چهل و دومین گردهمایی (همایش) ملی
علوم زمین
The 42nd National Geosciences Congress
www.geoconf.ir

ارزیابی دوام آجر در مقابل فرآیند یخبندان با اندازه‌گیری برخی خصوصیات فیزیکی و مقاومتی آن

کیمیا رشنویی[۱]، امین جمشیدی[۲]، رسول اجل لوئیان[۳]، David Martín Freire-Lista[۴]

دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد E-Mail; Rashnooei.k@gmail.com

دانشیار زمین شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد E-Mail; Jamshidi.am@lu.ac.ir

استاد زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان E-mail; rasajl@sci.ui.ac.ir

Associate Professor, Trás-os-Montes e Alto Douro University (UTAD), Quinta de Prados, 5001-801, Vila Real, Portugal E-Mail; davidfreire@utad.pt

چکیده

آثار باستانی هر کشور، نشان‌دهنده تاریخچه و تمدن آن سرزمین می‌باشند و میراثی هستند که باید در حفظ و نگهداری از آن‌ها کوشا باشیم. از جمله کارهایی که می‌توان برای نگهداری از آن‌ها انجام داد، استفاده از آجرهایی با ویژگی‌های مناسب برای مرمت و بازسازی آن‌ها می‌باشد. این آجر باید دارای مقاومت و دوام مناسبی باشد و در مقابل عوامل زوال مانند انجماد و آب شدن کمتر دچار تخریب و زوال شود. در این پژوهش به بررسی تأثیر چرخه‌های انجماد و آب شدن بر خصوصیات فیزیکی (تخلخل و جذب آب) و مکانیکی (مقاومت کششی برزیلی) آجر استفاده شده در مرمت بناهای باستانی در طی ۱۰ چرخه پرداخته شده است و پس از ۱۰ چرخه آزمون‌های فوق بر روی آجر انجام شده است، همچنین فرآیند آب شدن در محلول انجماد و آب شدن با اسیدیته ۵ و آب مقطر انجام شده است. نتایج نشان داد که پس از گذشت ۱۰ چرخه‌ی انجماد و آب شدن، میزان مقاومت کششی برزیلی در هر دو محلول دارای روندی کاهشی می‌باشد، همچنین تخلخل و جذب آب روندی افزایشی را طی می‌کنند.

کلید واژه‌ها : آجر، انجماد و آب شدن، خواص فیزیکی و مکانیکی، زوال

۱. مقدمه

میزان دوام و مقاومت سنگ‌ها و آجرها در برابر شرایط متفاوت اقلیمی به خصوص در مناطق سردسیر که احتمال انجماد آن‌ها وجود دارد، یک عامل تعیین کننده برای استفاده از آن‌ها در احداث بناها و همچنین بازسازی و مرمت بناهای باستانی می‌باشد. پژوهشگران گذشته به بررسی تاثیرات مختلف چرخه‌های انجماد و آب شدن بر روی سنگ‌های متفاوت پرداخته‌اند.

