

بررسی خستگی سنگ بکر بلوری تحت بارگذاری کاملاً معکوس شونده

سعید جمالی زواره^{۱*}، حمید هاشم‌الحسینی^۲، علیرضا باغبانان^۳، محسن خوشکام^۴، هادی حقگویی^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

(دریافت: اسفند ۱۳۹۴، پذیرش: تیر ۱۳۹۶)

چکیده

در طی پدیده خستگی جسم به علت تجمع آسیب و گسترش ترک ناشی از تکرار روند بارگذاری، در تنشی کمتر از مقاومت استاتیکی خود به صورت ناگهانی و ترد می‌شکند. سازندها و سازه‌های سنگی از جمله گسل‌ها، درزه‌ها، صفحات لایه‌بندی، مخازن زیرزمینی، دیواره تونل‌ها، دیواره حائل پل‌ها، پی راه‌ها و سدها و ... می‌توانند تحت تأثیر بارهای دینامیکی ناشی از زمین‌لرزه‌های بزرگ، انفجار سنگ، آتشباری، حفاری، ترافیک قرار گیرند. در این کار تحقیقاتی رفتار سنگ‌ها تحت تأثیر بارگذاری کاملاً معکوس شونده (کشش - فشار) و به کمک دستگاه آزمایش خستگی ساخته شده بر اساس آزمایش رایج خستگی فولاد بررسی شده است. از دو نمونه سنگ بلوری گابروی نطنز و مرمر سبز با ترکیب کانی‌شناسی و منشأ ساخت متفاوت جهت بررسی پدیده خستگی با این روش استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در نمودار $S-N$ برای هر دو نوع سنگ با کاهش مقدار تنش اعمالی به نمونه، تعداد دوره تحمل شده به صورت لگاریتمی افزایش پیدا می‌کند و نمودار هر دو سنگ از رابطه وهلر پیروی می‌کنند. همچنین امکان ارزیابی حد دوام به کمک این نوع آزمایش وجود دارد، درحالی‌که در تحقیقات قبلی این امکان وجود نداشته است. نتایج نشان می‌دهد که حد دوام برای گابروی نطنز در حدود ۱۴/۷ مگا پاسکال (۵۳٪ مقاومت کششی در حالت استاتیکی) و برای مرمر سبز حدود ۱۰/۸ مگا پاسکال (۶۰٪ مقاومت کششی در حالت استاتیکی) است. مقایسه نتایج حاصل شده با نتایج سایر مصالح تأیید می‌کند که دستگاه ساخته شده و روش مورداستفاده در این تحقیق برای برآورد خستگی در سنگ‌های بلوری مناسب است.

کلید واژه‌ها

خستگی سنگ، سنگ بکر دانه‌ای، روش تنش - عمر، بارگذاری کاملاً معکوس شونده، حد دوام

* عهده دار مکاتبات: s.jamali@mi.iut.ac.ir

۱- مقدمه

بسیاری از پارامترهای مقاومتی سنگ از جمله مقاومت فشاری [۱، ۴-۲۲]، مقاومت برشی [۲۳، ۲۴]، نیروی لازم برای گسترش ترک [۲۵-۲۷]، مقاومت کششی [۲۷-۲۹] و حتی تغییر مقدار مدول الاستیک [۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۶، ۳۰] شده است. به علاوه مشاهده شده است که هم در دید ماکروسکوپی و هم میکروسکوپی، نحوه شکست در حالت بارگذاری متناوب به وضوح با حالت استاتیکی تفاوت دارد [۹، ۱۳-۱۵، ۲۰، ۲۲، ۲۵، ۲۶، ۳۱].

گروهی از محققین نیز تأثیر بعضی از عوامل فیزیکی و مکانیکی سنگ و شرایط بارگذاری بر عمر خستگی را بررسی کرده‌اند. برای نمونه محققین مشاهده نمودند با کاهش ابعاد دانه‌های سنگ مقاومت خستگی آن افزایش [۸، ۱۷، ۱۸] و با افزایش دانسیته ترک، مقاومت خستگی آن کاهش [۱۲، ۳۲] می‌یابد. همچنین فشار آب منفذی اثر منفی [۸، ۱۰، ۳۳] و فشار جانبی اثر مثبت [۸، ۱۳، ۳۴] بر مقاومت خستگی سنگ دارد. برخی از محققین معتقدند که افزایش فرکانس باعث افزایش مقاومت خستگی می‌شود [۷، ۱۰، ۱۲، ۱۷، ۱۸، ۲۴، ۳۴-۳۶] برخی نیز اثر فرکانس را ناچیز می‌دانند [۸، ۱۳، ۱۵، ۳۰]. در حوزه مکانیک سنگ هنوز تحلیل عددی در رابطه با مدل‌سازی پدیده خستگی صورت نگرفته است. تحلیل‌های عددی در سایر مصالح نیز بر پایه و اساس نتایج کارهای آزمایشگاهی استوار است و نمودار تنش عمر (و یا کرنش عمر) یک ورودی برای تحلیل‌های عددی خستگی است.

