان داد با افزایش تنش محصورکننده، کرنش در لحظه شکست افزایش‌یافته و رفتار خستگی سه مرحله‌ای

حضور دارند. این مطلب باعث شده تا این سنگ‌ها کاملاً سفید بوده و پیشوند هولولکو برای آنها آورده شود. نبود این کانی‌ها، باعث شده تا این سنگ‌ها رفتار شکننده‌ای از خود نشان دهند. طوری که در نمونه‌های صحرایی فراهم کردن بلوک سنگی که بتوان مغزه مناسب از آن تهیه نمود مشکل بوده و اکثر بلوک‌ها دارای شکستگی و ریزترک‌های بودند که حاصل کرنش پذیری کم این سنگ‌ها در برابر تنش‌های تکتونیکی متحمل شده در گذشته زمین‌شناسی سنگ و همچنین تنش‌های ناشی از عملکرد فرایندهای هوازدگی می‌باشد.



شکل ۱: سیمای کانی‌شناختی سنگ‌های گرانودیوریتی الوند، الف: عکس مقطع کانی‌شناختی، ب: نتایج آنالیز XED. Qz: کوارتز، Pl: پلاژیوکلاز، Or: اورتوز

۳-۲- آزمایش‌های خستگی نیرو کنترل

خلاصه نتایج بارگذاری استاتیکی و دینامیکی بر روی این سنگ‌ها در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. این نتایج به‌عنوان مرجعی برای مقایسه رفتار دینامیکی با استاتیکی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به میانگین مقاومت تک‌محوره ۲۵۹ مگاپاسکال و مدول الاستیک ۶۶ گیگاپاسکال به‌دست آمده، این سنگ‌ها بر اساس رده‌بندی دیر و میلر در رده AM قرار می‌گیرند. بالا بودن مدول الاستیسیته و نزدیک بوده

درواقع این آزمایش‌ها به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی- مکانیکی این گروه از سنگ‌ها در شرایط بارگذاری استاتیکی و فراهم ساختن مرجعی برای آزمایش‌های دینامیکی بعدی، انجام گردیدند. به‌منظور انجام آزمایش‌های خستگی، دستگاه سروهیدرولیک حلقه بسته از نوع اینسترون با ظرفیت بارگذاری ۵۰۰ کیلو نیوتن در دانشگاه آدلاید استرالیا استفاده گردید. آزمون خستگی به دو صورت نیرو کنترل و جابجایی کنترل انجام می‌گردد که هر دو روش در این پژوهش به کار گرفته شده است. آزمایش‌های مذکور در شرایط بارگذاری تک‌محوری در سه سطح بیشینه بار مختلف، در بازه ۰/۹۲، ۰/۹۵ و ۰/۹۸ مقاومت فشاری تک‌محوری، انتخاب گردیدند. دامنه بارگذاری برای این سه آزمون خستگی، ۶۸ درصد مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ در نظر گرفته شد. بعلاوه به‌منظور ارزیابی رفتار نرم شوندگی این سنگ‌ها، یک آزمون چندمرحله‌ای به روش جابجایی کنترل انجام گردید. در شروع آزمایش نمونه تا سطح تنش متوسط، به‌صورت نیرو کنترل و با نرخ اعمال بار مشابه باحالت استاتیکی (۱/۶ کیلو نیوتن بر ثانیه)، بارگذاری شد. پس از رسیدن به سطح تنش متوسط، با وارد کردن دامنه و فرکانس بارگذاری، بارگذاری چرخه‌ای آغاز گردید. فرکانس مورد استفاده در این پژوهش به‌جز یک آزمون با فرکانس بارگذاری ۰/۵ هرتز، یک هرتز بوده است. درنهایت نتایج به‌دست آمده از آزمون خستگی از نقطه نظر کرنش‌های حداکثر و حداقل جانبی و محوری، مدول‌های مماسی و متقاطع بارگذاری و باربرداری، چقرمگی و انرژی وارفتگی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مطالعات پتروگرافی

مطالعات مقطع نازک نشان می‌دهد که گرانودیوریت‌های مورد مطالعه، درشت‌دانه با بافت انهدرال گرانولار می‌باشند (شکل ۱ الف). ترکیب کانی‌شناختی این سنگ‌ها شامل کوارتز (۲۵ درصد)، ارتوکلاز (۱۰ درصد)، پلاژیوکلاز (۶۰ درصد)، مسکویت (۲ درصد) و اسفن (۳ درصد) می‌باشد. نتایج آزمون XRD انجام شده بر روی این سنگ‌ها مؤید نتایج مطالعات مقطع نازک می‌باشد (شکل ۱ ب). نکته قابل توجه در ترکیب این سنگ‌ها نبود کانی‌های مافیکی مثل بیوتیت و هورنبلند بوده که معمولاً در ترکیب سنگ‌های خانواده گرانیتوئیدها

که به هنگام گسیختگی در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی، سنگ منفجرشده و در آنها سطح شکست به علت انفجار قابل تشخیص نیست (شکل ۳). علت این رفتار را می توان به رفتار الاستیک این سنگ نسبت داد. در واقع به علت رفتار الاستیک سنگ، انرژی زیادی در سنگ ذخیره شده و زمانی که تراز تنش به حدی که باعث ایجاد هسته های ترک می رسد، این انرژی ذخیره شده باعث گسیختگی ناگهانی سنگ شده و آزاد می گردد.

