تأثیر بارگذاری دینامیک چرخه‌ای روی خصوصیات مکانیکی و رفتار خستگی سنگ های تونالیتی

علی‌اکبر مؤمنی*؛ دانشگاه صنعتی شاهرود
غلامرضا خانلری، مجتبی حیدری؛ دانشگاه بوعلی سینا همدان
یاسین عبدی لر؛ دانشگاه لرستان

تاریخ: دریافت ۹۵/۷/۵ **پذیرش** ۹۵/۱۱/۲۶

چکیده

در این پژوهش رفتار خستگی سنگ‌های تونالیت تحت بارگذاری چرخه‌ای تک‌محوره بررسی شد. بدین‌منظور دو نوع بارگذاری نیرو کنترل و جابه‌جایی کنترل استفاده شد. آزمون‌های نیرو کنترل در ترازهای تنش متغییر و دامنهٔ بارگذاری ثابت (۸۲٪ مقاومت تک‌محوری) و فرکانس یک هرتز انجام شد. آزمون جابه‌جایی کنترل به‌صورت پله‌ای با افزایش دامنهٔ بارگذاری انجام شد. نتایج آزمون‌های خستگی انجام شده توسط پارامترهای آسیب خستگی شامل کرنش بیشینه و کمینهٔ محوری، کرنش بیشینه و کمینهٔ جانبی، مدول‌های مماسی و متقاطع، چقرمگی و انرژی وارفتگی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این تیپ سنگی کاهش چشم‌گیری در مقاومت خود به‌دلیل آسیب خستگی نشان می‌دهد. از بین پارامترهای آسیب خستگی، پارامتر کرنش جانبی آسیب سه‌مرحله‌ای خستگی را به بهترین شکل نشان می‌دهد. این مطلب مؤید این نکته است که ترک‌های ایجاد شده در راستای بارگذاری جهت یافته‌اند. هم‌چنین، آزمون‌های جابه‌جایی کنترل نشان داد که رفتار این تیپ سنگی از نوع کرنش نرم‌شوندگی است.

واژه‌های کلیدی: بارگذاری سیکلی، آسیب خستگی، کرنش نرم شوندگی، دامنهٔ بارگذاری

* **نویسنده مسئول** Ali_moomeni@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

مقدمه

خستگی تمایل یک ماده به شکست یا فرآیند آسیب رسیدن تجمعی تحت بارگذاری چرخه‌ای است. در واقع خستگی، نوعی ضعیف‌شدگی پیش‌رونده سنگ به‌دلیل گسترش ریزترک‌های ناشی از بارگذاری سیکلی است. ضعیف‌شدگی ناشی از خستگی باعث می‌شود که اغلب مقاومت سنگ به ۷۵-۳۰ درصد مقاومت آن در حالت استاتیکی برسد. علاوه بر مقاومت سنگ، مدول‌های تغییر شکل‌پذیری سنگ هم دچار تغییر می‌شوند. نتایج بارگذاری چرخه‌ای روی سنگ بکر در آزمایشگاه نشان می‌دهد که حد خستگی ممکن است در محدوده 10^{4}-10^{5} چرخه به‌وقوع به‌پیوندد [۱]. مواد مختلف رفتار متفاوتی را نسبت به بارگذاری دینامیکی از خود نشان می‌دهند. بعضی از مواد مقاوم‌تر و شکل‌پذیرتر شده در حالی‌که بعضی دیگر ضعیف‌تر و شکننده‌تر می‌شوند [۲] رفتار خستگی سنگ نسبت به مصالح دیگر نظیر خاک و فولاد به‌مراتب کم‌تر بررسی شده است. با این وجود در چند دههٔ اخیر تعدادی از محققان تحقیقاتی روی پدیدهٔ خستگی در سنگ انجام داده‌اند. سینگ[1] [۳] رفتار خستگی گریوک‌های سازند فلاگ‌استف[2] استرالیا را با میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری ۱۸۵ مگاپاسکال بررسی کرد. وی مقاومت خستگی ۸۷ درصد (۱٦۱ مگاپاسکال) و کرنش-سخت شوندگی ۲۹ درصد (۲۳۹ مگاپاسکال) را برای این سنگ‌ها به‌دست آورد. نتایج وی نشان داد که عمر خستگی با کاهش دامنهٔ تنش اعمال شده به‌صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد. هم‌چنین درصد سخت شوندگی با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری افزایش می‌یابد. ژنی و هیهونگ[3] [٤] رفتار چند تیپ سنگ را تحت بارگذاری سیکلی بررسی کردند و بیان داشتند که یک مقاومت بحرانی وجود دارد که مرتبط با دامنه، میزان بارگذاری و طول موج است. این مقاومت بحرانی، مقاومت چرخه‌ای نامیده می‌شود و کم‌تر از مقاومت استاتیکی است. تین[4] و همکاران [۵] تغییرات کرنش، فشار آب منفذی و ویژگی‌های خستگی ماسه سنگ‌های اشباع را در شرایط بارگذاری چرخه‌ای و استاتیکی بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در بعضی از آزمایش‌ها، یک کرنش بحرانی وجود دارد که در آن گسیختگی نمونه ناگهان اتفاق می‌افتد.

1. Singh
2. Flagstaff
3. Zhenye and Haihong
4. Tien

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

ژاو[5] [٦] یک سری آزمایش‌های دینامیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و سه‌محوری، کشش تک‌محوری و برش محصور نشده را روی گرانیت باکیت‌هیمای[6] سنگاپور انجام داد. وی دریافت که تحت تنش‌های فشاری دینامیکی مقاومت این نوع از سنگ‌ها با استفاده از معیار هوک و براون بهتر توصیف می‌شود. اکسون[7] و همکاران [۷] مشخصات ریزترک‌های ایجاد شده به‌وسیله بارگذاری چرخه‌ای را در گرانیت‌های بوهاس[8] بررسی کرده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که ترک‌های ایجاد شده ناشی از بارگذاری چرخه‌ای عمدتاً در فلدسپارها و هم‌جهت با محور بارگذاری گسترش پیدا کرده است.. خیااو[9] و همکاران [۸]، [۹] متغیرهای ارزیابی آسیب خستگی را روی گرانیت‌های هنگ‌یان[10] 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، زیرا در این روش آسیب اولیه سنگ نیز در نظر گرفته می‌شود. ارسلان و ویلیامز[11] [۱۰] تأثیر بارگذاری چرخه‌ای را بر مقاومت کششی غیرمستقیم توف‌های بریزبن را بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که مقاومت کششی برزیلی این توف‌ها، تحت بارگذاری خستگی نسبت به‌حالت استاتیکی، ۳۳ درصد کاهش می‌یابد. چن[12] و همکاران [۱۱] اتصال و گسترش شکستگی را در بارگذاری خستگی ارزیابی کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که مقاومت خستگی بتن در حالت ترک‌دار نسبت به حالتی که سنگ فاقد ترک باشد، ۱۵ تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. خانلری و همکاران [۱۲] و مؤمنی و همکاران [۱۳] رفتار خستگی مونزوگرانیت‌های الوند را در شرایط مختلف بارگذاری سیکلی ارزیابی و مشاهده کردند که در اثر پدیدهٔ خستگی مقاومت این نوع گرانیت ها تا ۷۵ درصد مقاومت اولیهٔ آن‌ها کاهش می‌یابد.

