

ارزیابی رفتار مکانیکی گرانیت‌های پورفیری تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی سه‌محوری

علی‌اکبر مومنی^{*}، غلامرضا خانلری^۱، مجتبی حیدری^۲ و علی‌اصغر سپاهی^۴

۱- دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲، ۳ و ۴- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

نویسنده مسئول: Ali_moomeni@yahoo.com *

دریافت: ۹۵/۷/۱۳ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۵

چکیده

هدف از انجام این پژوهش ارزیابی خصوصیات مقاومتی مونزوگرانیت‌های الوند تحت شرایط مختلفی از بارگذاری بوده است. بدین منظور در ابتدا آزمون‌های استاتیکی در شرایط تک‌محوری و سه‌محوری انجام گردید تا تاثیر فشار همه جانبه بر روی رفتار مکانیکی سنگ ارزیابی گردد. بعلاوه رفتار خستگی این سنگ‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای سه‌محوره مورد مطالعه قرار گرفت. آزمون‌های خستگی به صورت نیرو کنترل بوده و به دو صورت تراز تنش و دامنه بارگذاری ثابت و متغیر با فرکانس یک هرتز انجام گردید. تاثیر خستگی بر روی رفتار این سنگ‌ها در شرایط بارگذاری سه‌محوری توسط پارامترهای آسیب خستگی شامل کرنش بیشینه و کمینه محوری، کرنش بیشینه و کمینه جانبی، مدول‌های مماسی و متقاطع، دانسیته انرژی و انرژی وارفتگی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمون‌های استاتیکی نشان داد که افزایش فشار همه جانبه تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری این سنگ‌ها داشته و باعث افزایش مقاومت و فاز پلاستیک قبل از شکست شده است. مدول‌های الاستیک سنگ نیز با افزایش فشار همه جانبه به صورت خطی افزایش نشان می‌دهند. ارزیابی پارامترهای آسیب خستگی نشان می‌دهد که فرایند آسیب در شرایط سه‌محوره نیز شامل سه فاز هسته‌زایی ترک، گسترش ترک با سرعت یکنواخت و فاز رشد شتابدار ترک می‌باشد. بعلاوه از بین پارامترهای آسیب خستگی، پارامتر کرنش جانبی، مدول متقاطع، و انرژی وارفتگی آسیب سه مرحله‌ای خستگی را بهتر نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: بارگذاری چرخه‌ای سه‌محوری، آسیب خستگی، انرژی وارفتگی، دامنه، فرکانس

مقدمه

است. به عنوان مثال اکسون^۱ و همکاران [۱] مشخصات ریزترک‌های ایجاد شده به وسیله بارگذاری چرخه‌ای را در گرانیت‌ها، مطالعه نموده‌اند. آن‌ها مشاهده نمودند که ترک‌های ایجاد شده ناشی از بارگذاری چرخه‌ای عمدتاً در فلدسپارها و هم جهت با محور بارگذاری گسترش پیدا کرده است. خیاو^۲ و همکاران [۱۱ و ۱۰] متغیرهای ارزیابی آسیب خستگی را بر روی گرانیت‌های هنگ‌یان بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ارزیابی آسیب خستگی با استفاده از روش کرنش باقی‌مانده، نتایج بهتری را نسبت به روش‌های دیگر دارد، چرا که در این روش آسیب اولیه سنگ نیز در نظر گرفته می‌شود. خانلری و همکاران [۵] و مومنی و همکاران [۸] رفتار خستگی مونزوگرانیت‌های الوند را در شرایط مختلفی از بارگذاری سیکلی تک‌محوری مورد ارزیابی قرار دادند و مشاهده کردند که در اثر پدیده خستگی مقاومت این نوع

تاثیر فشار همه جانبه بر روی خصوصیات مکانیکی و تغییر شکل‌پذیری سنگ‌ها در شرایط استاتیکی، مورد توجه محققان زیادی بوده است. ارزیابی خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها در شرایط سه‌محوری سیکلی به ندرت مورد توجه محققان بوده و تاثیر پدیده خستگی در این نوع بارگذاری به درستی بررسی نشده است. هنگامی که سنگی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرند، چنانچه دارای نقاط وضعی مانند ریزترک بوده و یا تراز تنش‌های اعمالی به حدی باشد که وارد فاز پلاستیک شود، باعث آسیب رسیدن تجمعی تحت بارگذاری چرخه‌ای شده و سنگ گسیخته می‌گردد که این پدیده را خستگی می‌نامند. آزمون خستگی با توجه به این که نیاز به دستگاه‌های سروهیدرولیک ویژه دارد، گران بوده و کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در چند دهه اخیر تعدادی از محققین مطالعاتی بر روی پدیده خستگی در سنگ انجام داده‌اند که عمدتاً در شرایط بارگذاری تک‌محوری بوده

^۱Akesson^۲Xiao

آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی، دارای نسبت طول به قطر $2/5$ و قطر 54 میلی‌متر بوده‌اند. سطوح انتهایی این مغزه‌ها مطابق با استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ [۱۲] آماده گردیدند. هم‌چنین به منظور ثبت رفتار تغییر شکل‌پذیری این سنگ‌ها در طول آزمایش چهار عدد کرنش‌سنج الکترونیکی با طول 20 میلی‌متر برای آزمون‌های تک‌محوری و 40 میلی‌متری سیم بلند برای آزمون‌های سه‌محوری، با آرایش دو کرنش‌سنج قائم و دو کرنش‌سنج افقی بر روی نمونه‌ها چسبانیده شدند (شکل ۱). در ابتدا خصوصیات فیزیکی مغزه‌ها تعیین گردید (جدول ۱). در ادامه آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی 4 نمونه انجام گرفت تا خصوصیات مکانیکی و تغییر شکل‌پذیری در شرایط تک‌محوری اندازه‌گیری گردد. بدنبال آزمون‌های مقاومتی تک‌محوره، مقاومت فشاری استاتیکی سه‌محوره سنگ در شرایطی که فشار همه جانبه 2 و 10 مگاپاسکال به نمونه‌ها اعمال شده بود، اندازه‌گیری گردید. سپس آزمون‌های خستگی سه‌محوره با فشار جانبی مشابه به حالت استاتیکی تحت فرکانس بارگذاری یک هرتز انجام گردید. برای آزمون خستگی با فشار محصور کننده 10 مگاپاسکال، شرایط بارگذاری شامل بیشینه و دامنه بار، ثابت در نظر گرفته شدند. درحالی‌که برای آزمون با فشار محصور کننده 2 مگاپاسکال، تقریباً بعد از هر 50 چرخه با ثابت نگه داشتن بار متوسط، دامنه بارگذاری افزایش یافته و در نتیجه به صورت پله‌ای بار بیشینه افزایش و بار کمینه کاهش داشته است. لازم به ذکر است که به منظور انجام آزمایش‌های مکانیکی، دو دستگاه سروهیدرولیک حلقه بسته از نوع اینسترون با ظرفیت بارگذاری 300 و 500 کیلونیوتن در دانشگاه آدلاید استرالیا استفاده گردید. نحوه انجام آزمایش‌های سیکلی به این ترتیب بوده که در ابتدای آزمایش نمونه تا سطح تنش متوسط، با نرخ اعمال بار مشابه با حالت استاتیکی ($1/6$ کیلو نیوتن بر ثانیه)، بارگذاری شد. سپس با وارد کردن دامنه و فرکانس بارگذاری، بارگذاری چرخه‌ای آغاز گردید. در نهایت نتایج آزمون خستگی از نقطه نظر کرنش‌های حداکثر و حداقل جانبی و محوری، مدول‌های مماسی و متقاطع بارگذاری و باربرداری، دانسیته انرژی و انرژی وارفتگی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

