

اثر دوره های انجماد- ذوب بر مقاومت خستگی سنگ تراورتن

علی عسکری پور کبیر^۱؛ علیرضا باغبانان^{۲*}؛ احمد رحمانی شهرکی^۳؛ حمید هاشم الحسینی^۴

۱- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استاد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دکترا مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴- دانشیار مکانیک خاک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

(نویسنده مسئول: bagh110@iut.ac.ir)

چکیده

پدیده خستگی یکی از عوامل مهم شکست در مواد است که طی آن، یک جسم در اثر تجمع تدریجی آسیب‌ها و گسترش ترک‌های ریز ناشی از بارگذاری‌های مکرر، در تنشی کمتر از مقاومت استاتیکی خود دچار شکست ناگهانی و ترد می‌شود. این مسئله در سازه‌های سنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به‌ویژه زمانی که عوامل محیطی همچون نوسان‌های دمایی و چرخه‌های یخبندان-ذوب نیز بر شدت آسیب‌دیدگی تأثیرگذار باشند. ترکیب بارهای دینامیکی و شرایط محیطی متغیر می‌تواند روند تخریب را تسریع کرده و عمر مفید سازه‌های مهندسی را کاهش دهد. سازه‌های معدنی و عمرانی نظیر مخازن ذخیره‌سازی سوخت، تکیه‌گاه سدها، پل‌ها و سایر سازه‌های سنگی، در طول عمر خود تحت تأثیر نیروهای متناوب و نوسان‌های شدید دمایی قرار دارند. در این تحقیق، به‌منظور شبیه‌سازی اثر دوره‌های یخبندان، ۳۰ دوره انجماد-ذوب در دماهای $+40$ و -20 درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه‌های سنگی صورت گرفت و سپس توسط دستگاه توسعه‌یافته با مکانیزم جدید، پارامترهای خستگی تحت بارگذاری کاملاً معکوس شونده، بررسی شد که نتایج آن به روش تنش-عمر ارائه و مقایسه شده است. نتایج نشان داد که سنگ تراورتن دارای حد دوام برابر با $0/49$ مقاومت کششی نهایی خود است. همچنین در محدوده تنش‌های اعمالی بالا، نمودار تنش-عمر کاهش‌ی معادل $36/67$ درصد را نشان داد، درحالی‌که این مقدار برای حد دوام برابر $34/32$ درصد به‌دست آمد. علاوه بر این، به‌منظور بررسی اثرات ذاتی سنگ، پارامترهای فیزیکی همچون تخلخل و سرعت موج طولی مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تخلخل سنگ پس از دوره‌های انجماد-ذوب 66 درصد افزایش یافته، درحالی‌که سرعت موج طولی در نمونه‌ها با کاهش معادل 14 درصد همراه بوده است. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه دوره‌های انجماد-ذوب بر ساختار درونی و خواص مکانیکی سنگ تراورتن است.

خستگی سنگ، دوره انجماد-ذوب، حد دوام، روش تنش-عمر (S-N)، بارگذاری کاملاً معکوس شونده

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

تأثیر گرانش و وزن روباره‌ها هستند. درحالی‌که بارهای دینامیکی در دامنه گسترده‌تری از جمله حرکت‌های تکتونیکی، لرزه‌ای، تکیه‌گاه‌های سنگی تا عوامل انسانی مانند ترافیک و انفجارها در معادن و همچنین پروژه‌های مختلف

ساختارهای سنگی در طول عمر خود در معرض بارهای استاتیکی و دینامیکی قرار دارند. بارهای استاتیکی ناشی از

ارائه دادند و محدوده تنش حد دوام^۱ سنگ مورد آزمایش را مشخص کرده اند، اشاره کرد. همچنین رابطه وهلر که برای نمودار تنش- عمر فلزها بیان شده را برای نمونه‌های مورد آزمایش بسط دادند و بیان کردند هر چه سنگ دانه ریزتر باشد مقاومت خستگی بیشتری از خود نشان میدهد [۱۰، ۱۱].

حقوقی و همکاران (۲۰۱۸) مشخص کردند که در هر سطح تنش، عمر خستگی با افزایش در سطح فرکانس بارگذاری بهبود می‌یابد. نتایجی خود را در ارتباط با عدم ارتباط بین حدودام و فرکانس بارگذاری، نیز ارائه کردند و رابطه‌ای بین سطح تنش و چرخه‌های بارگذاری ارائه کردند [۱۲]. در ادامه معادله آسیب جدیدی برای بارگذاری دو مرحله‌ای و یک مدل قانون آسیب دوخطی نیز برای پیش‌بینی عمر خستگی نمونه‌های مرمر سبز تحت بارگذاری دو مرحله‌ای بیان کردند [۱۲-۱۴]. حقوقی و همکاران (۲۰۲۱)، به پیش‌بینی عمر خستگی دامنه متغیر نیز پرداختند. مشخص شد که سطح بارگذاری بالاتر نقش مهمی در عمر خستگی نمونه‌ها دارد. نتایج ایشان نشان می‌دهد که یک رابطه غیرخطی بین نسبت چرخه اولیه و باقیمانده برای نمونه سنگ مورد مطالعه وجود دارد. بنابراین یک مدل منحنی آسیب جدید گسترش دادند [۱۵]. حقیقی و همکاران (۲۰۲۴)، به مطالعه تجربی رفتار خستگی و اثر فرکانس برای نمونه‌های متنوعی از بتونی مسلح و غیر مسلح تحت بارگذاری کاملاً معکوس شونده پرداختند. به منظور ارزیابی تأثیر فرکانس بارگذاری، آزمایش بار خستگی در پنج فرکانس بارگذاری ۱/۵، ۴/۲، ۶/۴، ۸/۴ و ۱۳ هرتز انجام شد. در هر سطح فرکانس، آزمون‌ها با ۶۰٪، ۷۰٪ و ۸۰٪ از مقاومت کششی انجام شد. یافته‌های ایشان نشان می‌دهد که فرکانس‌های بارگذاری بالاتر باعث افزایش عمر خستگی نمونه‌های بتن شده است. تعداد دوره‌های منجر به شکست در ۶۰٪، ۷۰٪ و ۸۰٪ از مقاومت کششی به ترتیب حدود ۵، ۶/۳ و ۹/۵ برابر افزایش یافته، زیرا فرکانس بارگذاری از ۱/۵ هرتز به ۱۳ هرتز افزایش یافته است [۱۶]. مطالعاتی به منظور بررسی اثرهای چرخه‌های انجماد-ذوب بر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها انجام شده است که نحوه بارگذاری آنها استاتیکی بوده است [۱۷-۱۹]. کاژائو و همکاران (۲۰۲۲)، پیرامون تأثیر دما و افزایش بارگذاری چرخه‌ای دوره ای منفرد چند سطحی^۲ ($MLSCL$) بر خواص مکانیکی