در سال‌های اخیر توجه زیادی به رفتار سنگ در شرایط بارگذاری دینامیکی (بارگذاری چرخه‌ای) تحت شرایط متفاوتی از نرخ کرنش و هم‌چنین رفتار بعد از شکست شده است.

5. Zhao
6. Bukit Timah
7. Akesson
8. Bohus
9. Xiao
10. HengYang
11. Erarslan and Williams
12. Chen

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

مروری بر تاریخچهٔ مکانیک سنگ نشان می‌دهد که پیشرفت‌هایی در زمینهٔ توصیف رفتار سنگ در بارگذاری دینامیکی و چگونگی آزادسازی انرژی در حین تغییر شکل، حاصل شده است. با این وجود اطلاعات و دانش موجود برای پاسخ‌گویی به نیازهای کاربردی و پیش‌بینی انفجار سنگ و زمین‌لرزه و تدوین یک برنامهٔ علمی برای حل این مشکلات کافی نیست. با توجه به موارد گفته شده، روی رفتار خستگی سنگ‌ها کارهای محدودی صورت گرفته است. این در شرایطی است که تاکنون رفتار خستگی سنگ در ایران بررسی نشده است. از این رو، ضرورت ارزیابی عملکرد بارگذاری چرخه‌ای روی خصوصیات مهندسی این گروه از سنگ‌ها، احساس می‌شود.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر روی سنگ‌های تونالیتی الوند انجام شده است. بدین‌منظور بلوک مناسبی از این سنگ‌ها انتخاب شد و سپس برای تهیه مغزه‌های لازم به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی انتقال داده شد. در ابتدا به‌منظور تشخیص کانی‌شناسی این سنگ‌ها مقاطع نازک مناسب از آن تهیه و بررسی شد. به‌علاوه برای تکمیل تحقیقات سنگ‌شناسی آزمایش XRD روی این نمونه‌ها انجام شد. مغزه‌های تهیه شده به‌منظور انجام آزمون خستگی، دارای نسبت طول به قطر ۲/۵ و قطر ٥٤ میلی‌متر بوده‌اند. سطوح انتهایی این مغزه‌ها مطابق با استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ[13] [١٤] آماده شدند. هم‌چنین به‌منظور ثبت رفتار تغییر شکل‌پذیری این سنگ‌ها در طول آزمایش چهار عدد کرنش سنج الکترونیکی با طول ۲۰ میلی‌متر، با آرایش دو کرنش سنج قائم و دو کرنش سنج افقی روی نمونه‌ها چسبانیده شدند. هم‌چنین برای درک بهتر چگونگی ایجاد و رشد ترک در این سنگ‌ها، سه عدد سنسور ثبت انتشار امواج صوتی[14] با آرایش دو سنسور در نزدیکی سطوح انتهایی و یک سنسور در مرکز نمونه، روی این نمونه‌ها نصب شدند (شکل ۱). قبل از انجام آزمایش‌های خستگی، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این سنگ‌ها اندازه‌گیری شدند. در واقع این آزمایش‌ها به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکو-مکانیکی این گروه از سنگ‌ها در شرایط بارگذاری استاتیکی و فراهم ساختن مرجعی برای آزمایش‌های

13. ISRM
14. Acoustic Emission

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

دینامیکی بعدی، انجام شدند. به‌منظور انجام آزمایش‌های خستگی، دستگاه سروهیدرولیک حلقه بسته از نوع اینسترون با ظرفیت بارگذاری ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتن در دانشگاه آدلاید استرالیا استفاده شد. خستگی به دو صورت نیرو کنترل و جابه‌جایی کنترل انجام می‌شود که هر دو روش در این پژوهش به‌کار گرفته. به‌طور معمول آزمایش شده است. آزمایش‌های مذکور در شرایط بارگذاری تک‌محوری در سه سطح بیشینه بار مختلف، در بازه ۰/۸۰، ۰/۸۵ و ۰/۹۰ مقاومت فشاری تک‌محوری، انتخاب شد. دامنهٔ بارگذاری برای این سه آزمون خستگی ۸۲ درصد مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، در نظر گرفته شد. به‌علاوه به‌منظور ارزیابی رفتار نرم‌شوندگی



شکل ۱. نحوهٔ آرایش کرنش سنج‌ها و سنسورهای ثبت امواج صوتی روی مغزهٔ سنگی در آزماش خستگی

این سنگ‌ها دو آزمون چند مرحله‌ای به‌روش جابه‌جایی کنترل انجام شد. در شروع آزمایش نمونه تا سطح تنش متوسط، به‌صورت نیرو کنترل و با نرخ اعمال بار مشابه با حالت استاتیکی (۱/٦ کیلونیوتن برثانیه)، بارگذاری شد. پس از رسیدن به سطح تنش متوسط، با وارد کردن دامنه و فرکانس بارگذاری، بارگذاری چرخه‌ای آغاز شد. لازم به ذکر است که فرکانس استفاده شده در این پژوهش یک هرتز بوده است. در نهایت نتایج به‌دست آمده از آزمون خستگی از

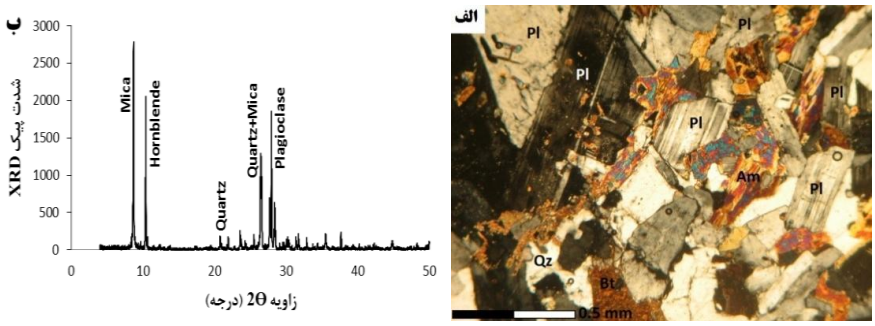
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

نقطه نظر کرنش‌های حداکثر و حداقل جانبی و محوری، مدول‌های مماسی و متقاطع بارگذاری و باربرداری، چقرمگی و انرژی وارفتگی ارزیابی شدند.

نتایج و بحث

پژوهش‌های پتروگرافی

بررسی‌های مقطع نازک نشان داده است که تونالیت‌های بررسی شده، متوسط دانه با بافت اینترگرانولار تا سابهدرال گرانولار هستند. بافت اینترگرانولار این سنگ باعث شده چفت‌شدگی و در هم تنیدگی کانی‌ها که عمدتاً پلاژیوکلازها هستند، بیش‌تر شده و باعث افزایش مقاومت در این سنگ‌ها بشود. مرز دانه‌ها به‌خصوص در مورد پلاژیوکلازها مستقیم است. دانه‌های کوارتز انهدرال بوده است و بیوتیت‌ها در برخی موارد کمی کلریتی شده‌اند (شکل ۲ الف). ترکیب کانی شناختی این سنگ‌ها شامل کوارتز (۱۵ درصد)، ارتوکلاز (۳ درصد)، پلاژیوکلاز (۳۸ درصد)، بیوتیت (۲۵ درصد)، هورنبلند (۱۵ درصد) و کانی‌های فرعی (٤ درصد) است. نتایج آزمون XRD انجام شده روی این سنگ‌ها مؤید نتایج بررسی‌های مقطع نازک است(شکل ۲ ب).



