

بررسی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و ترک‌شناسی گرانیت در فرآیند خستگی

شهرام قاسمی^۱، ماشاله خامه‌چیان^۲، محمدرضا نیکودل^۳ و احمد ذلولی^۱

^۱ دکتر، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰

چکیده

درزه و ترک جزء لاینفک سازه‌های سنگی می‌باشند. زمانی که این سازه‌ها تحت بار قرار گیرند در اثر رشد ترک‌ها دچار گسیختگی می‌گردند. این مسئله در بارگذاری‌های چرخه‌ای دارای اهمیت فراوانی است زیرا شکست تحت سطوح بارگذاری پایین‌تر از حد تسلیم سنگ در اثر خستگی رخ می‌دهد. از این رو در این تحقیق به بررسی رشد و انتشار درز و ترک‌ها در بارگذاری خستگی به روش مقاطع میکروسکوپی فلورسانس پرداخته شده است. ابتدا مراحل مختلف خستگی سنگ گرانیت که یک سنگ پر کاربرد در مهندسی می‌باشد مشخص شده و سپس نمونه‌هایی تا هر یک از مراحل بارگذاری شده و تغییرات فیزیکی، مکانیکی و ترک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ با افزایش تعداد چرخه‌ها کاهش پیدا کرده است. در مرحله یک خستگی ترک‌ها با شتاب زیادی در سنگ و کانی‌ها ایجاد می‌گردد و سپس در مرحله دوم انرژی اعمال شده بیشتر صرف رشد ترک‌ها می‌گردد و مجدداً در مرحله سوم شیب ایجاد ترک‌ها افزایش پیدا کرده و شبکه بهم متصلی از ترک‌ها به وجود می‌آید که سبب شکست سنگ می‌گردد. در میان کانی‌های سازنده فلدسپارها بیشترین میزان ترک خوردگی را نشان داده‌اند و کمترین میزان ترک در بیوتیت ایجاد شده است.

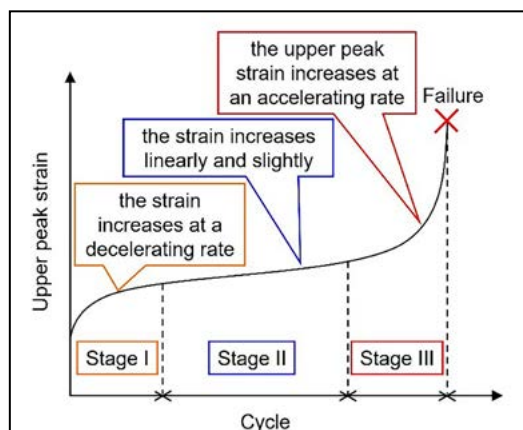
کلیدواژه‌ها: ترک، خستگی، بارگذاری چرخه‌ای، گرانیت.

***نویسنده مسئول:** ماشاله خامه‌چیان

E-mail: khamechm@modares.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

بارگذاری چرخه‌ای و بخصوص خستگی است تا بتوان یک طراحی مناسب برای ساخت سازه‌های پایدار داشت. رفتار خستگی مواد سنگی بر اساس مطالعات گذشته سه مرحله را از خود نشان می‌دهند و در شکل ۱ نشان داده شده است (Royer - Carfagni and Salvatore 2000; Guo et al., 2012). که رفتاری مشابه با رفتار خزش می‌باشد (Brantut et al., 2013). خستگی سنگ یک رفتار سه مرحله‌ای از خود نشان می‌دهد که در مرحله اول میزان افزایش کرنش یک نرخ با شیب کاهنده را نشان می‌دهد که با مرور زمان از شیب آن کاسته شده است. سپس در مرحله دوم کرنش با یک شیب ثابت افزایش پیدا می‌کند و سپس در مرحله سوم که مرحله شتابدار نیز شناخته می‌شود میزان افزایش کرنش یک شیب افزایش‌دهنده پیدا می‌کند که منجر به شکست سنگ می‌گردد.



شکل ۱- منحنی معمول فرآیند خستگی برای مواد (Chen et al., 2011).

رفتار مکانیکی سنگ‌ها در بارگذاری چرخه‌ای توسط محققان بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است که نشان دهنده زوال ویژگی‌های مکانیکی با افزایش

مطالعه و گسترش ترک در سنگ به عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی که منجر به شکست سازه‌های سنگی می‌گردد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. درزه‌ها و ترک‌ها جزء لاینفک سازه‌های سنگی بوده که بر اساس نوع کاربری سازه تحت تأثیر مجموعه بارهای استاتیکی و چرخه‌ای قرار می‌گیرند. اعمال بار در شرایط مختلف می‌تواند باعث توسعه ترک گردد (Martin 1993; Akeson et al., 2004; Ghasemi et al., 2019). یکی از مهم‌ترین عوامل گسیختگی گسترش همین درزه‌ها و ترک‌های موجود در سنگ می‌باشد. این مسئله در مورد سازه‌هایی که تحت تأثیر بار چرخه‌ای قرار دارند بیش از سایر سازه‌ها اهمیت دارد زیرا شکست تحت تأثیر بارهای چرخه‌ای یا شکست خستگی در سطوح بارگذاری پایین‌تر از حد تسلیم سنگ و بدون هیچ پیش‌آگاهی و نشانه‌ای صورت می‌گیرد. مشخص شده است که بسیاری از مواد در نتیجه تنش‌های چرخه‌ای در طول زمان تضعیف شده و سرانجام به نقطه شکست می‌رسند حتی اگر تغییرات کمتر از مقاومت شکست در حالت استاتیکی باشد. این پدیده به عنوان خستگی شناخته شده است (Suresh, 1998)، و در بسیاری از مواد از جمله سنگ نیز رخ می‌دهد. بارهای اعمال شده بر سازه‌های ساخت بشر چه به صورت طبیعی باشد و چه ناشی از فعالیت‌های بشر مانند زلزله، باد و ترافیک دارای ماهیت چرخه‌ای می‌باشد. این تعریف محدوده وسیعی از بارها را با دامنه و فرکانس مشخص دربر می‌گیرد (Cerfontaine and Collin, 2018). طراحی تونل‌ها در برابر زلزله (Hashash et al., 2001)، پیش‌بینی خطرات آتش‌فشان‌ها (Kendrick et al., 2013; Heimisson et al., 2015)، ارزیابی فرآیند ذوب و انجماد بر تونل‌های ساخته شده در محیط‌های سرد (Liu et al., 2015)، تخریب پایه‌ها و ستون‌ها بر اثر بالا و پایین شدن سطح آب (Sorgi et al., 2011)، فضاهای ذخیره نفت و گاز در معادن نمک (Wang et al., 2015; Voznesenskii et al., 2017) و همچنین استفاده از معادن قدیمی به منظور فعالیت‌های هیدروالکتریکی همگی مثال‌هایی می‌باشند که بارهای چرخه‌ای در اثر فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌گردند. همگی این کاربردهای نشان از این می‌باشند که نیاز به فهم و درک بهتری از رفتار سنگ‌ها در