ژئومکانیکی مانند مخازن ذخیره سوخت و انرژی است. بار دینامیکی منجر به ایجاد کرنش معکوس و در پی آن، آسیب به ساختار سنگی می‌شود. با تجمیع این آسیب‌ها، امکان ایجاد شکستی خطرناک و زودهنگام میسر می‌شود [۱، ۲]. خستگی در سنگ‌ها به کاهش تدریجی مقاومت مکانیکی آنها تحت بارگذاری‌های تکراری گفته می‌شود. این پدیده مشابه خستگی در فلزها است و می‌تواند موجب شکست ناگهانی سنگ شود. خستگی زمانی رخ می‌دهد که سنگ به طور مداوم تحت طیفی از تنش‌ها قرار گرفته و ترک‌های میکروسکوپی در آن ایجاد شود. برخلاف شکست استاتیکی که بر اثر یک بار ثابت رخ می‌دهد، خستگی ناشی از تجمع تدریجی آسیب‌هاست و در نهایت، با رسیدن تنش‌ها به حد بحرانی، منجر به گسیختگی سنگ می‌شود. موضوع خستگی سنگ، به خصوص در حوزه سازه‌های زیرزمینی، مهندسی ژئوتکنیک و مهندسی نفت اهمیت زیادی دارد [۳-۵]. تنش‌های مکرر، حتی اگر کوچک باشند، می‌توانند با گذشت زمان باعث تولید و گسترش ترک‌ها شوند که نهایتاً منجر به شکست سنگ می‌شوند [۶-۸]. تحقیق‌های متنوعی درباره درک حساسیت سنگ‌ها در برابر بارهای چرخه‌ای و تأثیر عوامل مختلف ذاتی و عملیاتی انجام شده است که منجر به مشخص شدن اهمیت مکانیسم شکست و تغییر شکل سنگ و درک بهتر از مقاومت خستگی برای ارزیابی بهتر پایداری بلندمدت سازه‌های سنگی شده است. ترک‌های ناشی از خستگی عموماً در امتداد صفحاتی عمود بر بیشترین تنش‌های کششی رخ می‌دهند [۹]. مطالعه‌های بسیاری بر روی پارامترهای خستگی در سالیان اخیر صورت پذیرفته است که اغلب آنها، خستگی را تحت بارگذاری فشاری مورد آزمایش و بررسی قرار داده اند، اما عامل اصلی که منجر به رخداد خستگی می‌شود تنش‌های کششی باقی مانده در نمونه است [۳]. از این رو مقاومت کششی نیز تعیین کننده و حائز اهمیت است. بدیهی است که اندرکنش آنها را باید متقابلاً مورد بررسی قرار داد. در نتیجه امروزه توجه پژوهشگران به این امر جلب شده است. در سال‌های اخیر مطالعه‌هایی در زمینه بررسی مقاومت فشاری و کششی از طریق بارگذاری کاملاً معکوس انجام شده است. از جمله این مطالعه‌ها را می‌توان به جمالی و همکاران (۲۰۱۷) که نتایجی جهت ارزیابی یک محدوده مقاومت کششی برای انواع سنگ

^۱ Multi-level single cyclic loading tests

^۲ Endurance Limit

می‌شوند [۲۴]. همچنین از قدیم تراورتن در صنایع ساختمانی تزئینی و نما مورد استفاده قرار گرفته است. با اثر دوره‌های انجماد-ذوب بر ساختار سنگ متخلخل، یکپارچگی مولفه‌های هندسی و ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. اهمیت موضوع به دلیل استخراج مکرر از منابع هیدروکربنی و در پی آن اثرگذاری نیروهای متناوب و نوسان‌های تکراری دما که در اثر ذخیره سازی و یا استخراج تحت فشار بالا و شبیه سازی آسیب دمایی سالیانه هستند، بیشتر مشخص می‌شود. در نتیجه دانستن خصوصیت‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها و عوامل موثر بر تغییر در آن خصوصیت‌های حائز اهمیت است. به منظور درک بهتر اثرگذاری عوامل، در این مطالعه به بررسی اثرهای دوره‌های انجماد-ذوب بر روی مقاومت خستگی تحت بار معکوس شونده کامل و خصوصیت‌های مکانیکی و فیزیکی نمونه‌های تراورتن پرداخته شده است. برای ارزیابی پارامترهای مقاومت خستگی، از روش تنش-عمر استفاده شد. در این روش، نمونه سنگ تحت بارگذاری کاملاً معکوس (فشار-کشش) قرار می‌گیرد تا حد دوام و عمر خستگی و تأثیر سایر عوامل مشخص گردد. همانگونه که بیان شد عدم وجود بررسی‌های علمی پیرامون تعامل دوسویه درکشش-فشار که در نهایت باعث شکست خستگی می‌شود، توجه پژوهشگران را در سال‌های اخیر به این موضوع جلب کرده است. شرایط زمانی از حساسیت و پیچیدگی برخوردار می‌شود که اثر آسیب محیطی منجمله دوره های انجماد-ذوب (شبیه سازی اثر زمان) به این تعامل متقابل کشش-فشار افزوده شود و این تعامل از طریق بارگذاری کاملاً معکوس شونده در این تحقیق برای سنگ تراورتن بررسی و نتایج آسیب ناشی از دوره های انجماد-ذوب نیز ارائه می‌شود.

۲-۱- مطالعه ی رفتار خستگی با استفاده از

روش تنش - عمر

بررسی خستگی به روش تنش-عمر ($S-N$) یک روش مهم در علوم مهندسی است که برای تحلیل و پیش‌بینی خستگی و شکست مواد تحت تنش‌های متناوب استفاده می‌شود. به طور کلی، دو نوع آزمون بارگذاری خستگی وجود دارد. نوع اول به بارگذاری دامنه ثابتی اشاره دارد که نمونه یک مقدار بارگذاری