در طی پژوهشی ارزیابی دوام طولانی مدت ۲۲ نوع کربناته ایران بعد از چرخه‌های ذوب و انجماد با استفاده از روش CART پرداخته شده است. نتایج نشان داد که تخلخل اثرگذارترین پارامتر بر تخریب ناشی از ذوب و انجماد بوده است، همچنین با افزایش تخلخل، ثابت تخریب افزایش می‌یابد که بیان‌گر آن است که سنگ‌های متخلخل در چرخه‌های ذوب و انجماد سریع‌تر تخریب می‌شوند[1]. مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P از ویژگی‌های مکانیکی مهم به کار برده شده در ارزیابی دوام سنگ‌ها در مناطق سردسیر می‌باشند. از آن‌جایی که تعیین این ویژگی‌ها در طی آزمایش یخبندان بسیار وقت‌گیر و طاقت فرساست می‌توان از روابط آماری برای برآورد آن‌ها استفاده کرد. در طی پژوهشی که انجام شده‌است، یک مدل آماری چند متغیره برای ۱۵ نمونه تراورتن معرفی شده است که می‌تواند موارد ذکر شده را در هر چرخه از آزمایش یخبندان برآورد کند. در این مدل ویژگی‌های مکانیکی پس از چرخه‌های یخبندان به عنوان متغیر وابسته و همان ویژگی‌های مکانیکی در شرایط بکر، جذب آب و تعداد چرخه آزمایش یخبندان به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده اند. نتایج آزمون‌های آماری و استفاده از داده‌های دیگر پژوهشگران نشان می‌دهد که مدل ارائه شده دقت و درستی قابل قبولی در برآورد مقاومت فشاری تک محوری، کششی برزیلی و سرعت موج P در چرخه‌های یخبندان و در نتیجه دوام نمونه‌ها دارد[2]. مطالعه‌ی تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب و دما در فرآیند گرمایش-سرمایش روی نفوذپذیری ماسه سنگ منطقه لوشان حاکی از آن است که با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب میزان نفوذپذیری بعد از یک چرخه کاهش پیدا کرده و این کاهش تا ۵ چرخه ادامه می‌یابد. در ۱۰ سیکل نفوذپذیری اندکی افزایش ولی در ۲۰ سیکل بطور چشمگیری قابل مشاهده است. با افزایش دما در مرحله گرمایش فرآیند گرمایش-سرمایش نفوذپذیری ماسه سنگ در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش و سپس افزایش می‌یابد[3]. اثر چرخه‌های انجماد وذوب بر ویژگی‌های مقاومتی سنگ تراورتن محلات در طی ۱۰ چرخه بررسی شده است. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از چرخه‌های انجماد وذوب حدود ۱۳/۶درصد و مقاومت کششی حدود ۲/۲ درصد کاهش یافته است و علت این امر را می‌توان وجود حفرات نسبتاً بزرگ تراورتن دانست[4]. خواص فیزیکی و مکانیکی چهار واحد لیتولوژی قبل و بعد از ۶۰ چرخه‌ی انجماد و ذوب شدن برای مطالعه اثرات هوازدگی روی سنگ‌های آهک استان گیلان مورد ارزیابی قرار داده شده است. این مطالعه نشان داد که آزمون انجماد-ذوب باعث ایجاد ریزترک و شکستگی در داخل سنگ به عنوان عوامل اولیه افزایش سطح تماس در فرآیند انحلال است و افزایش Dn (متغیر آسیب)، تخلخل، جذب آب و کاهش سرعت موج P پس