شکل۲. سیمای کانی‌شناختی تونالت‌های الوند،الف) عکس مقطع کانی‌شناختی، ب) نتایج آنالیز XRD. Qz:کوارتز، Pl: پلاژیوکلاز،Se: سرسیت، Ch: کلریت، Bt: بیوتیت

بارگذاری استاتیکی و دینامیکی نیرو کنترل

خلاصه نتایج بارگذاری استاتیکی و دینامیکی روی این سنگ‌ها در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. این نتایج به‌عنوان مرجعی برای مقایسه رفتار دینامیکی با استاتیکی مورد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

استفاده قرار گرفت. با توجه به میانگین مقاومت تک‌محوره ۱۳۳ مگاپاسکال و مدول الاستیک ۳٦ گیگاپاسکال به‌دست آمده، این سنگ‌ها بر اساس رده‌بندی دیر و میلر در رده BM قرار می‌گیرند. حضور کانی‌های مافیک بیوتیت و هورنبلند باعث شده که دانسیته این سنگ‌ها در مقایسه با دیگر سنگ‌های خانواده گرانیتوئیدها بالاتر باشد. ساختار بلورین و عدم توسعه هوازدگی در این سنگ ها باعث شده تا همانند دیگر سنگ‌های آذرین مقدار تخلخل این سنگ نیز پایین باشد. با این وجود تخلخلی در حدود ۲ درصد می‌تواند بیان‌گر این مطلب باشد که رده این سنگ در سکانس هوازدگی با رده کمی هوازده هم‌خوانی دارد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در شرایط استاتیکی برای تونالیت‌های الوند

نوع مقادیر	مقاومت فشاری تک محوری(MPa)	مدول مماسی (GPa)	مدول متقاطع (GPa)	چقرمگی (J/m3)	دانسیته (gr/cm3)	تخلخل (%)
بیشینه	۱۳۵/۲۷	۳۷/٦۷	۲۹/٦۳	۰/۳۲۲	۲/۸۲	۲/٦۰
میانگین	۱۳۳/٤۳	۳٦/٤۷	۲۸/۷۷	۰/۳۱٤	۲/۸۱	۲/۲۰
کمینه	۱۳۲/۰	۳٤/۹٦	۲۷/۹۵	۰/۳۰۳	۲/۸۰	۱/۹۰

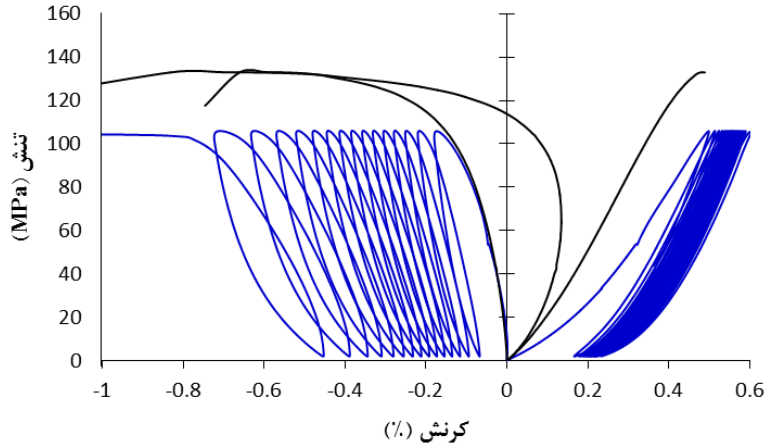
جدول ۲. خلاصه‌ای از مشخصات آزمون‌های خستگی انجام شده روی تونالیت‌ها

شماره نمونه	سطح تنش بیشینه	دامنه بارگذاری	(Hz) فرکانس	شماره چرخه شکست
TO5	۰/۸۲	۰/۸۲	۱	۱۷
TO1	۰/۸۵	۰/۸۲	۱	۲۹
TO7	۰/۹۰	۰/۸۲	۱	۱۰
TO4	۰/۸۰	۰/۷۱	۱	آزمون با خطا
TO2	جابه‌جایی کنترل	پله‌ای	۱	۲۱٤۳
TO3	جابه‌جایی کنترل	پله‌ای	۱	۲۱۹

به‌منظور درک مناسب از تأثیر خستگی روی رفتار تونالیت‌های بررسی شده، مقایسه‌ای بین حالت بارگذاری استایکی و دینامیکی در شکل ۳ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که چگونه به‌علت آسیب انباشتی، گسیختی می‌تواند در تراز تنشی پایین‌تر از مقاومت فشاری تک‌محوری و تحمل کرنشی بیش از کرنش سنگ در لحظه شکست استاتیکی اتفاق بیفتد. آنالیز نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های خستگی نشان می‌دهد که به‌طور نرمال، فرآیند گسیختگی خستگی در تونالیت‌ها شامل سه مرحله ایجاد ترک (فازI)، مرحله رشد یک‌نواخت و پایدار

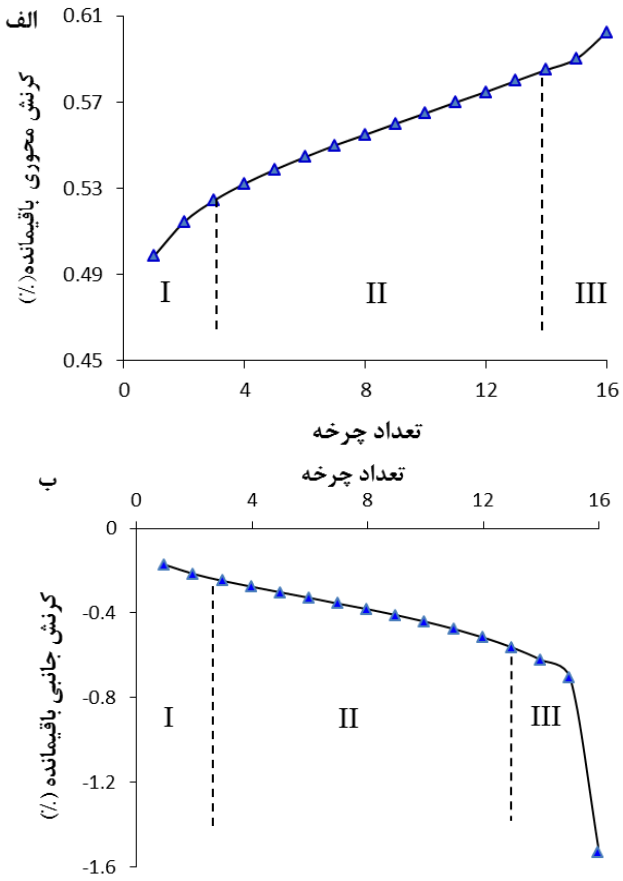
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