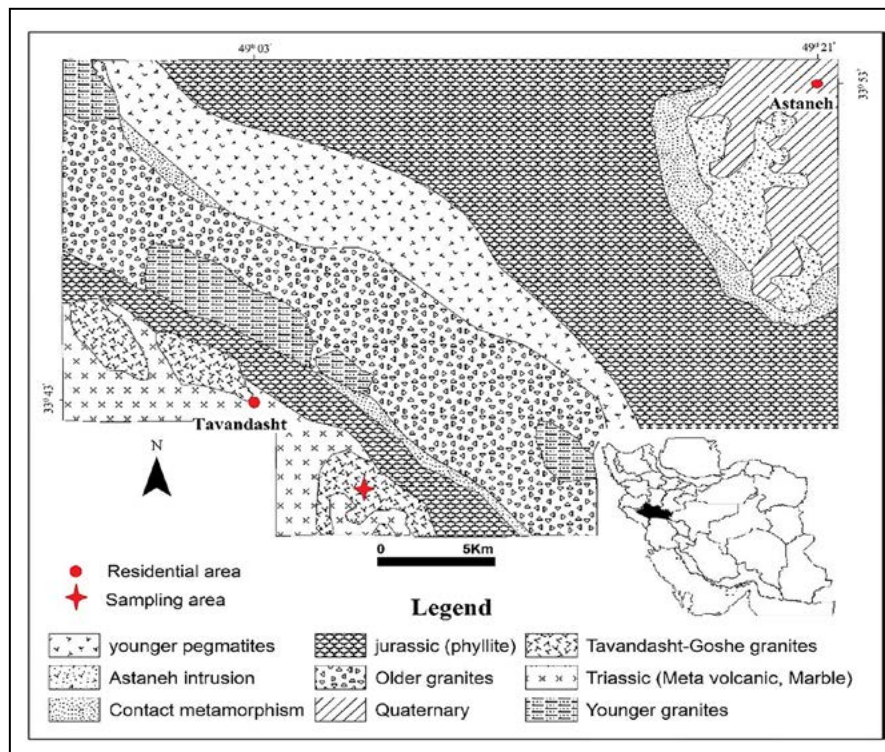
از معادن گرانیت جوکار در استان لرستان در شهرستان بروجرد برداشت شده است (شکل ۲). توده گرانیتی بروجرد در شمال و شمال خاور بروجرد در ناحیه‌ای با وسعت ۱۵۰ کیلومتر مربع قرار دارد و منطقه‌ای با تپه‌های کم ارتفاع را تشکیل داده است (قبادی و رسولی، ۱۳۹۱). تعداد زیادی مجموعه‌های پلوتونیک در بین شهر اراک و بروجرد قرار دارد این توده‌ها در سنگ‌های اوایل مزوزئیک نفوذ کرده‌اند و مربوط به کوهزایی آلپین می‌باشند. در این منطقه سه مجموعه گرانیتی قرار دارد که شامل توده نفوذی آستانه، گوشه و مجموعه بروجرد می‌باشد. مجموعه بروجرد شامل محدوده وسیعی از سنگ‌ها از گرانیت تا دیوریت را دربر گرفته است. اما نوع غالب سنگ در این منطقه سنگ‌های گرانودیوریت و کوارتز دیوریت می‌باشد. گرانودیوریت‌های این منطقه عمدتاً شامل پلاژیوکلاز، کوارتز، آلکالی فلدسپار و بیوتیت می‌باشند. کانی‌های فرعی این سنگ‌ها شامل اسفن، زیرکن و آپاتیت است. نتایج حاصل از سن سنجی Rb/Sr سن این توده نفوذی را به کرتاسه پایینی ارتباط می‌دهد و جدیدترین فعالیت‌های این منطقه در طول اواخر کرتاسه و اوایل پالئوژن رخ داده است (Sepahi and Athari, 2006).

تعداد چرخه‌ها می‌باشد (Gatelier et al., 2002; Bagde and Petroš 2005; Taheri et al., 2016; Yang et al., 2017). اما، بررسی وضعیت ترک خوردگی و رشد و انتشار ترک‌ها در سنگ که مهم‌ترین عامل شکست سنگ می‌باشد و همچنین ارتباط آن با وضعیت کانی‌شناسی کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Akesson et al., 2004; Chen et al., 2011). بر این اساس در این تحقیق سنگ گرانیت که یک سنگ آذرین درونی پرکاربرد در ساخت و ساز می‌باشد انتخاب و سپس تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته است. پس از تعیین نمودار و مراحل خستگی برای سنگ مورد نظر، نمونه‌هایی تا هر یک از مراحل خستگی بارگذاری شده است و سپس به وسیله روش ترکیبی استفاده از عکس‌برداری در زیر نور پلاریزه و نور فلورسانس به بررسی مستقیم ترک‌های موجود در سنگ و همچنین در کانی‌های سازنده سنگ پرداخته شده است تا بتوان ارتباط مناسبی میان وضعیت ترک خوردگی در سنگ و کانی‌های سازنده سنگ مورد نظر برقرار کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱. زمین‌شناسی منطقه نمونه‌برداری

نمونه‌های گرانیت که به نام گرانیت سفید بروجرد یا گرانیت جوکار شناخته می‌شود



شکل ۲- زمین‌شناسی منطقه نمونه‌برداری گرانیت (Masoudi and Yardley, 2005).

۲-۲. آماده‌سازی نمونه‌ها و تهیه مقاطع نازک فلورسانس

تهیه شد. بدین منظور به‌وسیله دستگاه برش قطعات سنگی به ابعاد طول و عرض تقریبی ۳×۲ سانتی‌متر تهیه گردید. در مرحله بعد نمونه‌های برش خورده به روش اشباع سطحی توسط رزین اپوکسی با گرانروی پایین حاوی کمتر از ۱ درصد وزنی ماده فلورسانس، تحت فشار خلأ ۰/۸ بار اشباع شدند. بعد از خشک شدن رزین، سطح هدف به روش دستی و با استفاده از بودر مقطع رزنی صیقل داده شد. در مرحله بعد نمونه‌ها به لام چسبانده شد و سپس برش و صیقل داده شد تا به ضخامت معمول مقاطع نازک زمین‌شناسی برسند.

۲-۳. مطالعه مقاطع نازک

برای مطالعه ریزترک‌ها از میکروسکوپ پلاریزه (مدل Bell) دارای منبع نور فلورسانس استفاده شد (میکروسکوپ پلاریزه-فلورسانس). همچنین میکروسکوپ

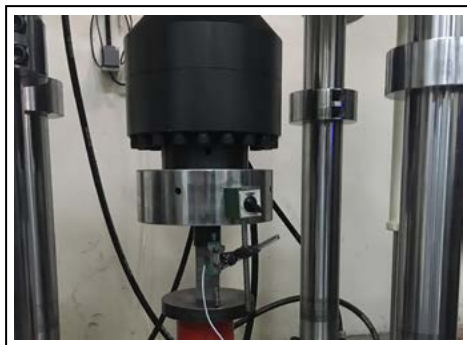
پس از انتقال نمونه‌ها به کارگاه برش سنگ، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵۴ میلی‌متر و با نسبت طول به قطر ۲/۵-۲ برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، بارگذاری چرخه‌ای، سرعت امواج طولی و ویژگی‌های وزنی-حجمی تهیه شد. سپس به منظور بررسی ترک‌های از پیش موجود در سنگ و کانی‌های سازنده آن و همچنین از بین بردن اثر مغزه‌گیری، از مغزه‌های تهیه شده جهت تهیه مقاطع فلورسانس استفاده شد. لازم به ذکر است که برای نمونه‌های حالت بکر و همچنین نمونه‌های بارگذاری شده در هر مرحله ۳ مقطع نازک به روش زیر تهیه شد و نتایج ارائه شده در ادامه مقاله میانگین نتایج سه مقطع نازک در هر مرحله می‌باشد.

مقاطع نازک فلورسانس در جهت عمود بر جهت اعمال بار تهیه شدند. مقاطع نازک به‌منظور اجتناب از هر گونه اثر سطوح انتهایی از وسط مغزه‌ها بارگذاری شده

۲-۶- آزمایش بارگذاری چرخه‌ای

به منظور انجام آزمایش چرخه‌ای از دستگاه آزمایش خستگی محوری ساخت شرکت سنتام به نام SAF ۲۰۰ با ظرفیت بارگذاری ۲۰۰۰ kN استفاده شد. این دستگاه از نوع سروو هیدرولیک بوده و از نرم افزار خاص خود بهره می برد و قادر است تغییر شکل های تا ۱ میکرومتر را ثبت کند (شکل ۵).

به منظور به دست آوردن نمودار خستگی برای سنگ گرانیت آزمایش هایی با تنظیمات مختلف که شامل تغییر در فرکانس، دامنه بار برداری و بار گذاری و حداکثر بار می باشد انجام گرفت و سپس بهینه ترین حالت که نزدیکترین نمودار خستگی را به حالت ایده آل نشان داد انتخاب و ادامه آزمایش بر طبق آن صورت گرفت. در حالت نهایی آزمایش چرخه‌ای در فرکانس ۰/۱ هرتز، حداکثر بار ۸۵٪ مقاومت تک محوری و با دامنه بارگذاری و بار برداری ۹۵٪ حداکثر بار اعمالی انجام شد.

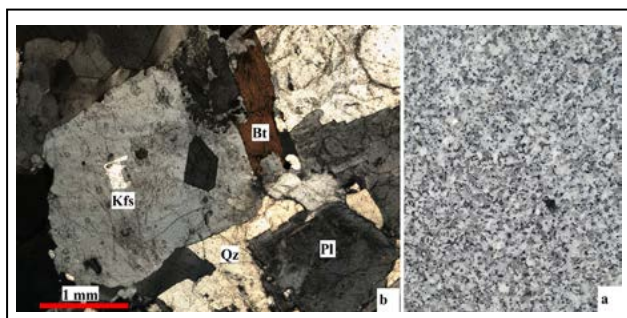


شکل ۵- نحوه انجام آزمایش بارگذاری چرخه‌ای.