گرانیت پرداختند [۲۰]. ژنگیانگ سونگ و همکاران (۲۰۲۲)، کاهش مقاومت شکست خستگی به میزان ۲۱/۵۶٪ تحت بارگذاری چرخه‌ای را بدست آوردند. همچنین بیان کردند که در اثر ۲۰ دوره انجماد-ذوب مقدار میانگین مقاومت خستگی به میزان ۱۱/۵۴٪ کاهش می‌یابد که این کاهش به میزان ۱۸/۰۱٪ برای گروه با ۴۰ چرخه انجماد-ذوب کاهش ثبت شد [۲۱]. شیائوپینگ ژو و همکاران (۲۰۲۲)، اثرات ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دوره انجماد-ذوب در دمای ۲۰- و ۲۰، تحت بارهای چرخه‌ای بر خواص مکانیکی، رفتارهای ترک و مکانیسم آسیب خستگی سنگ‌های از قبل ترکدار را بررسی کردند. از تکنولوژی تصویر دیجیتال برای نظارت بر فرآیند ترک، نحوی انتشار و تجزیه و تحلیل برای نمونه‌های آزمایش شده استفاده شده است. جذب آب در نمونه ماسه سنگ از ۱/۶۸٪ به ۱/۷۷٪ با افزایش تعداد دوره‌های انجماد-ذوب افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد منافذ و شکستگی در نمونه‌های ماسه سنگ در طول آزمایش انجماد-ذوب افزایش می‌یابد [۲۲]. جینگ لی و همکاران (۲۰۲۴)، به بررسی نتایج خستگی و تحلیل تکامل انرژی ماسه سنگ قرمز، با اثر ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ دوره انجماد-ذوب در دمای ۲۰- و ۲۰ تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌پردازند. از طریق ضریب همبستگی پیرسون^۳، همبستگی بین عمر خستگی، تنش شکست و تعداد دوره‌های انجماد-ذوب نمونه‌های ماسه‌سنگ محاسبه کردند. نتایج نشان می‌دهد که دوره‌های انجماد و ذوب با عمر خستگی و تنش شکست همبستگی منفی دارند و با افزایش تعداد دوره‌های انجماد و ذوب، تعداد بارگذاری‌های دوره‌ای مربوط به شکست نمونه‌های ماسه‌سنگ قرمز کاهش می‌یابد. این بدان معنا است که عمر خستگی کاهش می‌یابد و تنش در نقطه شکست نیز روند کاهشی را نشان می‌دهد. افزایش آسیب انجماد-ذوب و خستگی منجر به افزایش شکل پذیری و کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌شود. زیرا با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد و ذوب، یخزدگی مکرر آب در منافذ نمونه‌ها منجر به تغییر ساختار منافذ، افزایش تخلخل و کاهش خواص مکانیکی نمونه‌ها می‌شود [۲۳]. کربنات‌ها در سال‌های اخیر اهمیت زیادی در صنعت، علم و فناوری پیدا کرده‌اند، به‌نظر می‌رسد که تقریباً ۶۰ درصد ذخایر هیدروکربنی و ۴۰ درصد ذخایر گاز جهان در مناطقی با میزبانی سنگ‌های کربناته یافت

^۳ Pearson correlation coefficient

نمونه و I گشتاور دوم سطح می باشد.

گشتاور دوم سطح برای یک سطح دایره ای از رابطه ۲ بدست می آید:

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (2)$$

که D قطر نمونه است. با چرخش نمونه حول محور خنثی، مقدار y در رابطه ۳ به صورت تابعی از زمان (t) و فرکانس چرخش نمونه (f) تغییر می کند:

$$y = \frac{D}{2} \cos(2\pi f t) \quad (3)$$

حال با جای گذاری رابطه (۲) و رابطه (۳) در رابطه (۱) دامنه بارگذاری متناوب (S_a) بصورت زیر بدست می آید:

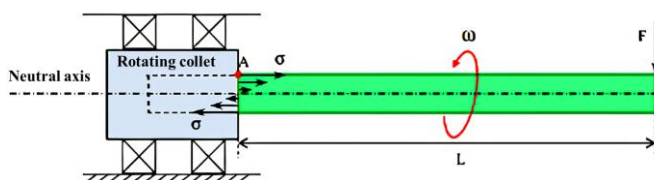
$$S_a = \frac{32FL}{\pi D^3} \cos(2\pi f t) \quad (4)$$

با افزایش و کاهش مقدار نیروی خمشی اعمالی بر روی نمونه ها دامنه بارگذاری قابل تغییر خواهد بود و با کم و زیاد کردن سرعت چرخش موتور، فرکانس بارگذاری متناوب نیز قابل تنظیم می باشد. تست اول در سطح تنش کمی کوچک تر از مقاومت خمشی یکنواخت $BNTS^4$ انجام می شود. تست های دیگر با سطوح تنش کم تر از آنچه که در مرحله اول استفاده شد، انجام شدند. این فرآیند ادامه می یابد و نتایج به عنوان یک نمودار تنش (S) در برابر تعداد چرخه ها (N) در مقیاس لگاریتمی ارائه می شود.

۲- تجهیزات آزمایش و آماده سازی

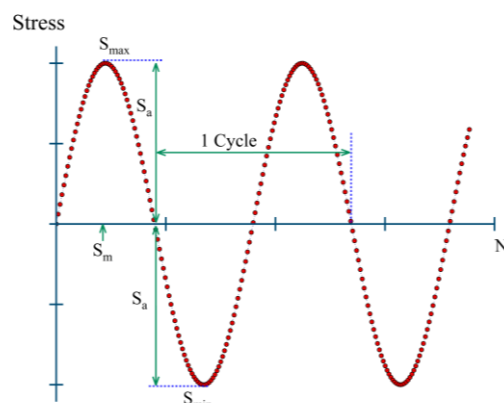
نمونه ها

روشی برای تعیین شکست خمشی در سنگ ها در شرایط بارگذاری کاملاً معکوس وجود ندارد. در این تحقیق، از یک دستگاه جدید مبتنی بر دستگاه تست $R.R.Moore$ که برای بررسی خمشی در فلزها می باشد، الهام گرفته شده است [۲۷].



شکل ۲- نحوه ایجاد بارگذاری کاملاً معکوس شونده سینوسی به کمک روش خمش دو نقطه ای چرخشی

ثابت را تا زمانی که شکست آن رخ دهد تجربه می کند. نوع دوم بارگذاری دامنه متغیر است که دامنه بارگذاری در طول عمر نمونه تغییر خواهد کرد [۳، ۲۵، ۲۶]. آزمون های خمشی دامنه ثابت بر روی چندین نمونه در دامنه های بارگذاری کاملاً معکوس مختلف انجام می شوند. حالت کاملاً معکوس نشان دهنده نوعی بارگذاری است که در اطراف تنش متوسط صفر متناوب است. بر اساس تعاریف درمباحث خمشی، عمر خمشی (N) برابر است با تعداد چرخه هایی که منجر به شکست نمونه می شود، میانگین تنش (S_m) و دامنه تنش (S_a) در شکل ۱ نشان داده شده است. آزمایش های خمشی تنش-عمر معمولاً بر روی چندین نمونه یکسان در دامنه های مختلف تنش کاملاً معکوس انجام می شود. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، تنش خمشی (σ) به لنگر خمشی اعمال شده (M) ، فاصله از محور خنثی (y) و گشتاور دوم سطح (I) بستگی دارد.