۳-۲-۱- ارزیابی تأثیر بیشینه باربر روند خستگی

ارزیابی آسیب خستگی بر اساس پارامترهای کرنش محوری و جانبی در برابر چرخه نسبی (شماره چرخه بارگذاری (n) به شماره چرخه نهایی در لحظه شکست (N)) و در شرایط بارگذاری با دامنه بار $0/68$ و بیشینه بارهای $0/92$ ، $0/95$ و $0/98$ در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ها دیده می شود فرایند آسیب خستگی این سنگ ها شامل سه مرحله هسته زایی ترک، رشد یکنواخت ترک و رشد تسریع شونده ترک می باشد. مرحله هسته زایی ترک (فاز I) و مرحله رشد یکنواخت و پایدار ترک (فاز II)، در هر چهار پارامتر و همچنین هر چهار نمونه قابل تشخیص می باشد. عمده تفاوت رفتار این نوع سنگ با دیگر گرانیتهای، مربوط به رشد ناپایدار و تسریع شونده ترک (فاز III) می باشد.

آن با مقدار مدول متقاطع، حکایت از این مطلب دارد که این سنگ ها کرنش پذیری خیلی پایینی دارند. ساختار بلورین و عدم توسعه هوازگی در این سنگ ها باعث گردیده تا همانند دیگر سنگ های آذرین مقدار تخلخل این سنگ، پایین باشد. نبود کانی های مافیک حاوی آهن و منیزیم باعث شده دانسیته این سنگ ها نسبت به خانواده گرانیتهای در پایین ترین مقدار باشد.

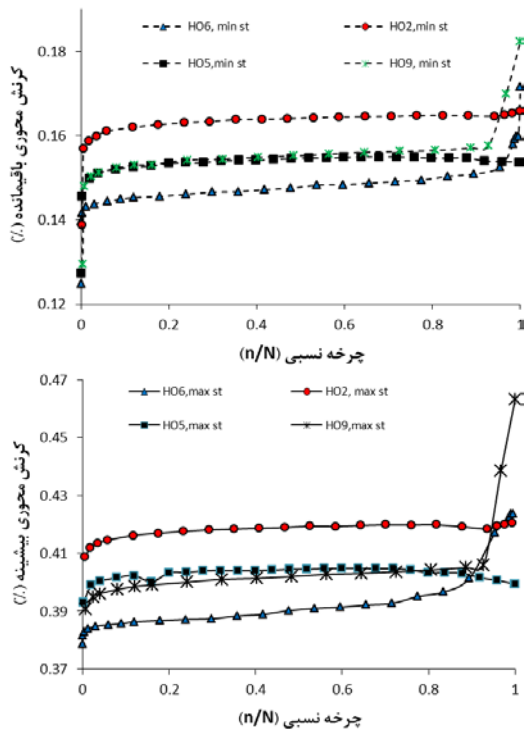
به منظور مقایسه رفتار گراندیوریت ها در حالت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی، منحنی تنش-کرنش این تیپ سنگی در هر دو حالت بارگذاری، در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، به علت آسیب انباشتی، گسیختگی برای این تیپ سنگی نیز می تواند در تراز تنشی پایین تر از مقاومت فشاری تک محوری اتفاق بیفتد. با این وجود، ارزیابی رفتار این تیپ سنگی در شکل ۲ حکایت از رفتار بسیار الاستیک و شکننده برای این تیپ خاص سنگی داشته به نحوی که سنگ در بارگذاری چرخه ای کرنش محوری کمی را متحمل شده و عملاً به محض رسیدن به کرنش محوری در لحظه شکست برای حالت بارگذاری استاتیکی، نمونه دچار گسیختگی می شود. در مقایسه با رفتار دیگر سنگ های گرانیتهای [۱۴]، مقاومت این سنگ ها بالاتر بوده و سهم بخش رفتار پلاستیک در منحنی تنش-کرنش این نوع سنگ، بسیار محدود می باشد. شکنندگی این سنگ ها در حدی است

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در شرایط استاتیکی برای گراندیوریت های الوند

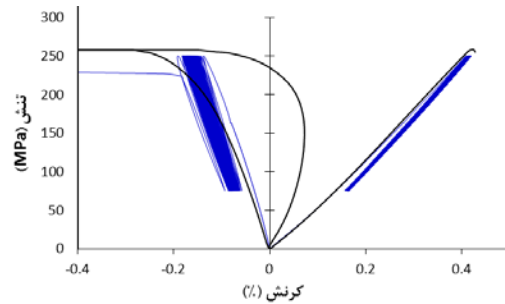
نوع مقادیر	مقاومت فشاری تک محوری (Mpa)	مدول مماسی (Gpa)	مدول متقاطع (Gpa)	چقرمگی (J/m ³)	دانسیته (gr/cm ³)	تخلخل (%)
بیشینه	۲۷۳/۲۲	۶۷/۸۸	۶۰/۲۲	۰/۵۷۸	۲/۶۴۷	۰/۹۲
میانگین	۲۵۹/۱۶	۶۶/۰۳	۵۹/۰۸	۰/۵۳۰	۲/۶۴۵	۰/۸۴
کمینه	۲۴۹/۱۰	۶۴/۷۲	۵۸/۱۷	۰/۴۶۸	۲/۶۴۴	۰/۷۶

جدول ۲: خلاصه ای از مشخصات آزمون های خستگی انجام شده بر روی گراندیوریت ها

شماره نمونه	سطح تنش بیشینه	دامنه بارگذاری	فرکانس (Hz)	شماره چرخه شکست
HO5(92-1-501)	۰/۹۲	۰/۶۸	۱	۵۰۱
HO6(95-1-1709)	۰/۹۵	۰/۶۸	۱	۱۷۰۹
HO2(98-1-170)	۰/۹۸	۰/۶۸	۱	۱۷۰
HO9(98-0.5-124)	۰/۹۸	۰/۶۸	۰/۵	۱۲۴
HO11(87-98-1-277)	۰/۸۷، ۰/۹۲، ۰/۹۷، ۰/۹۸	۰/۶۸	۱	۲۷۷
HO3(95-1-164)	۰/۹۵	-	۱	۱۶۴