گرانیت‌ها تا 75 درصد مقاومت اولیه آن‌ها کاهش می‌یابد. نگاهی اجمالی به تاریخچه مکانیک سنگ نشان می‌دهد که آزمون خستگی سه‌محوره نسبت به حالت تک‌محوری به ندرت مورد مطالعه قرار گرفته است. به عنوان مثال لیو^۳ و هی^۴ [۶] و لیو و همکاران [۷] به منظور ارزیابی تاثیر تنش محصور کننده بر روی خصوصیات خستگی سنگ، یک سری آزمایش خستگی سه‌محوری بر روی ماسه‌سنگ‌ها انجام دادند که نشان داد با افزایش تنش محصور کننده، کرنش در لحظه شکست افزایش یافته و رفتار خستگی سه مرحله‌ای همانند شرایط تک‌محوری وجود دارد. چن^۴ و همکاران [۲] رفتار مکانیکی سنگ‌های نمکی را تحت بارگذاری سه‌محوره سیکلی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که فشار محصور کننده تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی مدول‌های باربرداری این نوع سنگ دارد. ژاو^۵ [۱۲] یک سری آزمایش‌های دینامیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و سه‌محوری، کشش تک‌محوری و برش محصور نشده را بر روی گرانیت باکیت‌تیمای^۶ سنگپور انجام داد. وی دریافت که تحت تنش‌های فشاری دینامیکی مقاومت این نوع از سنگ‌ها با استفاده از معیار هوک و براون بهتر توصیف می‌گردد. بررسی پژوهش‌های انجام شده بر روی رفتار خستگی گرانیت‌ها نشان می‌دهد که این نوع سنگ علاوه بر مقاومت نسبتاً بالای خود تحت ضعیف شدگی پیشرونده ناشی از بارگذاری سیکلی قرار می‌گیرد [۱۲] و [۱۹]. با توجه به وجود موارد بسیاری از بارگذاری سیکلی طبیعی و مصنوعی در طبیعت، مطالعات انجام شده در این زمینه، بخصوص در ایران، محدود بوده و اطلاعات و دانش موجود برای پاسخ‌گویی به نیازهای کاربردی کافی نمی‌باشد. آنچه که در بالا به آن اشاره شد انگیزه اصلی برای انجام این پژوهش بوده است.

مواد و روش‌ها

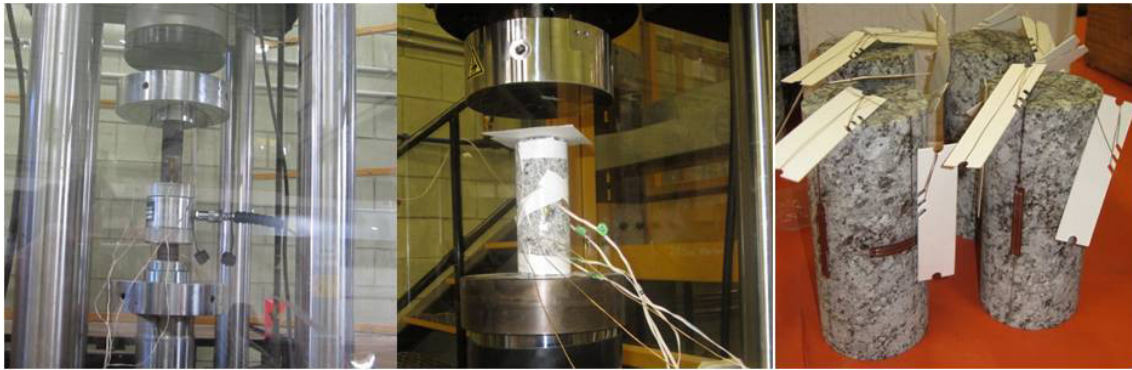
تحقیق حاضر بر روی گرانیت‌های پورفیری الوند انجام شده است. در ابتدا به منظور تشخیص کانی‌شناسی این سنگ‌ها مقاطع نازک مناسب از آن تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت. مغزه‌های تهیه شده به منظور انجام

