

ارزیابی اثر چرخه انجماد و ذوب بر ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌های متخلخل: مطالعه موردی سنگ تراورتن محلات

هادی عطاپور^{۱*} و رضا رفیعی^۲

۲- استادیار گروه مهندسی ژئومکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۱- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

نویسنده مسئول: *h.atapour@arakut.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۱۲

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸

چکیده

دوام سنگ‌ها در مقابل شرایط آب و هوایی متغیری که همراه با آسیب به ساختار سنگ هستند، یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین کننده برای انتخاب این سنگ‌ها جهت استفاده در نمای بیرونی ساختمان‌ها و سنگ‌فرش معابر عمومی می‌باشد. از این رو استفاده از سنگ‌ها به عنوان مصالح مهندسی و ساختمانی نیازمند بررسی مقاومت آن‌ها در مقابل چرخه‌های مختلف گرم و سرد شدن، تر و خشک شدن و نیز انجماد و ذوب می‌باشد. با توجه به تنوع شرایط آب و هوایی در کشور ایران که دارای مناطق گرم و خشک، سردسیر و مناطق ساحلی است، چرخه‌ی انجماد و ذوب یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی است که می‌تواند موجب فرسایش و تغییر مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها شده و در نتیجه ضمن کاهش دوام سنگ‌ها، کاربری مفید آن‌ها را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. در مطالعه حاضر هدف اصلی ارزیابی تغییرات مشخصات مقاومتی نمونه‌های تراورتن در مقابل چرخه مهم انجماد و ذوب می‌باشد. در این راستا تغییرات مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در طی ۱۰ چرخه انجماد و ذوب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از چرخه‌های انجماد-ذوب حدود ۱۳/۶ درصد و مقاومت کششی نمونه‌ها حدود ۲/۲ درصد کاهش یافته است. کاهش قابل توجه مقاومت فشاری نمونه‌ها در ده چرخه نشان از تاثیرپذیری قابل توجه سنگ تراورتن از فرآیند انجماد-ذوب است.

واژه‌های کلیدی: سنگ ساختمانی، چرخه انجماد-ذوب، تراورتن، فرسایش، خواص مکانیکی

۱- پیشگفتار

کوچک‌تر می‌شود. عبارتی دیگر فرسایش ناشی از فرآیند انجماد-ذوب، ترکیب شیمیایی سنگ‌هایی را که روی آن‌ها اثر می‌گذارد تغییر نمی‌دهد، اما با ایجاد سطوح خارجی بیشتر در سنگ، آن‌ها را در برابر هوازدگی شیمیایی که ترکیبات موجود در سنگ‌ها را تغییر می‌دهد، آسیب‌پذیر می‌کند. روزهای چرخه انجماد-ذوب شامل روزهایی است که دمای صفر و کمتر از صفر و نیز دمای صفر و بیشتر از صفر در آن‌ها رخ می‌دهد. در مناطق سردسیر، سنگ‌های ساختمانی استفاده شده در هر سال حداقل در معرض یک چرخه انجماد-ذوب قرار می‌گیرند. انجماد و ذوب در غیاب رطوبت در حقیقت چرخه حرارتی می‌باشد. هر چند شکستگی در سنگ می‌تواند در اثر این چرخه رخ دهد، اما حضور رطوبت فرآیند شکست را شتاب می‌بخشد. در نهایت، خصوصیات سنگ از جمله مقاومت، چگالی و نفوذپذیری به مقدار زیادی تحت تاثیر این چرخه قرار می‌گیرند (حسینی و احمری، ۱۳۹۹؛ حسینی و فخری،

توانایی سنگ در حفظ ویژگی‌های خود در مقابل عوامل فرسایشی محیط در طی مدت بهره‌برداری به عنوان دوام سنگ تعریف می‌شود (لاینه‌ارت، ۱۹۸۸). شاخص دوام (توانایی حفظ خصوصیات مقاومتی و مشخصات ظاهری در مقابل عوامل فرسایشی محیط) یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سنگ برای استفاده از آن به عنوان سنگ‌نما و سنگ‌فرش است (باوز و همکاران، ۲۰۰۶؛ بابازاده، ۱۳۹۵). جهت استفاده از سنگ به عنوان مصالح ساختمانی، لازم است سنگ مورد نظر دارای چندین نوع دوام از جمله دوام در مقابل چرخه‌های گرم و سرد شدن متوالی، دوام در مقابل تر و خشک شدن و نیز دوام در مقابل انجماد و ذوب باشد. مقاومت در مقابل فرآیند "انجماد-ذوب" سنگ در حقیقت قابلیت آن برای پایدار ماندن در چرخه انجماد-ذوب در محیطی با شرایط مرطوب می‌باشد. این چرخه در طی یک فرآیند فیزیکی موجب شکستن سنگ به قطعات

علاوه بر تخریب کلی سنگ که در بالا اشاره شد، این فرآیند می‌تواند با ایجاد جدایش پوسته‌ها از سطح سنگ، زیبایی سطح سنگ ساختمانی را تحت‌الشعاع قرار دهد (دپرز و همکاران، ۲۰۲۰). تکرار چرخه انجماد-ذوب سبب حرکت آب از مسیر ترک‌های موجود و ترک‌های ایجاد شده می‌شود که این امر آسیب‌پذیری سنگ را افزایش می‌دهد. عبارتی دیگر، میزان تخریب سنگ در مناطق سردسیر، وابسته به تعداد چرخه انجماد-ذوب، دمای انجماد، نوع سنگ، تنش‌ها و میزان رطوبت است (چن و همکاران، ۲۰۱۰؛ تان و همکاران، ۲۰۱۱). در سال‌های اخیر، تحقیقات قابل‌توجهی در مورد تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ انجام شده است (بینال و همکاران، ۲۰۰۲؛ پنتال و نشاوی، ۲۰۰۲؛ التینداگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ رودریچ و سیگموند، ۲۰۰۷؛ کاراکا و همکاران، ۲۰۱۰؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