ترک (فاز II) و مرحله رشد ناپایدار و تسریع شونده ترک (فاز III) است. در شکل ٤ روند تغییرات کرنش‌های محوری و جانبی به تصویر کشیده است. چنان‌که در این شکل دیده می‌شود، آسیب انباشتی منجر به تغییر خصوصیات مهندسی این مصالح و ضعیف‌شدگی پیش‌رونده آن شده است. هم‌چنین با توجه به محدوده تغییرات کرنشی از لحظه بارگذاری تا شکست، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای این گروه از سنگ‌ها، کرنش جانبی در فرآیند خستگی بیش‌تر از کرنش محوری تحت تأثیر قرار گرفته است. ارزیابی آسیب خستگی بر اساس پارامترهای کرنش محوری و جانبی در برابر چرخه نسبی و در شرایط بارگذاری با دامنهٔ بار ۰/۸۲ و بیشینه بارهای ۰/۸۰، ۰/۸۵ و ۰/۹۰ مقاومت فشاری تک‌محوری، در شکل ۵ نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش مقدار بیشینه بار، بخش زیادی از عمر خستگی، صرف گسترش ترک شده است. این در حالی است که با کاهش سطح بیشینه بار، مدت زمانی که نمونه در فاز رشد تسریع شونده ترک است، افزایش می‌یابد. این موضوع در روند تغییرات کرنش محوری باقی‌مانده نمود واضح‌تری دارد (شکل ۵ ب)، به‌طوری‌که عملاً فاز سوم تنها در تراز تنش کمینه قابل تشخیص است. این روند می‌تواند به رفتار شکننده این سنگ‌ها مربوط شود. در واقع در سطوح تنش بالاتر، به‌علت گسترش ناگهانی ترک‌های ایجاد شده در مراحل قبل، تعداد چرخه‌هایی که در آن رفتار نمونه وارد فاز سوم خستگی شده است، بسیار محدود است.



شکل ٤. منحنی تنش کرنش استاتیکی و دینامیکی برای تونالیت الوند (نمونهٔ To5)

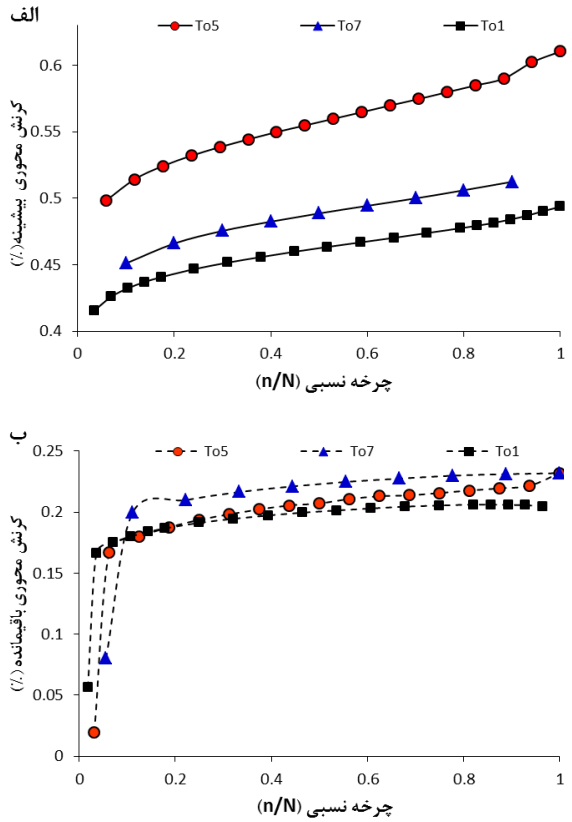
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]



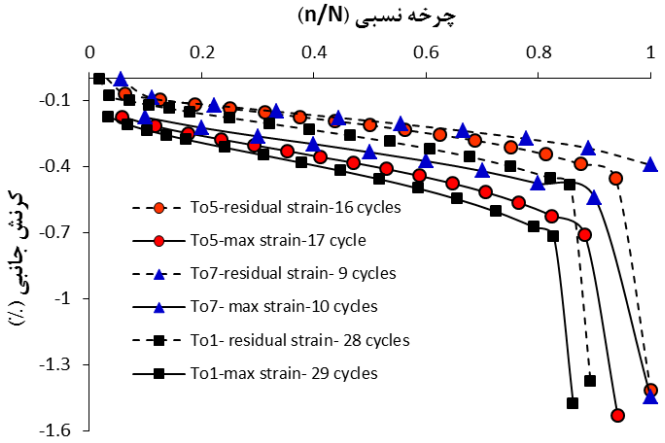
شکل ۵. روند تغییرات سه مرحله‌ای کرنش‌های باقی‌مانده الف)محوری و ب)جانبی (نمونه To5)

نکته قابل توجه در روند تغییرات کرنش محوری افزایش شدید این پارامتر در چرخه اول نسبت به سایر چرخه‌ها است. این مطلب می‌تواند ناشی از بسته شدن ناپیوستگی‌های موجود در نمونه و هم‌چنین به‌دلیل بارگذاری آرام تا تراز تنش متوسط باشد. برخلاف روند تغییرات کرنش محوری، تشخیص فاز توسعه شتاب‌دار ترک در روند تغییرات کرنش جانبی، امکان‌پذیر است. این امر ناشی از این حقیقت است که ترک‌ها عمدتاً در راستای بارگذاری ایجاد شده و باعث شده‌اند که این پارامتر به بارگذاری چرخه‌ای حساس‌تر باشد. چنان‌که در شکل‌های ٦ و ٧ دیده می‌شوند، ضعیف‌شوندگی پیش‌رونده باعث شده تا با افزایش تعداد چرخه‌ها، اختلاف بین کرنش‌های حداکثر و باقی‌مانده افزایش یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]



شکل ٦. روند تغییرات کرنش محوری حداکثر و باقی‌مانده در بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۷. روند تغییرات کرنش جانبی حداکثر و باقی‌مانده در بارگذاری چرخه‌ای

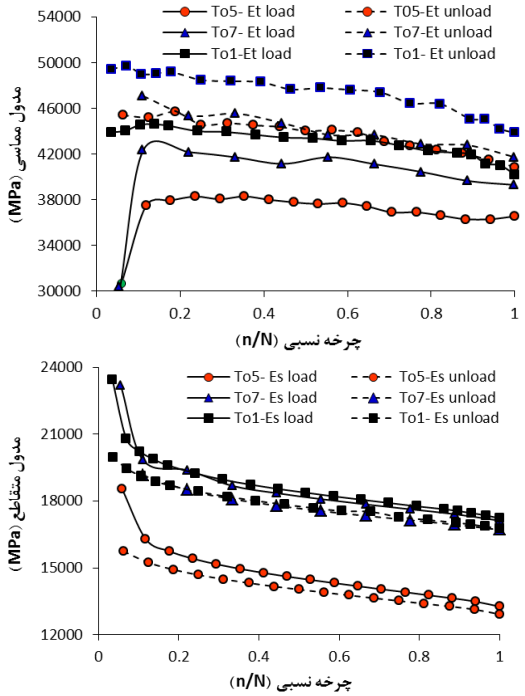
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