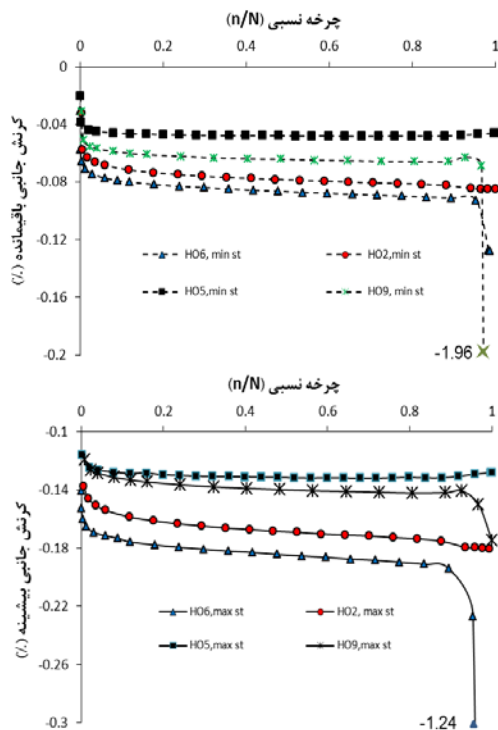
شکل ۴: روند تغییرات کرنش محوری حداکثر و باقیمانده در بارگذاری چرخه‌ای در نمونه‌های HO2(98-1-170)، HO5(92-1-501)، HO6(95-1-1709) و HO9(98-0.5-124)



شکل ۲: نمونه‌ای از منحنی تنش کرنش استاتیکی و دینامیکی برای هولولوکوگرانود یورت‌های الوند



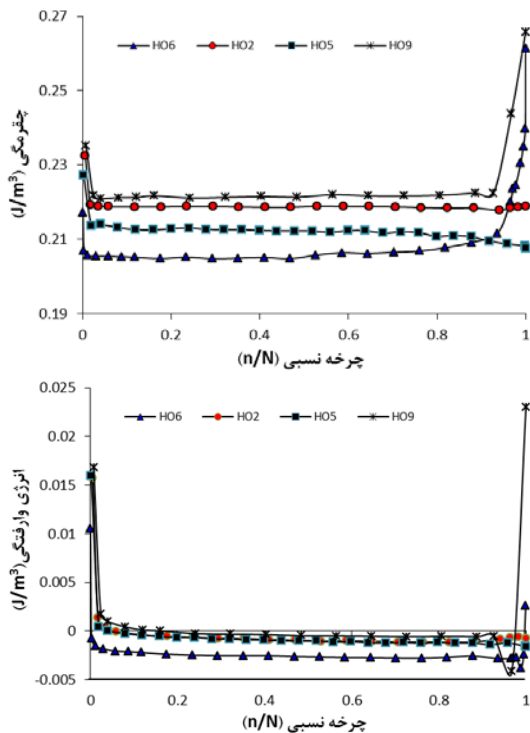
شکل ۳: انفجار هولولوکوگرانود یورت‌ها به هنگام شکست و پخش شدن اجزای آن



شکل ۵: روند تغییرات کرنش جانبی حداکثر و باقیمانده در بارگذاری چرخه‌ای در نمونه‌های HO2(98-1-170)، HO5(92-1-501)، HO6(95-1-1709) و HO9(98-0.5-124)

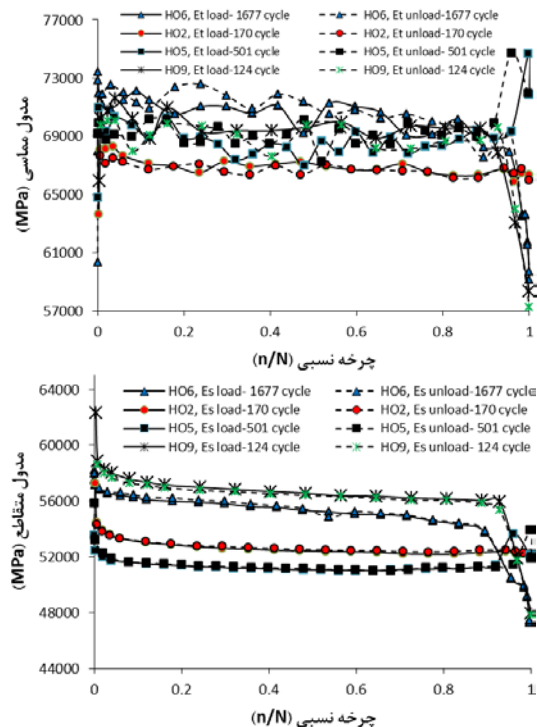
همچنین مقایسه منحنی‌های پارامترهای آسیب خستگی نمونه های $HO2(98-1-170)$ و $HO9(98-0.5-124)$ نشان می‌دهد که در شرایط بارگذاری مشابه و فرکانس متفاوت، کاهش فرکانس بارگذاری، فاز توسعه سریع ترک، نمود بهتری از خود نشان می‌دهد. به علاوه با کاهش تنش بیشینه بارگذاری، بخش بیشتری از عمر خستگی، در فاز گسترش سریع ترک، طی می‌گردد. در واقع در سطوح تنش بالاتر به علت گسترش ناگهانی ترک‌های ایجاد شده در مراحل قبل تعداد چرخه‌هایی که رفتار نمونه وارد فاز سوم خستگی شده است، بسیار محدود است. در مقایسه با رفتار دیگر گرانیتوئیدی [۱۴] و علی‌رغم تحمل تنش بالاتر، مقدار کرنش‌های محوری و جانبی در لحظه شکست برای این تیپ سنگی، در هر دو شرایط بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای کمتر می‌باشد. این امر نشان از رفتار الاستیک این تیپ سنگی داشته و شکنندگی آن باعث شده که میزان تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در سنگ، قبل از رسیدن به نقطه شکست محدود باشد.