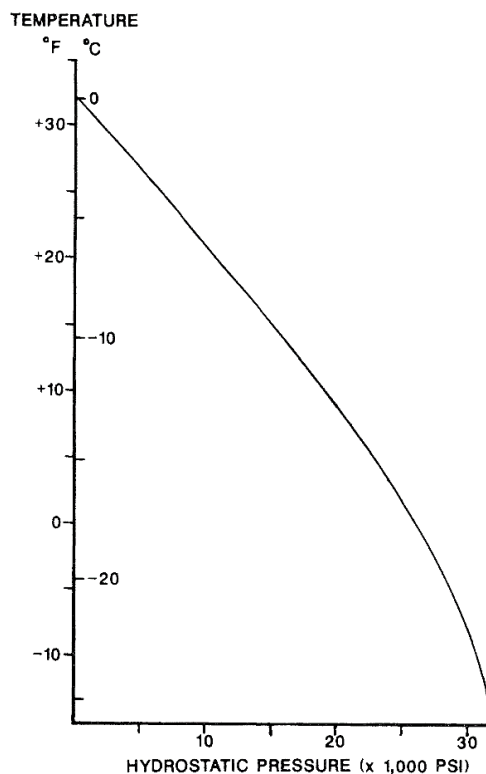
مناطق مستعد هوازدهی از نوع انجماد-ذوب، ارتباط نزدیکی با آب و هوای جهانی دارند. متناسب با تغییرات آب و هوای جهانی، مناطق تحت تأثیر این پدیده نیز تغییر خواهند کرد. در یک منطقه مشخص، این تغییرات شامل تغییر در محدوده دمای انجماد و ذوب، مدت زمان انجماد و فرکانس رویدادهای انجماد-ذوب خواهد بود (دپرز و همکاران، ۲۰۲۰). به عنوان نمونه انتظار می‌رود از طریق گرم شدن کره زمین، ساختمان‌ها و بقایای باستان‌شناسی در اروپای غربی کمتر تحت تأثیر رویدادهای انجماد-ذوب در آینده قرار گیرند، در حالی که وقوع این رویدادها در مناطق با ارتفاع و/یا عرض جغرافیایی بالا افزایش خواهد یافت (گروسی و همکاران، ۲۰۰۷).

علاوه بر این، در صنعت ساختمان‌سازی جهت حفظ انرژی، روز به روز تلاش بیش‌تری جهت عایق کردن دیوارها می‌شود. این عامل باعث می‌شود که رطوبت جذب شده در سنگ در ساختمان‌های جدید نسبت به ساختمان‌های قدیمی کمتر خشک شده و این موضوع ممکن است هوازدهی انجماد-ذوب سنگ‌های استفاده شده را تسریع نماید (واندموبروک و همکاران، ۲۰۱۹؛ ورسکن و همکاران، ۲۰۱۵). در نتیجه، نیاز هست مصالح ساختمانی مورد استفاده در مناطق حساس، از لحاظ مقاومت در مقابل انجماد-ذوب در سطح بالایی قرار داشته باشند و علاوه بر این، باید نسبت به تغییرات محیطی آتی مانند تغییر در رطوبت و دمای جو نیز مورد ارزیابی قرار گیرند.

۱۳۹۷؛ موسوی و همکاران، ۱۳۹۹؛ عبدی و خانلری، ۱۳۹۷؛ بیر و سگو، ۲۰۰۹؛ بلانگر و همکاران، ۱۹۹۳؛ حسینی و خدایاری، ۲۰۱۹؛ پروسکین و همکاران، ۲۰۱۰؛ ساد و همکاران، ۲۰۱۰؛ تاکارلی و همکاران، ۲۰۰۸).

این موضوع مسئله مهمی در استفاده از سنگ به عنوان مصالح ساختمانی است. خواه این مصالح سنگدانه بتن، سنگ برای کنترل فرسایش (گابیون، سنگ‌چین و غیره) و یا سنگ ساختمانی باشد. عبارتی دیگر، تخریب سنگ در چرخه‌های انجماد-ذوب مشکل اصلی در بسیاری از پروژه‌های مهندسی از قبیل جاده‌ها، مصالح ساختمانی، راه‌آهن و مسیر لوله‌ها در مناطق سردسیر است (گروسی و همکاران، ۲۰۰۷؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ بابازاده، ۱۳۹۵). هوازدهی ناشی از فرآیند انجماد-ذوب یکی از مهم‌ترین عوامل در تخریب سنگ‌ها در مناطقی است که دما به طور متناوب در اطراف نقطه انجماد در نوسان است (ماتسوکا و مورتون، ۲۰۰۸). هنگامی که دما به زیر نقطه انجماد می‌رسد، سنگ یخ زده و آب موجود در حفرات ریز آن در حدود ۹ درصد حجم اولیه خود انبساط پیدا می‌کند. بنابراین سنگ حاوی رطوبت تحت تنش‌های کششی داخلی ناشی از انتقال فاز از آب به یخ قرار می‌گیرند (وینکلر، ۱۹۶۸). این تنش‌ها متعاقباً در حین ذوب شدن یخ آزاد می‌شوند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، فشار هیدرواستاتیکی ناشی از انجماد در یک سیستم اشباع می‌تواند از ۲۰۰۰ psi در دمای ۱- درجه سانتی‌گراد تا ۳۰۰۰ psi در دمای ۲۲- درجه سانتی‌گراد باشد. این مقدار فشار بالاتر از مقاومت کششی همه انواع سنگ‌ها می‌باشد (لاینهارت، ۱۹۸۸). ملور (۱۹۷۰) با مطالعه سنگ‌هایی که اشباع کامل نبوده‌اند، نشان داده است که کرنش ناشی از انجماد در سنگ‌هایی که حداقل تا ۵۰٪ اشباع باشند، می‌تواند سبب رخداد ترک داخلی در سنگ شود. فوکودا (۱۹۸۳) مکانیزم این نوع ترک خوردن در داخل سنگ را تشریح نموده است.

در شرایط طبیعی، اکثر مواد با یک چرخه انجماد-ذوب متلاشی نمی‌شوند، اما بارگذاری متوالی ناشی از تکرار این چرخه، باعث تخریب مواد متخلخل می‌شود. به طور کلی، با توالی فرآیند انجماد و ذوب، با ایجاد ریز ترک‌ها در سنگ، تخلخل افزایش پیدا می‌کند (مارتینز و همکاران، ۲۰۱۳). افزایش تخلخل اثرات این فرآیند در آسیب سنگ را تشدید می‌کند و در نهایت سبب تخریب ساختار سنگ می‌شود.



شکل ۱. رابطه فشار هیدرواستاتیکی با کاهش دما در یک سیستم اشباع بسته (لاینها، ۱۹۸۸)

۲- مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه عموماً سنگ‌های حاوی حفره (سنگ‌های متخلخل) بیش‌ترین تاثیرپذیری را از شرایط محیطی دارند، در مطالعه حاضر جهت ارزیابی اثر چرخه انجماد و ذوب از سنگ تراورتن استفاده شد. در این راستا ابتدا مناسب بودن سنگ‌های انتخابی به عنوان سنگ ساختمانی از نظر خواص فیزیکی از جمله چگالی، درصد جذب آب و تخلخل و همچنین مقاومت خمشی مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه اثر چرخه یخبندان و ذوب بر روی خواص مکانیکی سنگ با استفاده از روش استاندارد ASTM-D5312 ارزیابی شد (۲۰۰۴). بدین منظور، قبل و بعد از چرخه‌های انجماد و ذوب از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی استفاده شد. در ادامه روش آماده‌سازی و مشخصات نمونه‌ها و همچنین آزمایش‌های انجام شده شرح داده شده است.