از ۶۰ چرخه این نتیجه را تایید می‌کند[5]. علت تاثیر فرایند یخبندان- ذوب بر روی سنگ‌ها را وجود ترک‌ها و حفرات داخل سنگ می داند، در اقلیم‌های سردسیر هنگامی‌که دمای هوا به صفر می‌رسد، آب موجود در حفرات منجمد شده و ۹٪ افزایش حجم پیدا می‌کند که باعث اعمال فشار به حفرات و ریزترک‌های موجود در سنگ می‌شود و باعث توسعه‌ی حفرات و ترک‌های موجود و ایجاد ترک‌های جدید در سنگ می‌شود[6]. مدل‌های آماری برای پیش‌بینی خواص مکانیکی سنگ‌های ساختمانی تراورتن پس از انجام آزمایش انجماد-ذوب در این پژوهش بیان شده است. برای این منظور ۱۲ نمونه تراورتن انتخاب و خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها شامل چگالی، جذب آب، مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج P در طی چرخه۶۰ تعیین شد. سپس بعد از تجزیه و تحلیل داده‌ها مدل‌های آماری برای پیش‌بینی خواص مکانیکی نمونه‌های تخریب شده پس از آزمون‌های انجماد-ذوب پیشنهاد شد که در آن‌ها ویژگی مکانیکی نمونه‌ها پس از انجماد-ذوب، به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شده است (وابسته به متغیرهای مستقل شامل ویژگی‌های مکانیکی در شرایط بکر و جذب آب نمونه‌ها). این مدل‌ها از دقت بسیار خوبی برخوردارند[7]. تأثیر ۳۰۰ چرخه‌ی انجماد و ذوب روی خواص فیزیکی و مکانیکی سه نوع سنگ گرانیتی الوند در غرب ایران در طی این مطالعه پرداخته شده‌است. با افزایش تعداد چرخه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، چگالی خشک و سرعت موج P کاهش یافته درحالی‌که تخلخل و جذب آب افزایش یافته است. سرعت موج P و مقاومت کششی نیز به‌عنوان بهترین شاخص برای ارزیابی اثرات چرخه‌های انجماد و ذوب بر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های گرانیتی مورد مطالعه پیشنهاد شده است[8]. اثر درجات مختلف اسیدیته اسید سولفوریک بر خواص فیزیکی و مکانیکی تراورتن، از معدن آتشکوه محلات (مرکز ایران)، از جمله تخلخل، شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی در طی ۳۰ چرخه و با اسیدیته‌های ۲، ۳/۵ و ۵ مورد بررسی قرار داده شده است و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن بعد از ۵ چرخه اندازه گیری شده است. پس از هر ۵ چرخه، پارامترهای ثابت فروپاشی و نیمه عمر از منحنی‌های رگرسیون به دست آورده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش چرخه‌های تر و خشک شدن، تخلخل افزایش یافت در حالی‌که شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی کاهش یافتند، همچنین دوام نمونه پس از برهم‌کنش محلول اسید سولفوریک با مقادیر مختلف اسیدیته تغییر می‌کند[9]. در این پژوهش به بررسی تعیین میزان مقاومت سنگ شیست در معدن انگوران پس از ۷۵ چرخه‌ی انجماد و ذوب در مقابل عوامل هوازدگی با استفاده از آزمایش تراکم تک‌محوری می‌پردازند. نتایج SEM نشان داد که بعد از ۷۵ چرخه، شکاف‌هایی در سنگ‌ها ایجاد و تخلخل آن‌ها افزایش پیدا کرده و مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته کاهش یافته و همچنین نسبت پواسون نیز با افزایش درجه هوازدگی افزایش یافته است[10].

۲. مواد و روش ها

نمونه آجر استفاده شده در پژوهش حاضر، آجرهایی هستند که از آن‌ها برای مرمت آثار باستانی استفاده می‌شود.

بلوک‌های استفاده شده دارای ابعاد تقریبی ۲۰*۲۰*۴/۴ سانتی‌متر بودند، پس از مغزه‌گیری از این بلوک‌ها و برش نمونه‌های استوانه‌ای شکل، آماده شروع فرآیندهای انجماد و آب شدن می‌باشند.

مغزه‌های استفاده شده برای اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی آجر یعنی آزمون مقاومت برزیلی دارای ارتفاع ۴۴ میلی‌متر و قطر ۴۲ میلی‌متر می‌باشند، همچنین برای اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی آجر که شامل تخلخل و میزان جذب آب می‌باشد از نمونه‌های مکعبی به ابعاد تقریبی ۴۰*۴۰*۴۰ میلی‌متر استفاده شده است. نمونه‌ها بر اساس روش پیشنهادی ISRM تهیه شده اند.

۱،۲. مطالعات کانی شناسی

برای بررسی ترکیب کانی شناسی آجر از مقاطع نازک میکروسکوپی و همچنین تحلیل تجزیه شیمیایی (XRD) استفاده شده است. نتایج مطالعات کانی شناسی نشان می‌دهد که عمده کانی‌های تشکیل دهنده آجر شامل کلسیت، کوارتز، مونت موریلونیت، آنورتیت، ایلیت، کلریت و کائولینیت می‌باشند. اکثر این کانی‌ها، کانی‌های رسی با خاصیت تورمی و جذب آب بالا هستند.

۲،۲.چرخه های انجماد و آب شدن

جهت انجام چرخه‌های انجماد و آب شدن ابتدا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت بطور جداگانه درون آب مقطر و محلول انجماد و آب شدن با اسیدیته ۵ قرار داده شده‌اند، سپس برای دوره انجماد به مدت ۱۲ ساعت و با دمای ۲۲- درجه سانتی‌گراد درون فریزر قرار داده شده اند، همچنین برای دوره ذوب به مدت ۱۲ساعت درون استخر آب با دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده اند، به این ترتیب هر چرخه انجماد و آب شدن ۲۴ ساعت زمان می‌برد.