۳- نتایج

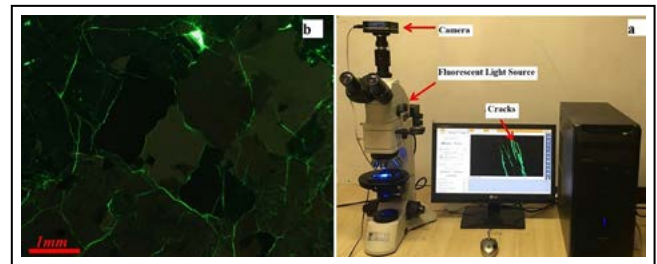
۳-۱. ویژگی های سنگ شناسی گرانیت

بر اساس مطالعات مقطع نازک و ترسیم چندوجهی برای هر نوع کانی در نرم افزار JMicroVision، مشخص شد گرانیت جوکار یک سنگ دانه متوسط می باشد که شامل ۲۷-۲۵٪ کوآرتز، ۵۵-۵۳٪ پلاژیو کلاز، ۱۰-۸٪ فلدسپار پتاسیم، ۷-۵٪ بیوتیت و کمتر از ۲٪ هورنبلند است (شکل ۶). کانی های فرعی مشاهده شده در مقاطع نازک شامل اکسید آهن و تیتانیم، اسفن و زیرکن است. پلاژیو کلازها فراوان ترین فاز می باشند که به صورت شکل دار تا نیمه شکل دار رشد کرده اند و ماکل های دوتایی در آنها به خوبی شکل گرفته است. از لحاظ بافتی گرانیت جوکار بافت متوسط تا درشت دارد و بافت گرانوفیری (هم رشدی کوآرتز و آلکالی فلدسپار) در آن دیده می شود. هورنبلند به صورت یخشی در حال تبدیل شدن به کلریت بوده و آثار کلریت در هسته برخی از هورنبلندها دیده می شود. سرسیتی شدن در پلاژیو کلازها نیز مشاهده شده است.



شکل ۶- سنگ گرانیت در نمونه دستی و مقطع نازک (a) نمونه دستی صیقل داده شده گرانیت؛ (b) مقطع نازک گرانیت در نور پلاریزه. Bt=بیوتیت، Pl=پلاژیو کلاز، Qz=کوآرتز و Kfs=آلکالی فلدسپار.

مجهز به دوربین دیجیتال برای تصویر برداری از مقاطع نازک بود (شکل ۳a). تصاویر کاملی از مقاطع نازک تهیه شده به صورت پیوسته با دوربین متصل به میکروسکوپ، زیر نور پلاریزه و فلورسانس در بزرگنمایی ۴۰X تهیه شد. که از ترکیب این تصاویر با یکدیگر یک تصویر به دست می آید که هم زمان قادر به مشاهده نوع کانی و همچنین ترک های ایجاد شده در آن می باشیم (شکل ۳b).

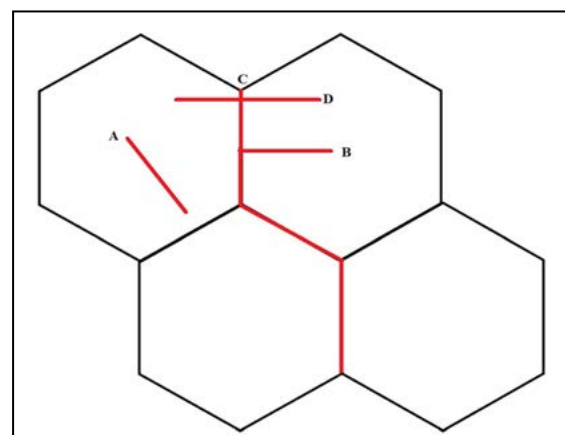


شکل ۳- (a) میکروسکوپ مجهز به نور فلورسانس؛ (b) عکس نهایی تهیه شده برای مطالعه ترک ها.

۲-۴. مطالعه ترک ها

جهت مطالعه ترک ها از رابطه چگالی خطی ریزترک ها (LMD) (Linear Microcrack Density) (Sousa et al., 2005) استفاده شد. بدین منظور یک سطحی از ریزموزائیک به ابعاد ۱۲×۲۰ میلی متر مربع توسط خطوطی موازی و عمود بر هم با ابعاد هر مش شبکه ۳×۵ میلی متر مربع شبکه بندی شد. سپس تعداد و نوع ترک هایی که خطوط را قطع می کردند به دست آمد. در سنگ هایی که بافت موزائیکی داشتند چگالی خطی برای ریزترک های درون دانه ای، بین دانه ای، مرزدانه ای و عبوری محاسبه شد. به طور کلی ریزترک ها در سنگ به ۴ دسته تقسیم بندی می شوند (Kranz, 1979) که عبارت اند از:

ترک های درون دانه ای: که در درون دانه شکل می گیرند، ترک های بین دانه ای: در درون دانه ها رشد کرده و به مرز دانه رسیده اند، ترک های مرزدانه ای: در طول مرز دانه ها رشد کرده اند و در نهایت ترک های عبوری: که از درون دو یا چند دانه عبور کرده اند (شکل ۴).



شکل ۴- انواع مختلف ترک در سنگ، A: ترک درون دانه ای، B: ترک بین دانه ای، C: ترک مرزدانه ای، D: ترک عبوری.

۲-۵- تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

ویژگی های وزنی- حجمی سنگ ها (وزن واحد حجم خشک و اشباع، تخلخل مؤثر و جذب آب وزنی) با استفاده از روش اشباع- غوطه وری و سرعت موج P و S با استفاده از دستگاه Pandit lab طبق استاندارد (2007) ISRM در حالت سالم و پس از بارگذاری نمونه ها اندازه گیری شد. برای اندازه گیری مقاومت فشاری در حالت سالم سه نمونه از هر نوع سنگ با نسبت طول به قطر 2.5 ± 0.2 طبق استاندارد (2007) ISRM مورد آزمایش قرار گرفتند.

۳-۲. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر

انجام شده گرانیت مورد نظر دارای مقاومت تک محوری ۱۱۴/۶ و مدول الاستیسیته مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۴۳/۸ گیگاپاسکال می‌باشد. تخلخل مفید سنگ نیز ۰/۷ می‌باشد. در حالت بکر در هر میلی متر از سنگ گرانیت ۳/۵۰ ترک شمارش شده است.

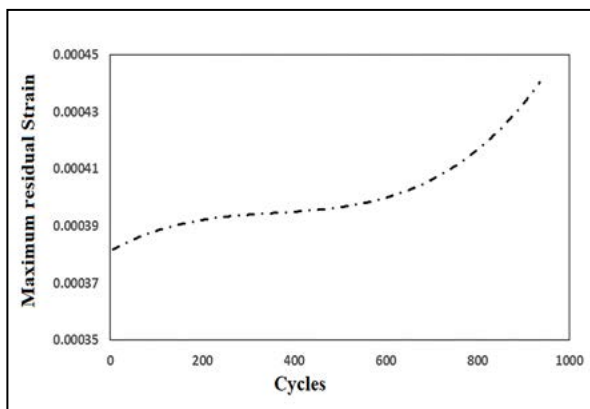
سنگ‌ها مواد ناهمگنی هستند که شامل درز و ترک و حفراتی می‌باشند که توسعه و همچنین ارتباط آنها با هم خصوصیات فیزیکی و رفتار مکانیکی سنگ اثر می‌گذارد. بر این اساس اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها در حالت بکر انجام شد و در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس اندازه‌گیری‌های

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها.

Properties	LMD	E	UCS	V _s	V _p	W _a	n _e	γ _{sat}	γ _d
	(N/mm)	(GPa)	(MPa)	(m/s)	(m/s)	(%)	(%)	(kN/m ³)	(kN/m ³)
Value	3.50	43.8	114.6	2670	5099	0.27	0.70	26.19	26.09

E, UCS, V_s, V_p, W_a, n_e, γ_{sat} و LMD به ترتیب بیانگر وزن واحد حجم خشک، وزن واحد حجم اشباع، تخلخل مؤثر، جذب آب، سرعت موج فشاری، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و چگالی خطی ریز ترک‌ها هستند.

استفاده شد. بعد از تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها از وسط و عمود بر جهت بارگذاری برش خورده و از هر مغزه دو مقطع نازک فلورسانس تهیه شده است که از آن‌ها برای بررسی ریز ترک‌ها استفاده شده است و نتایج مربوطه در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۸- حداکثر کرنش باقی‌مانده در برابر تعداد چرخه‌ها در شکست خستگی گرانیت (شکست در چرخه ۹۳۳).

جدول ۲- میانگین تعداد چرخه‌ها برای مراحل مختلف خستگی گرانیت.

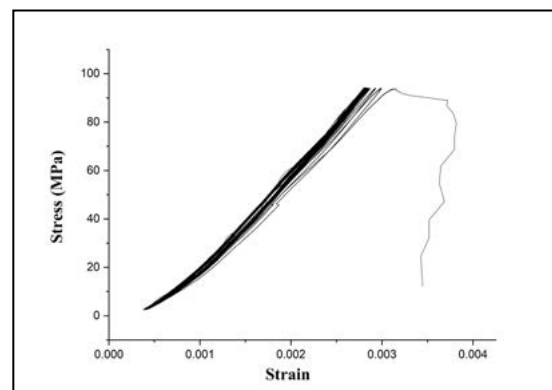
Fatigue stage	Stage 1	Stage 2	Mean cycles of failure
Number of cycles	90	400	920

جدول ۳- تغییر خصوصیات فیزیکی گرانیت تحت آزمایش بارگذاری چرخه‌ای.