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

بیش‌ترین ذخائر تراورتن کشور در مناطق خضراباد یزد، محلات، آذرشهر، شمال سیرجان، شمال تکاب و جنوب انار قرار دارد. در تحقیق حاضر جهت ارزیابی اثر چرخه انجماد و ذوب بر خواص مکانیکی سنگ تراورتن، نمونه‌های

لازم از سنگ تراورتن محلات تهیه شد. موقعیت محل نمونه‌برداری در ۵ کیلومتری جنوب غرب شهر محلات و در مختصات با طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲۴ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۰ دقیقه واقع شده است. بخشی از بلوک‌های تهیه شده جهت مغزه‌گیری در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای تعیین خواص فیزیکی سنگ تراورتن، ۵ نمونه استوانه‌ای با قطر ۵۴ میلی‌متر از بلوک‌های موجود مغزه‌گیری شد. جهت انجام آزمایش‌های مقاومت خمشی، مطابق با استاندارد ملی ISIRI-8229 نمونه‌هایی با ابعاد ۶۹×۱۰۱×۵۰ میلی‌متر تهیه شد (شکل ۳). جهت تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها مطابق با استاندارد ISRM تعداد ۱۰ نمونه استوانه‌ای با قطر ۵۴ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر به کمک دستگاه مغزه‌گیر تهیه و با استفاده از دستگاه برش و ساب، انتهای نمونه‌ها مطابق با الزامات استاندارد آماده‌سازی شد (شکل ۴) (اولسای و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین جهت تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی) تعداد ۱۰ نمونه دیسکی با قطر ۵۴ میلی‌متر و ضخامت ۳۲ الی ۳۵ میلی‌متر تهیه شد.



شکل ۲. نمونه‌هایی از بلوک‌های سنگ تراورتن محلات



شکل ۳. نمونه‌های مکعب مستطیل تهیه شده جهت انجام آزمایش‌های خمش



شکل ۴. بخشی از نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده جهت انجام آزمایش‌های طراحی شده

نمونه‌ها قبل و بعد از ۱۰ چرخه انجماد-ذوب مطابق با استاندارد ISRM انجام شد (اولسای و همکاران، ۲۰۰۷). در ادامه روش انجام هر یک آزمایش‌های مذکور ارائه شده است.

۲-۲-۱- آزمایش‌های ارزیابی کیفیت سنگ تراورتن سنگ تراورتن مورد استفاده در ساختمان باید سالم، بادوام، عاری از خرده‌های سنگ، ترک، رگه‌های باز، حفره‌ها یا دیگر نواقصی باشد که ممکن است به انسجام ساختاری آن آسیب می‌رساند. در این راستا نیاز است سنگ تراورتن ساختمانی با الزامات و استانداردهای ارائه شده در استاندارد

۲-۲-۲- انجام آزمایش‌ها

قبل از ارزیابی اثر فرآیند انجماد-ذوب بر خواص مکانیکی سنگ تراورتن، ابتدا مناسب بودن نمونه‌های انتخابی به عنوان سنگ ساختمانی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور مشخصات فیزیکی نمونه‌ها شامل چگالی، درصد جذب رطوبت و تخلخل تعیین شد. همچنین آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ISIRI-8229 انجام شد. جهت ارزیابی اثر فرآیند انجماد و ذوب بر مشخصات مقاومتی سنگ تراورتن، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی بر روی

دقیقه سرد و سپس با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شدند. سپس نمونه‌ها به مدت بیش از ۴۸ ساعت در داخل آب غوطه‌ور شدند. بعد از اشباع نمونه‌ها با آب، نمونه‌ها از آب خارج و سطح آن‌ها به کمک پارچه نمدار خشک و مجدد به کمک ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شدند. در نهایت جهت تعیین حجم دقیق نمونه‌ها، وزن غوطه‌وری نمونه‌ها به کمک ترازوی ارشمیدس اندازه‌گیری شد. درصد جذب آب از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\text{درصد جذب آب} = \frac{B-A}{A} \times 100$$

که در آن، A: وزن آزمون خشک بر حسب گرم؛ B: وزن آزمون پس از غوطه‌وری بر حسب گرم. همچنین با توجه به اندازه‌گیری جرم خشک، جرم اشباع و جرم غوطه‌ور نمونه‌ها، مقدار تخلخل نمونه‌ها نیز تعیین شد.

ملی ISIRI 13247 مطابقت داشته باشد. بدین منظور و جهت ارزیابی سنگ تراورتن انتخابی، آزمایش‌های تعیین چگالی، درصد جذب آب و مقاومت خمشی بر روی نمونه‌ها انجام شده است.

الف- تعیین خواص فیزیکی

از جمله مهم‌ترین الزامات استاندارد ملی در زمینه خواص فیزیکی سنگ تراورتن ساختمانی، حداکثر درصد جذب آب (٪ ۲/۵) و حداقل چگالی لازم (2300 kg/m^3) می‌باشد. جهت تعیین خواص فیزیکی، از تعداد ۵ نمونه استفاده شد. مطابق با استاندارد ملی ISIRI ۵۶۹۹، بمنظور تعیین پارامترهای فوق‌الذکر، مغزه‌های تهیه شده ابتدا به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه خشک شدند (شکل ۵). بعد از خشک شدن کامل، نمونه‌ها در دمای اتاق و به مدت ۳۰



شکل ۵. عملیات تعیین خواص فیزیکی نمونه‌های تراورتن

شده است (شکل ۶). برای تعیین مقاومت خمشی سنگ، نیاز است حداقل ۵ نمونه از سنگ آزمایش شده و میانگین نتایج به عنوان مقاومت خمشی سنگ ارائه شود. در تحقیق حاضر جهت افزایش دقت با توجه تغییرپذیری ذاتی خواص سنگ تراورتن از ۱۰ نمونه جهت تعیین مقاومت خمشی استفاده شد. نمونه‌های تهیه شده دارای عرض ۱۰۱ میلی‌متر، ضخامت ۶۹ میلی‌متر و طول ۵۰۰ میلی‌متر بوده‌اند. دهانه آزمون برابر با ۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. قبل از انجام آزمایش نیاز است تا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ خشک شده و سپس از داخل گرمکن خارج و قبل از آزمایش در دمای اتاق سرد شوند. بعد از انجام مراحل فوق‌الذکر، آزمایش استاندارد مقاومت خمشی انجام و مقاومت خمشی نمونه‌ها از رابطه زیر تعیین شد:

ب- تعیین خواص مکانیکی

مقاومت خمشی یکی از مهم‌ترین خواص مکانیکی است که در کاربرد سنگ به عنوان مصالح مهندسی مورد توجه قرار می‌گیرد. بطوریکه در استاندارد ملی ISIRI 13247، حداقل مقاومت خمشی لازم برای سنگ تراورتن ساختمانی برابر با ۳/۴ مگاپاسکال اعلام شده است. در این راستا جهت ارزیابی کیفیت سنگ تراورتن تهیه شده جهت کاربرد مصالح مهندسی، در این مرحله مقاومت خمشی آن‌ها تعیین شد. جهت تعیین مقاومت خمشی سنگ مورد مطالعه، از استاندارد ملی ایران ISIRI-8229 استفاده شد. استاندارد مذکور بر اساس استاندارد ASTM C880/C880M تدوین شده است. مطابق با استانداردهای فوق‌الذکر، جهت انجام آزمایش مقاومت خمشی از روش بارگذاری چهارنقطه‌ای بر روی نمونه‌های بلوکی استفاده

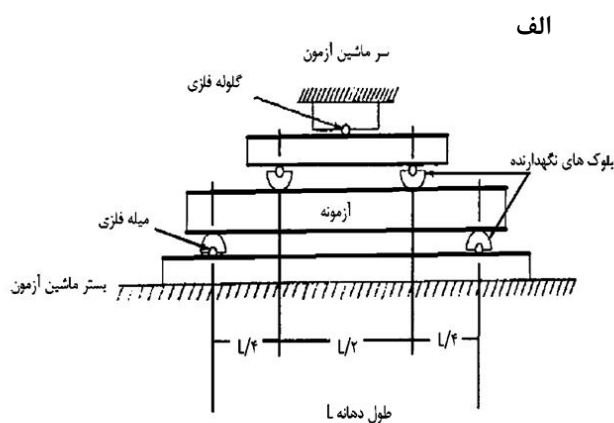
استفاده می‌شود. در تعیین شاخص شدت انجماد-ذوب، علاوه بر تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب سالانه در جغرافیای مورد نظر، میزان رطوبت، شدت و دمای مرتبط با هر چرخه انجماد-ذوب در نظر گرفته می‌شود. بنابراین عدد شاخص شدت انجماد-ذوب در هر منطقه، پیش‌بینی کننده تعداد چرخه انجماد-ذوب سالانه نبوده بلکه بیشتر نشان‌دهنده شدت فرایند انجماد-ذوب در آن منطقه جغرافیایی می‌باشد. در نتیجه تعداد چرخه لازم برای انجام آزمایش عدد ثابتی نبوده و متناسب با شاخص شدت چرخه انجماد-ذوب منطقه مورد نظر تغییر می‌کند. به عنوان نمونه در شکل ۷، بر اساس داده‌های آب هوایی، نقشه توزیع جغرافیایی شاخص شدت انجماد-ذوب برای امریکا توسط آژانس ملی اقیانوسی و جوی این کشور (NOAA) تهیه شده است.

$$\sigma = \frac{3WL}{4bd^2}$$

که در آن W حداکثر بار بر حسب نیوتن، L دهانه نمونه بر حسب میلی‌متر، b عرض نمونه بر حسب میلی‌متر و d ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر می‌باشد. در این حالت مقاومت خمشی بر اساس مگاپاسکال بدست می‌آید.

۲-۲-۲- آزمایش‌های ارزیابی اثر چرخه انجماد و ذوب

برای تعداد چرخه در آزمایش انجماد و ذوب سنگ، عدد معینی در استاندارد ASTM D5312 مشخص نشده است (ASTM D 5312 2004). مطابق با استاندارد مذکور، تعداد چرخه انجماد و ذوب در آزمایش ارزیابی دوام سنگ در مقابل یخبندان متناسب با منطقه مورد مطالعه تعیین می‌شود. در این راستا از شاخص شدت انجماد-ذوب



شکل ۶. الف- روش آزمایش خمش سنگ ساختمانی (ISIRI-8229) و ب- قرارگیری نمونه در دستگاه آزمایش خمش ۴ نقطه



شکل ۷. نقشه خطوط هم‌تراز شاخص شدت انجماد-ذوب (ASTM D 5312 2004)

قرار می‌گیرد. زمان لازم برای فرآیند ذوب در دمای مذکور باید حداقل ۸ ساعت بوده و در عین حال نباید بیشتر از ۱۲ ساعت بشود. در این مرحله فرآیند کامل ذوب بر روی نمونه‌ها انجام شد. در طی مدت ذوب، نمونه‌ها در داخل ظرف باقی مانده و بعد از طی شدن این زمان، مجدداً داخل ظرف با آب پر شده و نمونه‌ها مستغرق می‌شوند و چرخه انجماد و ذوب مجدداً با مراحل‌ی که در بالا توضیح داده شد، به تعداد ۱۰ چرخه تکرار شد.

بعد از ۱۰ چرخه انجماد و ذوب، مجدداً مقاومت فشاری تک‌محوری پنج عدد از نمونه‌ها مطابق با استاندارد ISRM تعیین شد. در این آزمایش‌ها نیز مطابق با استاندارد مورد استفاده، از دستگاه دیجیتال ۲۰۰ تنی به همراه نشیمنگاه کروی استفاده شده است (شکل ۸).

ب- آزمایش مقاومت کششی

در فرایند یخبندان، ایجاد ترک در داخل سنگ نیازمند غلبه فشار هیدرواستاتیک ناشی از انجماد بر مقاومت کششی سنگ می‌باشد. بنابراین یکی از پارامترهای مهم جهت ارزیابی میزان اثر فرآیند یخبندان بر خواص مکانیکی سنگ، استفاده از مقاومت کششی آن می‌باشد. در تحقیق حاضر جهت ارزیابی اثر چرخه انجماد-ذوب بر مقاومت کششی سنگ، از آزمایش کششی غیرمستقیم (برزیلی) استفاده شد. جهت انجام این آزمایش، نمونه‌های دیسکی با قطر ۵۴ میلی‌متر و ضخامت ۳۲ الی ۳۵ میلی‌متر تهیه شد. تعداد نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش ۵ عدد بوده است. مطابق با استاندارد ابتدا آزمایش برزیلی مطابق با استاندارد ISRM بر روی بخشی از نمونه‌های دیسکی که در آزمایشگاه تحت چرخه انجماد و ذوب قرار نگرفته بودند انجام شد. سپس مابقی نمونه‌ها که ده چرخه انجماد و ذوب را تحمل کرده بودند، آزمایش شدند. شرایط انجام آزمایش برای هر دو دسته نمونه یکسان بوده است (شکل ۹). در شکل ۱۰ نمایی از نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش‌ها مقاومت فشاری تک‌محوری و آزمایش مقاومت کششی برزیلی نشان داده شده است. شکست رخ داده در نمونه‌ها دارای شرایط استاندارد آزمایش بوده است. بطوریکه در دیسک‌های آزمایش برزیلی شکستگی‌های قائم ایجاد شده است. همچنین در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری شکستگی‌ها به موازات محور بارگذاری رخ داده است. جهت اطمینان، یک نمونه بیشتر از تعداد مورد اشاره در استاندارد آزمایش شد.