شکل ۱- خصوصیت های تنش کاملاً معکوس شونده

رابطه بین تنش خمشی (σ) و نیروی اعمالی بوسیله وزنه (F) به صورت رابطه ۱ می باشد:

$$\sigma = \frac{FLy}{I} \quad (1)$$

که L طول ممان خمشی، y فاصله بار اعمالی تا محور خنثی

⁴ Bending Tensile Strength

شده است. مطابق با اشکال ۴ و ۵، تعداد ۵۰ نمونه تراورتن با قطر ۱۱ و طول ۱۲۰ میلیمتر برای انجام تست شاهد در نظر گرفته شد. ۱۰ نمونه به منظور تکرار آزمایش و کاهش خطا در نظر گرفته شد. همچنین ۲۰ نمونه برای عملیات دوره های انجماد-ذوب در نظر گرفته شد. نمونه ها به منظور قرارگیری در دستگاه و همقواره شدن در یک راستا درون نگه دارنده های فلزی با استفاده از رزین مقاوم، ثابت شدند. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده، به منظور بررسی مقاومت مکانیکی و ویژگی های فیزیکی سنگ تراورتن، تعدادی نمونه آزمایشی مطابق با استانداردهای بین المللی تهیه شد. این نمونه ها دارای قطر NX و طول ۱۱۰ میلیمتر بوده و طبق دستورالعمل های انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM) آماده سازی گردیدند.



شکل ۳- نمایشی از دستگاه آزمایش خستگی

برای ارزیابی خصوصیت های دینامیکی سنگ، سرعت موج فشاری-طولی در نمونه ها بر اساس استاندارد $ASTM D 2845$ اندازه گیری شد. نتایج حاصل نشان داد که میانگین سرعت انتشار امواج فشاری برابر با 5357 ± 218 متر بر ثانیه است.



شکل ۴- نمونه های مورد استفاده از سنگ تراورتن

۱-۲- دستگاه آزمایش

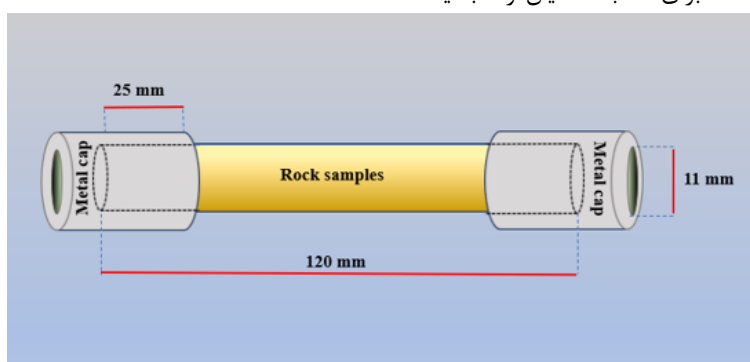
دستگاه مورد استفاده در این پژوهش، برای انجام آزمون های خستگی سنگ ها است که با هدف بررسی رفتار دینامیکی نمونه های سنگی تحت بارگذاری های متناوب طراحی و توسعه یافته است. این دستگاه قابلیت اعمال بارگذاری کاملاً معکوس شونده را دارد که در آن نیروها به صورت متقارن در دو جهت مخالف به نمونه وارد می شوند. بارگذاری اعمال شده دارای یک الگوی سینوسی است که امکان تنظیم فرکانس و نرخ اعمال بار را برای محققان فراهم می کند.

یکی از ویژگی های کلیدی این دستگاه، مجهز بودن به یک حسگر پیشرفته است که به صورت خودکار عملیات را تحت نظر دارد. این حسگر به محض وقوع شکست در نمونه، آزمون را متوقف کرده و تعداد چرخه های اعمال شده را تا لحظه شکست ثبت می کند. این ویژگی باعث می شود دقت و قابلیت اطمینان داده های به دست آمده افزایش یابد. دستگاه قادر است سرعت چرخش نمونه ها یا همان فرکانس بارگذاری را در محدوده ۱۰۰ تا ۱۲۰۰ دور در دقیقه تنظیم کند که انعطاف پذیری بالایی را برای انجام آزمایش های مختلف فراهم می آورد. علاوه بر این، شمارنده دقیق تعبیه شده در سیستم، توانایی شمارش تعداد چرخه ها را با دقتی بالا، حتی تا ۵۰۰۰ دور بر دقیقه، دارد. این قابلیت باعث می شود که آزمون های خستگی با دقت بالایی انجام شده و داده های حاصل از آن از اعتبار بالایی برخوردار باشند. همچنین، دستگاه به گونه ای طراحی شده است که پس از وقوع شکست در نمونه، به صورت خودکار فرآیند آزمون را متوقف کرده و تعداد دقیق چرخه های اعمال شده (عمر خستگی نمونه) را ثبت می کند، این عملکرد خودکار باعث افزایش دقت نتایج می شود. شکل ۲، مکانیزم و شکل ۳ دستگاه آزمایش را نشان می دهد.

۲-۲- طرح آزمایش و آماده سازی نمونه ها

ابعاد نمونه های تراورتن استفاده شده در این تحقیق با در نظر گرفتن نسبت طول به قطر متناسب با دستگاه تیر چرخان تحت خمش که عمدتاً بین ۹ تا ۱۱ میلیمتر، مطابق شکل ۳ که در مطالعه های قبلی این تیم تحقیقاتی استفاده شده است، در نظر گرفته شد [۲۸، ۲۷، ۲۵، ۳]. پس از تهیه نمونه ها، در مرحله آماده سازی نمونه هایی که دارای ضعف ساختاری بوده به منظور جلوگیری از ایجاد خطا از روند آزمایش کنار گذاشته

کامل نمونه ها قبل و بعد از شروع دوره های انجماد- ذوب به منظور بررسی تخلخل نمونه ها به مدت ۷۲ ساعت درون آب در شرایط ایده آل (فشار ۱ اتمسفر و دمای محیط) به گونه ای که آب در کل نمونه در جریان باشد قرار داده شدند. برای اندازه گیری وزن اشباع نمونه ها پس از خروج از آب با یک پارچه جاذب آب سطح نمونه ها آبیگری شد. همچنین جهت خشک کردن نمونه ها، به مدت ۲۴ ساعت در دمای 105°C قرار گرفته اند. قبل و بعد از دوره های انجماد- ذوب، وزن هر نمونه با دقت هزارم ($0/001$) گرم اندازه گیری شد و ابعاد (طول و قطر) هر نمونه با کولیس دیجیتال به دقت صدم ($0/01$) میلی متر یادداشت شد. متوسط تخلخل نمونه های تراورتن قبل از انجام عملیات حرارتی 0.478 ± 0.029 درصد بدست آمد.