³Liu

⁴Chen

⁵Zhao

⁶Bukit Timah



شکل ۱. نحوه آرایش کرنش‌سنج‌ها و تجهیزات استفاده شده در آزمون تک‌محوری و سه‌محوری

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی مونزوگرانیت‌های الوند

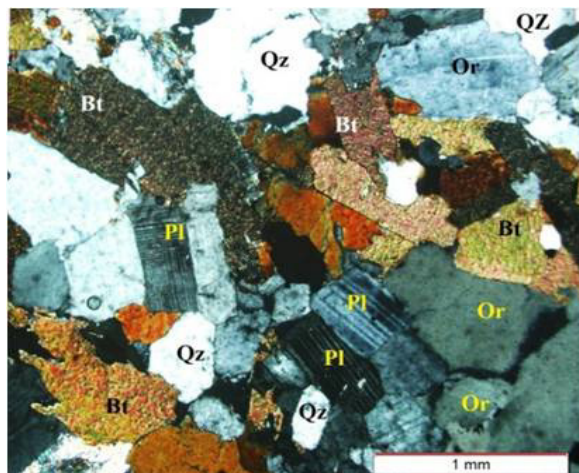
نوع مقادیر	سرعت موج P در شرایط خشک (m/s)	سرعت موج P در شرایط اشباع (m/s)	شاخص جذب سریع آب (%)	دانسیته اشباع (gr/cm ³)	دانسیته خشک (gr/cm ³)	تخلخل (%)
بیشینه	۳۳۵۴	۴۱۲۴	۰/۳۸	۲/۷۲	۲/۷۱	۱/۴۰
میانگین	۳۲۵۴	۳۹۸۴	۰/۳۵	۲/۷۱	۲/۷۰	۱/۲۸
کمینه	۳۱۱۵	۳۸۴۳	۰/۳۱	۲/۷۰	۲/۶۹	۱/۰۶

مطالعات مقطع نازک نشان داده است که گرانیت‌های پورفیری مورد مطالعه، درشت دانه (> ۵ میلی‌متر) با بافت ساب‌هدرال گرانولار و ساخت پورفیری می‌باشند. ترکیب کانی شناختی این سنگ‌ها شامل کوارتز (۲۵ درصد)، ارتوکلاز (۲۵ درصد)، پلاژیوکلاز (۲۵ درصد)، بیوتیت (۲۰ درصد) و کانی‌های فرعی (۵ درصد) بوده و مشخص می‌نماید که این سنگ‌ها مونزوگرانیت می‌باشند (شکل ۲).

نتایج و بحث

مطالعات پتروگرافی

گرانیت‌های پورفیری، توده اصلی باتولیت الوند را تشکیل داده و کاربرد گسترده‌ای دارند (به عنوان مثال استفاده از این سنگ‌ها به عنوان سنگ نمای ساختمان، ساخت مجسمه و بناهای یادبود، سنگ فرش پیاده‌روها و غیره). بنابراین شناخت رفتار مکانیکی این مصالح در برابر بارگذاری استاتیکی و دینامیکی، اهمیت فراوانی دارد.



شکل ۲. سیمای کانی شناختی مونزوگرانیت الوند: Qz: کوارتز، Pl: پلاژیوکلاز، Or: اورتوز، Bt: بیوتیت

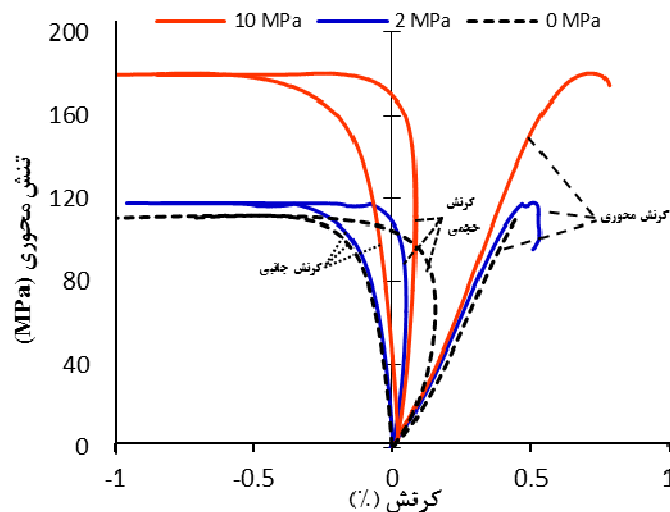
می‌دهد که میانگین میزان تخلخل این سنگ‌ها ۱/۲۸ درصد، شاخص جذب سریع آب ۰/۳۵ درصد، دانسیته خشک (g/cm³) ۲/۷۰ و دانسیته اشباع (g/cm³) ۲/۷۱، سرعت سیر موج التراسونیک در شرایط خشک (m/s)

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی استاتیکی

پیش از انجام آزمون‌های مکانیکی، خصوصیات فیزیکی شامل درصد تخلخل و دانسیته و سرعت سیر موج التراسونیک برای این سنگ‌ها تعیین گردید. نتایج نشان

در لحظه شکست زیاد شده، با این وجود روند تغییرات متفاوت است. افزایش میزان تغییر شکل پذیری سنگ با افزایش فشار جانبی، در ماسه‌سنگ‌های مطالعه شده توسط لیو و هی [۶] نیز مشاهده گردید. کرنش محوری با افزایش تنش همه‌جانبه روند افزایشی با الگوی خطی داشته در حالی که کرنش جانبی با افزایش فشار همه جانبه افزایش داشته ولی روند افزایشی آن با الگوی لگاریتم طبیعی کاهش می‌یابد. در واقع بالا رفتن فشار همه‌جانبه، مانع از انبساط سنگ در جهت جانبی می‌گردد. تاثیر فشار همه‌جانبه بر کرنش جانبی به طوری است که در فشار ۱۰ مگاپاسکال پس از شکست نمونه که با افت بار وارده توسط دستگاه مشخص گردید، نمونه از سل هوک و ممبر این خارج شده ولی سطح شکست در آن مشخص نبوده و با وارد کردن چند ضربه آرام چکش به سنگ سطح شکست خود را نمایان نمود. لازم به ذکر است با توجه به تعداد شکل‌های زیاد این مقاله، از آوردن گراف‌های آنالیز آماری روند تغییرات خودداری شده و تنها توصیف آن‌ها ذکر گردیده است. علاوه بر بررسی تاثیر فشار همه‌جانبه بر روی پارامترهای مذکور، با استفاده از نرم‌افزار راکلب (RockLab) و بر اساس نتایج آزمون‌های مقاومتی انجام شده و استفاده از معیار مور-کلمب، مقادیر چسبندگی این نوع سنگ ۰/۹۷ مگاپاسکال و مقدار زاویه اصطکاک داخلی ۵۸ درجه تعیین گردید.