همانطور که در این شکل مشخص است، این شاخص در امریکا بین ۵ تا ۵۵ تغییر می‌کند. در هر نقطه جغرافیایی، تعداد چرخه بر اساس نزدیک‌ترین خط تراز به نقطه مورد نظر انتخاب می‌شود. بعبارتی دیگر، تعداد چرخه لازم در آزمایش اثر انجماد-ذوب وابسته به شرایط منطقه مورد بررسی تعیین می‌شود. با عنایت به تغییرات گسترده‌ی آب و هوایی در گستره‌ی ایران، تهیه نقشه توزیع جغرافیایی شدت و فرکانس چرخه انجماد-ذوب برای کشور توسط ارگان‌های زیربسط، در ارزیابی امکان استفاده از سنگ در نقاط مختلف کشور لازم بوده و بسیار مفید خواهد بود. در تحقیق حاضر، اثر ۱۰ چرخه انجماد-ذوب بر روی خواص مکانیکی سنگ تراورتن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا، از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره و آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی) استفاده شده است.

الف- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)

جهت ارزیابی اثر چرخه انجماد و ذوب، از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قبل و بعد از چرخه انجماد و ذوب استفاده شد. بدین منظور قبل از چرخه انجماد و ذوب، مقاومت فشاری تک‌محوری پنج عدد از نمونه‌ها مطابق با استاندارد ISRM تعیین شد. در این راستا از دستگاه دیجیتال ۲۰۰ تنی به همراه نشیمنگاه کروی استاندارد جهت انجام آزمایش‌ها استفاده شد. چرخه انجماد و ذوب مطابق با استاندارد ASTM به روش زیر قابل انجام است. ابتدا در کف ظرفی که قرار است نمونه‌ها قرار گیرند، یک قطعه فرش و یا یک بافت مصنوعی قرار می‌گیرد. سپس نمونه‌ها تهیه شده بر روی آن گذاشته می‌شوند. سپس داخل ظرف با آب پر شده تا همه نمونه‌ها به حالت مستغرق قرار گیرند. نمونه‌ها در این حالت به مدت حداقل ۱۲ ساعت باقی می‌مانند. در تحقیق حاضر جهت اطمینان از اشباع شدن نمونه‌ها، این مدت ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. سپس آب داخل ظرف تا جایی خالی می‌شود که فقط قطعه فرش و یا بافت کف ظرف حالت غوطه‌ور داشته باشد. سپس ظرف به همراه نمونه‌ها در داخل فریزر قرار می‌گیرد. در این حالت نیاز است نمونه‌ها به مدت حداقل ۱۲ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد باقی بمانند. مطابق با استاندارد حد بالایی برای زمان انجماد وجود ندارد. در چرخه‌های انجماد و ذوب، حداقل زمان مورد نظر رعایت شد. بعد از طی شدن حداقل ۱۲ ساعت برای فرآیند انجماد، ظرف نمونه‌ها در داخل گرمکن در دمای ۳۲ درجه



شکل ۸. انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی مغزه‌ها



شکل ۹. انجام آزمایش مقاومت کششی برزبلی بر روی نمونه‌های دیسکی



شکل ۱۰. نمایی از نمونه‌های آزمایش شده

۳- ارائه نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی شامل چگالی خشک، درصد جذب آب و تخلخل در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که در این جدول ارائه شده است،

مقدار چگالی خشک نمونه‌های مورد استفاده در محدوده‌ی ۲/۳۲ تا ۲/۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار داشته و مقدار میانگین آن برابر با ۲/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. مقدار جذب رطوبت نمونه‌ها نیز در محدوده ۱/۹ تا ۲/۵

مگاپاسکال شده است. میانگین مقاومت خمشی نمونه‌ها برابر با ۸/۹ مگاپاسکال است. همانطور که قبلاً بیان شد، مطابق با استاندارد ملی ISIRI 13247، حداقل مقاومت خمشی لازم برای سنگ ساختمانی تراورتن برابر با ۳/۴ می‌باشد. بنابراین مقاومت خمشی نمونه‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین خواص مقاومت، در محدوده مورد قبول استاندارد قرار دارد.

درصد بوده و میانگین آن برابر با ۲/۲ درصد شده است. همچنین مقدار میانگین تخلخل نمونه‌ها برابر با ۵/۱ درصد تعیین شده است. از نتایج حاصل مشخص است که سنگ تراورتن مورد استفاده از نظر خواص فیزیکی با الزامات استاندارد ملی سنگ‌های ساختمانی تراورتن‌ها مطابقت دارد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. کمترین و بیشترین مقدار مقاومت خمشی نمونه‌ها بترتیب برابر با ۶/۵ و ۱۱/۴

جدول ۱. خواص فیزیکی تراورتن‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

مقادیر میانگین	شماره نمونه					واحد	نماد	پارامتر
	۵	۴	۳	۲	۱			
	۶۵۹/۴	۶۵۲/۶	۶۴۶/۸	۶۵۷/۸	۶۴۸/۸	gr	md	جرم خشک
	۶۷۲/۲	۶۶۶/۶	۶۶۱/۸	۶۷۰/۸	۶۶۴/۸	gr	msat	جرم اشباع
	۳۹۲/۲	۳۸۷/۶	۳۸۳/۸	۳۹۱/۶	۳۸۵/۴	gr	m _{sub}	جرم غوطه ور
۲/۳	۲/۳۶	۲/۳۴	۲/۳۳	۲/۳۶	۲/۳۲	gr/cm ³	p _d	چگالی خشک
۵/۱	۴/۵۷	۵/۰۲	۵/۴۰	۴/۶۶	۵/۷۳	%	n	تخلخل
۲/۲	۱/۹	۲/۱	۲/۳	۲	۲/۵	%	W	درصد جذب آب