از آنجایی که تاکنون روش استاندارد برای بررسی خستگی در سنگ ارائه نشده است، در تحقیقات قبلی برای بررسی خستگی سنگ عموماً از همان روش‌های استاتیکی موجود استفاده شده و تنها بار استاتیکی با یک بار متناوب جایگزین شده است. در اکثر این تحقیقات، مقاومت خستگی در محدوده فشاری و به کمک دستگاه آزمایشگاه خودکنترل^۱ بررسی شده است و نتایج به دست آمده در محدوده فشاری اعتبار دارد. اما تجربیات به دست آمده از خستگی بر روی دیگر مواد مانند فلزات نشان می‌دهند که عموماً پدیده خستگی با گسترش ترک مرتبط است که در حالت کشش بیشتر مؤثر بوده و هر عاملی که تنش کششی در نمونه را کاهش دهد باعث افزایش عمر خستگی می‌شود [۳۷]. به عبارت دیگر اگرچه در عمل ممکن است تحت بارگذاری فشاری شکست خستگی رخ دهد ولی

در طراحی‌های اخیر مهندسی سنگ، بیشتر توجه به رفتار سنگ تحت بارگذاری دینامیکی، بارگذاری خستگی (بارگذاری متناوب) و همچنین رفتار سنگ بعد از مرحله شکست متمرکز شده است. بررسی رفتار سنگ‌ها تحت بارگذاری دینامیکی از زمانی که تأثیر مشخص این بارها بر روی خصوصیات سنگ به اثبات رسید، شدت گرفته است. می‌دانیم مواد مختلف تحت تأثیر بارهای دینامیکی رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. بعضی از آن‌ها تحت چنین شرایطی مقاوم‌تر و شکل‌پذیرتر شده و برخی ضعیف‌تر و شکننده‌تر می‌شوند [۱]. خستگی پدیده‌ای است که جسم در تنشی کمتر از مقاومت استاتیکی خود در اثر تجمع آسیب ناشی از تکرار روند بارگذاری، بدون علامت و ناگهانی می‌شکند. برای ایجاد شکست خستگی سه عامل نیاز است: الف) تنش کششی حداکثری به مقدار بسیار زیاد (ب) تغییرات کافی در مقدار تنش و ج) زیاد بودن تعداد چرخه‌های تنش وارد [۲]. تجربیات گذشته نشان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد از مجموع شکست‌های مکانیکی که در قطعات صنعتی اتفاق می‌افتد ناشی از اثر خستگی است [۳]. سازندهای سنگی و سازه‌های سنگی از جمله گسل‌ها، درزه‌ها، صفحات لایه‌بندی، مخازن زیرزمینی، دیواره تونل‌ها، دیواره حائل پل‌ها، پی راه‌ها و سدها و ... می‌توانند تحت تأثیر بارهای دینامیکی و استاتیکی قرار دارند. بارهای دینامیکی به‌طور متناوب در اثر زمین‌لرزه‌های بزرگ، انفجار سنگ، آتشفباری، حفاری، ترافیک ایجاد می‌شوند [۱، ۴-۶]. اگرچه بررسی‌های زیادی در مورد شکست سازه‌های سنگی تحت بارگذاری متناوب صورت نگرفته است ولی بدون شک در سازه‌های سنگی نیز به علت وجود شکستگی‌های و ترک‌های بسیار زیاد و همچنین تأثیر طیف وسیعی از انواع بارگذاری‌های دینامیکی بر سازه‌های سنگی مطالعه شکست خستگی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

تحقیقات قبلی مربوط به خستگی سنگ را می‌توان در دو زمینه کلی تقسیم کرد. گروهی از محققین با جایگزینی بارگذاری متناوب به جای بارگذاری معمول استاتیکی در آزمایش‌های مرسوم به مقایسه نتایج حاصل از این تغییر در رفتار و خصوصیات سنگ پرداخته‌اند. در طی این تحقیقات مشاهده شده است که بارگذاری متناوب باعث کاهش

عامل اصلی که منجر به رخداد خستگی می‌شود تنش‌های کششی پسماند و یا غیرمستقیم ایجاد شده در نمونه است [۳]. به‌علاوه آنچه در حوزه مکانیک سنگ کمتر مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از تجربیات محققین در سایر رشته‌ها و به‌کارگیری روش‌های استاندارد بررسی خستگی برای بررسی این پدیده در سنگ است. به بیانی علی‌رغم وجود پیشرفت‌ها و تجربیات غنی در خستگی فلزات، هنوز مطالعات دقیق و گسترده‌ای برای ارتقاء سطح علمی و ارائه استاندارد برای بررسی این پدیده در سنگ انجام نگرفته است.

۱-۱- روش تنش-عمر

گسیختگی خستگی یک پدیده تجمعی است که با تغییر شکل پلاستیک در اطراف نقص‌های ماکروسکوپی معین با تمرکز تنش محلی بالا شروع می‌شود، درحالی‌که تنش کل می‌تواند پایین‌تر از مقاومت جسم باشد. اثر این تغییر شکل پلاستیک برای یک چرخه بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است اما بعد از تعداد چرخه معین، با توجه به سطح تنش، ترک‌های جدید تشکیل شده در این ناحیه پلاستیک گسترش یافته و به حدی می‌رسند که با چشم غیرمسلح قابل مشاهده بوده و منجر به شکست نمونه می‌گردند. برای بررسی و تحلیل شکست خستگی در طراحی‌های مهندسی سه روش کلی ارائه شده است: روش تنش-عمر، روش کرنش-عمر و روش مکانیک شکست. روش تنش-عمر رایج‌ترین و راحت‌ترین روشی است که برای طراحی خستگی سازه‌ها و قطعات مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. از این روش تحت عناوین روش کلاسیک تحلیل خستگی، روش خستگی با چرخه زیاد^۲ (HCF) و روش تنش کنترل‌شده^۳ نیز یاد می‌شود [۲، ۳، ۳۸، ۳۹].