۳۲۵۴ و در شرایط اشباع 3984 (m/s) می‌باشد. خلاصه نتایج بارگذاری استاتیکی تک‌محوری و سه‌محوری انجام شده روی این سنگ‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. به‌منظور درک مناسب از تاثیر فشار همه‌جانبه بر روی رفتار مقاومتی و تغییر شکل پذیری سنگ‌های مورد مطالعه، مقایسه‌ای بین حالت بارگذاری تک‌محوری و سه‌محوری در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، رفتار کاملاً شکننده این سنگ در حالت تک‌محوره با افزایش فشار جانبی، وارد یک بخش پلاستیک شده ولی با این وجود رفتار کلی سنگ شکننده می‌باشد. همانطور که در جدول ۲ و شکل ۳ مشخص است روند تغییرات مقاومت فشاری به نحوی است که مقاومت سنگ از ۱۱۲ مگاپاسکال در شرایط تک‌محوری به ۱۸۰ مگاپاسکال در شرایط فشار همه جانبه ۱۰ مگاپاسکال، رسیده است. روند تغییرات این پارامتر الگوی نمایی دارد. دانسیته انرژی نیز دارای روند تغییرات مشابه با مقاومت فشاری بوده و از $0/25 \text{ (J/m}^3\text{)}$ در شرایط فشار همه جانبه صفر به $0/74 \text{ (J/m}^3\text{)}$ برای آزمون با فشار همه جانبه ۱۰ مگاپاسکال رسیده است. ارزیابی تاثیر فشار همه جانبه بر مدول‌های الاستیسیته این سنگ‌ها نشان می‌دهد که با افزایش فشار همه جانبه مدول‌های مماسی و متقاطع به صورت خطی و به ترتیب با شیب تغییرات ۵۹ و ۵۶ درصد زیاد می‌گردند. بررسی اثر فشار همه‌جانبه بر روی کرنش‌های محوری و جانبی لحظه شکست نشان می‌دهد که تغییر شکل پذیری سنگ



شکل ۳. رفتار تنش-کرنش مونوزوگرانیته‌ها تحت فشارهای محصور کننده متفاوت در آزمون سه محوری استاتیکی

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در شرایط استاتیکی برای تونالیته‌های الوند

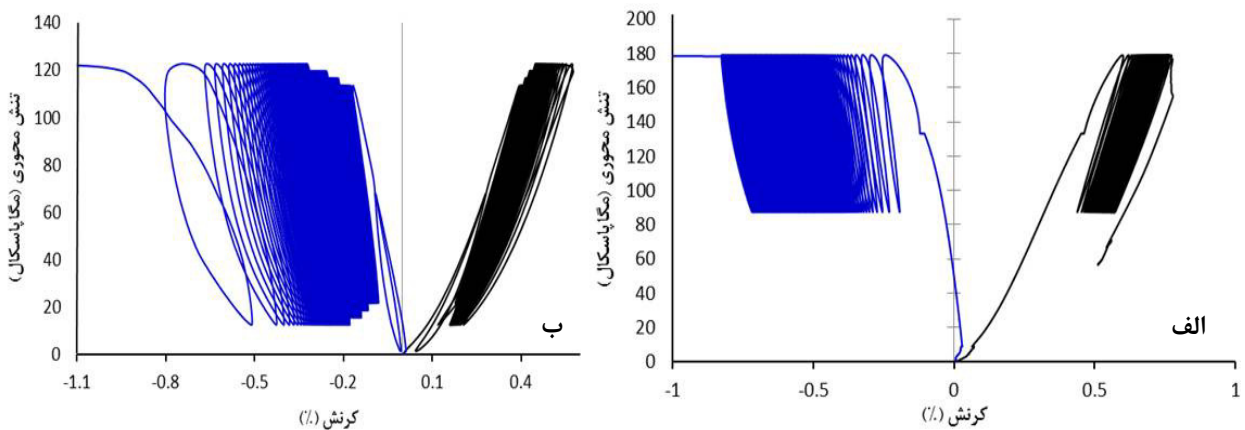
کرنش جانبی شکست (%)	کرنش محوری شکست (%)	دانسیته انرژی (J/m ³)	مدول متقاطع (GPa)	مدول مماسی (GPa)	مقاومت فشاری (MPa)	فشار محصور کننده (MPa)
-۰/۵۲	۰/۴۵	۰/۲۵	۲۲/۹۲	۲۹/۳۷	۱۱۲	۰
-۰/۷۱	۰/۵۱	۰/۳۰۸	۲۴/۹۲	۳۰/۵۳	۱۱۸	۲
-۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۷۴	۲۸/۸۵	۳۵/۲۸	۱۸۰	۱۰

آزمون بارگذاری سیکلی سه‌محوری

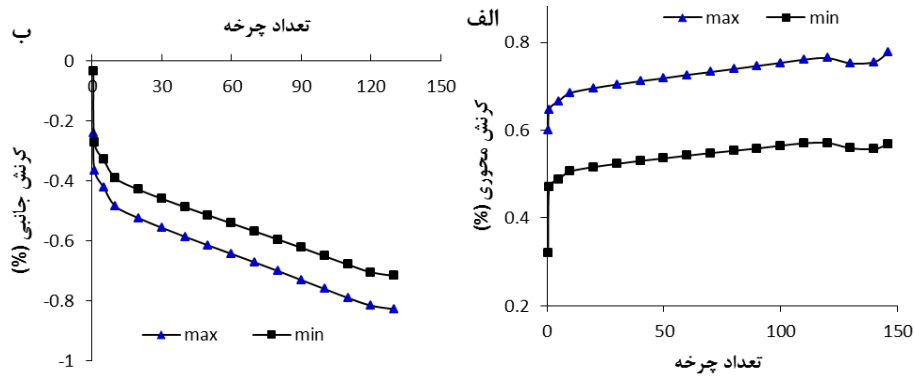
روند تغییرات کرنش‌های جانبی و محوری در این دو آزمون خستگی سه‌محوره در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، نمونه A29 به علت دارا بودن ریز ترک، ابتدا رفتار پلاستیک از خود نشان می‌دهد و با بسته شدن آن‌ها رفتار به سمت الاستیک میل می‌نماید. در نمونه A59، در چرخه‌های اولیه بارگذاری نمونه تقریباً رفتار الاستیک داشته و با افزایش تعداد چرخه‌ها و بار بیشینه، رفتار سنگ الاستیک-پلاستیک شده و تغییر شکل‌های غیر قابل برگشت محوری و جانبی توسعه پیدا کرده و بخصوص در چرخه‌های پایانی، بزرگی تغییر شکل‌ها بشدت افزایش می‌یابد.