روند آسیب خستگی چقرمگی و انرژی وارفتگی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، کاهش ناگهانی در چند چرخه اول بارگذاری، ناشی از بسته شدن ریزترک های موجود و بارگذاری آهسته تا تنش متوسط، برای این تیپ سنگی نیز مشاهده می شود. در چرخه های بعدی، ایجاد ریزترک های جدید و رشد ترک های قبلی به آهستگی شروع و کم کم روند افزایشی آن با شیب یکنواخت ادامه می یابد. در نهایت یک افزایش سریع در روند تغییرات چقرمگی اتفاق می افتد که در ارتباط با فاز تسریع شونده رشد ترک است. همانند روند تغییرات دیگر پارامترهای آسیب خستگی، آنومالی مربوط به فاز سوم آسیب، در نمونه HO5(92-1-501) - برای چقرمگی و انرژی وارفتگی هم دیده می شود. برای انرژی وارفتگی نیز رفتار مشابه با روند تغییرات چقرمگی مشاهده می شود. نکته بسیار مهم در روند تغییرات انرژی وارفتگی این مطلب است که با کاهش شدید در چند چرخه اول، مقدار این پارامتر به سمت صفر میل می کند. در واقع به علت تشکیل نشدن حلقه هیسترسیس، بخشی از انرژی که در هر چرخه به سنگ وارد شده مصرف نشده و این انرژی در سنگ ذخیره می شود.



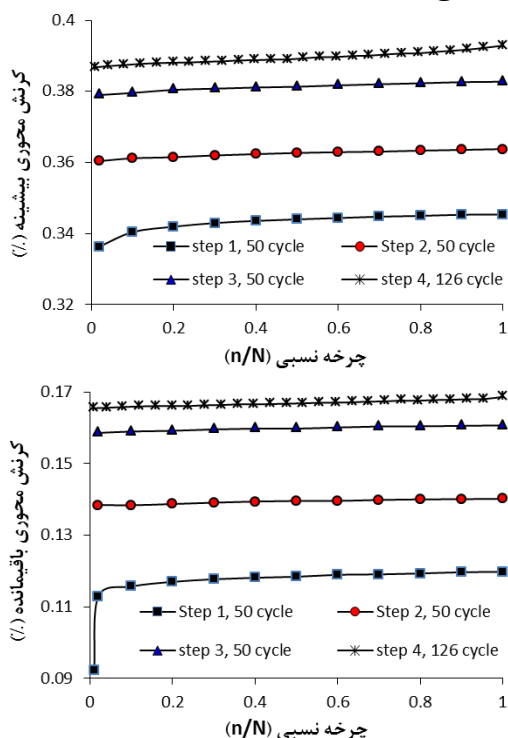
شکل ۷: روند تغییرات چقرمگی و انرژی وارفتگی در شرایط بیشینه بار متفاوت در نمونه های HO6(95-1-1709)، HO5(92-1-501) و HO9(98-0.5-124)، HO2(98-1-170) و HO5(92-1-501)

شکل ۶ تغییرات پارامتر آسیب خستگی مدول مماسی و متقاطع را در شرایط بارگذاری و باربرداری در برابر چرخه نسبی نشان می دهد. همان طور که در این شکل دیده می شود، آنومالی مربوط به نمونه HO5(92-1-501) در هر دو مدول مماسی و متقاطع نیز نمود پیدا کرده است. روند تغییرات نشان می دهد که به طور کلی مدول مماسی روند کاهشی را با افزایش تعداد چرخه ها، در هر دو شرایط بارگذاری و باربرداری، نشان می دهد. با این وجود، تشخیص مراحل سه گانه آسیب خستگی برای این پارامتر مشکل است. برخلاف مدول مماسی، روند آسیب سه مرحله ای برای مدول متقاطع در هر دو شرایط بارگذاری و باربرداری دیده می شود. مشابه با تغییرات کرنشی، برای این پارامترها نیز با کاهش تنش بیشینه بارگذاری، بخش بیشتری از عمر خستگی در فاز توسعه سریع ترک سپری شده است. نکته قابل توجه در روند تغییرات مدول های الاستیک و بخصوص مدول متقاطع، مشابه بودن مقادیر این پارامتر در شرایط بارگذاری و باربرداری است. در واقع این انطباق حکایت از رفتار الاستیک خطی و عدم تشکیل حلقه وارفتگی دارد.



شکل ۶: روند تغییرات مدول های مماسی و متقاطع بارگذاری و باربرداری در شرایط با بیشینه بار متفاوت در نمونه های HO5(92-1-501)، HO6(95-1-1709) و HO2(98-1-170)، HO9(98-0.5-124)

تشخیص داد. روند تغییرات کرنش جانبی همانند کرنش محوری بوده با این تفاوت که مراحل ذکر شده در کرنش جانبی بهتر قابل تشخیص هستند. در واقع چون ترک‌های ایجاد شده در راستای بارگذاری توسعه می‌یابند، لذا بازشدگی آنها در راستای عمود بر ترک بوده و باعث می‌شود که در بارگذاری چرخه‌ای کرنش جانبی بیش از کرنش محوری تحت تأثیر قرار گیرد.