وهلر^۴ طی سال‌های ۱۸۵۰ تا ۱۸۶۰ میلادی در آلمان اولین بار آزمایش خستگی را به‌صورت منظم و اصولی روی ریل‌های راه‌آهن انجام داد و به‌عنوان پدر آزمایش سیستماتیک خستگی شناخته می‌شود. او پایه‌گذار روش تنش-عمر است. در این روش، نمودار تنش-عمر نمونه ($S-N$)، که حاصل انجام آزمایش‌های متعدد بر روی قطعه مورد بررسی است، رفتار خستگی قطعه مورد آزمایش را نشان می‌دهد [۳]. نمودار $S-N$ تعداد چرخه قابل تحمل نمونه را

$$S_a = \alpha - \beta \log N \quad (1)$$

که در این رابطه، پارامترهای α و β مقادیر ثابت، S_a دامنه تنش و N تعداد دوره بارگذاری تا لحظه شکست است. در نمودار $S-N$ و رابطه وهلر با تقسیم مقادیر تنش بر مقدار مقاومت حداکثر نمونه در حالت استاتیکی صورت نرمال شده تنش به دست می‌آید که برای مقایسه نتایج مواد مختلف مفید است. همان‌طور که در رابطه وهلر نیز مشخص است، مقادیر بزرگ‌تر β نمایانگر این است که با افزایش تعداد چرخه‌ها، مقاومت خستگی سریع‌تر کاهش پیدا می‌کند، به‌عبارت‌دیگر هر چه مقدار β کمتر باشد، ماده موردنظر مقاومت بیشتری در برابر خستگی از خود نشان می‌دهد [۳۹].

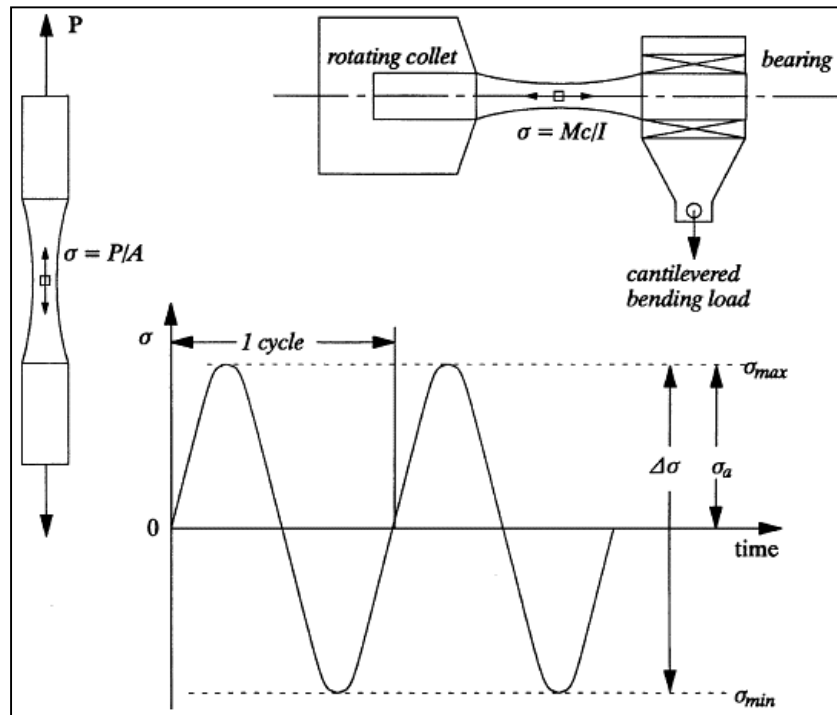
در این تحقیق به‌منظور به‌کارگیری تجربیات محققین مکانیک و بررسی امکان استفاده از روش تنش-عمر و آزمایش تیر چرخان در سنگ‌ها برنامه آزمایش طراحی شده و سپس نتایج آزمایش بر روی دو نوع سنگ بلوری با ترکیب کانی‌شناسی و شرایط تشکیل مختلف، گردآوری و تحلیل شده است.

۲- طرح آزمایش

به‌منظور انجام آزمایش تعیین مقاومت خستگی، نمونه‌های سنگی موردنظر تحت دامنه مشخصی از فشار متناوب قرار گرفته و تا رسیدن نمونه به مقاومت نهایی خود تعداد دوره‌ها اندازه‌گیری می‌شود. ساختارهای سنگی علاوه بر فشار تحت کشش نیز قرار می‌گیرند و مقاومت کششی سنگ‌ها به‌مراتب از مقاومت فشاری آن‌ها کمتر است. در نتیجه جهت بررسی مقاومت خستگی سنگ بهتر است از بارگذاری متناوبی که هم تحت فشار باشد و هم تحت کشش استفاده شود. برای این منظور از آزمایش تعیین مقاومت خستگی تحت خمش خالص و چرخش که در مورد

نهایی خود برسد. بار اعمالی بر روی نمونه‌ها به صورت بارگذاری متناوب تکراری خواهد بود که می‌توان دامنه و فرکانس آن را تغییر داد. در نهایت به کمک اطلاعات به دست آمده می‌توان نمودار خستگی سنگ مورد نظر را به دست آورد.