پارامترهای آسیب خستگی بر روی آزمون‌های خستگی سه‌محوری مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج آن در شکل‌های ۵ تا ۷ نمایش داده شده است. روند تغییرات کرنش محوری به صورت سه مرحله‌ای بوده و بخش زیادی از عمر خستگی را مرحله توسعه پایدار ترک به خود اختصاص داده است (شکل ۵ الف). یک سخت شوندگی موضعی در انتهای این مرحله دیده می‌شود که باعث کم شدن روند افزایشی کرنش محوری شده است.

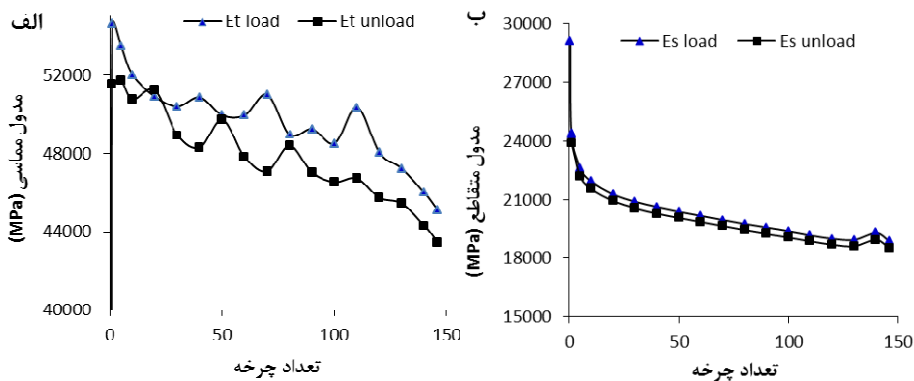
تغییرات کرنش جانبی (شکل ۵ ب) یک افت شدید اولیه در این پارامتر را نشان داده که مربوط به فاز اولیه ایجاد ترک و بسته شدن ریز ترک‌های از قبل موجود و هم‌چنین بارگذاری آرام تا تراز تنش متوسط سیکل اول می‌باشد. این روند با یک بخش نزولی دارای شیب ثابت، مربوط به فاز توسعه پایدار ترک، دنبال می‌گردد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، فاز توسعه شتابدار خود را در این نمودار بروز نداده است. در صورت توجه به تعداد چرخه‌ها، می‌توان چنین نتیجه گرفت که در آغاز مرحله گسترش شتابدار ترک، ناپیوستگی‌های ایجاد شده باعث انقطاع در هر دو کرنش سنج جانبی شده و بنابراین آسیب وارده به کرنش‌سنج‌ها، باعث عدم ثبت داده‌های این مرحله گشته است. روند تغییرات مدول مماسی بارگذاری و باربرداری در نمونه A29 با فشار محصور کننده ۱۰ مگاپاسکال، روند نزولی منظم‌تری نسبت به حالت تک محوری نشان می‌دهد (شکل ۶ الف). مرحله ایجاد ترک (فاز یک) و مرحله توسعه شتابدار ترک در این نمودارها قابل تشخیص می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که افزایش فشار محصور کننده، باعث افزایش قابل توجه در مقدار این پارامتر شده است. روند تغییرات مدول متقاطع منظم‌تر بوده و مراحل سه‌گانه آن قابل تشخیص می‌باشد.



شکل ۴. الف) رفتار تغییر شکل‌پذیری مونوزوگرنایت A29 در آزمون خستگی سه‌محوری با فشار محصور کننده ۱۰ مگاپاسکال، ب) رفتار تغییر شکل‌پذیری مونوزوگرنایت A59 در آزمون خستگی سه‌محوری مرحله‌ای با فشار محصور کننده ۲ مگاپاسکال



شکل ۵: روند تغییرات کرنش محوری و جانبی در آزمون خستگی سه محوری با فشار محصور کننده ۱۰ مگاپاسکال



شکل ۶: روند تغییرات مدول مماسی و متقاطع در آزمون خستگی سه محوری با فشار محصور کننده ۱۰ مگاپاسکال

با روندی کاهنده ادامه پیدا کرده است. در پله‌های تنش دوم و سوم شیب تغییرات به صورت افزایشی خطی بوده و می‌تواند بیانگر مرحله توسعه یکنواخت ترک باشد. در پله تنش آخر روند تغییرات به صورت افزایشی با روندی افزایشنده بوده و در واقع بخش اصلی عمر خستگی در این پله تنش صرف توسعه شتابدار ترک گردیده است (شکل ۸). بررسی تغییر رفتار کرنش جانبی هم در پله‌های تنش مختلف، روندی مشابه به کرنش محوری را از خود نشان می‌دهد.

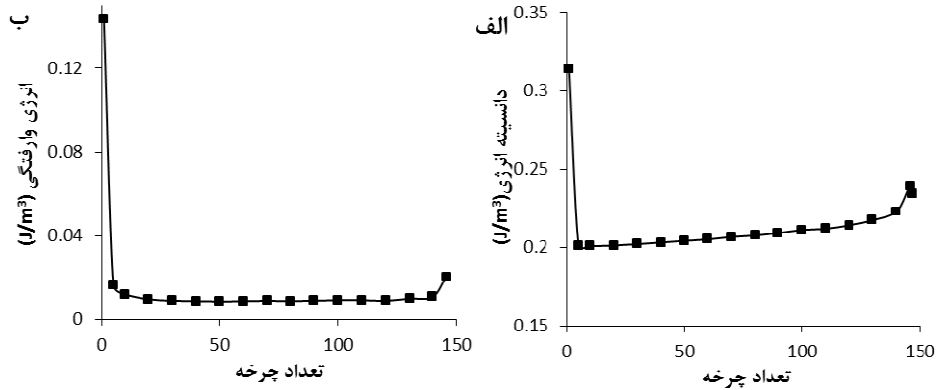
بررسی تغییر رفتار مدول مماسی نشان می‌دهد که در دو پله تنش ابتدایی روند تغییرات نزولی بوده ولی خیلی بارز نیست. در پله تنش سوم این روند نزولی کمی واضح‌تر شده است. در پله تنش آخر، به علت افزایش تنش و همچنین حضور ترک‌های ناشی از پله‌های تنش قبلی، مدول مماسی روند نزولی شدیدی را از خود نشان می‌دهد (شکل ۹ الف و ب). روند تغییرات مدول متقاطع، با افت اولیه به خاطر بسته شدن ریزترک‌های موجود در سنگ مواجه شده و پس از آن شیب تغییرات این پارامتر یکنواخت و به صورت خطی می‌گردد. در پله تنش دوم،