جدول ۲. نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها

شماره نمونه										واحد	نماد	پارامتر
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱			
۱۴۰۱۸/۴	۱۱۴۱۷/۱	۱۲۸۶۲/۳	۱۴۵۹۶/۵	۱۳۰۰۶/۸	۱۰۱۱۶/۴	۸۳۸۲/۲	۹۵۳۸/۳	۱۰۸۳۹	۹۸۱۰	N	W	حداکثر بار
۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	mm	L	دهانه
۱۰۱/۱	۱۰۱/۱	۱۰۱/۱	۱۰۱/۱	۱۰۱/۱	۱۰۱/۱	۱۰۱/۱	۱۰۱/۱	۱۰۱/۱	۱۰۱/۱	mm	b	عرض
۶۹	۶۹	۶۹	۶۹	۶۹	۶۹	۶۹	۶۹	۶۹	۶۹	mm	d	ضخامت
۱۰/۹	۸/۹	۱۰	۱۱/۴	۱۰/۱	۷/۹	۶/۵	۷/۴	۸/۴	۷/۶	MPa	σ	مقاومت خمشی
۸/۹										MPa		میانگین مقاومت خمشی

شده است. همانطور که در این جدول آورده شده است، میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها بعد از طی چرخه‌های انجماد و ذوب به مقدار ۳۵/۶ مگاپاسکال کاهش یافته است. این مقدار کاهش معادل ۱۳/۶ درصد مقاومت اولیه نمونه‌ها است. همچنین بعد از هر چرخه انجماد و ذوب، نمونه‌ها بطور چشمی مورد بررسی قرار گرفتند. در طی چرخه‌ها تغییر ظاهری قابل توجهی از جمله پوسته پوسته شدن، ترک برداشتن و یا هر نوع تخریب دیگری مشاهده نشد. همچنین در طی این ۱۰ چرخه انجماد و ذوب، در وزن نمونه‌ها هیچ کاهش رخ نداد.

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌ها قبل از هرگونه عملیات چرخه انجماد و ذوب در جدول ۳ ارائه شده است. محدوده تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها مابین ۳۳ و ۵۰/۵ مگاپاسکال بوده است. همانطور که در این جدول مشخص است، میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط طبیعی برابر با ۴۱/۲ مگاپاسکال می‌باشد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها بعد از ۱۰ سیکل انجماد و ذوب در جدول ۴ ارائه شده است. کمترین و بیشترین مقدار مقاومت فشاری در این حالت به ترتیب برابر با ۳۰/۸ و ۴۰/۳ تعیین

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌ها قبل از چرخه انجماد و ذوب

شماره نمونه					واحد	نماد	پارامتر	
قبل از سیکل ذوب و یخبندان								
۵	۴	۳	۲	۱				
۷۵۵۳۷	۹۳۱۹۵	۸۸۲۹۰	۱۱۵۷۵۸	۹۹۰۸۱	N	F	نیروی شکست	آزمایش مقاومت فشاری
۵۴	۵۴	۵۴	۵۴	۵۴	mm	D	قطر نمونه	
۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	mm	L	طول نمونه	
۳۳	۴۰/۷	۳۸/۶	۵۰/۵	۴۳/۳	MPa	σ	مقاومت فشاری	
۴۱/۲					MPa		میانگین مقاومت فشاری	

جدول ۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌ها بعد از ده چرخه انجماد و ذوب

شماره نمونه					واحد	نماد	پارامتر	
بعد از ۱۰ سیکل ذوب و یخبندان								
۵	۴	۳	۲	۱				
۷۷۴۹۹	۸۸۲۹۰	۷۰۶۳۲	۹۲۲۱۴	۷۸۴۸۰	N	F	نیروی شکست	آزمایش مقاومت فشاری
۵۴	۵۴	۵۴	۵۴	۵۴	mm	D	قطر نمونه	
۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	mm	L	طول نمونه	
۳۳/۸	۳۸/۶	۳۰/۸	۴۰/۳	۳۴/۳	MPa	σ	مقاومت فشاری	
۳۵/۶					MPa		میانگین مقاومت فشاری	

در نتیجه بالا بودن مقدار سطح آزاد نمونه نسبت به کل حجم آن‌ها مربوط دانست. بطوریکه بعد از اشباع شدن نمونه و خروج از آب و قرار دادن نمونه‌ها در داخل یخچال، بخشی از سیال قبل از رخداد انجماد، از نمونه زهکشی شده است. این موضوع بخصوص در مورد سنگ تراورتن که دارای حفراتی با ابعاد قابل توجه می‌باشد و زهکشی راحت‌تر می‌تواند رخ دهد، موثرتر می‌باشد. با لحاظ کردن تاثیرپذیری مقاومت فشاری از تعداد ده چرخه انجماد و ذوب - بدون در نظر گرفتن نتایج آزمایش مقاومت کششی برزیلی به دلایلی که شرح داده شد استفاده از تراورتن‌های مورد آزمایش جهت کاربردهای بیرونی در مناطق سردسیر که چرخه‌های زیاد و شدید انجماد و ذوب را تحمل می‌کنند، پیشنهاد نمی‌شود. همچنین با توجه به حساسیت مشاهده شده در تراورتن‌ها نسبت به فرآیند انجماد و ذوب، پیشنهاد می‌شود قبل از استفاده از هر نوعی از تراورتن، دوام آن در مقابل فرسایش ناشی از انجماد و ذوب با استفاده از آزمایش‌های مناسب مورد ارزیابی قرار گیرد. در نهایت با توجه به مشاهدات صورت گرفته، بهتر است نمونه‌ها بعد از اشباع شدن و خروج از آب بلافاصله در داخل فریزر قرار گیرند. همچنین، پیشنهاد می‌شود قبل از خارج کردن نمونه‌ها از داخل آب و قرار دادن آن‌ها در داخل

نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی) نمونه‌ها قبل از چرخه‌های انجماد و ذوب در جدول ۵ نشان داده شده است. از داده‌های جدول مشخص است که میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها برابر با ۴/۴ مگاپاسکال شده است. این مقدار حدود یک دهم مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها می‌باشد. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی نمونه‌ها دیسکی بعد از اعمال ۱۰ چرخه ذوب و انجماد در جدول ۶ ارائه شده است. همانطور که در این جدول آورده شده است، میانگین مقاومت کششی بعد از آزمایش چرخه‌های انجماد و ذوب به ۴/۳ مگاپاسکال رسیده است. این مقدار کاهش معادل ۲/۲ درصد مقاومت کششی اولیه نمونه‌ها می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با ۱۰ چرخه انجماد و ذوب، مقدار مقاومت کششی سنگ‌ها چندان تحت تاثیر فرآیند انجماد و ذوب قرار نگرفته در حالی که مقاومت فشاری نمونه‌ها در این تعداد چرخه به مقدار قابل توجهی افت داشته است. با توجه به مکانیزم آسیب به سنگ در حین یخ بستن آب موجود در حفرات، انتظار می‌رود که مقاومت کششی نمونه‌ها بیشتر از مقاومت فشاری تحت تاثیر فرآیند انجماد-ذوب قرار بگیرند. علت کاهش کم مقاومت کششی را می‌توان کوچک بودن ابعاد نمونه‌های آزمایش برزیلی و

آب موجود در حفرات سنگ، امکان زهکش شدن آب از حفرات آن کاهش می‌یابد.