مصالح فلزی به کار می‌رود، استفاده شده است. شمای کلی از چگونگی این آزمایش در شکل (۱) آورده شده است. همان طوری که در شکل (۱) مشخص است نمونه مورد نظر تحت بار خمشی و به همراه آن چرخش قرار گرفته و به واسطه آن نمونه به صورت متناوب تحت کشش و فشار قرار می‌گیرد تا اینکه در تعداد دوره مشخصی به مقاومت



شکل ۱: شمای کلی از آزمایش خستگی سنگ تحت خمش خالص و چرخش [۲]

تحقیق کمی دچار آلتراسیون شده و همین عامل می‌تواند سبب کاهش مقاومت گابرو شده باشد.

از آنجایی که برای انجام آزمایش خستگی در سنگ استاندارد ا ارائه نشده است و روش و دستگاه استفاده شده در این تحقیق از روش و دستگاه رایج در آزمایش خستگی فلزات الهام گرفته شده است؛ از این رو ابعاد نمونه‌های سنگی استفاده شده در این تحقیق نیز با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به ساختارهای سنگی و نیز ظرفیت دستگاه و نسبت طول به قطر در نمونه‌های استاندارد فلزات تعیین شده است. نسبت طول به قطر در نمونه‌های دستگاه تیر چرخان تحت خمش عموماً بین ۹ تا ۱۱ است [۲، ۳، ۴۰، ۴۱] که این نسبت در نمونه‌های به کاررفته در این تحقیق نیز رعایت شده است. در ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای به طول ۱۲۰ میلی‌متر و به قطر تقریبی ۱۱ میلی‌متر جهت اجرای آزمون خستگی به کمک دستگاه مغزه گیر در آزمایشگاه تهیه شدند. نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش

۲-۱- نمونه‌های سنگ

به جهت تشابه ساختار سنگ‌های بلوری با فلزات، در این تحقیق از دو نمونه سنگ بلوری ساختمانی پر کاربرد در ایران با ترکیب کانی‌شناسی و منشأ ساخت متفاوت (گابروی نطنز و مرمر سبز) برای بررسی خستگی استفاده شده است. در این تحقیق برای بررسی اثر وجود تنوع کانی‌ها بر رفتار خستگی از یک سنگ متشکل از چند کانی (گابروی نطنز) در مقابل سنگی با تنها یک نوع کانی (مرمر سبز) استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که گابروی نطنز حاوی ۶۱٪ فلدسپات پلاژیوکلاز، ۳۱/۵٪ کلینوپروکسن، ۲٪ کلریت و ۱/۵٪ کانی‌های اپاک است در حالی که مرمر سبز تقریباً تنها از کلسیت تشکیل شده است. مشخصات سنگ‌های استفاده شده در این تحقیق، در جدول (۱) آورده شده است. انتظار می‌رسید که مقاومت گابرو از مرمر بیشتر باشد اما گابروی استفاده شده در این

باعث ایجاد تمرکز تنش محلی می‌گردد که می‌تواند باعث اختلال در نتایج شود به همین علت در ادامه نمونه‌های آماده‌شده به کمک دو قالب فلزی که در دو انتهای نمونه‌ها تعبیه شدند آماده اجرای آزمایش شدند. در شکل (۲) مراحل و چگونگی تهیه این نمونه‌ها نشان داده شده است.

خستگی فلزات (نمونه ارائه‌شده در شکل ۱) به‌وسیله ماشین‌کاری روی یک قطعه فلز آماده می‌شوند اما ماشین‌کاری روی نمونه‌های سنگی به‌آسانی امکان‌پذیر نیست و نمونه‌های سنگی عموماً به‌وسیله مغزه‌گیری تهیه شده و استوانه‌ای شکل می‌باشند. از طرفی اعمال مستقیم تنش خمشی به نمونه در محل تکیه‌گاه و نقطه اعمال بار

جدول ۱: مشخصات سنگ‌های استفاده‌شده در این تحقیق

نوع سنگ	مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	مدول یانگ (GPa)	مقاومت کششی برزیلی (MPa)	قطر متوسط دانه‌ها (mm)
گابروی نطنز	۷۵/۵	۷۸	۱۰/۸۷	۰/۷۵
مرمر سبز	۱۰۰	۹۶	۷/۴۱	۰/۰۳



شکل ۲: الف) نمونه‌های مغزه‌گیری شده گابروی نطنز ب) نمونه‌های آماده‌شده مرمر سبز پس از تعبیه قالب‌های فلزی



شکل ۳: دستگاه آزمایش خستگی سنگ و نحوه قرارگیری نمونه در آن

۲-۳- اجرای آزمایش

پس از آماده کردن نمونه‌ها سطح آن‌ها به کمک یک کاغذ سنباده نرم پرداخت شده تا اثر زبری سطح به حداقل خود برسد و در ادامه هرکدام از نمونه‌های آماده‌شده شماره‌گذاری می‌شوند. سپس تعدادی از نمونه‌ها تحت بار استاتیکی قرار گرفته و متوسط مقاومت کششی نهایی آن‌ها