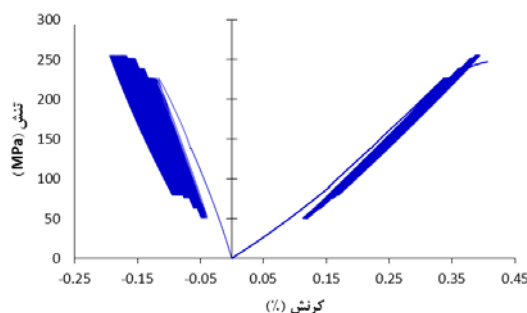


شکل ۹: روند تغییرات کرنش‌های محوری بیشینه و باقیمانده در آزمون خستگی نیرو کنترل پله‌ای برای نمونه HO11(87-98-1-277)

همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، مدول متقاطع بارگذاری و باربرداری در چرخه‌های اولیه به خاطر بسته شدن ناپیوستگی‌های موجود در سنگ، افت سریعی داشته و با افزایش تعداد چرخه‌ها به سمت پایداری میل می‌نمایند. در واقع روند کاهش مدول با شیب کاهنده به دلیل این مطلب است که محیط الاستیک پیرامون ناحیه پلاستیک ترک، به خاطر خاصیت الاستیسیته، به هنگام باربرداری تمایل به برگشت به حالت اولیه دارد. این موضوع باعث ایجاد تنش فشاری در اطراف ترک شده و باعث کند شدن روند رشد آن می‌گردد. به همین خاطر، بارگذاری پله‌ای یا بیش بارگذاری انجام گردیده است. در دو پله میانی رفتار نمونه مشابه با پله اول بوده و شیب منحنی‌ها تقریباً باهم برابرند. در ۶۰ درصد عمر خستگی مربوط به پله بارگذاری چهارم شیب منحنی روندی افزایشی به خود

در توجیه این رفتار، می‌توان چنین بیان کرد که در چند چرخه اول که حلقه‌های کوچک وارفنگی تشکیل می‌شود، بخشی انرژی وارده به سنگ، صرف بستن ریزترک‌ها شده و مصرف می‌شود. پس از بسته شدن این ریزترک‌ها، سنگ کاملاً یکپارچه و الاستیک شده و به علت اینکه عملاً نقطه تسلیم در این سنگ‌ها نزدیک مقاومت نهایی است، بخش زیادی از انرژی وارده مصرف نشده تا به چرخه‌های آخر برسد.

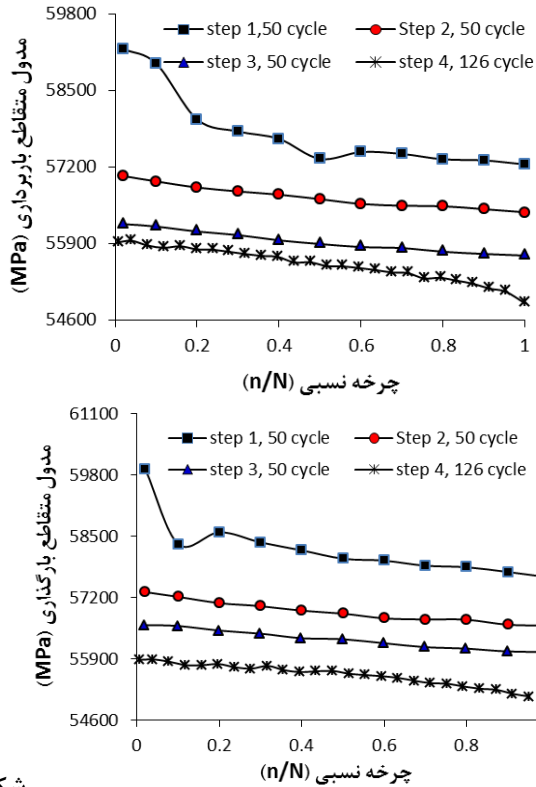
یک آزمون خستگی چندمرحله‌ای نیرو کنترل در ۴ سطح تنش از ۰/۸۷ تا ۰/۹۸ مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی گرانودیوریت الوند انجام گردید (شکل ۸). نحوه انجام این آزمایش به نحوی بود که تنش‌های اعمالی بعد از تثبیت تغییر شکل به ترتیب افزایش داده شدند. روند آسیب خستگی چندمرحله‌ای بر اساس پارامترهای کرنش جانبی و محوری، مدول متقاطع، چقرمگی و انرژی وارفنگی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۸: منحنی تنش-کرنش بارگذاری پله‌ای در نمونه HO11(87-98-1-277)

روند تغییرات کرنش‌های محوری و جانبی حداکثر و باقیمانده در بارگذاری پله‌ای، در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، افزایش سریع مقادیر کرنش‌ها در ۲۰ درصد اول عمر خستگی مربوط به پله اول، مشخص بوده و بعد از آن منحنی با شیب تقریباً یکنواخت ادامه می‌یابد. افزایش پله‌های تنش، تنها باعث افزایش ناگهانی در چرخه اول شده ولی شیب منحنی‌های مربوط به پله‌های تنش دوم و سوم تقریباً موازی با بخش یکنواخت پله تنش اول می‌باشند که بیانگر فاز توسعه یکنواخت ترک می‌باشد. در ۵۰ تا ۶۰ درصد عمر خستگی پله تنش چهارم، شیب منحنی معکوس شده و روندی افزایشی به خود می‌گیرد و حکایت از شروع فاز آسیب جدی به نمونه دارد. در صورت ترکیب این منحنی‌ها، می‌توان روند سه مرحله‌ای آسیب خستگی را برای این نمونه

یابد. در پله تنش دوم روند کاهشی انرژی وارفتگی ادامه داشته و عملاً مقدار آن صفر است. در پله تنش سوم و چهارم منحنی روندی افزایشی داشته ولی باین وجود، تغییرات بسیار کم بوده و نزدیک صفر است.