Stage		n _c (%)	W _a (%)	V _p (m/s)	V _s (m/s)
Fatigue 1	Intact	0.75	0.28	5178	2865
	Loading	1.11	0.41	4081	2464
	Changes (%)	49.27	44.37	-21.18	-13.99
Fatigue 2	Intact	0.71	0.28	5210	2905
	Loading	1.3	0.51	3746	2399
	Changes (%)	83.41	82.16	-28.1	-17.42

۳-۳. آزمایش بارگذاری چرخه‌ای

به‌منظور ارزیابی خستگی نمونه گرانیت در سطح بیشینه تنش ۸۵ درصد و دامنه بار ۹۵ درصد مقاومت تک‌محوری ۳ نمونه تحت آزمایش قرار گرفتند. منحنی تنش کرنش حاصل از آزمایش چرخه‌ای در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- منحنی تنش کرنش آزمایش خستگی گرانیت در مرحله شکست.

با توجه به اینکه بررسی و تحلیل‌های صورت گرفته از نمودار تنش کرنش در بارگذاری چرخه‌ای به دلیل حجم زیاد داده‌ها، محدود می‌باشد و امکان تعیین مراحل خستگی از این نمودار امکان‌پذیری نمی‌باشد؛ نمودار حداکثر مقدار کرنش باقی‌مانده در برابر تعداد (S-N) چرخه (شکل ۸) ترسیم شده است که بر اساس آن می‌توان اقدام به تفکیک مراحل مختلف خستگی کرد. پس از تعیین نمودار S-N برای هر سه آزمایش میانگین تعداد آزمایش‌ها برای هر مرحله خستگی به دست آمد و در جدول ۲ نشان داده شده است. سپس آزمایش‌های چرخه‌ای برای رسیدن به هر مرحله بر طبق تنظیماتی مشابه با حالت شکست خستگی ولی با تعداد چرخه‌های مشخص انجام شد و سپس از نمونه‌های آزمایش شده برای تعیین خصوصیات فیزیکی و ریز ترک‌شناسی استفاده گردید.

با توجه به شکل ۸ و جدول ۲ به‌خوبی مراحل یک و دوم خستگی از هم قابل تشخیص می‌باشند. در مرحله اول کرنش باقی‌مانده در سنگ با یک شیب کاهنده افزایش یافته است و سپس بصورت میانگین بعد از ۹۰ چرخه سنگ به مرحله دوم خستگی که مقدار کرنش باقی‌مانده با یک حالت خطی و شیب بسیار کم افزایش می‌باشد وارد می‌گردد. بعد از مرحله دوم (تعداد ۴۰۰ چرخه) سنگ وارد مرحله افزایش شدید و ناپایدار کرنش شده است که سنگ را به مرحله شکست وارد می‌کند.

۳-۴. خصوصیات فیزیکی و ریز ترک‌شناسی سنگ‌های بارگذاری شده

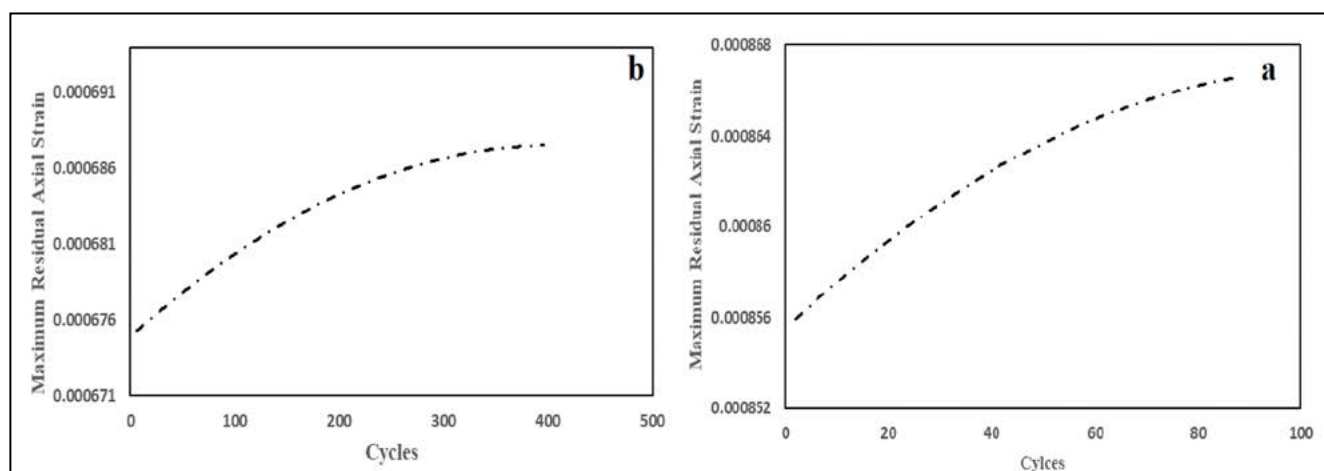
بعد از انجام آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای و رسیدن به هر یک از مراحل خستگی، آزمایش‌ها متوقف شده و از نمونه‌ها به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی

جدول ۴- چگالی خطی ریزترک‌ها (N/mm) در سنگ گرانیت تحت بارگذاری خستگی.

Minerals	Intact	Fatigue 1	Fatigue 2	Failure
Plagioclase	4.17	9.74	11.84	18.46
Quartz	2.13	5.64	7.62	14.12
K-Feldspar	2.54	9.55	10.22	18.75
Biotite	2.66	8.73	9.70	10.92
Total	3.5	9.52	11.70	17.44

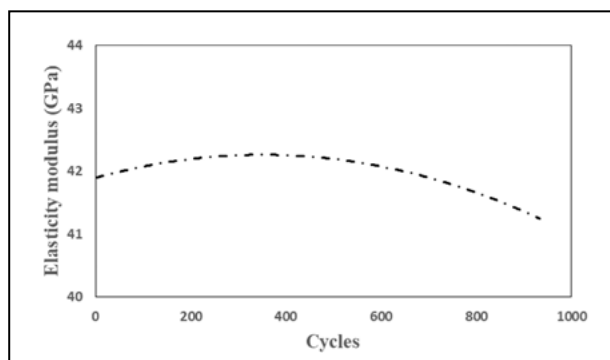
۴-۱. تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

اندازه‌گیری تغییرات کرنش باقی مانده (شکل ۹) در آزمایش‌ها نشان داده است که با افزایش تعداد چرخه‌ها کرنش به صورت تجمعی در سنگ افزایش پیدا کرده است که به تدریج سبب زوال و شکست سنگ در مقاومتی کمتر از مقاومت فشار تک‌محوری می‌گردد. علاوه بر این نتایج کرنش باقی مانده نشان می‌دهد که تعداد چرخه‌های انتخاب شده برای رسیدن به مراحل خستگی یک و دو به درستی انتخاب شده‌اند و آزمایش‌ها در تعداد چرخه‌های مناسب متوقف شده‌اند. میزان افزایش کرنش‌های باقی مانده در مرحله اول خستگی ۱۰/۵۲ و در مرحله دوم خستگی ۱۶/۱۳ درصد نسبت به میزان کرنش اولیه می‌باشد در حالیکه این مقدار برای نمونه‌های شکسته افزایش ۲۸/۹۷ درصد می‌باشد.



شکل ۹- منحنی کرنش باقی مانده در مراحل مختلف آزمایش خستگی گرانیت. (a) مرحله یک (b) مرحله دو.

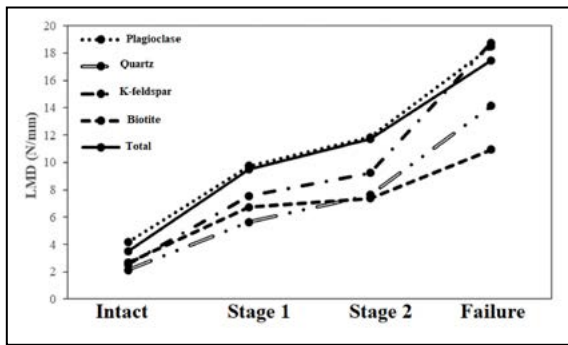
حالی که تعداد چرخه‌ها نسبت به مرحله ۱ (۹۰ چرخه) افزایش بیش از ۴ برابری را نشان می‌دهد اما کاهش خصوصیات فیزیکی نسبت به مرحله ۱ شتاب کمتری پیدا کرده است. سرعت موج P در مرحله دوم خستگی نسبت به مرحله یک در حدود ۷ درصد کاهش پیدا کرده است و به ۲۸/۱ درصد کاهش نسبت به مرحله بکر رسیده است. کاهش در سرعت موج S نیز رخ داده است و به ۱۷/۴۲ درصد کاهش نسبت به حالت بکر رسیده است.