شکل ۸ تغییرات پارامتر آسیب خستگی مدول‌های مماسی و متقاطع را در شرایط بارگذاری و باربرداری را در برابر چرخه نسبی نشان می‌دهد. چنان‌که در این شکل دیده می‌شود مدول مماسی روند کاهشی را با افزایش تعداد چرخه‌ها، در هر دو شرایط بارگذاری و باربرداری، نشان می‌دهد. علی‌رغم روند تغییرات نسبتاً منظم این پارامتر، تشخیص مراحل سه گانه آسیب خستگی برای این پارامتر، مشکل است. برخلاف مدول مماسی، روند آسیب سه مرحله‌ای و به‌خصوص فاز اول و دوم برای مدول متقاطع در هر دو شرایط بارگذاری و باربرداری دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از نحوهٔ محاسبه آن باشد. در حقیقت چون مدول متقاطع شیب خطی است که مبدأ مختصات را به منحنی تنش کرنش در ۵۰ درصد ماکزیمم تنش، در هر چرخه وصل می‌کند و با افزایش تعداد چرخه این خط کم شیب‌تر می‌شود، از این رو، روند کاهشی نسبتاً منظم آن قابل پیش‌بینی است. با این وجود به‌دلیل رفتار شکننده این نوع سنگ، فاز رشد تسریع شونده ترک خیلی واضح نیست. در واقع، نمونه به محض این‌که وارد این مرحله شده، ترک‌های ایجاد شده به‌هم متصل شده و باعث شده تا نمونه و یا کرنش سنج‌ها گسیخته شوند.

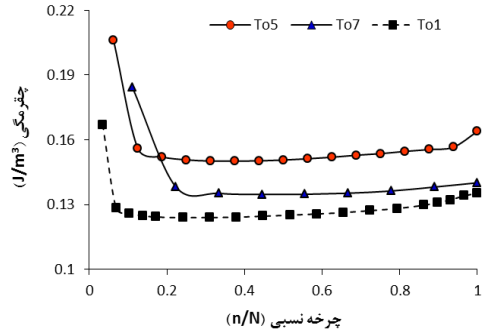
تأثیر بیشینه بار بر روند آسیب خستگی چقرمگی و انرژی وارفتگی در شکل ۹ نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل‌ها دیده می‌شود، برای این تیپ سنگی نیز کاهش شدید این پارامترها، در چند چرخه اول مشاهده می‌شود. وجود ناپیوستگی‌ها در سنگ باعث می‌شود که در چند چرخه اول، سنگ پلاستیک‌تر عمل کند. پس از بسته شدن این ریزترک‌ها، سنگ الاستیک شده و در چرخه‌های بعدی ایجاد ریزترک‌های جدید و رشد ترک‌های قبلی به آهستگی شروع و کم‌کم روند افزایشی آن با شیب یک‌نواخت ادامه می‌یابد. در نهایت افزایشی سریع در روند تغییرات چقرمگی اتفاق می‌افتد که در ارتباط با فاز تسریع شونده رشد ترک است. در واقع در این فاز علاوه بر رشد ترک، اتصال ترک‌ها به یک‌دیگر اتفاق افتاده و رفتار پلاستیک رفتار غالب سنگ می‌گردد. رفتار مشابه با روند تغییرات چقرمگی برای انرژی وارفتگی مشاهده می‌شود. چنان‌که در این دو شکل دیده می‌شود، نمونه To5 علی‌رغم تحمل تنش بیشینهٔ کم‌تر نسبت به دو نمونه دیگر، میزان چقرمگی و انرژی وارفتگی بیش‌تر را در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

چرخه اول نشان می‌دهد. در واقع این مطلب نشان می‌دهد که این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر به‌دلیل داشتن ریزترک یا دیگر عوامل ضعف، ضعیف‌تر است و در چرخه اول رفتار پلاستیک بیش‌تری را از خود نشان می دهد.

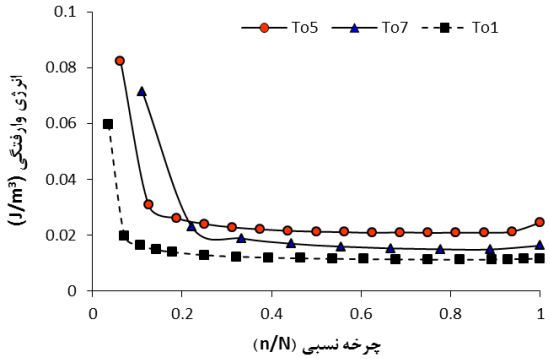


شکل ۸. روند تغییرات مدول‌های مماسی و متقاطع بارگذاری و بار برداری در شرایط با بیشینهٔ بار متفاوت



شکل ۹. روند تغییرات چقرمگی و تغییرات انرژی وارفتگی در شرایط با بیشینهٔ بار متفاوت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]



شکل ۹. روند تغییرات چقرمگی و تغییرات انرژی وارفتگی در شرایط با بیشینهٔ بار متفاوت

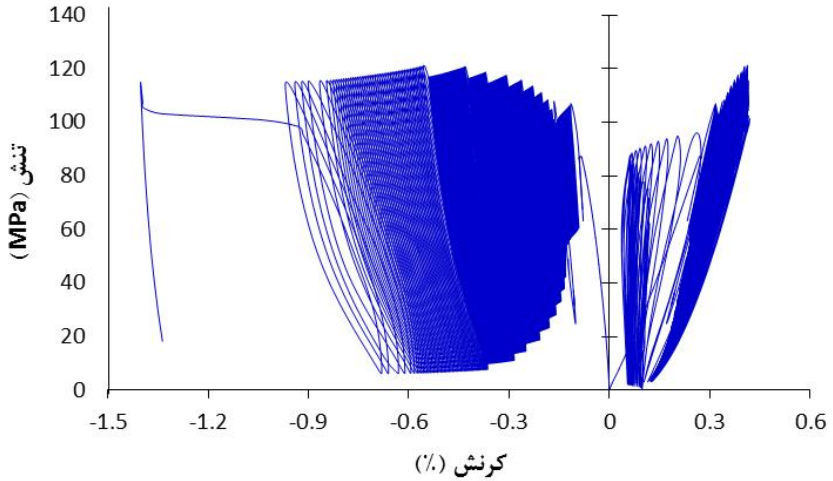
آزمون خستگی جابه‌جایی کنترل پله‌ای

به‌منظور ارزیابی رفتار نرم‌شوندگی تونالیت‌های بررسی شده، دو آزمایش بارگذاری چرخه‌ای به‌صورت جابه‌جایی کنترل انجام شد. آزمون‌های مربوط به‌صورت بارگذاری پله‌ای با دامنهٔ جابه‌جایی متغیر انجام شد. در نهایت بر اساس نتایج به‌دست آمده از این دو آزمون، روند تغییرات تنش کمینه و بیشینه، کرنش محوری کمینه و بیشینه و کرنش جانبی کمینه و بیشینه بررسی شده‌اند. برای درک بهتر چگونگی انجام آزمایش بارگذاری چرخه‌ای با دامنهٔ جابه‌جایی افزاینده، نمودار تنش- کرنش نمونه To2 در شکل۱۰ نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل‌ها دیده می‌شود، رفتار نرم شوندگی برای تونالیت‌های بررسی شده به‌خصوص در پله آخر بارگذاری، کاملا مشخص است.