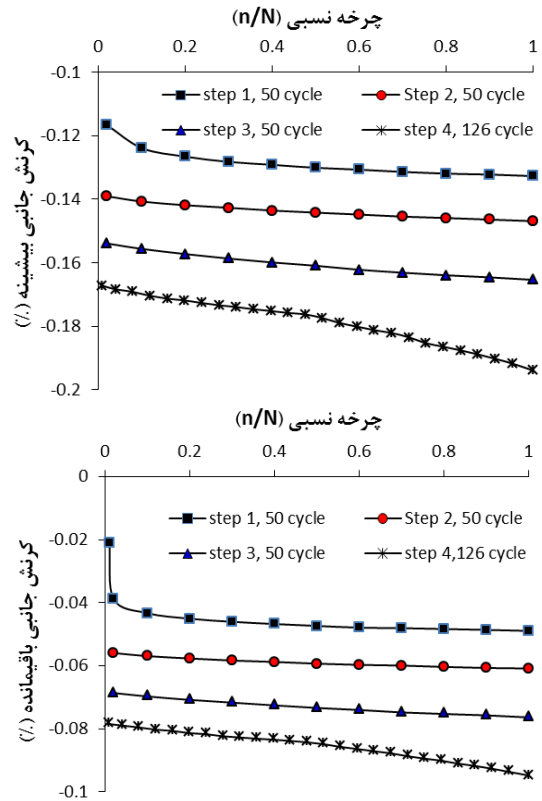
شکل ۱۱

۱۱: روند تغییرات مدول متقاطع بارگذاری و باربرداری در آزمون خستگی نیرو کنترل پله‌ای برای نمونه HO11(87-98-1-277)

۳-۳- آزمون خستگی جابجایی کنترل پله‌ای

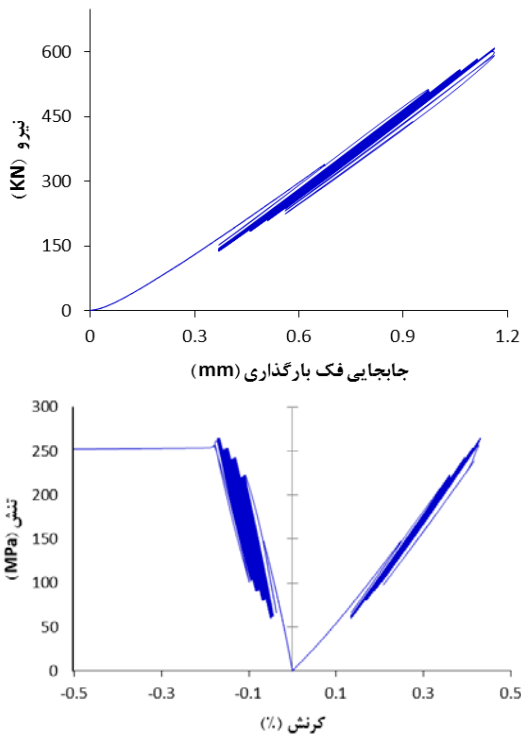
به منظور درک بهتر چگونگی رفتار سخت‌شوندگی و یا نرم‌شوندگی گرانودیوریت‌ها، یک نمونه آزمایش بارگذاری چرخه‌ای به صورت جابجایی کنترل انجام گردید. نمودارهای نیرو-جابجایی دستگاه اینسترون و نمودار تنش- کرنش این نمونه در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، برای اعمال یک جابجایی مشخص پیوسته میزان نیرو و یا تنش لازم کاهش یافته و این روند کاهشی نیرو در پله بارگذاری نهایی مشهودتر است.

می‌گیرد. لازم به ذکر است که به دلیل روند پراکنده مدول مماسی، از آوردن این پارامتر خودداری به عمل آمده است.



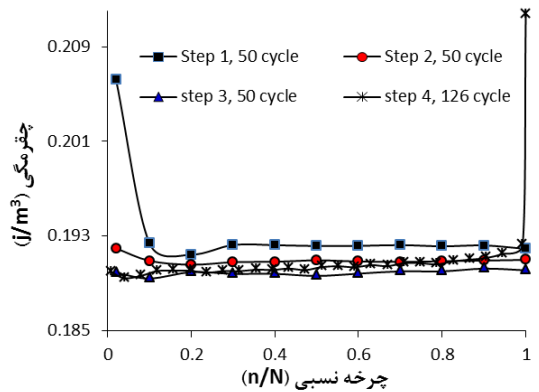
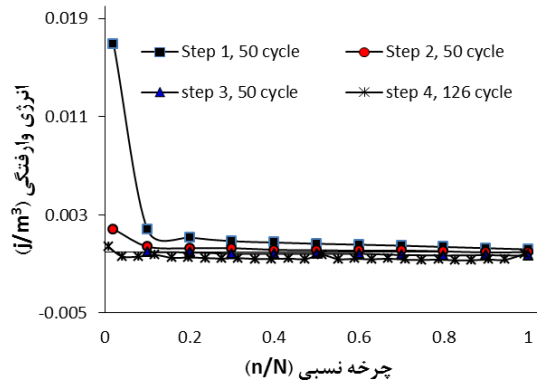
شکل ۱۰: روند تغییرات کرنش‌های جانبی بیشینه و کرنش باقیمانده در آزمون خستگی نیرو کنترل پله‌ای برای نمونه HO11(87-98-1-277)