شکل ۱۰- تغییرات مدول الاستیسیته در آزمایش خستگی گرانیت.

تغییرات در تخلخل مفید و همچنین در میزان جذب آب نیز رخ داده است و روندی مشابه با تغییرات سرعت موج را از خود نشان می‌دهد بدین گونه که در مرحله اول خستگی میزان کاهش نسبت به مرحله دوم خستگی شیب بیشتری دارد. در مرحله دوم خستگی نسبت به نمونه بکر افزایش تخلخل مفید ۸۳/۴۱ درصد و میزان جذب آب ۸۲/۱۶ درصد افزایش پیدا کرده است.

بر طبق شکل ۱۰ در نمونه شکسته شده در ابتدای بارگذاری مدول الاستیسیته شروع به افزایش می‌کند هرچند که این مقدار بسیار ناچیز است. در ادامه با افزایش تعداد چرخه‌های مدول الاستیسیته شروع به کاهش می‌کند و در مراحل آخر منتهی به شکست سنگ کاهش مدول الاستیسیته نسبت به چرخه‌های ابتدایی کاهش ۲٪ را از خود نشان می‌دهد. افزایش مدول الاستیسیته در چرخه‌های ابتدایی می‌تواند به دلیل بسته شدن حفرات و همچنین درز و ترک‌های از پیش موجود در سنگ باشد. نتایج محققین نشان داده است که تغییر در مدول الاستیسیته در شرایط آزمایش با فرکانس ثابت چندان مشخص نیست به این دلیل که در این نوع آزمایش منحنی‌های تنش کرنش به موازات هم قرار دارند. بسیاری از محققین هیچ گونه کاهش را در مدول الاستیسیته مشاهده نکرده‌اند (Royer - Carfagni and Salvatore 2000; Xiao et al., 2010; Ma et al., 2013; Wang et al., 2015 Attewell and Farmer 1973;). نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج Yang et al. (2017) مطابقت دارد که نشان داده‌اند در چرخه‌های ابتدایی مدول الاستیسیته افزایش نسبی را از خود نشان داده است. اندازه‌گیری تغییرات خصوصیات فیزیکی بر روی نمونه‌ها به منظور بررسی تأثیر بارگذاری چرخه‌ای بر روی خصوصیات فیزیکی انجام شد. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری‌های سرعت موج بر روی نمونه‌ها به دلیلی شکست نمونه‌ها صورت نگرفته است و در جدول ۳ فقط تغییرات مربوط به مراحل خستگی یک و دو نشان داده شده است. بر طبق نتایج ارائه شده در جدول ۳ با شروع بارگذاری بر روی نمونه‌ها در مرحله اول خستگی به طور متوسط سرعت موج P در حدود ۲۱/۱۸ درصد و سرعت موج S به میزان ۱۳/۹۹ درصد کاهش می‌باشد. سپس با افزایش تعداد چرخه‌ها در مرحله ۲ (۴۰۰ چرخه) در



شکل ۱۱- تغییرات چگالی خطی ترک‌های گرانیت و کانی‌های سازنده در آزمایش خستگی.

نوع ترک ایجاد نمی‌گردد. بازشدگی مرز دانه‌ها در گرانیت به دلیل وجود کانی کوآرتز می‌باشد. کوآرتز یکی از مقاوم‌ترین کانی‌های موجود در این نمونه گرانیت می‌باشد و به دلیل ویژگی‌های مقاومتی بالایی که دارد به سختی ترک می‌خورد (Kudo et al., 1992) اما به دلیل ضریب انبساط حرارتی و فشردگی بالایی که دارد (Nur and Simmons, 1970) در مرز خود با سایر کانی‌ها دارای بازشدگی یا به عبارتی ترک‌های مرزدانه‌ای می‌باشد. یافته‌های سایر محققین نیز نشان می‌دهد که در سنگ‌های غنی از کوآرتز تعداد ترک‌های مرز دانه‌ای فراوانی در نمونه‌های سالم وجود دارد (Sprunt and Brace 1974; Richter and Simmons, 1977). بنابراین با توجه به باز بودن بیشتر مرزهای دانه‌ای در گرانیت LMD این نوع ترک در بارگذاری خستگی تغییر زیادی نمی‌کند.

شیب افزایش LMD در مرحله دوم بارگذاری خستگی نسبت به مرحله اول کاهش یافته است. دلیل کند شدن آهنگ ایجاد ترک‌ها به این دلیل می‌باشد که انرژی اعمال شده در این مرحله بیشتر صرف رشد ترک‌ها از پیش موجود و ترک‌های ایجاد شده در مرحله یک می‌شود و به همین دلیل آهنگ افزایش LMD کاسته شده است. محاسبه میانگین طول ریزترک‌ها در مراحل مختل بارگذاری چرخه‌ای در جدول ۵ ارائه شده است که به خوبی نشان دهنده افزایش میانگین طول ریزترک‌ها در مرحله دوم خستگی نسبت به مرحله اول شده است.

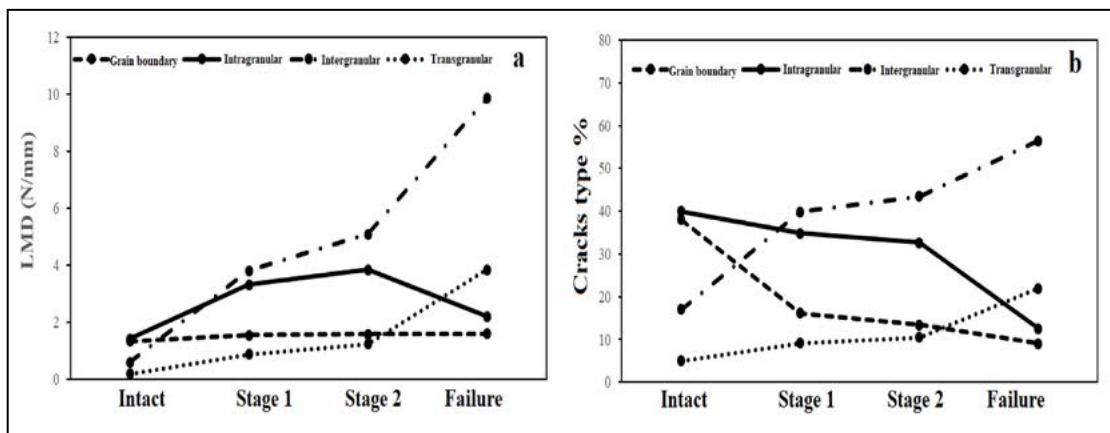
تغییرات مشاهده شده در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی به خوبی نشان می‌دهند که افزایش چرخه‌ها سبب ضعیف شدن تدریجی و همچنین افزایش تجمعی کرنش در سنگ می‌باشد که ناشی از تشکیل ترک‌های جدید و همچنین رشد ترک‌های از پیش موجود و ترک‌های جدید در سنگ می‌باشد که در نهایت با افزایش چگالی این ترک‌ها و به هم پیوستگی آن‌ها سنگ دچار گسیختگی می‌گردد. که در ادامه به بررسی تغییرات این ترک‌ها در سنگ پرداخته خواهد شد.

۲-۴. تغییر خصوصیات ریزترک‌شناسی

در آزمایش خستگی شرایط بارگذاری برای تمامی مراحل یکسان می‌باشد و فقط تعداد چرخه‌ها در مراحل مختلف خستگی یک، دو و شکست سنگ متفاوت است. بنابراین با بررسی تک‌تک مراحل تا شکست می‌توان اطلاعات مناسبی از آنچه در درون سنگ در آزمایش خستگی تا رسیدن به مرحله شکست روی می‌دهد به دست آورد. تغییرات LMD در گرانیت و کانی‌های سازنده آن تحت آزمایش خستگی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

تغییرات مشاهده شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در مرحله اول بارگذاری خستگی ریزترک‌ها با سرعت نسبتاً زیادی تشکیل می‌شوند. افزایش LMD در مرحله یک خستگی نسبت به نمونه‌های بکر ۱۷۲ درصد می‌باشد. با توجه به شکل ۱۲ عمده ترک‌های ایجاد شده در این مرحله از بارگذاری از نوع ترک‌های بین دانه‌ای می‌باشد. تغییرات LMD ترک‌ها در شکل a ۱۲ نشان می‌دهد که در این مرحله ترک‌های درون‌دانه‌ای و عبوری نیز افزایش پیدا کرده است اما به دلیل افزایش شدید در LMD ترک‌های بین دانه‌ای، در شکل b ۱۲ درصد فراوانی ترک‌های درون‌دانه‌ای کاهش یافته است. افزایش LMD ترک‌های بین دانه‌ای و درون‌دانه‌ای و ثابت ماندن LMD ترک‌های مرزدانه‌ای سبب کاهش شدید درصد ترک‌های مرزدانه‌ای که ترک‌های با طول زیاد می‌باشند، می‌شود به همین دلیل در این مرحله با توجه به جدول ۵ میانگین طول ترک‌های موجود در سنگ گرانیت کاهش می‌یابد.