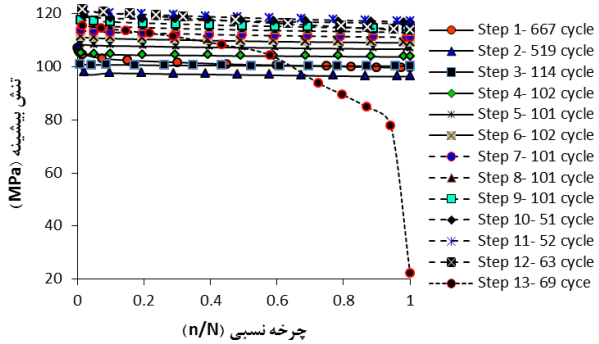
به‌منظور بررسی بهتر رفتار نرم‌شوندگی، روند تغییرات تنش‌های بیشینه و کمینه در برابر چرخه نسبی در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. تغییرات تنش کمینه، افت سریع این پارامتر را در ۲۰ درصد پله بارگذاری اول نشان می‌دهد. بعد از آن با افزایش چرخه‌ها، تنش کمینه به‌صورت کاهنده و با شیب بسیار کم به‌تدریج پایدار می‌شود. تغییرات این پارامتر در پله‌های تنش بعدی به‌صورت نزولی با شیب کم و یک‌نواخت ادامه یافته است. در پله تنش بارگذاری آخر، روند تغییرات تنش کمینه به‌صورت نزولی افزاینده بوده و بعد از گذشت ٦٥ درصد ازسیکل‌های خستگی پله آخر نمودار از حالت خطی خارج شده و به‌صورت منحنی نزولی با شیب افزاینده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

تبدیل شده و بیان‌گر فاز توسعه سریع ترک‌های ایجاد شده در مراحل قبل است. بررسی تغییرات تنش بیشینه با افزایش تعداد چرخه‌ها، روندی مشابه با تغییرات تنش کمینه را نشان می‌دهد، با این تفاوت که افت تنش در پله بارگذاری آخر بسیار بارزتر است و به‌صورت مشهود شروع فاز رشد تسریع شونده را ۵۵ درصد عمرخستگی پله آخر نشان می‌دهد. با توجه به روند تغییرات بارزتر تنش ماکزیمم، می‌توان از این پارامتر به‌عنوان بهترین پارامتر در ارزیابی رفتار نرم شونگی استفاده کرد.

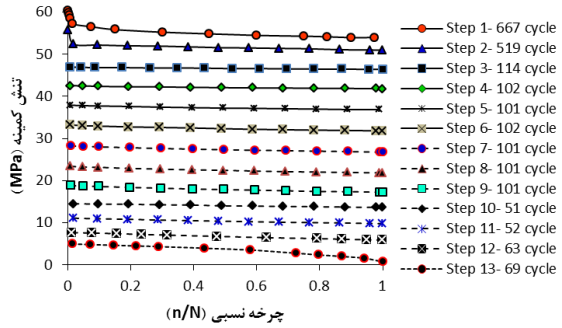


شکل ۱۰. روند تغییرات تنش-کرنش برای نمونه To2 طی آزمایش خستگی جابه‌جایی کنترل



شکل۱۱. روند تغییرات تنش کمینه و بیشینه طی آزمایش خستگی جابه‌جایی کنترل برای نمونه To2

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

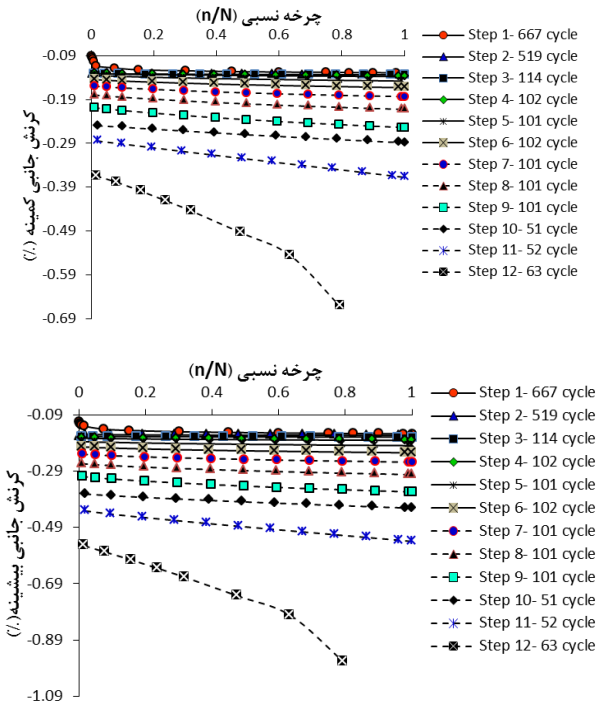


شکل۱۱. روند تغییرات تنش کمینه و بیشینه طی آزمایش خستگی جابه‌جایی کنترل برای نمونه To2

چنان‌که قبلا ذکر شد، کرنش جانبی روند آسیب وارده در بارگذاری چرخه‌ای را بهتر از دیگر پارامترها نشان می‌دهد. شکل ۱۲ تغییرات کرنش جانبی بیشینه و باقی‌مانده را برای نمونه To2 به نمایش گذاشته‌اند. نکات مورد توجه در این دو نمودار، افزایش سریع کرنش جانبی در چرخه‌های ابتدایی پله بارگذاری اول است که پس از گذشت از این مرحله، کرنش‌های جانبی بیشینه و باقی‌مانده روندی افزاینده و یک‌نواخت دارند. برای سایر پله‌های بارگذاری تا پله دهم، بخش ابتدایی نمودار تا ۳۰-۴۰ درصد عمر خستگی، دارای شیب بیش‌تر از ادامه عمر خستگی بوده است. نمودار مربوط به پله بارگذاری یازدهم کاملاً روندی خطی داشته ولی نمودار مربوط به پله بارگذاری دوازدهم روندی غیرخطی و افزاینده نشان می‌دهد. نمودار مربوط به پله بارگذاری سیزدهم به‌دلیل تخریب کرنش سنج ها به تصویر کشیده نشده است. هم‌چنین این نکته قابل توجه است که با افزایش پله‌های بارگذاری اختلاف نمودارهای کرنش جانبی پیاپی، افزایش یافته است. این نکته به‌خصوص در پله‌های بارگذاری پایانی مشهودتر است و بیانگر این مطلب است که روند آسیب خستگی روندی غیر خطی است.