پارامتر آسیب خستگی چقرمگی یک افت شدید را در چرخه‌های اولیه پله بارگذاری با سطح تنش برابر با ۸۷٪ مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، نشان می‌دهد (شکل ۱۲). پس از بسته شدن ریزترک‌ها و گذشت ۲۵ درصد از عمر خستگی پله تنش اول، منحنی روندی یکنواخت با شیب بسیار کم به خود می‌گیرد چراکه مقدار کرنش معادل تنش‌ها نسبت به چرخه‌های اولیه کم شده است. در پله‌های تنش میانی نیز کاهش اولیه در چقرمگی همانند پله اول، ولی با شدت کمتر دیده شده و پس‌از آن نمودار با شیب یکنواخت و مثبت ادامه می‌یابد. تغییرات این پارامتر در پله تنش چهارم همانند مراحل قبل بوده با این تفاوت که تقریباً در ۸۰ درصد عمر خستگی شیب منحنی شروع به افزایش سریع‌تر کرده و یک جهش بزرگ در چرخه آخر بارگذاری دیده می‌شود. تغییرات انرژی وارفتگی نشان می‌دهد که در پله تنش اول، منحنی در چرخه‌های اولیه کاهش شدیدی داشته و روند کاهشی آن ادامه می‌



شکل ۱۳: تغییرات نیرو-جابجایی دستگاه اینسترون و تنش-کرنش نمونه HO3(95-1-164) در آزمایش خستگی جابجایی

تغییرات تنش کمینه و بیشینه روند کاملاً مشابهی را از خود نشان می‌دهند. افت این پارامتر در ۵ درصد از عمر خستگی پله اول مشخص بوده و پس از آن روند نزولی تنش با شیب بسیار کم ادامه می‌یابد (شکل ۱۴). این روند یکنواخت در پله‌های دوم و سوم بارگذاری و به صورت هم‌شیب ادامه می‌یابد. در ۸۰ درصد عمر خستگی پله آخر شیب تغییرات تنش شدت گرفته و رفتار نرم شوندگی مشهود است. این رفتار در منحنی تغییرات تنش بیشینه مشخص‌تر از تنش کمینه می‌باشد که باعث افت ۲۵ مگا پاسکالی در تنش اعمالی پله آخر شده است. باین‌وجود، روند تغییرات تنش نشان می‌دهد که شکنندگی سنگ باعث شده که این تیپ خاص از سنگ، کمتر تحت تأثیر رفتار نرم شوندگی قرار گیرد.



شکل ۱۲: روند تغییرات چقرمگی و انرژی وارفتگی در آزمون خستگی به روش نیرو کنترل پله‌ای برای نمونه HO11(87-98-1-277)

علت چنین روندی می‌تواند ناشی از افت تنش و به تبع آن کرنش متناظر با آن در بارگذاری چرخه‌ای باشد. چراکه عامل کنترل‌کننده آزمون نیرو جابجایی فک‌های بارگذاری نسبت به هم بوده و عملاً هم‌مقدار تنش و هم‌مقدار کرنش متغیر است. با توجه به آنچه گفته شد این تیپ سنگی نیز رفتار نرم شوندگی از خود نشان می‌دهد. باین‌وجود به علت رفتار غالب الاستیک و تغییر شکل پلاستیک کم، مقدار نرم شوندگی این نوع سنگ کم می‌باشد. در واقع با توجه به مکانیسم ایجاد ترک در نرم شوندگی سنگ‌های سخت، وقوع این پدیده به خاطر طبیعت شکننده گرانودیوریت‌ها، کمتر دستخوش رفتار نرم شوندگی گردیده است. به منظور بررسی بهتر رفتار نرم شوندگی این سنگ‌ها، روند تغییرات تنش‌های بیشینه و کمینه، در برابر چرخه نسبی در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند.

بعلاوه مقایسه تغییرات کرنش جانبی و محوری نشان می‌دهد که کرنش جانبی آسیب‌پذیری بیشتری داشته، بدین معنی که عمده ترک‌های ایجادشده، در راستای محور بارگذاری بوده و همچنین کرنش محوری لحظه شکست در بارگذاری چرخه‌ای تقریباً برابر با کرنش لحظه شکست در بارگذاری استاتیکی است...

۳- پارامترهای کرنش جانبی به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر از میان پارامترهای آسیب‌خستگی بوده که می‌تواند رفتار خستگی این تپ سنگ‌ها را نشان دهد.

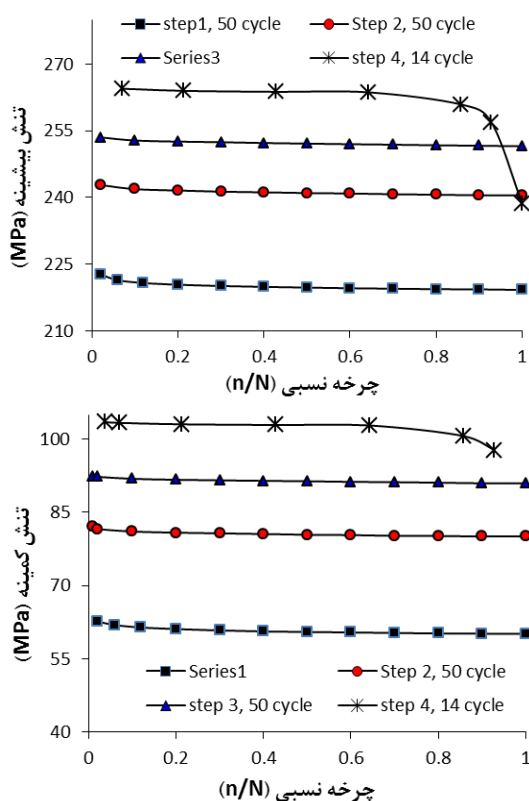
۴- مدول متقاطع نسبت به مدول مماسی در فرایند آسیب‌خستگی، روند ضعیف‌شدگی پیشرونده سنگ را بهتر نشان می‌دهد.