دستگاه، ابتدا دستگاه فریزر روشن شود و دمای آن به مقدار ۱۸- برسد و سپس نمونه از داخل آب خارج و در داخل دستگاه فریزر قرار گیرد. در این حالت به علت انجماد سریع

جدول ۵. نتایج آزمایش برزیلی نمونه‌ها قبل از چرخه انجماد و ذوب

شماره نمونه					واحد	نماد	پارامتر	
قبل از سیکل ذوب و یخبندان								
۵	۴	۳	۲	۱				
۱۱۳۸۹/۴	۹۹۱۷/۹	۱۶۱۵۷/۱	۱۵۰۴۸/۵	۱۱۳۸۹/۴	N	F	نیروی شکست	آزمایش
۵۴	۵۴	۵۴	۵۴	۵۴	mm	D	قطر نمونه	مقاومت
۳۲/۸	۳۳	۳۵	۳۴/۹	۳۴/۵	mm	t	ضخامت نمونه	کششی
۴/۱	۳/۵	۵/۴	۵/۱	۳/۹	Mpa	σ	مقاومت کششی برزیلی	
۴/۴					Mpa		مقاومت کششی میانگین	

جدول ۶. نتایج آزمایش برزیلی نمونه‌ها بعد از ده چرخه انجماد و ذوب

شماره نمونه					واحد	نماد	پارامتر	
بعد از ۱۰ سیکل ذوب و یخبندان								
۵	۴	۳	۲	۱				
۱۲۶۹۴/۱	۱۵۱۳۶/۸	۸۱۷۱/۷	۱۳۴۸۸/۸	۱۳۷۱۴/۴	N	F	نیروی شکست	آزمایش
۵۴	۵۴	۵۴	۵۴	۵۴	mm	D	قطر نمونه	مقاومت
۳۶/۲	۳۴/۷	۳۳/۷	۳۴	۳۵/۹	mm	t	ضخامت نمونه	کششی
۴/۱	۵/۱	۲/۹	۴/۷	۴/۵	Mpa	σ	مقاومت کششی برزیلی	
۴/۳					Mpa		میانگین مقاومت کششی	

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از تراورتن در کاربردهای بیرونی، دوام آن در مقابل چرخه انجماد-ذوب مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین نتایج آزمایش برزیلی نشان داد که مقاومت کششی نمونه‌ها بعد از چرخه‌های انجماد-ذوب حدود ۲/۲ درصد افت کرده است. بر اساس تجربیات و مشاهدات در حین آزمایش‌ها، جهت ارزیابی اثر فرآیند انجماد-ذوب بر مشخصات سنگ، پیشنهاد می‌شود تا جای ممکن دستگاه فریزر قبل از قرار دادن نمونه‌ها در داخل آن، به دمای ۱۸- رسیده باشد و نمونه‌ها بلافاصله بعد از خروج از آب در داخل دستگاه قرار گیرند تا فرآیند انجماد آن بلافاصله شروع شود. این امر سبب کاهش زهکشی محتوی رطوبت نمونه خواهد شد.

منابع

بابازاده، م.، قبادی، ر (۱۳۹۵) ارزیابی اثر هوازدگی نمک و ذوب-انجماد بر مقاومت و دوام‌پذیری ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی. مجله زمین‌شناسی مهندسی، شماره ۱، سال دهم، ص ۳۳۵۱-۳۳۷۲.

جهت بررسی اثر فرآیند انجماد-ذوب بر روی خواص مقاومتی سنگ تراورتن، نمونه سنگی از محلات انتخاب شد. ابتدا مشخصات فیزیکی و مقاومت خمشی سنگ تراورتن انتخابی تعیین شد. نتایج حاصل نشان داد مشخصات سنگ مورد استفاده در محدوده تعیین شده استاندارد ملی سنگ تراورتن ساختمانی قرار دارد. در ادامه نمونه‌های مورد استفاده تحت اثر ۱۰ چرخه انجماد-ذوب مطابق با روش استاندارد قرار گرفتند. جهت ارزیابی میزان اثر فرآیند انجماد-ذوب بر خواص مقاومتی تراورتن، از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی استفاده شد. با مقایسه مقامت‌های نمونه‌ها قبل از چرخه انجماد-ذوب و بعد از چرخه‌ها مشخص شد که مقاومت فشاری نمونه‌ها حدود ۱۳/۶ افت کرده است. این مقدار افت در طی ده چرخه عدد قابل توجهی بوده و نشانگر تاثیرپذیری تراورتن از فرآیند انجماد-ذوب است. علت این امر را می‌توان در حفرات نسبتاً بزرگ سنگ تراورتن دانست. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مناطق سردسیر، برای