نحوهٔ انجام آزمون بارگذاری چرخه‌ای جابه‌جایی کنترل روی نمونه To3 توسط نمودارهای نیرو جابه‌جایی دستگاه اینسترون و تنش-کرنش، در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. نحوهٔ رفتار نرم‌شوندگی در این نمودارها و به‌خصوص در پله بارگذاری نهایی به‌خوبی قابل تشخیص است. نمودار نیرو جابه‌جایی دستگاه به‌دلیل این‌که مستقل از استرین گیج‌ها بوده است و خطاهای ناشی از آسیب احتمالی استرین گیج‌ها را ندارد به‌خوبی رفتار کرنش نرم‌شوندگی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

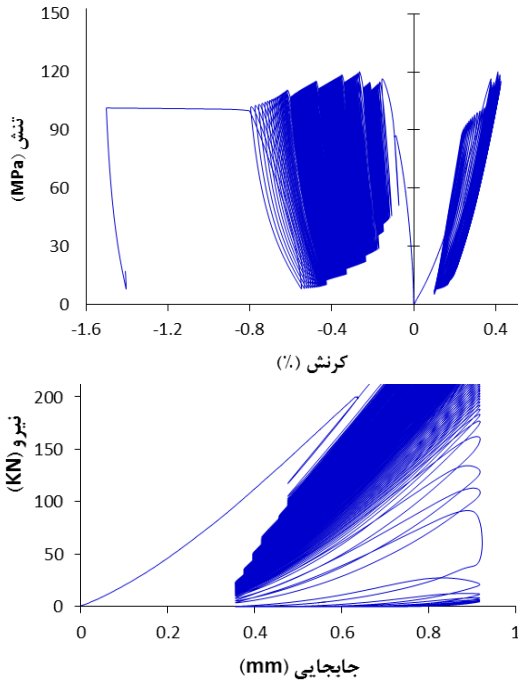


شکل ۱۲. روند تغییرات کرنش جانبی کمینه و بیشینه طی آزمایش خستگی جابه‌جایی کنترل (نمونه To2)

را نشان می‌دهد. در واقع برای یک جابجایی یک‌سان بین دو فک بارگذاری، مقدار نیروی لازم با افزایش تعداد سیکل کم‌تر می‌گردد. در واقع به‌علت ضعیف‌شدگی پیوسته سنگ، مقاومت آن در برابر جابه‌جایی قائم کم‌تر شده و نیروی کم‌تری برای دامنهٔ جابه‌جایی یک‌سان لازم است. در دامنهٔ بارگذاری نهایی به‌علت نزدیک شدن به آستانه شکست میزان تغییرات نیروی لازم به‌شدت زیاد شده و از تراز نیرویی در حدود ۲۵۰ کیلونیوتن به صفر کیلونیوتن می‌رسد. در منحنی تنش- کرنش نیز کاهش تنش لازم در هر دامنهٔ جابه‌جایی دیده می‌شود. با این وجود مقادیر کرنش با افزایش سیکل‌های بارگذاری، اضافه می‌شود. در واقع به‌علت ضعیف‌شدگی سنگ مقادیر کرنش‌ها و به‌خصوص کرنش جانبی اضافه می‌شود و برخلاف جابه‌جایی دستگاه که مقدار ثابتی است، مقدار کرنش متغییر است. با توجه به متغییر بودن تنش و کرنش در این تست و از طرفی مقادیر کرنش محوری کم و تغییرات تنش نامنظم، منحنی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

تنش کرنش محوری به‌درستی پدیده کرنش نرم‌شوندگی را نشان نمی‌دهد از این رو، از تغییرات تنش به‌صورت مجزا استفاده شد. تغییرات تنش‌های بیشینه و کمینه در برابر چرخه نسبی در شکل ١٤ نشان داده شده‌اند. تغییرات تنش کمینه افت سریع این پارامتر را در ۱۵ درصد آغازین پله بارگذاری اول نشان می‌دهند و بعد از آن با افزایش چرخه‌ها، تنش کمینه به‌صورت کاهنده و با شیب خطی کم ادامه می‌یابد. تغییرات این پارامتر در پله‌های فشار بعدی، به‌صورت نزولی با شیب کم و یک‌نواخت ادامه یافته است. در پله تنش نهایی، تغییرات تنش کمینه به‌صورت نزولی افزاینده بوده و بعد از گذشت٦٠ درصد از عمر خستگی در این پله، منحنی تغییرات تنش کمینه وارد فاز توسعه سریع ترک‌های ایجاد شده می‌شود.

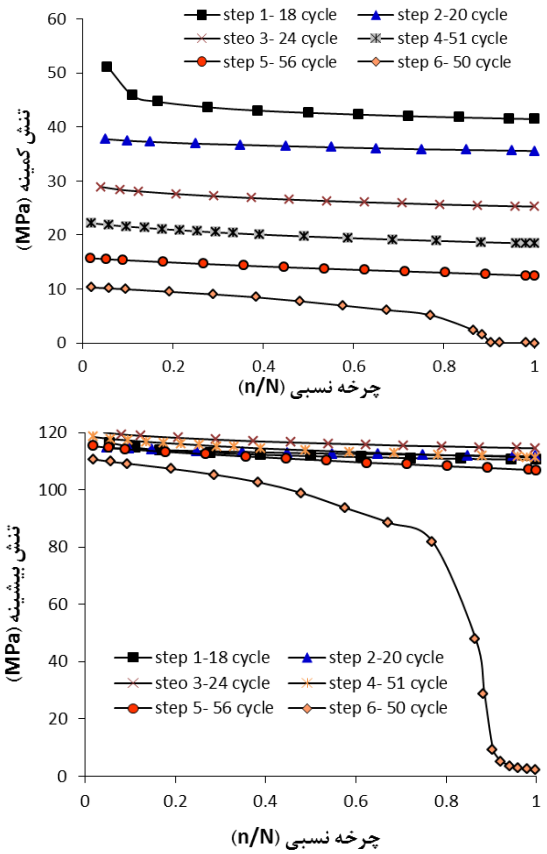


شکل ۱۳. روند تغییرات نیرو-جابه‌جایی دستگاه اینسترون و تغییرات تنش-کرنش طی آزمایش خستگی جابه‌جایی کنترل (نمونه To3)

روند تغییرات تنش بیشینه با افزایش تعداد چرخه‌ها، مشابه با تغییرات تنش کمینه بوده است با این تفاوت که روند افت تنش در پله بارگذاری آخر بسیار بارزتر است و در ۵۰ درصد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

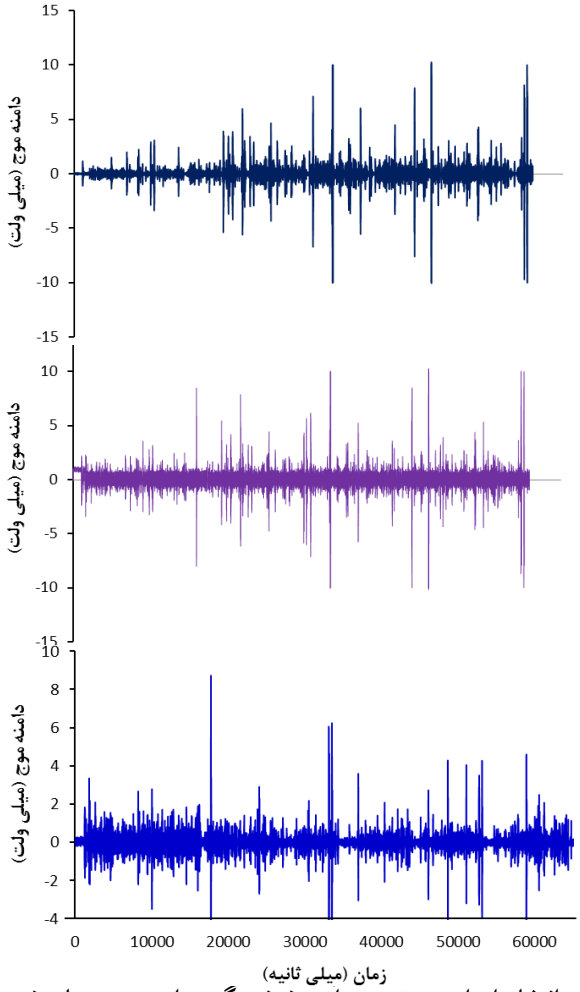
عمر خستگی پله آخر شیب نمودار از حالت خطی خارج شده و به‌صورت منحنی با شیب افزاینده تبدیل شده است. چنان‌که پیش‌تر ذکر شد این پارامتر می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای نشان دادن رفتار کرنش نرم شوندگی سنگ استفاده گردد. نکته قابل توجه در این نمودار، افزایش تنش بیشینه با افزایش پله‌های بارگذاری تا پله چهارم و کاهش این پارامتر در پله‌های پنجم و ششم است. این روند نشان می‌دهد که سنگ در پله‌های بارگذاری پنجم و ششم، وارد فاز آسیب جدی شده است.