۵- به‌جز چند چرخه ابتدایی و انتهایی عملاً حلقه وارفتگی در سنگ تشکیل نشده و بخشی از انرژی واردشده به سنگ به‌صورت گرما هدررفته و بخش دیگر آن در سنگ ذخیره‌شده و باعث می‌شود زمانی که ترک جوانه زد، سنگ به‌صورت ناگهانی بشکند و انرژی ذخیره‌شده را آزاد نماید. میزان انرژی ذخیره‌شده به حدی است که باعث انفجار سنگ شده و عملاً سطح شکست واضحی قابل تشخیص نخواهد بود.

۶- منحنی‌های نیرو-جابجایی دستگاه و تنش-کرنش جانبی در آزمون جابجایی کنترل نشان می‌دهد که علیرغم تغییرات اندک، رفتار این نوع سنگ‌ها از نوع رفتار کرنش-نرم شوندگی می‌باشد. از بین پارامترهای آسیب‌خستگی می‌توان از تغییرات پارامتر تنش بیشینه برای ارزیابی رفتار نرم‌شوندگی این سنگ‌ها استفاده نمود.

۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان کمال تشکر را از پرفسور مارک جکسا ریس دانشکده مهندسی عمران، محیط‌زیست و معدن دانشگاه آدلاید را به خاطر همکاری در انجام این پژوهش دارند. همچنین از آقایان دیوید هال و ایبن کیتس به خاطر همکاری در انجام آزمایشات تشکر می‌گردد.



شکل ۱۴: روند تغییرات تنش بیشینه و کمینه طی آزمایش خستگی جابجایی کنترل برای نمونه HO3(95-1-164)

۴- نتیجه‌گیری

به‌منظور ارزیابی رفتار خستگی سنگ‌های گرانیتوئیدی آزمون بارگذاری تک‌محوره چرخه‌ای بر روی این سنگ‌ها انجام گردید و با استفاده از پارامترهای آسیب‌خستگی، روند تضعیف‌شدگی سنگ از شروع بارگذاری تا لحظه شکست مورد ارزیابی قرار گرفت. موارد زیر را می‌توان به‌عنوان نتیجه‌گیری از رفتار خستگی این تپ سنگی برشمرد.

- ۱- سنگ‌های که رفتار الاستیک و مقاومت خیلی بالا دارند، به پدیده خستگی حساسیت کمتری خواهند داشت. درواقع هرچه نقطه تسلیم به مقاومت نهایی نزدیک‌تر باشد سنگ کمتر دچار خستگی می‌شود.
- ۲- مکانیسم گسیختگی در این نوع سنگ‌ها نیز ایجاد ریزترک بوده و آسیب‌انباشتی خستگی یک فرایند سه مرحله‌ای را نشان می‌دهد.

۶- مراجع

- [8] Bagde, M.N., Petros, V., 2009. Fatigue and dynamic energy behavior of rock subjected to cyclical loading. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 46: 200– 209. DOI:10.1016/j.ijrmms.2008.05.002
- [9] Fuenkajorn, K., Phueakphum, D., 2010. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. *Eng. Geol.* 112: 43–52. DOI 10.1016/j.enggeo.2010.01.002
- [10] Liu, E., He, S., 2012. Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions. *Eng. Geol.* 125: 81–91. DOI:10.1016/j.enggeo.2011.11.007
- [11] Liu, E., Huang, R., He, S., 2012. Effects of frequency on the dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under confining pressure conditions. *Rock. Mech. Rock. Eng.* 45: 89–102. DOI: 10.1007/s00603-011-0185-y
- [12] Momeni, A., Karakus, M., Khanlari, G.R., Heidari, M., Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 77: 89–96. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.029
- [13] International Society for Rock Mechanics, 2015. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. In: Ulusay R (ed) ISRM suggested methods. Springer International Publishing Switzerland ISBN: 978-3-319-07712-3
- [۱۴] مؤمنی، ع.ا، ۱۳۹۲. بررسی رفتار تابع زمان سنگ‌های گرانیتوئیدی الوند با تأکید بر هوازدگی و خستگی. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه بوعلی سینا
- [1] Mansurov, V.A., 1993. Laboratory experiments: their role in the problem of rock burst prediction. In: Hudson, editor. *Comprehensive rock engineering principles, practice & projects*, Vol. 3. Rock testing and site characterization. Oxford: Pergamon Press, p. 745–71. ISBN 0080420664 9780080420660 0080359310 9780080359311
- [2] Burdine, N.T., 1963. Rock failure under dynamic loading conditions. *Soc. Petr. Eng. J.* 3: 1–8. DOI: 10.2118/481-PA
- [3] Ishizuka, Y., Abe, T., Kodama, J., 1990. Fatigue behavior of granite under cyclic loading. In: Brumer, R., editor, *ISRM international symposium—static and dynamic considerations in rock engineering, Swaziland*, p.139–46. ISRM-IS-1990-015 .
- [4] Yamashita, S., Sugimoto, F., Imai, T., Namsrai, D., Yamauchi, M., Kamoshida, N., 1999. The relationship between the failure process of the creep or fatigue test and of the conventional compression test on rock. In: Vouille, G., Berest, P., editors. *ISRM-9 CONGRESS-1999-142*
- [5] Ray, S.K., Sarkar, M., Singh, T.N., 1999. Effect of loading and strain rate on the mechanical behavior of sandstone. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 36: 543–9. DOI: 10.1016/S0148-9062(99)00016-9
- [6] Geranmayeh Vaneghi, R., Ferdosi, B., Okoth, A.D., Kuek, B., 2018. Strength degradation of sandstone and granodiorite under uniaxial cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 10(1): 117-126 .
- [7] Bagde, M.N., Petros, V., 2005. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 42: 237–50. DOI:10.1016/j.ijrmms.2004.08.008

[15]