۳،۲.آزمون های انجام شده

خصوصیات مکانیکی یعنی مقاومت کششی برزیلی قبل از شروع چرخه‌ها و پس از ۱۰ چرخه روی نمونه‌ها اعمال شده است.

۴،۲.آزمون برزیلی

جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها از آزمایش برزیلی استفاده شده است که از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود. در این رابطه P بار در لحظه شکست (KN)، D قطر نمونه (mm)، T ضخامت نمونه(mm) و BTS مقاومت کششی (MPa) است. برای انجام این آزمون از ۶ نمونه استوانه‌ای به ابعاد گفته شده استفاده شده است.

$$\text{BTS} = \frac{2P}{\Pi TD} \qquad \text{رابطه (۱)}$$

۵،۲. اندازه‌گیری تخلخل و جذب آب

جهت تعیین خصوصیات فیزیکی آجر که شامل تخلخل و قابلیت جذب آب می‌باشد، از سه نمونه مکعبی شکل آجر استفاده شده است و این خصوصیات در حالت بکر و بعد از ۱۰ چرخه به روش غوطه‌ور سازی اندازه‌گیری شده است.

برای اندازه‌گیری تخلخل آجر از رابطه (۲) استفاده شده است. در این رابطه n میزان تخلخل نمونه بر حسب درصد، V_v حجم فضاهای خالی نمونه (g/cm^3) و V حجم کل نمونه (g/cm^3) می‌باشد.

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100$$ رابطه (۲)

همچنین جهت اندازه‌گیری میزان جذب آب نمونه رابطه (۳) مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این رابطه m_{sat} جرم اشباع (g)، m_s جرم خشک (g) و ω میزان جذب آب (درصد رطوبت) بر حسب درصد می‌باشد.

$$\omega = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100$$ رابطه (۳)

۳.تحلیل نتایج

تخلخل آجر در حالت بکر به طور میانگین برابر با ۳۴/۴۴ درصد می‌باشد که بر اساس طبقه بندی آنون (۱۹۷۹) در رده "تخلخل خیلی زیاد" (بزرگتر از ۳۰ درصد) قرار می‌گیرد [5]. نتایج نشان می‌دهد که جذب آب آجر به طور میانگین برابر با ۲۱/۶۶ درصد می‌باشد. همچنین در حالت بکر بطور میانگین، مقاومت کششی برزیلی برابر با ۲/۶۷ مگاپاسکال می‌باشد.

پس از ۱۰ چرخه میزان تخلخل برای اسیدیته ۵ به میزان ۴۰/۲۱درصد و برای آب مقطر به میزان ۳۸/۲۶ درصد رسیده است، همچنین میزان جذب آب برای اسیدیته ۵ به میزان ۲۵/۳۰ درصد و برای آب مقطر به میزان ۲۳/۹۱ درصد اندازه گیری شده است. همچنین پس از گذشت ۱۰چرخه، مقاومت برزیلی برای اسیدیته ۵ به میزان ۲/۰۷ مگاپاسکال و برای آب مقطر به میزان ۲/۵۸ مگاپاسکال رسیده است.

علت تأثیر فرآیند انجماد-ذوب بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ وجود ترک‌ها و حفرات داخل سنگ می‌باشد در اقلیم‌های سردسیر هنگامی که دمای هوا به صفر می‌رسد آب موجود در حفرات منجمد شده ۹٪ افزایش حجم پیدا می‌کند که باعث اعمال فشار به حفرات و ریزترک‌های موجود در سنگ می‌شود و باعث توسعه‌ی حفرات و ترک‌های موجود و ایجاد ترک‌های جدید در سنگ می‌شود. [2]

میزان خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در حالت بکر و پس از ۱۰ چرخه در جدول‌ها و نمودارهای زیر نمایش داده شده است.