با مقایسه منحنی‌های مدول مماسی و متقاطع می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فشار جانبی باعث افزایش اختلاف در مقدار عددی این دو پارامتر می‌گردد (شکل ۶ ب). تغییرات دانسیته انرژی و انرژی وارفتگی هم به مانند نتایج آزمون‌های خستگی تک‌محوری، روندی سه مرحله‌ای شامل کاهش شدید اولیه، روند افزایشی با شیب آرام و یکنواخت و روند افزایشی تسریع شونده را شامل می‌شوند (شکل ۷). روند تغییرات سه‌مرحله‌ای در پارامترهای آسیب خستگی ناشی از بارگذاری سیکلی در شرایط تک‌محوری بر روی سنگ‌های گرانیتی توسط خیالو و همکاران [۱۱ و ۱۰]، مومنی و همکاران [۸] و در شرایط سه‌محوری توسط لیو و هی [۶] بر روی ماسه‌سنگ‌ها و چن و همکاران [۲] بر روی سنگ‌های نمکی مشاهده شده است.

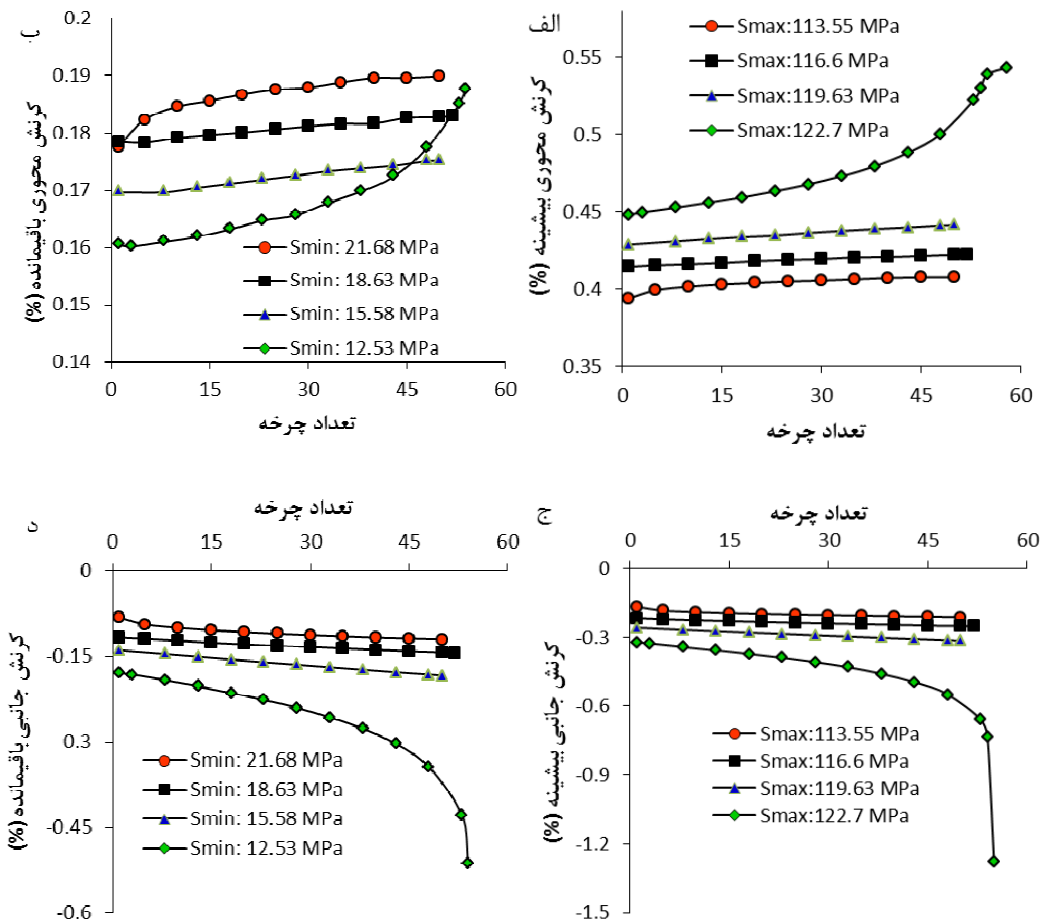
تحلیل نتایج آزمون خستگی سه‌محوری پله‌ای به صورت پارامترهای آسیب خستگی در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. روند تغییرات کرنش محوری نشان می‌دهد که در پله تنش اول، عمر خستگی صرف ایجاد و هسته‌زایی ترک شده و شیب منحنی به صورت افزایشی

تنش آخر روند تغییرات ابتدا به صورت خطی نزولی و با شیب بیش‌تر از مراحل قبلی بوده ولی بعد از گذشت تقریباً ۴۰ چرخه روند تغییرات وارد فاز توسعه شتابدار گردیده است (شکل ۹ ج و د).