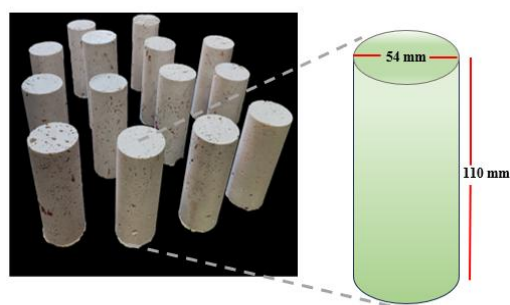
شکل ۵- ابعاد نمونه ها و نحوی قرارگیری در نگه دارنده فلزی

می باشد.

همانگونه که پیشتر بیان شد آزمایشها شامل دو مرحله اصلی هستند: ابتدا مقاومت خمشی نمونهها تحت بارگذاری خمشی یکنواخت (*BNTS*) تعیین شد، سپس آزمایشهای خستگی با اعمال بار متناوب سینوسی انجام گرفت. در تمامی مراحل، فرکانس بارگذاری ثابت و برابر با ۵ هرتز در نظر گرفته شد و دامنه بار بدون تغییر باقی ماند. مقدار حداکثر بار متناوب به صورت کسری از مقاومت خمشی نهایی نمونهها انتخاب شد، به گونه ای که در اولین آزمایش خستگی، مقدار بار بین ۸۰ تا ۹۰ درصد نیرو شکست تنظیم گردید. تعداد چرخه های تا لحظه شکست نمونهها در هر آزمایش ثبت شد و سپس نمودار تنش-عمر (*S-N*) مطابق با شکل ۷، ترسیم شد. در این پژوهش، آزمایشهای خستگی از سطح ۹۰ درصد مقاومت خمشی یکنواخت آغاز شد و به تدریج سطح تنش کاهش داده

علاوه بر این، متوسط مقاومت فشاری تکمحوره نمونهها 31.4 ± 5 مگاپاسکال تعیین شد که بر اساس طبقه بندی مهندسی، این سنگها در گروه سنگهای ضعیف قرار می گیرند. در ادامه، به منظور بررسی آسیب دوره های انجماد- ذوب و تغییرات سرعت امواج فشاری، ۳ نمونه مجزا برای هر گروه دمایی، مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین، برای تحلیل رفتار خستگی سنگ تحت دوره های مکرر انجماد و ذوب، تعداد ۲۰ نمونه در شرایط متوالی چرخه های سرمایش و گرمایش بررسی شد.

به منظور شبیه سازی ۳۰ دوره از فرآیند انجماد-ذوب، نمونه ها به مدت ۱۲ ساعت غوطه وری در آب، ۴ ساعت در دمای پایین (20°C) و سپس ۴ ساعت در دمای بالا (40°C) و پس از هر بار قرارگیری در دمای بالا سپس به مدت ۴ ساعت در آب غوطه قرار گرفته اند. برای کسب اطمینان از اشباعیت



شکل ۶- نمونه های استاندارد برای تعیین خصوصیت های مکانیکی و فیزیکی تراورتن

۳- نتایج و بحث

پارامترهای مقاومتی اندازه گیری شده با استفاده از تست های مرسوم مکانیک سنگی طبق دستور العمل ها مطابق جدول ۱

در این پژوهش، مقدار حد دوام برای سنگ تراورتن برابر ۵.۵ مگاپاسکال تعیین شد. کاهش تنش اعمالی به کمتر از این مقدار باعث شد که نمونه‌ها تا ۱۰۶ چرخه دوام بیاورند جدول ۲ نتایج مربوط به حد دوام سنگ تراورتن را ارائه می‌دهد

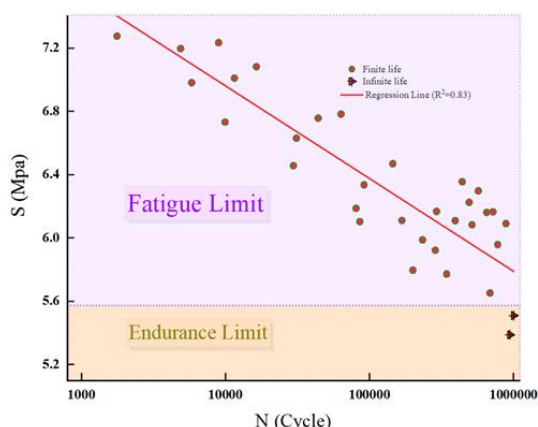
۳-۱- تأثیر دوره‌های انجماد-ذوب بر رفتار

خستگی سنگ تراورتن

برای بررسی تأثیر دوره‌های انجماد-ذوب بر رفتار خستگی سنگ تراورتن، ۳۰ دوره انجماد-ذوب بر روی ۲۰ نمونه مورد آزمایش اعمال شد. این دوره‌ها در بازه دمایی ۴۰+ تا ۲۰- درجه سانتی‌گراد انجام گرفت تا شرایط محیطی مشابه با چرخه‌های طبیعی یخبندان و ذوب را شبیه‌سازی کند.

جدول ۲- حد دوام نمونه‌های سنگ تراورتن

مقدار	پارامتر
	متوسط مقاومت
۱۱/۲۱	کششی تحت خمشی (MPa)
۵/۵	حد دوام (MPa)
	نسبت حد دوام به
۰/۴۹	مقاومت کششی تحت خمشی



شکل ۷- نمودار تنش - عمر، به دست آمده از نتایج آزمایش

خستگی بر روی نمونه‌های تراورتن

پس از انجام این فرآیند، داده‌های حاصل از آزمایش خستگی در نمودار تنش- عمر شکل ۸ با هدف مقایسه پارامترها ترسیم شد. نتایج نشان داد که در مقایسه با نمونه‌های شاهد،

نتایج حاصل از شکل ۷ نشان می‌دهد، در سطح تنش ۷.۹۷ مگاپاسکال (معادل ۷۰ درصد مقاومت خمشی) نمونه‌ها پس از ۳۰۳ چرخه دچار شکست شدند. در سطح ۶۴ درصد مقاومت خمشی (معادل ۷.۲۷ مگاپاسکال) عمر خستگی نمونه‌ها به ۱۷۶۷ چرخه افزایش یافت. در محدوده ۴۸ تا ۵۰ درصد مقاومت خمشی، یعنی در تنش ۵.۵ مگاپاسکال، نمونه‌ها ۱۰۶ چرخه دوام آوردند که این مقدار به‌عنوان حد دوام سنگ تراورتن تعیین شد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که در نوسان‌های تنشی کمتر از ۵.۵ مگاپاسکال، هیچ نمونه‌ای دچار شکست نشد. با کاهش سطح تنش اعمالی، عمر خستگی نمونه‌ها افزایش چشمگیری دارد. در سطوح تنش پایین‌تر، هیچ نمونه‌ای پس از یک میلیون چرخه دچار شکست نشده است که این مقدار را می‌توان به‌عنوان مرز شکست خستگی و منطقه ایمن در نظر گرفت. همچنین، تحلیل رگرسیون نشان داد که رابطه بین عمر شکست خستگی و تنش مربوطه با ۸۳ درصد ضریب همبستگی، بصورت نیمه‌لگاریتمی خطی است و با میتوان آن را بصورت رابطه ۵ بصورت مدلسازی کرد:

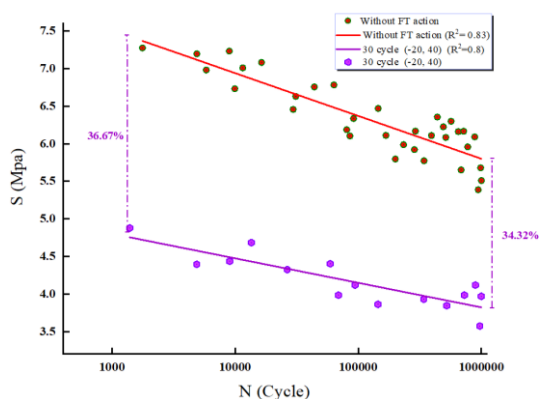
$$y = -0.254 \ln(x) + 9.3037 \quad (5)$$

حد دوام یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در رفتار خستگی سنگ است و بیانگر کمترین مقدار تنش است که نمونه‌ها در آن بدون شکست باقی می‌مانند.

جدول ۱- پارامترهای مقاومتی اندازه‌گیری شده برای

سنگ تراورتن

مقدار	پارامتر
	متوسط مقاومت
۳۱/۴	فشاری (MPa)
± ۵	
۲/۵۲۹	متوسط درصد
± ۰/۴۷۸	تخلخل
۱۱/۲۷	متوسط مقاومت کششی در
± ۱/۸۳۳	خمشی (MPa)
۵۳۵۷	میانگین سرعت موج
± ۲۱۸	فشاری (m/s)
۵/۹۳	متوسط مقاومت کششی
± ۰/۳۶	برزیلی (MPa)



شکل ۸- مقایسه اثر ۳۰ دوره انجماد-ذوب در دمای (۴۰)، ۲۰- در نمودار عمر- تنش تراورتن و میزان کاهش نسبت به نمودار شاهد. خط قرمز نمودار شاهد و خط بنفش نمودار ۳۰ دوره انجماد-ذوب است.

از سوی دیگر، کاهش مقدار عرض از مبدأ در نمودار تنش-عمر را می‌توان مستقیماً با تعداد دفعات تکرار دوره‌های دمایی مرتبط دانست. به عبارت دیگر، هرچه تعداد دوره‌های انجماد-ذوب بیشتر باشد، آسیب‌های ایجادشده در ساختار داخلی سنگ شدیدتر شده و تخریب آن تسریع می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، پس از انجام ۳۰ دوره در محدوده دمایی ۴۰+ تا ۲۰- درجه سانتی‌گراد، میزان تخلخل نمونه‌ها روند افزایشی داشته و از مقدار اولیه ۲/۴۷ درصد به ۴/۱۸ درصد افزایش یافته است. کاهش مقدار عرض از مبدأ در نمودار تنش-عمر را می‌توان مستقیماً با تعداد دفعات تکرار دوره‌های دمایی مرتبط دانست. به عبارت دیگر، هرچه تعداد دوره‌های انجماد-ذوب بیشتر باشد، آسیب‌های ایجادشده در ساختار داخلی سنگ شدیدتر شده و تخریب آن تسریع می‌شود. با افزایش تخلخل، تغییرات در خواص مکانیکی سنگ نیز مشاهده شد. از علل دیگر کاهش سرعت موج فشاری را می‌توان به افزایش ریزترک‌ها و گسترش نقاط ضعف در ساختار سنگ نسبت داد. در واقع، افزایش حجم ناشی از انجماد آب و توالی عملیات حرارتی، موجب گسترش ترک‌های میکروسکوپی شده و در نهایت منجر به کاهش پارامترهای خستگی در سنگ شده است.

تأثیر تخریبی این دوره‌ها بر رفتار خستگی نمونه‌ها کاملاً مشهود است. در بخش ابتدایی نمودار تنش-عمر، جایی که تعداد چرخه های خستگی کمتر است، کاهش عمر نمونه‌ها برابر ۳۶/۶۷ درصد محاسبه شد. این مقدار کاهش نشان می‌دهد که نمونه‌های تحت تأثیر دوره‌های حرارتی سریع‌تر از نمونه‌های شاهد دچار شکست شده‌اند. همچنین، برای محدوده حد دوام، کاهش میزان مقاومت خستگی نمونه‌ها به ۳۴/۳۲ درصد رسید. این کاهش نشان می‌دهد که حتی در محدوده تنش‌های پایین، دوره‌های انجماد-ذوب موجب کاهش قابل‌توجهی در مقاومت سنگ و افزایش احتمال شکست در درازمدت شده است. همچنین رابطه ۶ با ضریب همبستگی ($R^2=0.8$) زیر بدست آمد:

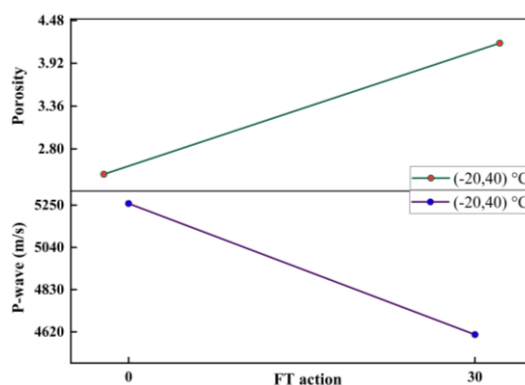
$$y = -0.151 \ln(x) + 5.8915 \quad (6)$$

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، شیب نمودار در اثر آسیب مکرر دما، به میزان ۴۰/۵۵ درصد نسبت به نمودار شاهد، کاهش یافته است که علت آن را می‌توان نفوذ و تکرار انبساط آب منجمد شده درون منافذ مرتبط دانست، که منجر به ایجاد کرنش‌های حرارتی برگشت‌ناپذیر و همچنین افزایش خصوصیت شکل‌پذیری^۵ می‌شود. از طرفی مقدار کاهش عرض از مبدأ را هم می‌توان به تعداد دفعات تکرار یا دوره‌های دمایی مرتبط دانست. مطابق شکل ۹، پس از ۳۰ دوره در محدوده ی دمایی (۴۰، ۲۰-) درصد تخلخل روند افزایشی و از ۲/۴۷ به ۴/۱۸ می‌رسد؛ متقابلاً سرعت موج فشاری از ۵۲۵۸ به ۴۶۰۶ متر بر ثانیه کاهش یافته است. این مهم می‌تواند در اثر افزایش حجم ناشی از انجماد آب و توالی عملیات حرارتی، باعث گسترش نقاط ضعف و افزایش ریز ترک شده که این امر عامل کاهش پارامترهای خستگی در سنگ شده است.