جدول (۱)

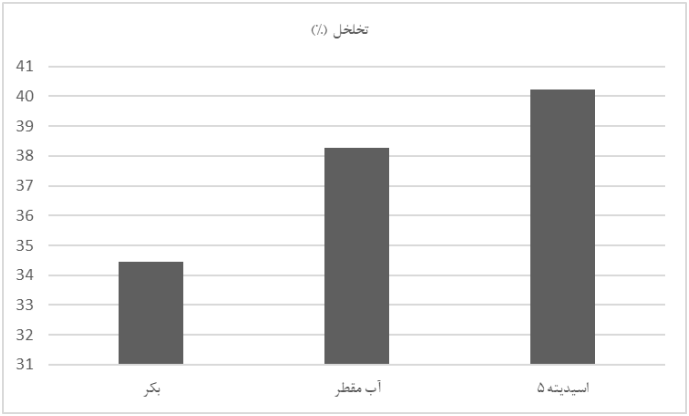
خصوصیات مکانیکی و فیزیکی آجر در حالت بکر	
مقاومت برزیلی (Mpa)	۲/۶۷
تخلخل(%)	۳۴/۴۴
جذب آب(%)	۲۱/۶۶

جدول (۲)

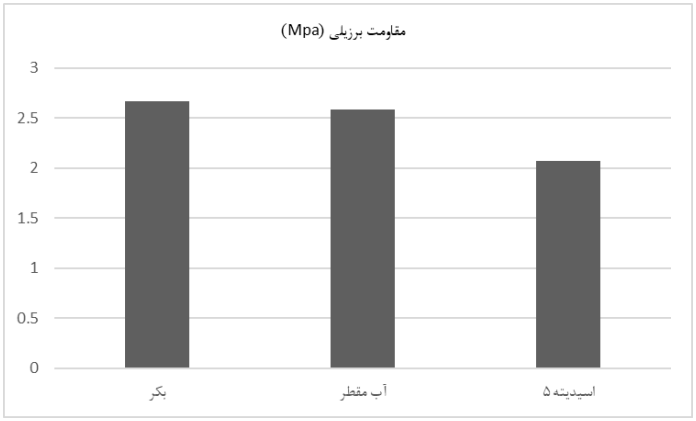
خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بعد از ۱۰ چرخه در آب مقطر	
مقاومت برزیلی (Mpa)	۲/۵۸
تخلخل(%)	۳۸/۲۶
جذب آب(%)	۲۳/۹۱

جدول (۳)

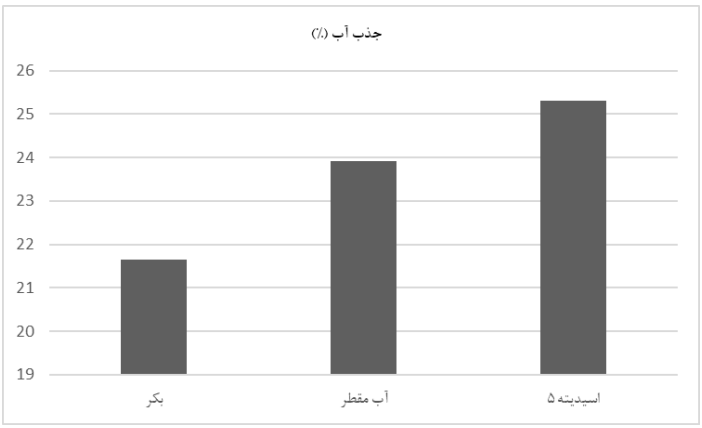
خصوصیات مکانیکی و فیزیکی آجر بعد از ۱۰ چرخه در اسیدیته ۵	
مقاومت برزیلی (Mpa)	۲/۰۷
تخلخل(%)	۴۰/۲۱
جذب آب(%)	۲۵/۳۰



نمودار (۱)



نمودار (۲)



نمودار (۳)

۴.نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر چرخه‌های انجماد و آب شدن بر خصوصیات فیزیکی آجر که شامل تخلخل و جذب آب می‌باشند و همچنین خصوصیات مکانیکی آجر که شامل مقاومت کششی برزیلی می‌باشد در محلول با اسیدیته ۵ و آب مقطر بررسی شده است.