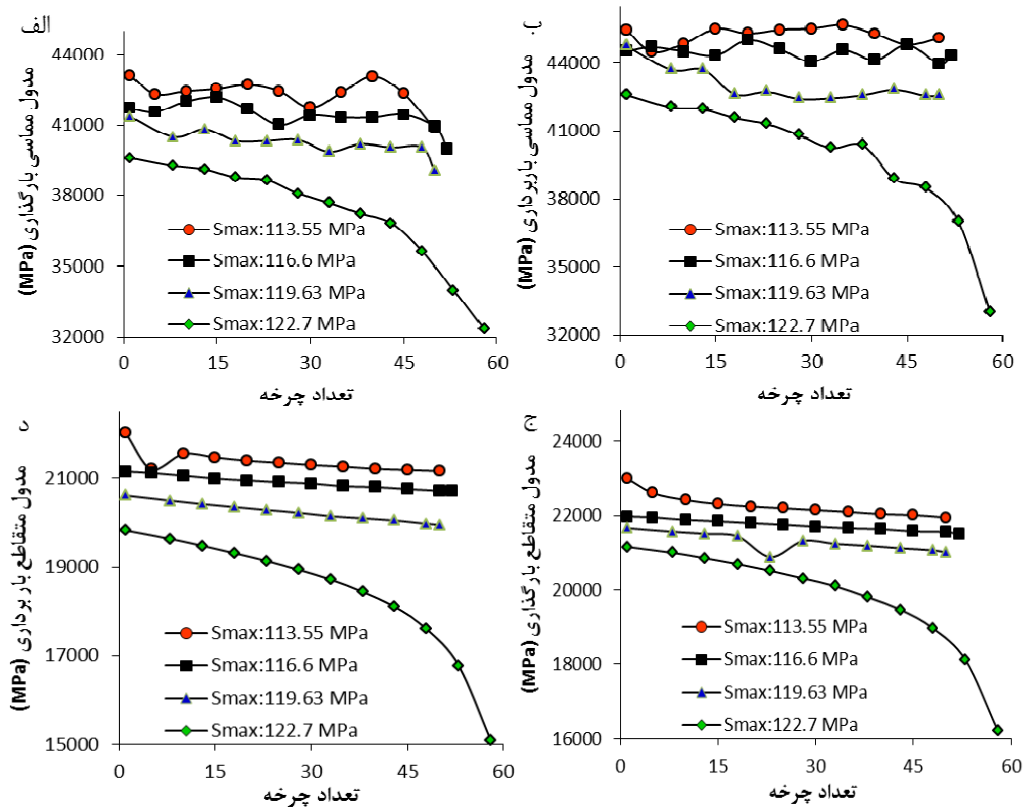
روند نزولی این پارامتر با شیب خطی تقریباً مشابه با مرحله قبل ادامه پیدا کرده است. در پله تنش سوم، روند تغییرات این پارامتر مانند پله‌های تنش قبل خطی نزولی بوده، با این تفاوت که شیب آن بیش‌تر شده است. در پله



شکل ۷. روند تغییرات دانسیته انرژی و انرژی وارفتگی در آزمون خستگی سه‌محوری با فشار محصور کننده ۱۰ مگاپاسکال



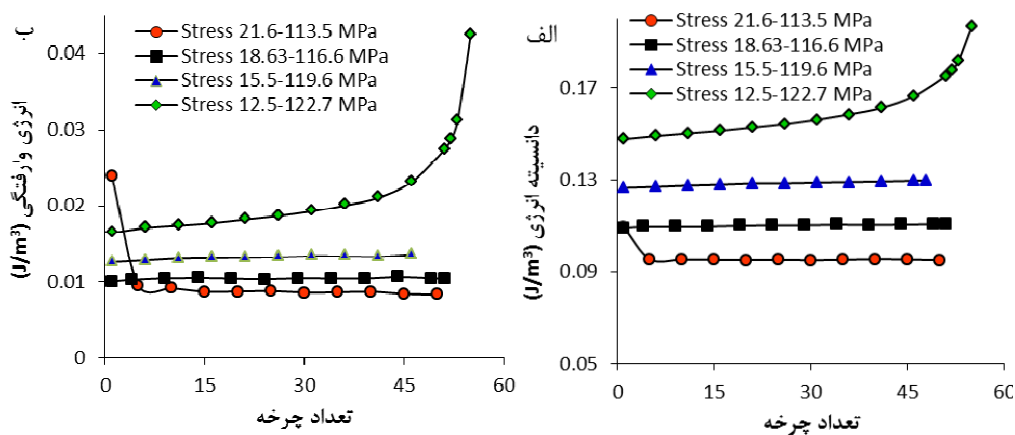
شکل ۸. روند تغییرات کرنشی در بارگذاری سه‌محوری پله‌ای با فشار محصور کننده ۱۰ مگاپاسکال، (الف) کرنش محوری بیشینه، (ب) کرنش محوری باقی‌مانده، (ج) کرنش جانبی بیشینه و (د) کرنش جانبی باقی‌مانده در برابر تعداد چرخه



شکل ۹. روند تغییرات مدول‌های الاستیک در بارگذاری سه‌محوری پله‌ای با فشار محصور کننده ۱۰ مگاپاسکال، (الف) مدول مماسی بارگذاری، (ب) مدول مماسی باربرداری، (ج) مدول متقاطع باربرداری و (د) مدول متقاطع باربرداری در برابر تعداد چرخه

پله‌های فشار تا پله فشار سوم، روند تغییرات خطی بوده و شیب آن‌ها افزایش می‌یابد. در پله فشار چهارم، روند تغییرات افزایشی غیرخطی با روندی افزایشی بوده که نشان از توسعه شتابدار ترک دارد (شکل ۱۰).

پارامترهای آسیب خستگی دانسیته انرژی و انرژی وارفتگی در پله تنش اولی ابتدا یک کاهش سریع در مقدار این دو پارامتر دیده می‌شود و سپس روند افزایشی خطی بسیار کندی را از خود نشان می‌دهد. با افزایش



شکل ۱۰. روند تغییرات دانسیته انرژی (الف) و انرژی وارفتگی (ب) در آزمون خستگی سه‌محوری پله‌ای با فشار محصور کننده ۱۰ مگاپاسکال

دیگر یا توسعه نیافته و یا به صورت ناقص توسعه پیدا کرده و سطح شکست مزدوج را تشکیل نمی‌دهد. در آزمون خستگی، ماهیت چرخه‌ای بودن آن باعث می‌شود که ترک‌های تشکیل شده در هر دو زون برشی توسعه یافته و باعث بروز سطوح شکست مزدوج گردد (شکل ۱۱ ب). برخلاف آزمون خستگی تک‌محوری، در حالت سه‌محوری، سطح شکست تشکیل شده به صورت واحد بوده و نشان از تاثیر فشار محصور کننده در جلوگیری از سطوح شکست مزدوج دارد (شکل ۱۱ ج).

به منظور ارزیابی تاثیر نوع بارگذاری بر روی شکست این تیپ سنگی، سطوح شکست تحت شرایط بارگذاری فشاری تک‌محوری استاتیکی، بارگذاری فشاری تک‌محوری و سه‌محوری چرخه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه مشاهدات نشان می‌دهد که در آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری، عمدتاً یک سطح شکست تشکیل می‌شود. با توجه به روند افزایشی تنش تا لحظه شکست، در این آزمون تنها یکی از سطوح برشی مزدوج ناشی از توزیع تنش در مغزه سنگی توسعه یافته و سطح شکست را تشکیل می‌دهد (شکل ۱۱ الف). سطح برش



شکل ۱۱. نحوه تشکیل سطح شکست در موزوگرانیته‌ها تحت شرایط بارگذاری مختلف، الف: آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری، ب: آزمون خستگی تک‌محوری، ج: آزمون خستگی سه‌محوری

نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری موزوگرانیته‌های الوند در شرایط تک‌محوری و سه‌محوری استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر از آن حاصل شد.