نمونه‌های مورد بررسی بود. کاهش سرعت موج فشاری نشان‌دهنده افزایش آسیب‌های داخلی، گسترش میکروتراک‌ها و کاهش چگالی ماده است که در نهایت موجب تضعیف ساختار سنگ می‌شود.

همچنین، تحلیل‌های انجام‌شده نشان داد که حد دوام مرتبط با مقاومت کششی تحت خمش است و در محدوده عمر یک تا ده میلیون چرخه، مقدار آن معادل ۴۰ درصد مقاومت کششی در خمش یکنواخت محاسبه شد. این یافته نشان می‌دهد که در این سطح از تنش و پایین‌تر، نمونه‌ها می‌توانند بدون شکست تحت بارگذاری‌های متناوب باقی بمانند.

در مجموع، نتایج این تحقیق بر اهمیت تأثیر دوره‌های انجماد-ذوب بر کاهش مقاومت خستگی سنگ تأکید دارد و نشان می‌دهد که آسیب‌ها دمایی پی‌درپی نقش مهمی در تسریع آسیب‌پذیری سنگ ایفا می‌کند. بنابراین، در طراحی و بهره‌برداری از سازه‌های سنگی، به‌ویژه در مناطق سردسیر با نوسان‌های دمایی شدید، باید تأثیر این پدیده بر طول عمر و عملکرد مکانیکی سنگ‌ها در نظر گرفته شود.



شکل ۹- روند تغییرات سرعت موج فشاری و تخلخل بعد از ۳۰ دوره ذوب و انجماد در دمای (۴۰، -۲۰)

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار خستگی سنگ تراورتن تحت بارگذاری متناوب و تأثیر دوره‌های انجماد-ذوب بر خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که سنگ تراورتن دارای حد دوام مشخصی است که مقدار آن تقریباً در ۵۰ درصد مقاومت کششی در خمش یکنواخت برابر با ۵/۵ مگاپاسکال تعیین شد. این بدان معناست که در سطوح تنش کمتر از این مقدار، سنگ در برابر بارگذاری متناوب، عمر نامحدود دارد و دچار شکست نمی‌شود.

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر افزایش آسیب ناشی از خستگی، تأثیر دوره‌های انجماد-ذوب است. بررسی نمونه‌ها پس از ۳۰ دوره انجماد-ذوب در محدوده دمایی (۴۰+ تا -۲۰-) درجه سانتی‌گراد نشان داد که این فرآیند به‌طور میانگین باعث کاهش ۳۵ درصدی عمر خستگی شده است. این کاهش را می‌توان به نفوذ آب به درون منافذ سنگ، انجماد آن و ایجاد تنش‌های داخلی ناشی از انبساط و انقباض پی‌درپی نسبت داد که به مرور زمان باعث گسترش ریزترک‌ها و کاهش مقاومت مکانیکی می‌شود.

از دیگر پیامدهای دوره‌های دمایی، افزایش ۶۶ درصدی میزان تخلخل و کاهش ۱۴/۲۱ درصدی سرعت موج فشاری در

۵- منابع

- [1] Y. Liu and F. Dai, "A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 1203-1230, 2021.
- [2] B. Cerfontaine and F. Collin, "Cyclic and fatigue behaviour of rock materials: review, interpretation and research perspectives," *Rock mechanics and rock engineering*, vol. 51, no. 2, pp. 391-414, 2018.
- [3] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, and H. O. Fuchs, *Metal fatigue in engineering*. John Wiley & Sons, 2000.
- [4] E. Brown, "ISRM suggested methods. Rock characterization testing and monitoring," *London: Royal School of Mines*, 1981.
- [5] P. Paris and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation laws," 1963.
- [6] R. G. Vaneghi, K. Thoeni, A. V. Dyskin, M. Sharifzadeh, and M. Sarmadivaleh, "Fatigue damage response of typical crystalline and granular rocks to uniaxial cyclic compression," *International Journal of Fatigue*, vol. 138, p. 105667, 2020.
- [7] J. Fan, J. Chen, D. Jiang, S. Ren, and J. Wu, "Fatigue properties of rock salt subjected to interval cyclic pressure," *International Journal of Fatigue*, vol. 90, pp. 109-115, 2016.
- [8] A. S. Voznesenskii, Y. O. Kutkin, M. N. Krasilov, and A. A. Komissarov, "Predicting fatigue strength of rocks by its interrelation with the acoustic quality factor," *International Journal of Fatigue*, vol. 77, pp. 194-198, 2015.
- [9] Z. Wang, S. Li, L. Qiao, and J. Zhao, "Fatigue behavior of granite subjected to cyclic loading under triaxial compression condition," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 46, pp. 1603-1615, 2013.
- [10] S. Jamali Zavareh, A. Baghbanan, H. Hashemolhosseini, and H. Haghgoei, "Effect of micro-structure on fatigue behavior of intact rocks under completely reversed loading," *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, vol. 6, no. Special Issue, pp. 55-62, 2017.
- [11] S. Jamali, H. Hashemolhosseini, A. Baghbanan, M. Khoshkam, and H. Haghgoei, "Evaluating fatigue in crystalline intact rocks under completely reversed loading," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 40, no. 5, pp. 789-797, 2017.
- [12] H. Haghgoei, H. Hashemolhosseini, A. Baghbanan, and S. Jamali, "The effect of loading frequency on fatigue life of green onyx under fully reversed loading," *Experimental Techniques*, vol. 42, pp. 105-113, 2018.
- [13] H. Haghgoei, H. Hashemolhosseini, and A. Baghbanan, "Cumulative fatigue damage under stepwise tension-compression loading," *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, vol. 52, no. 1, pp. 17-21, 2018.
- [14] H. Haghgoei, A. Baghbanan, and H. Hashemolhosseini, "Fatigue life prediction of rocks based on a new Bi-linear damage model," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 106, pp. 20-29, 2018.
- [15] H. Haghgoei, A. Baghbanan, H. Hashemolhosseini, and S. Jamali, "Variable amplitude fatigue life prediction of rock samples under completely reversed loading," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39, pp. 1951-1962, 2021.
- [16] M. Haghghi, P. Asadi, H. Hashemolhosseini, and A. Baghbanan, "An experimental study on the bending fatigue behavior of concrete beams by a proposed machine," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, pp. 1-17, 2024.
- [17] I. Faoro, S. Vinciguerra, C. Marone, D. Elsworth, and A. Schubnel, "Linking permeability to crack density evolution in thermally stressed rocks under cyclic loading," *Geophysical Research Letters*, vol. 40, no. 11, pp. 2590-2595, 2013.
- [18] Y. Wang, W. Feng, H. Wang, C. Li, and Z. Hou, "Rock bridge fracturing characteristics in granite induced by freeze-thaw and uniaxial deformation revealed by AE monitoring and post-test CT scanning," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 177, p. 103115, 2020.
- [19] J. Chen, C. Du, D. Jiang, J. Fan, and Y. He, "The mechanical properties of rock salt under cyclic