۲-۲- طراحی و ساخت دستگاه آزمایش خستگی سنگ

با توجه به نوع بارگذاری و ابعاد نمونه‌های سنگ دستگاه آزمایش خستگی سنگ با الهام گرفتن از دستگاه آزمایش خستگی تیر چرخان^۹ [۴۰] در فلزات طراحی و ساخته شد. این دستگاه قادر است نمونه‌های موردنظر را از سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه تا ۱۲۰۰ دور در دقیقه تحت چرخش قرار دهد. به کمک یک شمارنده و یک حس‌گر در دستگاه می‌توان تعداد دوره اعمال‌شده در نمونه را تا سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه به‌دقت شمارش کرد. این دستگاه همچنین مجهز به یک سیستم متوقف‌کننده است که به‌محض شکست نمونه عملیات را متوقف می‌کند و تعداد دور تا لحظه شکست را ثبت می‌کند. شکل بارگذاری در این دستگاه با ترکیب خمش خالص و چرخش به‌صورت یک بارگذاری متناوب سینوسی شکل در خواهد آمد، که می‌توان مقدار دامنه و فرکانس آن را تغییر داد. در شکل (۳) این دستگاه و نحوه بارگذاری آن نشان داده شده است.

که در واقع نمونه دچار خستگی نمی‌شود، به عبارت دیگر تنش‌های کمتر از حد دوام، انرژی لازم برای گسترش ترک خستگی را تأمین ننموده و نمونه سالم باقی می‌ماند. تجربیات محققین در سایر مصالح از جمله فلزات و بتن نشان داده است که حد دوام در محدوده یک میلیون سیکل رخ می‌دهد. پس از رسیدن به این مرحله با توجه به اطلاعات به دست از نمونه سنگ مورد نظر، نحوه شکست هر نمونه بررسی می‌شود و به دلیل اینکه سنگ به عنوان یک ماده غیر همگن و انیزوتروپ در نظر گرفته می‌شود برخی از این داده‌ها در رسم نمودار نهایی در نظر گرفته نمی‌شوند. به عنوان مثال می‌توان به نمونه شکل (۵) اشاره کرد که به دلیل وجود ترک از قبل در میانه آن از وسط شکسته شده است و نمی‌توان به داده‌های آن اعتماد کرد. در شکل (۶) تعدادی از نمونه‌های شکسته شده نشان داده شده است. در طی آزمایش تمام نمونه‌ها به‌طور ناگهانی شکسته شده و سطح شکست عمود بر محور نمونه (در انتهای نمونه و در راستای تنش کششی حداکثر) است و هیچ‌گونه نازک‌شدگی و یا پوسته‌پوسته شدن مشاهده نگردید.



شکل ۵: نمونه شکسته شده از وسط



شکل ۶: تعدادی از نمونه‌های شکسته شده

۳- نتایج

پس از اتمام آزمایش‌ها، داده‌های به دست آمده برای هر نوع سنگ دسته‌بندی شده و نمودار مقاومت خستگی -

تحت خمش مشخص می‌شود. مقاومت کششی گابرویی نطنز و مرمر سبزه تحت خمش به ترتیب ۲۸ و ۱۸/۱۲ مگا پاسکال است. پس از اینکه متوسط مقاومت کششی سنگ تحت خمش به دست آمد، اولین آزمایش بارگذاری متناوب با تنشی برابر با ۷۰ تا ۸۰ درصد متوسط مقاومت کششی سنگ تحت خمش اجرا گردیده و تعداد دور تا لحظه شکست نمونه ثبت می‌شود. این روند با کاهش مقدار تنش اعمالی ادامه پیدا کرده و اطلاعات مربوط به هر نمونه ثبت می‌شود. تمام آزمایش‌ها، در فرکانس بارگذاری ثابت ۵ هرتز انجام شده است و طول ممان خمشی برای همه نمونه‌ها ثابت است و تنها عامل متغیر تنش اعمالی است. باید در نظر داشت که وزن متعلقات بارگذاری نیز در محاسبه مقدار تنش وارد بر نمونه لحاظ گردیده است. در شکل (۴) طول ممان خمشی با خط قرمز مشخص شده است. رابطه بین تنش خمشی (σ) و نیروی اعمالی به وسیله وزنه (F) به صورت زیر است:

$$\sigma = \frac{FLy}{I} \quad (2)$$

که L طول ممان خمشی، y فاصله بار اعمالی تا محور خنثی نمونه و I گشتاور دوم سطح است. تعداد نمونه‌ها در این تحقیق بر اساس استاندارد انجمن مهندسان مکانیک ژاپن در سطح اطمینان پژوهشی تعیین شده است [۴۲]. بر همین اساس در این مقاله ۸-۱۲ نمونه در محدوده عمر محدود و ۳-۶ نمونه در محدوده عمر نامحدود مورد آزمایش قرار گرفته است.