طبق بررسی‌ها و اعداد بدست آمده از آزمون‌های انجام شده، خصوصیات فیزیکی آجر در هر دو محلول، پس از ۱۰ چرخه دارای روند افزایشی نسبت به حالت بکر هستند.

همچنین خصوصیات مکانیکی آجر، یعنی مقاومت کششی برزیلی در هر دو محلول دارای روندی کاهشی می‌باشد که نشان دهنده‌ی شروع زوال و تخریب نمونه‌های آجر استفاده شده هستند.

نمونه‌های آجر موجود در محلول با اسیدیته ۵ دارای زوال و تخریب بیشتری نسبت به نمونه‌های موجود در آب مقطر می‌باشند.

افزون بر این، پیش‌بینی می‌شود که با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد و آب شدن، نمونه‌های آجر دچار زوال و تخریب هرچه بیشتر خواهند شد و میزان مقاومت آن‌ها نیز روندی کاهشی را طی می‌کند.

منابع

[1] امیرکیایی وحید، قاسمی ابراهیم، فرامرزی لهراسب (۱۳۹۹) ارزیابی دوام طولانی مدت سنگ‌های ساختمانی کربناته بعد از چرخه‌های ذوب و انجماد با استفاده از روش CART . مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد سیزدهم، شماره ۳، صفحه ۶۷-۸۱.

[2] جمشیدی امین، نیکودل محمدرضا، خامه چیان ماشاالله (۱۳۹۳) مدل آماری برای برآورد ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌هایی از تراورتن‌ها درچرخه‌های یخبندان. مجله علوم زمین، سال ۲۴، شماره ۹۵، بهار ۱۳۹۴، صفحه ۳۷-۴۶.

[3] حسینی مهدی، فخری دانیال (۱۳۹۷) بررسی فرآیندهای یخبندان-ذوب و گرمایش-سرمایش بر نفوذپذیری ماسه سنگ لوشان. نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره سوم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۷۵-۹۱.

[4] عطاپور هادی، رفیعی رضا (۱۴۰۱) ارزیابی اثر چرخه انجماد و ذوب بر ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌های متخلخل: مطالعه موردی سنگ تروارتن محلات. نشریه یافته‌های نوین زمین شناسی کاربردی، دوره ۱۷، شماره ۳۳، بهار و تابستان ۱۴۰۲، صفحه ۲۰۱-۲۱۴.

[5] Anon (1979) Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, part 1: Rock and soil materials. Bulletin Association Engineering Geology 19, 355-371.

[6] Dehban Avan Estakhri M, Ghobadi MH, Mohseni H (2021) Predicting the long-term durability of limestones subjected to freeze–thaw cycles (case study: Guilan province, north of Iran). Geopersia, 11(2): 377-397.

[7] Freire-Lista DM, Fort R, Varas-Muriel MJ (2015) Freeze–thaw fracturing in building granites. Cold Regions Science and Technology 113:40-51. .

[8] Jamshidi A, Nikudel MR, Khamehchiyan M, Zalooli A (2015) Statistical models for predicting the mechanical properties of travertine building stones after freeze-thaw cycles. Engineering Geology for Society and Territory – Volume 8, Springer International Publishing Switzerland.

[9] Momeni A, Abdilor Y, Khanlari GR, Heidari M, Sepahi AA (2015) The effect of freeze–thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks. Bulletin of Engineering Geology and the Environment.

[10] Parvizpour SH, Jamshidi A, Sarikhani R, Ghassemi Dehnavi A (2022) The pH effect of sulfuric acid on the physico-mechanical properties of Atashkuh travertine, Central Iran. Environmental Earth Sciences 81:159.

[11] Seyed Mousavi Z, Tavakoli H, Moarefvand P, Rezaei M (2020) Micro-structural, petro-graphical and mechanical studies of schist rocks under the freezing-thawing cycles. Cold Regions Science and Technology 174: 103039.