- loading-unloading experiments," *Geomechanics and Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 325-334, 2016.
- [20] G. Zhao, Y. Guo, X. Chang, P. Jin, and Y. Hu, "Effects of temperature and increasing amplitude cyclic loading on the mechanical properties and energy characteristics of granite," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 81, no. 4, p. 155, 2022.
- [21] Z. Song, Z. Yang, Y. Wu, H. Konietzky, and W. Dang, "Experimental insights on fatigue behaviors of sandstone exposed to combining effects of compressive differential cyclic loading (DCL) and freeze-thaw (FT) action," *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, vol. 8, no. 5, p. 169, 2022.
- [22] X. Zhou, Y. Fu, Y. Wang, and J. Zhou, "Experimental study on the fracture and fatigue behaviors of flawed sandstone under coupled freeze-thaw and cyclic loads," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 119, p. 103299, 2022.
- [23] J. Li, J. Li, Z. Shi, M. Wang, and H. Tan, "Fatigue characteristics and energy evolution analysis of red sandstone under the coupling of freeze-thaw and cyclic loading," *International Journal of Fatigue*, vol. 185, p. 108331, 2024.
- [24] C. A. Luza Huillca *et al.*, "Characterization analyzes in the geomechanical behavior of travertine rock," *SN Applied Sciences*, vol. 5, no. 10, p. 267, 2023.
- [25] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's mechanical engineering design*. McGraw-Hill New York, 2011.
- [26] I. Gadolina, N. Makhutov, and A. Erpalov, "Varied approaches to loading assessment in fatigue studies," *International Journal of Fatigue*, vol. 144, p. 106035, 2021.
- [27] "Instron, R. R. Moore Rotating Beam Fatigue Testing System, in RRMoore Series Fixtures, I.I.P. Group, Editor. 2004: USA."
- [28] N. Fleck, C. Shin, and R. A. Smith, "Fatigue crack growth under compressive loading," *Engineering fracture mechanics*, vol. 21, no. 1, pp. 173-185, 1985.



The effect of freeze-thaw cycles on the fatigue strength of Travertine

Ali Askarpour Kabir¹; Alireza Baghbanan^{2*}; Ahmad Rahmani Shahraki³; Hamid Hashemolhosseini⁴

1- M.Sc. in Rock Mechanics, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology

2- Professor of Rock Mechanics, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology

3- Ph.D. in Rock Mechanics, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology

4- Associate Professor of Soil Mechanics, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

Received: 09. July. 2024 Accepted: 21. September. 2024

(*Corresponding author: bagh110@iut.ac.ir)

Keywords

Final Extended Abstract

Styles

Keywords

Rock Mechanics

Iranian Society for Rock Mechanics

Final English Extended Abstract

Fatigue failure in materials occurs due to the gradual accumulation of microstructural damage and the propagation of cracks under cyclic loading conditions. This process results in sudden and brittle failure at stress levels significantly lower than the material's static tensile strength. In rock-based infrastructures such as dams, bridges, underground reservoirs, and tunnel walls, fatigue is a crucial factor influencing long-term stability, especially when exposed to environmental stressors like freeze-thaw cycles, seismic activity, and dynamic loads from mining and traffic.

In this study, the fatigue behavior of travertine rock was examined under completely reversible cyclic loading to simulate environmental stress conditions. Travertine, a widely used sedimentary rock, has an average compressive strength of 31.4 MPa and is susceptible to environmental degradation. To investigate its fatigue performance, 30 freeze-thaw cycles were applied, alternating between -20°C and +40°C. The process involved saturating the rock samples in water, freezing them, and then allowing them to thaw, completing a full 24-hour cycle. This approach aimed to replicate natural weathering conditions and assess their impact on mechanical properties.

A specialized fatigue testing device, inspired by the R.R. Moore system for metal fatigue tests, was used to apply fully reversed sinusoidal loading. This device enables precise control over load amplitude, frequency (variable or constant), and loading rate, making it ideal for evaluating the fatigue performance of rock materials. The stress-life (S-N) curves generated from the experiments revealed a clear inverse relationship between the applied stress and fatigue life.

Key findings from this research include:

Endurance Limit: The endurance limit of travertine was determined to be 5.5 MPa, which is approximately 49% of its flexural tensile strength. This means that below this stress level, the material can withstand cyclic loading indefinitely without failure.

Effect of Freeze-Thaw Cycles: The fatigue life of travertine decreased by 36.67% in low-cycle regions and by 34.32% at the endurance limit after 30 freeze-thaw cycles. This highlights the deterioration effect of temperature fluctuations on rock durability.

Porosity and Wave Velocity Changes: The porosity of travertine increased by 66% after 30 thermal cycles, rising from an initial 2.47% to 4.18%. Conversely, longitudinal wave velocity decreased by 14.21%, from 5258 m/s to 4606 m/s.



indicating microcrack formation and internal structural weakening.

Fatigue Behavior under Reversible Loading: The majority of samples failed after exceeding 10^3 cycles, confirming that travertine exhibits lower fatigue strength under combined tensile and compressive loads compared to purely compressive conditions.

Overall, the findings demonstrate that freeze-thaw cycles significantly impact the fatigue strength of travertine by promoting microcrack propagation, increasing porosity, and reducing wave velocity. These results emphasize the necessity of considering environmental factors in the design and maintenance of rock-based structures, particularly in regions experiencing extreme temperature variations. The experimental setup and methodology presented in this study offer a reliable approach to assessing rock fatigue and provide valuable insights for improving the durability and long-term performance of natural stone materials in engineering applications.

Keywords: Rock fatigue, freeze-thaw cycles, endurance limit, stress-life (S-N) method, completely reversible loading.