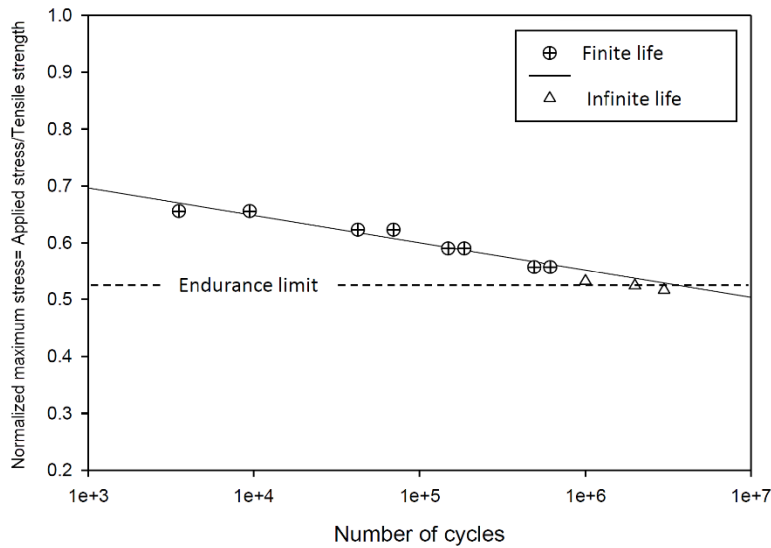
شکل ۴: چگونگی اعمال نیروی خمشی در نمونه‌ها

در ادامه با کاهش نیروی ممان خمشی اعمالی بر روی نمونه‌ها به مرحله‌ای می‌رسیم که نمونه سنگ مورد نظر در یک نیروی ممان خمشی خاص می‌تواند تعداد دوره‌های بارگذاری را تا بی‌نهایت تحمل کند که حد دوام ۱۰ نامیده می‌شود. به نظر می‌رسد که این نوع سنگ دارای حد دوام است. تعداد بی‌نهایت دوره‌های بارگذاری به این مفهوم است

خستگی وجود دارد، با نرمال‌سازی نتایج آزمایش خستگی نسبت به مقاومت کششی نمونه‌ها تحت خمش (که به وسیله نمونه‌های مشابه نمونه استفاده شده در آزمایش خستگی به دست آورده شده) می‌توان این خطا را از بین برد. به همین دلیل در نمودار تنش- عمر، تنش اعمالی به نمونه با تقسیم کردن بر مقاومت کششی تحت خمش نرمال‌سازی شده است. مقدار تمرکز تنش ناشی از وجود قاب‌های فلزی به اندازه ۱/۳۵ برآورد شده است.

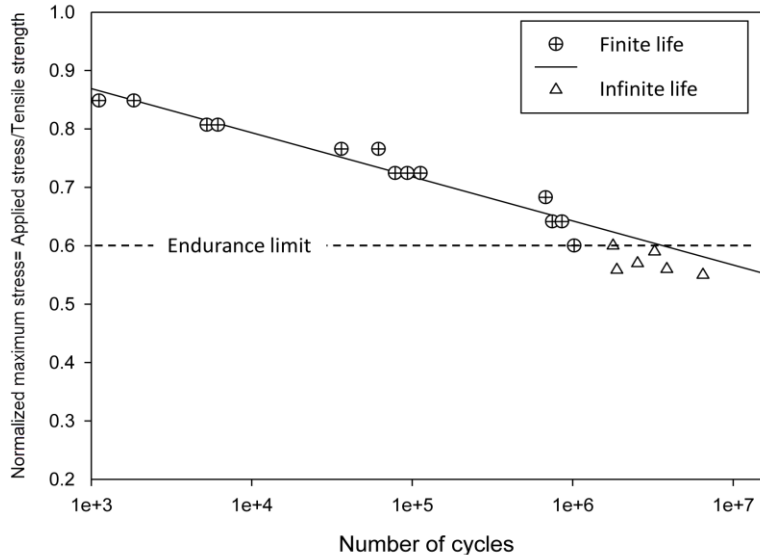
تعداد دوره بارگذاری ($S-N$) برای هر کدام از آن‌ها رسم شد. در شکل‌های (۷) و (۸) این نمودارها برای این دو نوع سنگ نشان داده شده است. در این نمودارها نمادهای دایره‌ای و مثلثی به ترتیب مربوط به نمونه‌هایی با عمر محدود و عمر نامحدود می‌باشند. نصب قالب‌های فولادی در دو انتهای نمونه باعث ایجاد تمرکز تنش در آن می‌شود. از آنجایی که این تمرکز تنش هم در آزمایش‌های استاتیکی تعیین مقاومت کششی تحت خمش نمونه‌ها و هم در آزمایش‌های

Natanz Gabbro S-N diagram



شکل ۷: نمودار ($S-N$)، گابروی نطنز

Green Onyx S-N diagram



شکل ۸: نمودار ($S-N$)، مرمر سبز

جدول ۲: نتایج آزمایش خستگی

نسبت حد دوام به مقاومت کششی تحت خمش	حد دوام (MPa)	مقاومت کششی تحت خمش (MPa)	ضریب همبستگی (R^2)	رابطه بین تنش حداکثر و تعداد دوره تا لحظه شکست	نوع سنگ
۰/۵۳	۱۴/۷	۲۸	۰/۹۴۱۲	$\frac{S}{S_T} = 0.8409 - 0.0482 \log N$	گابروی نطنز
۰/۶	۱۰/۸	۱۸/۱۲	۰/۹۴۳۵	$\frac{S}{S_T} = 1.0956 - 0.0755 \log N$	مرمر سبز

۱- در نمودار $S-N$ برای هر دو نوع سنگ با کاهش مقدار تنش اعمالی به نمونه، تعداد دوره تحمل شده به صورت لگاریتمی افزایش پیدا می‌کند و نمودار هر دو سنگ از رابطه وهرل پیروی می‌کنند.