- Tuff Due to Freeze-Thaw Action. *Cold Regions Science and Technology*, 38: 127–36.
- Deprez, M., Kock, M. T., Schutter, G. D., Cnudde, V (2020) A Review on Freeze-Thaw Action and Weathering of Rocks. *Earth-Science Reviews*, 203: 103-143.
- Fukuda, M (1983) The Pore Water Pressure Profile in Porous Rocks during Freezing. In Proc. 4th International Conformance on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 322–27.
- Grossi, C. M., Brimblecombe, P., Harris, I (2007) Predicting Long Term Freeze–Thaw Risks on Europe Built Heritage and Archaeological Sites in a Changing Climate. *Science of the Total Environment*, 377(2–3): 73–81.
- Hosseini, M., and Khodayari, A. R., (2019) Effect of Freeze-Thaw Cycle on Strength and Rock Strength Parameters (A Lushan Sandstone Case Study). *Journal of Mining and Environment*, 10: 57–70.
- Karaca, Z., Deliormanli, A. H., Elci, H., and Pamukcu, C (2010) Effect of freeze–thaw process on the abrasion loss value of stones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 7: 1207-1211.
- Lienhart, D. A (1988) The Geographic Distribution of Intensity and Frequency of Freeze-Thaw Cycles. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 25: 465–69.
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., Gomez-Heras, M., Marco-Castaño, L., García-del-Cura A (2013) Non-Linear Decay of Building Stones during Freeze–Thaw Weathering Processes. *Construction and Building Materials*, 38: 443–54.
- Matsuoka, N., and Murton, J (2008) Frost Weathering: Recent Advances and Future Directions. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19: 195–210
- Mellor, M (1970) 292 Phase Composition of Pore Water in Cold Rocks. Corps of Engineers, US Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Penttala, V., and Al-Neshawy, F (2002) Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles. *Cement and Concrete Research*, 32: 1407-1420.
- Proskin, S., Segó, D., and Alostaz, M (2010) Freeze–Thaw and Consolidation Tests on Suncor Mature Fine Tailings (MFT). *Cold Regions Science and Technology*, 63: 110–20.
- Ruedrich, J., and Siegesmund, S (2007) Salt and ice crystallisation in porous sandstones. *Environmental Geology*, 52: 225-249.
- Saad, A., Guédon, S., and Martineau, F (2010) Microstructural Weathering of Sedimentary Rocks by Freeze–Thaw Cycles: Experimental Study of State and Transfer Parameters. *Comptes Rendus Geoscience*, 342: 197–203
- حسینی، م.، احمدی، ا (۱۳۹۹) اثر دمای انجماد در فرآیند انجماد- ذوب بر خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ. مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۵ شماره ۲۹، ص ۱۲۲–۳۴.
- حسینی، م.، فخری، د (۱۳۹۷) اثر فرآیندهای یخبندان- ذوب و گرمایش- سرمایش بر نفوذپذیری ماسه‌سنگ لوشان. مجله مهندسی منابع معدنی، شماره ۴، سال سوم، ص ۷۵–۹۱.
- احمدی، ر (۱۳۹۷) کنترل کیفیت بلوک‌های سنگ ساختمانی با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR). نشریه زمین‌شناسی مهندسی، شماره ۱، سال دوازدهم، ص ۱–۲۶.
- موسوی، ز.، توکلی، ح.، معارف‌وند، پ.، رضائی، م (۱۳۹۹) ارزیابی تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر روی سرعت امواج فشاری و چگالی سنگ شیست (مطالعه موردی: معدن انگوران). مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱، سال دهم، ص ۱۵–۳۰.
- موسوی، ز.، توکلی، ح.، معارف‌وند، پ.، رضائی، م (۱۳۹۸) ارزیابی تغییرات چگالی و شاخص دوام سنگ شیست تحت تأثیر سیکل‌های انجماد-ذوب. مجله مهندسی معدن، شماره ۴۵، سال چهاردهم، ص ۱۲–۱.
- عبدی، ی.، خانلری، خ (۱۳۹۷) بررسی تأثیر انجماد- ذوب بر ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی بر اساس اندازه‌گیری سرعت سیر موج و تخلخل. مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۲، شماره ۲۳، ص ۷۵–۹۱.
- Altindag, R., Alyildiz, I. S., and Onargan, T (2004) Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze-thaw cycles. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 41: 1023-1028.
- ASTM D 5312 (2004) Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Freezing and Thawing Conditions.
- Beier, N. A., and Segó, D. C (2009) Cyclic Freeze–Thaw to Enhance the Stability of Coal Tailings. *Cold Regions Science and Technology*, 55: 278–85.
- Bellanger, M., Homand, H., Remy, J. M (1993) Water Behaviour in Limestones as a Function of Pores Structure: Application to Frost Resistance of Some Lorraine Limestones. *Engineering Geology*, 36: 99–108.
- Binal, A., Kasapoglu, K. E., Sensogut, C., and Ozkan, I (2002) Effects of freezing and thawing process on physical and mechanical properties of Selime ignimbrite outcrops in Aksaray–Ihlara valley. In VI Regional Rock Mechanics Symposium. Turkish National Society for Rock Mechanics, Seljuk University, Konya, 189-196.
- Chen, T. C., Yeung, M. R., Mori, N (2004) Effect of Water Saturation on Deterioration of Welded

- Takarli, M., Prince, V., and Siddique, R (2008) Damage in Granite under Heating/Cooling Cycles and Water Freeze–Thaw Condition. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45: 1164–75.
- Tan, X., Chen, W., Yang, J., and Cao, J (2011) Laboratory Investigations on the Mechanical Properties Degradation of Granite under Freeze–Thaw Cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 68: 130–38.
- Ulusay, R., and Hudson, J. A (2007) Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods. *International Society for Rock Mechanics*: 628.
- Vandemeulebroucke, I., et al (2019) Does Historic Construction Suffer or Benefit from the Urban Heat Island Effect in Ghent and Global Warming across Europe?. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46: 1032–42.
- Vereecken, E., Gelder, L. V., Janssen, H., and Roels, S (2015) Interior Insulation for Wall Retrofitting–A Probabilistic Analysis of Energy Savings and Hygrothermal Risks. *Energy and Buildings*, 89: 231–44.
- Wang, P., Xu, J., Fang, X., Wang, P., Zheng, G., and Wen, M (2017) Ultrasonic time-frequency method to evaluate the deterioration properties of rock suffered from freeze-thaw weathering. *Cold Regions Science and Technology*, 143: 13–22.
- Winkler, E. M (1968) Frost Damage to Stone and Concrete: Geological Considerations. *Engineering Geology*, 2: 315–23.
- Yavuz, H., Altindag, Saracl, S., Ugur, I., Sengun, N (2006) Estimating the Index Properties of Deteriorated Carbonate Rocks Due to Freeze–Thaw and Thermal Shock Weathering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43: 767–75.
- Zhang, Sh., Lai, Y., Zhang, X., Pu, Y., Yu, W (2004) Study on the Damage Propagation of Surrounding Rock from a Cold-Region Tunnel under Freeze–Thaw Cycle Condition. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19: 295–302.

Evaluation of the effect of freeze–thaw cycles on mechanical properties of porous rocks: A case study of Mahallat Travertine

H. Atapour^{*1} and R. Rafiei²

1- Assist. Prof., Dept., of Geomechanics Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- M. Sc., student. Dept., of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

*h.atapour@arakut.ac.ir

Received: 2022/2/7 Accepted: 2022/8/3

Abstract

The durability of rocks under variable climatic conditions is a determining factor in the use of natural rocks as building stones. Severe climate change can damage the rock structure. Therefore, to use stones as engineering and construction materials, it is necessary to evaluate their stability to different cycles of heating and cooling, wetting and drying, as well as freezing and thawing. Due to the diversity of climatic conditions in Iran, which has cold and hot, dry, and coastal areas, the freeze-thawing cycles of water is one of the most important environmental factors that can cause erosion and change the physical and mechanical properties of rocks. In the present study, the aim is to evaluate the strength changes of travertine samples as porous rock due to freezing and thawing cycles. Changes in compressive and tensile strength of the samples were determined during 10 freezing and thawing cycles. The results showed that the compressive strength of the samples was reduced by about 13.6% after freezing-thawing cycles. Also, the tensile strength of the samples has decreased by about 2.2%. Considerable reduction of compressive strength of samples in 10 cycles indicates the significant effect of freeze-thaw cycles on travertine rock.

Keywords: Building stone, Freeze-thaw cycle, Travertine rock, Erosion, mechanical properties.