شکل۱٤. روند تغییرات تنش کمینه و بیشینه طی آزمایش خستگی جابه‌جایی کنترل برای نمونه To3

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

روند تغییرات کرنش جانبی بیشینه و باقی‌مانده را برای نمونه To3 همانند نمونه To2 بوده است از این رو، از آوردن شکل تغییرات کرنش برای این نمونه خودداری شده است. نمونه‌ای از نتایج به‌دست آمده از داده‌های انتشار امواج صوتی ثبت شده برای تونالیت‌ها، در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. نکته قابل توجه افزایش تعداد و دامنه پالس‌های سنسور نصب شده در مرکز و بالای نمونه است. از طرفی چندین پالس دامنه بلند در روند خستگی این نمونه مشاهده شده که بیان‌گر وقوع چندین ترک اصلی است.



شکل ۱۵. نمودار انتشار امواج صوتی در ازمون خستگی برای سنسورهای نصب شده در بالا، مرکز و پایین نمونه تونالیت To7

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

نتیجه‌گیری

به‌منظور ارزیابی رفتار خستگی سنگ‌های تونالیتی آزمون بارگذاری تک‌محوره چرخه‌ای روی این سنگ‌ها انجام شد و با استفاده از پارامترهای آسیب خستگی، روند تضعیف‌شدگی سنگ از شروع بارگذاری تا لحظه شکست ارزیابی شد. به‌عنوان نتیجه‌گیری از رفتار خستگی این تیپ سنگی می‌توان این موارد را برشمرد:

۱. آسیب انباشتی خستگی یک فرایند سه‌مرحله‌ای را نشان داده است که در اثر وقوع ریزترک در سنگ، ناشی از اعمال چرخه‌های بارگذاری، ایجاد می‌شود. به‌علاوه مقایسهٔ تغییرات کرنش جانبی و محوری نشان می‌دهد که کرنش جانبی آسیب‌پذیری بیش‌تری داشته و عمده ترک‌های ایجاد شده، در راستای محور بارگذاری هستند.

۲. از میان پارامترهای آسیب خستگی استفاده شده در این پژوهش، پارامترهای کرنش‌های باقی‌مانده محوری و جانبی به‌علت در نظر گرفتن آسیب‌های اولیه ناشی از وجود نقاط ضعف در سنگ و هم‌چنین نشان دادن کرنش پلاستیک و روند سه‌مرحله‌ای کامل، عملکرد بهتری دارند.

۳. مدول مماسی در فرایند آسیب خستگی روند نزولی داشته ولی الگوی تغییرات آن پراکنده است. این در حالی است که مدول متقاطع روند نزولی سه مرحله‌ای کاملی را از خود نشان می‌دهد.

٤. تغییرات چقرمگی و انرژی وارفتگی در فرایند خستگی ابتدا در چند چرخه اول کاهش شدیدی را نشان داده و در واقع حلقه‌های تشکیل شده کوچک‌تر می‌گردند. پس از آن تغییرات این دو پارامتر به‌صورت یک‌نواخت با شیب ملایم افزایش یافته تا وارد فاز تسریع شونده شده و روند افزایشی آن‌ها شدت می‌یابد.

۵. منحنی‌های نیرو–جابه‌جایی دستگاه و تنش–کرنش جانبی رفتار کرنش- نرم‌شوندگی را برای این سنگ‌ها نشان می‌دهد. با این وجود از بین پارامترهای آسیب خستگی می‌توان از پارامتر تنش بیشینه برای ارزیابی رفتار نرم‌شوندگی این سنگ‌ها استفاده کرد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

تشکر و قدردانی

از پرفسور مارک جکسا رئیس دانشکدهٔ مهندسی عمران، محیط زیست و معدن دانشگاه آدلاید و آقایان دیوید هال و ایین کیتس برای همکاری در انجام این پژوهش و انجام آزمایش‌ها تقدیر و تشکر می‌کنیم.

منابع

1. Brighenti G., "Reactions of rock to fatigue loading", Proc. 4th Int. Con. On Rock Mechanics, Montreux, 1(1979) 65-70.

2. Stavrogin A.N., Tarasov B.G., "Experimental physics and rock mechanics", Balkem, Rotterdam (2001) 356.

3. Singh S.K., "Fatigue and strain hardening behaviour of Graywacke from the Flagstaff formation, New South Wales", Eng. Geol. 26: 171-9.

4. Zhenyu T., Haihong M., "Technical note: an experimental study and analysis of the behaviour of rock under cyclic loading", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 27(1) (1990) 51-6.

5. Tien Y.M., Lee D.H., Juang C.H., "Strain, pore pressure and fatigue characteristics of sandstone under various load conditions", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 27(4) (1990) 283-9.

6. Zhao M.J., Xu R., "The rock damage and strength study based on ultrasonic velocity", Chin. J. Geotech. Eng. 22(6) (2000) 720-2.

7. Akesson U., Hansson J., Stigh J., "Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading", Eng. Geol. 72 (2004) 131-142.

8. Xiao J.Q., Ding D.X., Xu, G., "Inverted S-shaped model for nonlinear fatigue damage of rock", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 46 (3) (2009) 643-8.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]

9. Xiao J.Q., Ding D.X., Jiang F.L., Xu, G., "Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 47 (2010) 461-468.

10. Erarslan N., Williams D. J., "Investigating the Effect of Cyclic Loading on the Indirect Tensile Strength of Rocks", Rock. Mech. Rock. Eng. 45 (2012) 327-340.

11. Chen Y. L., Ni J., Shao W., Zhou Y.C., Javadi A., Azzam R., Coalescence of fractures under uni-axial compression and fatigue loading", Rock. Mech. Rock. Eng. 45 (2012) 241-249.

12. Khanlari G.R., Momeni A., Karakus Murat., "Assessment of Fatigue Behavior of Alvand Monzogranite Rocks", Journal of Engineering Geology, Kharazmi university 8 (1) (2014) 2003-2020.

13. 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 (2014) 89-96.

14. International Society for Rock Mechanics, "Rock characterization testing and monitoring. In: Brown ET (ed) ISRM suggested methods", Pergamon press, Oxford (1981).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.4.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.135]