۲- در تحقیقات قبلی اکثر آزمایش‌ها در محدوده فشاری انجام شده است اما طبق تئوری مکانیک شکست، گسترش ترک با تنش کششی در ارتباط است از این رو در تحقیقات قبلی ارزیابی حد دوام برای سنگ‌ها امکان‌پذیر نبوده و یا از بررسی آن صرف نظر شده است، در این نوع این بررسی امکان‌پذیر شده و به نظر می‌رسد که این نوع سنگ‌ها دارای حد دوام هستند.

۳- مقدار حد دوام برای سنگ گابروی نطنز در محدوده ۱۴/۷ مگا پاسکال (۵۳٪ مقاومت کششی آن در حالت خمش) و برای سنگ مرمر سبز در محدوده ۱۰/۸ مگا پاسکال (۶۰٪ مقاومت کششی آن در حالت خمش) برآورد شد.

۴- حد دوام هر دو سنگ از لحاظ مقدار نسبت به مقاومت کششی و تعداد دوره با محدوده مشاهده شده برای فلزات (۰/۴ تا ۰/۶ مقاومت کششی در 10^6 دوره) مطابقت دارد.

۵- با توجه به این موضوع که این نوع آزمایش خستگی برای اولین بار است که بر روی نمونه‌های سنگی اجرا می‌شود، نتایج و نمودارهای به دست آمده روندی منطقی از خود نشان می‌دهند و این قابل اجرا بودن این روش را جهت برآورد خستگی سنگ‌ها تأیید می‌کند.

مراجع

[1] Bagde, M. N., & Petroš, V. (2009). Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1), 200-209.

این رابطه را می‌توان به صورت کلی زیر نوشت:

$$\frac{S}{S_T} = A - \beta \log N \quad N > 1000 \quad (3)$$

که در آن S تنش اعمالی به نمونه، S_T مقاومت کششی سنگ، N تعداد دوره تا لحظه شکست و A و B پارامترهای مربوط به نوع سنگ هستند. این رابطه همان صورت نرمال شده رابطه وهرل (رابطه ۱) است [۳۹].

از آنجایی که آزمایش‌های قبلی درباره خستگی در حوزه مکانیک سنگ عموماً در تنش‌های فشاری بالا و تعداد سیکل محدود (عمر محدود) انجام شده، از این رو در تحقیقات قبلی ارزیابی حد دوام (عمر نامحدود) برای سنگ‌ها امکان‌پذیر نبوده و یا از بررسی آن صرف نظر شده است. اما همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد گابروی نطنز و مرمر سبز دارای حد دوام بوده و با کاهش مقدار تنش اعمالی، در مرحله‌ای دیگر نمونه دچار شکست نمی‌شود و قابلیت تحمل بی‌نهایت دوره وجود دارد. مقدار حد دوام برای سنگ گابروی نطنز در محدوده ۱۴/۷ مگا پاسکال (۵۳٪ مقاومت کششی آن در حالت خمش) و برای سنگ مرمر سبز در محدوده ۱۰/۸ مگا پاسکال (۶۰٪ مقاومت کششی آن در حالت خمش) برآورد شد.

همان‌طور که از نتایج آزمایش‌ها مشخص است هر دو سنگ بررسی شده در این تحقیق، به رغم ترکیب و منشأ تشکیل متفاوت، رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند و نیز هر دو دارای حد دوام می‌باشند.

۴- نتیجه گیری

پس از اجرای آزمایش خستگی بر روی دو نمونه سنگ بلوری (گابرو نطنز و مرمر سبز) و رسم نمودار ($S-N$) برای آن‌ها می‌توان به نتایج زیر در ارتباط با مقاومت خستگی این دو نمونه سنگ اشاره کرد:

- [14] Passaris, E. (1982). *Fatigue Characteristics Of Rocksalt With Reference To Underground Storage Caverns*. Paper presented at the ISRM International Symposium.
- [15] Fuenkajorn, K., & Phueakphum, D. (2010). Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. *Engineering Geology*, 112(1-4), 43-52.
- [16] Ray, S., Sarkar, M., & Singh, T. (1999). Effect of cyclic loading and strain rate on the mechanical behaviour of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(4), 543-549.
- [17] Singh, S. (1988). Relationship among fatigue strength, mean grain size and compressive strength of a rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 21(4), 271-276.
- [18] Singh, S. (1989). Fatigue and strain hardening behaviour of graywacke from the flagstaff formation, New South Wales. *Engineering geology*, 26(2), 171-179.
- [19] Song, H., Zhang, H., Kang, Y., Huang, G., Fu, D., & Qu, C. (2013). Damage evolution study of sandstone by cyclic uniaxial test and digital image correlation. *Tectonophysics*.
- [20] Song, R., Yue-ming, B., Jing-Peng, Z., De-yi, J., & Chun-he, Y. (2013). Experimental investigation of the fatigue properties of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 64, 68-72.
- [21] Voznesenskii, A. S., Kutkin, Y. O., Krasilov, M. N., & Komissarov, A. A. (2015). Predicting fatigue strength of rocks by its interrelation with the acoustic quality factor. *International Journal of Fatigue*.
- [22] Zhenyu, T., & Haihong, M. (1990). *An experimental study and analysis of the behaviour of rock under cyclic loading*. Paper presented at the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.
- [23] Jafari, M., Amini Hosseini, K., Pellet, F., Boulon, M., & Buzzi, O. (2003). Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(7), 619-630.
- [24] Wang, W.-h., Li, X.-b., Zhang, Y.-p., & Zuo, Y.-j. (2007). Closure behavior of rock joint under dynamic loading. *Journal of Central South University of Technology*, 14, 408-412.
- [25] Erarslan, N., & Williams, D. (2012). Mechanism of rock fatigue damage in terms of fracturing modes. *International Journal of Fatigue*, 43, 76-89.
- [26] Erarslan, N., & Williams, D. (2012). Investigating the Effect of Fatigue on Fracturing
- [2] Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G., Liu, X., & Gao, Z. (2011). *Mechanical engineering design* (9th ed.). New York, USA: McGraw-Hill 266-276
- [3] Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2000). *Metal fatigue in engineering*. USA: John Wiley & Sons. 3-10, 59-98
- [4] Bagde, M. N., & Petroš, V. (2005). Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(2), 237-250.
- [5] Bagde, M. N., & Petroš, V. (2005). Waveform effect on fatigue properties of intact sandstone in uniaxial cyclical loading. *Rock mechanics and rock engineering*, 38(3), 169-196.
- [6] Bagde, M. N., & Petroš, V. (2012). Dynamic Properties of Sandstone Rock Subjected to Cyclic Loading. *ISRM India Journal-Half Yearly Technical Journal of Indian National Group of ISRM*, 1(1), 5-16.
- [7] Attewell, P., & Farmer, I. (1973). *Fatigue behaviour of rock*. Paper presented at the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.
- [8] Burdine, N. (1963). Rock failure under dynamic loading conditions. *Old SPE Journal*, 3(1), 1-8.
- [9] Guo, Y., Yang, C., & 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.
- [10] Ishizuka, Y., Abe, T., & Kodama, J. (1990). *Fatigue behaviour of granite under cyclic loading*. Paper presented at the ISRM international symposium—static and dynamic considerations in rock engineering, Swaziland.
- [11] Khanlari, G., Momeni, A. A., & Karakus, M. (2014). Assessment of Fatigue Behavior of Alvand Monzogranite Rocks. *Iranian Journal of Engineering Geology*, 8(1), 2003-2020.
- [12] Li, N., Chen, W., Zhang, P., & Swoboda, G. (2001). The mechanical properties and a fatigue-damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclical loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 1071-1079.
- [13] Ma, L.-j., Liu, X.-y., Wang, M.-y., Xu, H.-f., Hua, R.-p., Fan, P.-x.,... 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.

- [39] Lalanne, C. (2010). *Mechanical Vibration and Shock Analysis, Fatigue Damage* (Vol. 4): John Wiley & Sons. 40-48
- [40] Instron. (2004). R. R. Moore Rotating Beam Fatigue Testing System. In I. I. P. Group (Ed.), *RRMoore Series Fixtures*. USA.
- [41] Lee, Y.-L. (2005). *Fatigue testing and analysis: theory and practice*. USA: Butterworth-Heinemann. 103-113
- [42] JSME. (1981). Standard method of statistical fatigue testing: JSME Standard Method for Determination of S-N Curves. *JSME S(002-1981)*.
- 1- Servo Control
2- High Cycle Fatigue (HCF)
3- Stress Controlled Fatigue
4- Wöhler
5- Wöhler relation
6- Basquin relation
7- Stromeyer law
8- Weibul relation
9- Rotating beam fatigue test machine (R.R.Moore)
10- Endurance Limit
- Resistance of Rocks. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 6(10), 1310-1318.
- [27] Nejati, H. R., & Ghazvinian, A. (2014). Brittleness effect on rock fatigue damage evolution. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(5), 1839-1848.
- [28] Erarslan, N., & Williams, D. (2012). Investigating the effect of cyclic loading on the indirect tensile strength of rocks. *Rock mechanics and rock engineering*, 45(3), 327-340.
- [29] Li, G., Moelle, K., & Lewis, J. (1992). *Fatigue crack growth in brittle sandstones*. Paper presented at the International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts.
- [30] Haimson, B. C., & Kim, C. M. (1971). *Mechanical Behavior of Rock under Cyclic Fatigue*. Paper presented at the Stability of Rock Slopes, United States.
- [31] Le, J.-L., Manning, J., & Labuz, J. F. (2014). Scaling of fatigue crack growth in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 72, 71-79.
- [32] Eberhardt, E. (1998). *Brittle rock fracture and progressive damage in uniaxial compression*. University of Saskatchewan Saskatoon.
- [33] Tien, Y., Lee, D., & Juang, C. (1990). *Strain, pore pressure and fatigue characteristics of sandstone under various load conditions*. Paper presented at the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.
- [34] Liu, E., Huang, R., & He, S. (2012). Effects of frequency on the dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under confining pressure conditions. *Rock mechanics and rock engineering*, 45(1), 89-102.
- [35] Chen, Y., Ni, J., Shao, W., Zhou, Y., Javadi, A., & Azzam, R. (2012). Coalescence of fractures under uni-axial Compression and fatigue loading. *Rock mechanics and rock engineering*, 45(2), 241-249.
- [36] Xiao, J., Ding, D., Xu, G., & Jiang, F. (2008). Waveform effect on quasi-dynamic loading condition and the mechanical properties of brittle materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(4), 621-626.
- [37] Fleck, N., Shin, C., & Smith, R. A. (1985). Fatigue crack growth under compressive loading. *Engineering fracture mechanics*, 21(1), 173-185.
- [38] Dieter, G. E. (1998). *Mechanical metallurgy*. London: McGraw-Hill New York.