تغییرات نوع ترک‌ها در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که تغییرات زیادی در LMD ترک‌های مرزدانه‌ای از مرحله بکر تا مرحله شکست ایجاد نمی‌شود. این مسئله نشان‌دهنده این است که در گرانیت در حالت بکر تقریباً تمامی مرزهای دانه‌ها در حالت باز شده قرار دارند و در مرحله اول خستگی، باقی مانده این مرزها نیز باز شده‌اند و به همین دلیل تا مرحله شکست تغییرات زیادی در LMD این

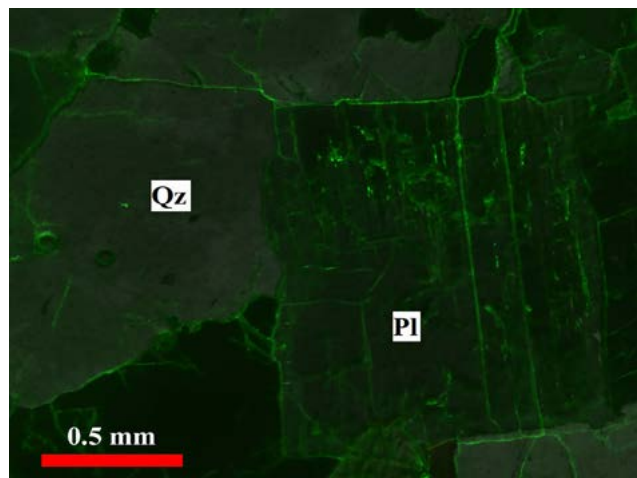


شکل ۱۲- تغییرات نوع ترک‌های گرانیت در بارگذاری خستگی (a) LMD؛ (b) درصد فراوانی ترک‌ها.

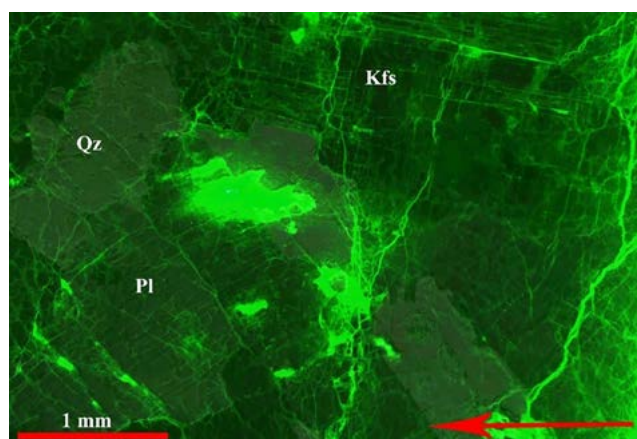
جدول ۵ - تغییرات میانگین طول ترک‌ها در بارگذاری خستگی گرانیت.

Stage	Intact	Stage 1	Stage 2	Failure
Mean length of the cracks (MM)	0.501	0.385	0.455	0.237

از خود نشان می دهند. وضعیت ترک خوردگی در فلدسپارها در مرحله شکست در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۴- ترک های از پیش موجود در کانی پلاژیوکلاز و کوارتز که به موازات سطوح رخ در این کانی می باشند.



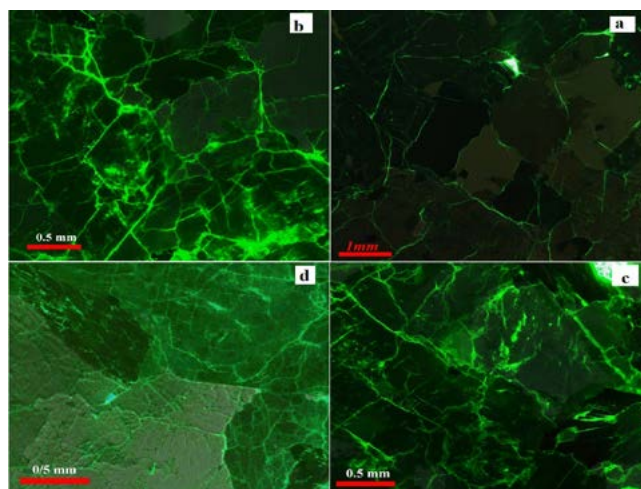
شکل ۱۵- وضعیت ترک خوردگی گرانیت در بارگذاری چرخه ای. جهت فلش دور شدن از شکستگی های اصلی را نشان می دهد.

– **کوارتز:** کوارتز یکی از مقاوم ترین کانی های موجود در این نمونه گرانیت می باشد و به دلیل ویژگی های مقاومتی بالایی که دارد به سختی ترک می خورد (Kudo et al., 1992). به همین دلیل در حالت بکر با توجه به شکل ۱۱ کمترین LMD را از خود نشان می دهد. بر خلاف فلدسپارها، کوارتز فاقد رخ می باشد و از طرفی به علت اینکه جزو آخرین کانی هایی می باشد که متبلور می شود دارای حفرات یا حباب های گاز و سیالات در ساختار خود می باشد که می توانند به عنوان منبع اولیه برای تشکیل ریزترک در این کانی باشد (Sprunt and Brace, 1974). به همین دلیل در این کانی ترک های ایجاد شده جهت یابی خاصی را نشان نمی دهند و معمولاً دارای جهت یابی تصادفی می باشند که به خوبی در شکل های ۱۴ و ۱۵ قابل مشاهده می باشند.

با شروع بارگذاری در مرحله اول خستگی این کانی با ۷/۶۲ ترک در میلی متر همانند مرحله بکر کمترین چگالی خطی را از خود نشان می دهد. اما با افزایش تعداد چرخه ها در مرحله دوم و سوم LMD این کانی از بیوتیت نیز بیشتر شده است و در مرحله شکست LMD این کانی به ۱۴/۱۲ ترک در میلی متر می رسد.

– **بیوتیت:** بررسی رفتار بیوتیت نشان داده است که این کانی حتی در مقادیر کم نقش بسیار مهمی در فرایند ایجاد و انتشار ترک در گرانیت ایفا می کند (Ghasemi et al., 2019). مشاهدات میکروسکوپی مقاطع فلورسانس در

در مرحله سوم خستگی مجدداً شیب افزایش LMD در کل سنگ افزایش پیدا می کند و سبب می گردد LMD سنگ به ۱۷/۴۴ ترک در میلی متر برسد که نسبت به نمونه بارگذاری نشده افزایش ۴/۹۸ برابری را دارد. تغییرات نوع ترک ها در مرحله شکست (شکل ۱۲ b) نشان می دهد که بیش ترین فراوانی متعلق به ترک های بین دانه ای می باشد که بیش از ۵۶ درصد مجموع کل ترک ها را شامل می شود و نسبت به نمونه های بکر افزایش ۱۶/۵۶ برابری را نشان می دهد. تکرار چرخه ها در این مرحله سبب می شود نمونه ها در مرحله سوم خستگی تغییرات کرنش دائمی زیادی را نشان دهند، که ناشی از رشد و به هم پیوستگی ترک ها و ایجاد ترک های بین دانه ای و عبوری جدید است. در این مرحله ترک های عبوری با شدت بیشتری ایجاد می گردند که سبب اعمال تغییر شکل و همچنین آسیب های جبران ناپذیری در سنگ می شود که در نهایت باعث شکست سنگ می گردند. افزایش ۳/۱۳ برابری ترک های عبوری در نمونه های شکسته شده نسبت به مرحله دوم خستگی سبب می شود که این نوع ترک، فراوانی بیشتری از ترک های مرزدانه ای و درون دانه ای داشته باشد و به دومین ترک فراوان در نمونه های شکسته شده در آزمایش خستگی تبدیل شود. اندازه گیری میانگین طول ترک ها در مرحله شکست نشان می دهد که در مرحله شکست میانگین طول ترک ها نسبت به مرحله ۲ کاهش یافته است. دلیل کاهش طول ترک ها با وجود افزایش LMD ترک های بین دانه ای و عبوری، تشکیل ساختارهای پیچیده و در هم تنیده ای از ترک های متصل به هم اما با طول کم می باشد که به خوبی در شکل ۱۳ d نشان داده شده است. در شکل ۱۳ مراحل تغییرات ترک ها از نمونه بکر تا مرحله شکست در سنگ گرانیت در مقطع فلورسانس نشان داده شده است.



شکل ۱۳- وضعیت ترک خوردگی گرانیت از مرحله بکر تا مرحله شکست؛ (a) بکر، (b) مرحله یک، (c) مرحله دو، (d) مرحله شکست.