۱- در شرایط بارگذاری استاتیکی افزایش فشار همه جانبه باعث افزایش مقاومت فشاری و دانسته انرژی به صورت نمایی، افزایش مدول‌های الاستیسته و کرنش محوری به صورت خطی و افزایش کرنش جانبی با روندی کاهنده و الگویی لگاریتم طبیعی می‌شود.

۲- آسیب خستگی در شرایط سه‌محوری نیز شامل سه فاز شروع، گسترش یکنواخت و گسترش شتابدار ترک می‌باشد.

۳- مقایسه تغییرات کرنش جانبی و محوری در بارگذاری سیکلی و مقایسه آن با شرایط استاتیکی نشان می‌دهد که کرنش جانبی آسیب‌پذیری بیشتری دارد.

۴- به علت بارگذاری سریع‌تر در آزمون خستگی نسبت به شرایط استاتیکی مقدار مدول مماسی در آزمون خستگی بزرگ‌تر از مدول استاتیکی بوده و ایجاد ریزترک‌ها باعث روند کاهشی این پارامتر گردید. مدول متقاطع روند تغییرات منظمی‌تر داشته و مراحل آسیب سه‌گانه را بهتر نشان می‌داد. نزدیکی مقادیر مدول متقاطع بارگذاری و باربرداری حکایت از نزدیکی منحنی بارگذاری و باربرداری دارد.

۵- فشار همه‌جانبه باعث می‌گردد که حلقه‌های وارفتگی به دلیل نزدیکی منحنی بارگذاری و باربرداری کوچک شده و مقادیر انرژی وارفتگی سنگ نسبت به حالت

- confining pressure conditions. *Rock. Mech. Rock. Eng.* 45: 89–102.
- [8] Momeni, A., Karakus, M., Khanlari, G.R., Heidari, M (2015) Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 77: 89–96.
- [9] Takarli, M., Prince, W., Siddique, R (2008) Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze–thaw condition. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 45: 1164–1175.
- [10] Xiao, J.Q., Ding, D.X., Jiang, F.L., Xu, G (2010) Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 47: 461–468.
- [11] Xiao, J.Q., Ding, D.X., Xu, G (2009) Inverted S-shaped model for nonlinear fatigue damage of rock. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 46(3): 643–8.
- [12] Zhao, M.J., Xu, R (2000) The rock damage and strength study based on ultrasonic velocity. *Chin. J. Geotech. Eng.* 22(6): 720–2.

تک‌محوری و تراز تنش یکسان کمتر گردد. با این وجود روند تغییرات مساحت حلقه‌های وارفتگی تشکیل شده (انرژی وارفتگی) به خوبی می‌تواند بازگو کننده روند آسیب خستگی باشد.

۶- فشار همه‌جانبه باعث می‌شود که علاوه بر رشد آرام ترک‌ها به دلیل ماهیت چرخه‌ای بارگذاری، سطح شکست به صورت واحد تشکیل می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان کمال تشکر را از پرفسور مارک جکساریس دانشکده مهندسی عمران، محیط زیست و معدن دانشگاه آدلاید را به خاطر همکاری در انجام این پژوهش دارند. هم‌چنین از آقای اندی ویدهاال و ایینکیتس به خاطر همکاری در آزمایشگاه و انجام آزمایشات قدردانی می‌گردد. هم‌چنین از گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی‌سینا به دلیل فراهم نمودن امکانات لازم برای تهیه مغزه‌های سنگی و مقاطع میکروسکوپی تشکر به عمل می‌آید.

منابع

- [1] Akesson, U., Hansson, J., Stigh, J (2004) Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading. *Eng. Geol.* 72: 131–142.
- [2] Chen, Jie; Du, Chao; Jiang, Deyi; Fan, Jinyang; He, Yi (2016) The mechanical properties of rock salt under cyclic loading-unloading experiments. *Geomechanics and Engineering.* 10 (3), 325-334
- [3] Cho, S.H., Ogata, Y., Kaneko, K (2003) Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 40: 763–777.
- [4] International Society for Rock Mechanics (1981) Rock characterization testing and monitoring. In: Brown ET (ed) *ISRM suggested methods*. Pergamon press, Oxford.
- [5] Khanlari, G.R., Momeni, A., Karakus, M (2014) Assessment of Fatigue Behavior of Alvand Monzogranite Rocks. *Journal of Engineering Geology, Kharazmi university* 8 (1): 2003-2020.
- [6] 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.
- [7] Liu, E., Huang, R., He, S (2012) Effects of frequency on the dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under

Assessment of mechanical behavior of porphyroid granites subjected to triaxial static and dynamic loading

A. A. Momeni^{1*}, G. R. Khanlari², M. Heydari² and A. A. Sepahi²

1- Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood

2- Dept., of Geology, Faculty of Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan

* Ali_moomeni@yahoo.com

Received: 2016/10/4 Accepted: 2017/1/14

Abstract

The main aim of this research is assessing strength properties of Alvandmonzogranite under different loading conditions. For this reason, at the first step, static tests under uniaxial and triaxial states were done to evaluate the effect of confining pressure on mechanical behavior of the rock. Furthermore, fatigue behavior of the rocks subjected to triaxial cyclic loading was evaluated. The fatigue tests were done in load control condition with 1Hz frequency and two states of loading including constant stress level and amplitude, and variable state of them. The results of the fatigue tests have been evaluated by fatigue damage parameters including maximum and minimum axial strain, maximum and minimum lateral strain, tangent and secant modulus, energy density and hysteresis energy. The static tests results show that confining pressure has a remarkable effect of strength and deformability properties of these rocks and has induced increasing in strength and per failure plastic phase. Elastic modulus of the rocks have been increased with increasing confining pressure in a linear function. Evaluation of the fatigue damage parameters indicated that fatigue damage process in triaxial condition shows three stages including crack initiation phase, uniform velocity phase and acceleration phase, as well. Among the fatigue damage parameters, lateral strain, secant modulus and hysteresis energy show better three-stage fatigue damage behavior.

Keywords: Triaxial cyclic loading, fatigue damage, hysteresis energy, amplitude, frequency