۳-۴. تأثیر کانی شناسی بر ترک خوردگی گرانیت

– **فلدسپار:** فلدسپارها کانی هایی می باشند که در ساختار خود دارای سطوحضعفی مانند سطوح رخ می باشند (MacKenzie and Guilford, 2014) به همین دلیل ترک ها می تواند به راحتی در درون این سطوح رخ ایجاد گردند. پلاژیوکلاز در حالت بکر بیشترین LMD را در بین سایر کانی ها از خود نشان می دهد (شکل ۱۱). مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک در زیر نور فلورسانس نیز نشان می دهد که در حالت بکر ترک های ایجاد شده در این کانی به موازات سطوح رخ می باشند (شکل ۱۴). با بارگذاری نمونه ها، ریزترک های جدید در فلدسپار پتاسیم و پلاژیوکلاز با شیب بیشتری از سایر کانی ها شروع به شکل گیری در سنگ می کند و سپس در مرحله دوم از شدت افزایش آن کاسته شده است. در مرحله شکست مجدداً شیب ایجاد ترک ها افزایش پیدا می کند و در نهایت فلدسپار پتاسیم با ۱۸/۷۵ و پلاژیوکلاز با ۱۸/۴۶ ترک در میلی متر فراوانترین ریزترک ها در این سنگ گرانیت

در چرخه‌های بالا بیشتر صرف تغییر شکل بیوتیت می‌گردد تا اینکه سبب ایجاد ترک‌های جدید در این کانی گردد. با این وجود به علت سطح بالای کرنش ایجاد شده در سنگ LMD بیوتیت در مرحله شکست نسبت به نمونه‌های بکر افزایش بیش از ۳ برابری را از خود نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

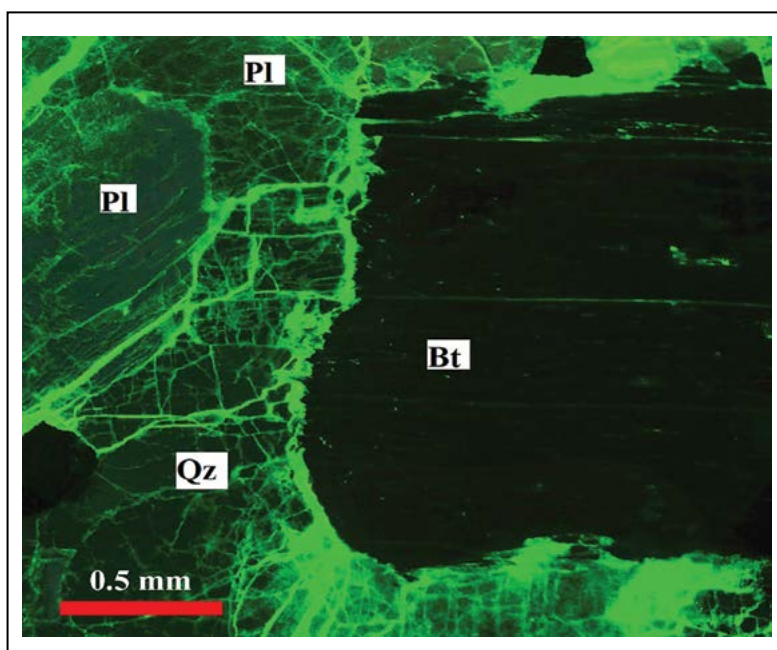
در این پژوهش به بررسی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و ترک‌های ایجاد شده سنگ گرانیت در مراحل مختلف بارگذاری خستگی پرداخته شده است و نتایج حاصل از یافته‌های این تحقیق نشان داده است که: خصوصیات فیزیکی این سنگ با افزایش تعداد چرخه‌ها کاهش پیدا کرده است و این کاهش همانند رفتار خستگی رفتار سه مرحله‌ای را از خود نشان می‌دهد. به گونه‌ای که در مرحله اول شیب این تغییرات زیاد است و در مرحله دوم شیب آن کاسته شده است و مجدداً در مرحله انتهایی شیب تغییرات افزایش پیدا می‌کند.

بررسی LMD ترک‌های ایجاد شده در کل سنگ و کانی‌های سازنده آن نشان داده است که در مرحله اول خستگی ترک‌های جدیدی در درون سنگ ایجاد می‌گردند که در فلدسپارها و بیوتیت به موازات سطوح رخ و در کوارتز دارای جهت یابی تصادفی می‌باشند. شیب ایجاد ترک‌ها در مرحله اول بیش از مرحله دوم و در مرحله سوم مجدداً افزایش پیدا می‌کند که روندی مشابه با رفتار خستگی سنگ می‌باشد.

در میان کانی‌های سازنده گرانیت مورد نظر فلدسپارها بیشترین LMD را از خود نشان می‌دهند و با توجه به اینکه این کانی بیشترین درصد فراوانی را در کانی‌های سازنده این سنگ دارد نقش مهمی را در رفتار مکانیکی و شکست سنگ ایفا می‌کند. بیوتیت به دلیل تغییر شکل پذیری بالایی که دارد در ابتدای بارگذاری LMD آن به شدت افزایش پیدا می‌کند اما در نهایت در مرحله شکست کمترین میزان LMD را نشان می‌دهد که نشان می‌دهد انرژی بیشتر صرف تغییر شکل پلاستیک در این کانی می‌شود تا اینکه صرف ایجاد ترک‌های جدید گردد. همین عامل سبب می‌گردد که در کانی‌های مجاور با بیوتیت نقاطی با LMD بالا نسبت به سایر مناطق ایجاد گردد.

بارگذاری خستگی وجود ریزترک‌های به موازات جهت رخ [۰۰۱] را نشان داده‌اند. وجود ریزترک‌های به موازات جهت رخ در بیوتیت معمول می‌باشد (Gottschalk et al., 1990). در گرانیت وجود کرنش برشی و زون‌های برشی شکل‌پذیر به طور مؤثری در ارتباط با حضور بیوتیت در این سنگ می‌باشد (White et al., 1980). به‌طور کلی سطوح ضعف موجود در هر کانی مناطقی با سطح انرژی پایین، تراکم پیوند کم و مقاومت پایین‌تر نسبت به سایر نقاط کانی می‌باشند. بر این اساس در اثر بارگذاری، تنش‌های برشی در صفحات رخ ایجاد می‌شوند که سبب ایجاد لغزش در صفحات رخ می‌شود و در نتیجه ریزترک‌ها شروع به شکل‌گیری می‌کنند (Seo et al., 2002; Lee et al., 2006). با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در مرحله یک خستگی ترک‌های جدیدی در بیوتیت شروع به شکل‌گیری می‌کنند. این کانی در مرحله اول خستگی به شدت تحت تأثیر قرار گرفته است LMD ترک‌های موجود در آن با افزایش ۲۲۸٪ به ۸/۷۳ ترک در میلی‌متر می‌رسد. در مرحله ۲ همانند سایر کانی‌ها از شیب افزایش LMD کاسته شده است و نسبت به سایر کانی‌ها LMD کمتری را نشان می‌دهد. در مرحله شکست با وجود افزایش مجدد شیب ایجاد ترک‌ها، این کانی با LMD برابر با ۱۰/۹۲ همچنان کمتری میزان ترک خوردگی را از خود نشان می‌دهد.

کم بودن LMD این کانی نسبت به سایر کانی‌ها را می‌توان به دلیل خصوصیات تغییر شکل‌پذیری این کانی تحت بارگذاری توضیح داد. مشاهدات میکروسکوپی در مرز بیوتیت با سایر کانی‌ها (شکل ۱۶) محلی را با تمرکز بالای مواد فلورسانس نشان می‌دهد. بیوتیت نسبت به سایر کانی‌های به دلیل تغییر شکل‌پذیری بیشتر، متحمل تغییر شکل‌های دائمی می‌شود. از طرف دیگر به دلیل عدم تطابق مدول الاستیسیته با کانی‌های مجاور در مرز بیوتیت با این کانی‌های ریزترک‌هایی ایجاد می‌گردد (Lee et al., 2006) که به دلیل تمرکز تنش در مرز این کانی با سایر کانی‌ها می‌باشد. بر اساس دلایل ذکر شده در مرز بیوتیت بخصوص در گوشه‌ها نقاطی با بازشدگی و همچنین LMD بالا ایجاد می‌شود که به‌وسیله مواد فلورسانس پر می‌شود و سبب درخشندگی بیشتر این نقاط نسبت به سایر نقاط می‌شود. وجود این تغییر شکل‌ها خود می‌تواند دلیلی بر کم بودن LMD در این کانی باشد چرا که انرژی ذخیره شده



شکل ۱۶- وضعیت ترک خوردگی در بیوتیت و کانی اطراف آن در بارگذاری خستگی.

References

- Akesson, U., Hansson, J. and Stigh, J., 2004- Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading." *Engineering Geology* 72(1-2): 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.07.001>.
- Attewell, P. and Farmer, I., 1973- Fatigue behaviour of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Elsevier. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(73\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(73)90055-7).
- Bagde, M. N. and Petroš, V., 2005- Waveform effect on fatigue properties of intact sandstone in uniaxial cyclical loading. *Rock mechanics and rock engineering* 3 169-196. <https://doi.org/10.1007/s00603-005-0045-8>.
- Brantut, N., Heap, M., Meredith, P. and Baud, P., 2013-Time-dependent cracking and brittle creep in crustal rocks: A review. *Journal of Structural Geology* 52: 17-43. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.03.007>.
- Cerfontaine, B. and Collin, F., 2018- Cyclic and fatigue behaviour of rock materials: review, interpretation and research perspectives. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 51(2): 391-414. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1337-5>.
- Chen, Y., Watanabe, K., Kusuda, H., Kusaka, E. and Mabuchi, M., 2011- Crack growth in Westerly granite during a cyclic loading test. *Engineering Geology* 117(3-4): 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.017>.
- Gatelier, N., Pellet, F. and Loret, B., 2002- Mechanical damage of an anisotropic porous rock in cyclic triaxial tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39(3): 335-354. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00029-](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00029-).
- Ghasemi, S., Khamchayan, M., Taheri, A., Nikudel, M. R. and Zalooli, A., 2019- Crack Evolution in Damage Stress Thresholds in Different Minerals of Granite Rock." *Rock Mechanics and Rock Engineering*: 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01964-9>.
- Gottschalk, R. R., Kronenberg, A. K., Russell, J. E. and Handin, J., 1990- Mechanical anisotropy of gneiss: failure criterion and textural sources of directional behavior." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 95(B13): 21613-21634. <https://doi.org/10.1029/JB095iB13p21613>.
- Guo, Y., Yang, C. and Mao, H., 2012- Mechanical properties of Jintan mine rock salt under complex stress paths. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*(56): 54-61. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.ijrmms.2012.07.025>.
- Hashash, Y. M., Hook, J. J., Schmidt, B., John, I. and Yao, C., 2001-Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and underground space technology* 16(4): 247-293. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(01\)00051-](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00051-).
- Heimisson, E. R., Einarsson, P., Sigmundsson, F. and Brandsdóttir, B., 2015- Kilometer scale Kaiser effect identified in Krafla volcano, Iceland. *Geophysical Research Letters* 42(19): 7958-7965. <https://doi.org/10.1002/2015GL065680>.
- Kendrick, J. E., Smith, R., Sammonds, P., Meredith, P. G., Dainty M. and Pallister, J. S., 2013-The influence of thermal and cyclic stressing on the strength of rocks from Mount St. Helens, Washington. *Bulletin of volcanology* 75(7): 728. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0728-z>.
- Kranz, R. L., 1979- Crack growth and development during creep of Barre granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Elsevier. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)90772](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)90772).
- Kudo, Y., Sano, O., Murashige, N., Mizuta, Y. and Nakagawa, K., 1992-Stress-induced crack path in Aji granite under tensile stress. *pure and applied geophysics* 138(4): 641-656. <https://doi.org/10.1007/BF00876342>.
- Le, J.-L., Manning, J. and Labuz, J. F., 2014- Scaling of fatigue crack growth in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 72: 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.08.015>.
- Lee, S.-E., Kim, M.-I., Park, J.-H., Park, C.-K., Kang, M. and Jeong, G.-C., 2006- Damage process of intact granite under uniaxial compression: microscopic observations and contact stress analysis of grains." *Geosciences Journal* 10(4): 457-463 <https://doi.org/10.1007/BF02910439>.
- Liu, E. and He, S., 2012- Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions. *Engineering Geology* 125: 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.11.007>.
- Liu, Q., Huang, S., Kang, Y. and Liu, X., 2015- A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze-thaw. *Cold Regions Science and Technology* 120: 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.013>.
- Ma, L.-j., Liu, X.-y., Wang, M.-y., Xu, H.-f., Hua, R.-p., Fan, P.-x., Jiang, S.-r., Wang G.-a. and Yi, Q.-k., 2013-Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*(62): 34-41. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.ijrmms.2013.04.003>.
- MacKenzie, W. S. and Guilford, C., 2014- Atlas of the Rock-Forming Minerals in Thin Section, Routledge.
- Martin, C. D., 1993- The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings.
- Masoudi, F. and Yardley, B., 2005- Magmatic and metamorphic fluids in pegmatite development: Evidence from Borujerd Complex, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 16(1): 43-53.
- Nur, A. and Simmons, G., 1970- The origin of small cracks in igneous rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Elsevier. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90044-](https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90044-).

- Richter, D. and Simmons, G., 1977- Microcracks in crustal igneous rocks: microscopy. The Earth's crust, AGU Washington, DC. 20: 149-180.
- Royer- Carfagni, G. and Salvatore, W., 2000- The characterization of marble by cyclic compression loading: experimental results." *Mechanics of Cohesive- frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures* 5(7): 535-563. [https://doi.org/10.1002/1099-1484\(200010\)5:7%3C535::AID-CFM102%3E3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1099-1484(200010)5:7%3C535::AID-CFM102%3E3.0.CO;2-D).
- Seo, Y., Jeong, G., Kim, J. and Ichikawa, Y., 2002- Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression." *Engineering Geology* 63(3-4): 259-275. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00086](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00086).
- Sepahi, A. A. and Athari, S. F., 2006- Petrology of major granitic plutons of the northwestern part of the Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt, Zagros Orogen, Iran: with emphasis on A-type granitoids from the SE Saqqez area." *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry* 183(1): 93-106. <https://doi.org/10.1127/0077-7757/2006/0063>.
- Sorgi, C., De Gennaro, V. and Chen, D., 2011- Water-rock interaction mechanisms and ageing processes in chalk, INTECH Open Access Publisher.
- Sousa, L. M., del Rio, L. M. S., Calleja, L., de Argandona, V. G. R. and Rey, A. R., 2005- Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites." *Engineering Geology* 77(1-2): 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.001>.
- Sprunt, E. S. and Brace, W., 1974- Direct observation of microcavities in crystalline rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Elsevier. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)92874-](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)92874-).
- Taheri, A., Yfantidis, N., Olivares, C., Connelly, B. and Bastian, T., 2016- Experimental study on degradation of mechanical properties of sandstone under different cyclic loadings." *Geotechnical Testing Journal* 39(4): 673-687. <https://doi.org/10.1520/GTJ20150231>.
- Voznesenskii, A. S., Krasilov, M. N., Kutkin, Y. O., Tavostin, M. N. and Osipov, Y. V., 2017- Features of interrelations between acoustic quality factor and strength of rock salt during fatigue cyclic loadings." *International Journal of Fatigue* 97: 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.12.027>.
- Wang, Z., Li, S., Qiao, L. and Zhang, Q., 2015- Finite element analysis of the hydro-mechanical behavior of an underground crude oil storage facility in granite subject to cyclic loading during operation." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 73: 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.09.018>.
- White, S., Burrows, S., Carreras, J., Shaw, N. and Humphreys, F., 1980- On mylonites in ductile shear zones." *Journal of Structural Geology* 2(1-2): 175-187. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(80\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(80)90048-6).
- Xiao, J.-Q., Ding, D.-X., Jiang, F.-L. and Xu, G., 2010- Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 3(47): 461-468. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.ijrmms.2009.11.003>.
- Yang, S.-Q., Tian, W.-L. and Ranjith, P., 2017- Experimental investigation on deformation failure characteristics of crystalline marble under triaxial cyclic loading." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 50(11): 2871-2889. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1262-7>.

Investigating physical, mechanical and crack properties of granite in the fatigue process

Sh. Ghasemi¹, M. Khamsehchiyan^{2*}, M. R. Nikudel³ and A. Zalooli¹

¹Ph. D., Department of Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2020 March 11

Accepted: 2020 August 31

Abstract

Joints and cracks are an integral part of rock structures. When load applied to these structures, growth, and interaction of the cracks lead them to failure. This aspect is particularly crucial in cyclic loading because failure occurs at stress levels lower than the yield point due to the fatigue process. This research aims to study the growth and interaction of the cracks in the fatigue process by the fluorescence thin section method. At first, different stages of fatigue for granite rock were determined, then samples loaded up to each stage. Later, the physical, mechanical, and crack properties of the samples were investigated. The results show that physical and mechanical properties declined by increasing the number of cycles. During the first stage of fatigue, crack initiated at a high rate, and in the second stage, the increasing rate descended, and energy mostly consumed to increase the length of the cracks. In the last staged, which is the failure stage, the rate of crack initiation increases again and forms a complicated network of cracks, which leads the sample to failure. Among the constituent minerals, feldspar exhibits the highest crack density, and biotite shows the lowest density of the cracks.

Keywords: Crack, Fatigue, Cyclic loading, Granite.

For Persian Version see pages 1 to 10

*Corresponding author: M. Khamsehchiyan; E-mail: khamechm@modares.ac.ir