

اثر دمای انجماد در فرآیند انجماد - ذوب بر خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ

مهدی حسینی^{۱*} و امیرمحمد احمدی^۲

۱- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین
 ۲- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران

نویسنده مسئول: *mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۹۹/۸/۲۱

دریافت: ۹۹/۵/۲۶

چکیده

سنگ‌ها در محیط‌های سرد معمولاً در معرض شرایط انجماد و ذوب قرار می‌گیرند. فرایند انجماد- ذوب یکی از مهم‌ترین و قدرتمندترین عامل هوازدگی از نوع فیزیکی می‌باشد که خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد و باعث کاهش دوام و پایداری سنگ می‌شود. در این تحقیق تاثیر دمای انجماد در یک سیکل انجماد - ذوب با سه دمای انجماد ۲۰-، ۴۰-، ۶۰- بر روی نفوذپذیری، مقاومت کششی، مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، مقاومت تراکم سه‌محوری در فشارهای محصور کننده ۳، ۵ و ۷ مگاپاسکال، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های ماسه‌سنگ سازند لالون منطقه لوشان، بررسی و تاثیرات دمای انجماد بر روی خواص ذکر شده مطالعه شده و با خواص نمونه‌هایی که سیکل انجماد- ذوب را تحمل نکرده‌اند مقایسه شد. نتایج بدست آمده حاکی از این بود که با کاهش دما در یک سیکل انجماد- ذوب، مقاومت کششی، مقاومت تراکم تک‌محوری، مقاومت تراکم سه‌محوری، چسبندگی و مدول الاستیسیته کاهش و نفوذپذیری افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: دمای انجماد، انجماد - ذوب، خواص فیزیکی، خواص مکانیکی، ماسه‌سنگ

۱- پیشگفتار

در این تحقیق چن و همکاران (۲۰۱۴) تنها خواص مکانیکی (شامل مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته) گرانیته در سه دمای مختلف انجماد- ذوب (۴۰۰ تا ۲۰-)، (۶۵ تا ۲۰-) و (۱۰۰ تا ۲۰-) بعد از ۳۰ سیکل تعیین شد و نتایج بدست آمده نشان داد با افزایش دمای ذوب، مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، خانلری و همکاران (۲۰۱۵) خواص فیزیکی و مکانیکی (شامل سرعت امواج طولی، تخلخل و مقاومت تراکم تک‌محوری) پنج نوع ماسه‌سنگ در هر ۵ سیکل انجماد- ذوب (در مجموع ۳۰ سیکل، تغییرات دما: ۲۰- تا ۲۰) تعیین شده و نتیجه بدست آمده حاکی از این بود که با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد- ذوب در نمونه ماسه‌سنگ مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته و سرعت امواج طولی کاهش می‌یابد. در آخر نتیجه‌گیری شد که نمونه ماسه‌سنگی که حفره‌های بزرگ‌تر دارد حساسیت کمتری نسبت به سیکل انجماد- ذوب از خود نشان می‌دهند. در این تحقیق ژو و همکاران (۲۰۰۵) خواص فیزیکی و مکانیکی (شامل تخلخل، مدول الاستیسیته و رزونانس

تحقیقات زیادی درباره تأثیر تعداد سیکل‌های انجماد- ذوب و دمای انجماد بر خواص فیزیکی و مکانیکی انجام شده است در ادامه برخی از پژوهش‌ها گذشته ارائه شده است. در پژوهش آلتینداگ و همکاران (۲۰۰۴) خواص فیزیکی و مکانیکی (شامل سرعت امواج طولی، تخلخل، مقاومت تراکم تک‌محوری، شاخص بارنقطه‌ای و مقاومت کششی غیرمستقیم) سنگ ایگنمبریت در هر ۵ سیکل انجماد- ذوب (در مجموع ۵۰ سیکل، تغییرات دما: ۲۰- تا ۲۰) تعیین شده و نتایج حاکی از این بود که با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد- ذوب، مقاومت تراکم تک‌محوری، شاخص بارنقطه‌ای، مقاومت کششی غیرمستقیم و سرعت امواج طولی کاهش و تخلخل افزایش یافته است. جمشیدی و همکاران (۲۰۱۳) روی ۱۴ سنگ ساختمانی مختلف بعد از هر ۵ سیکل انجماد- ذوب (تا ۵۰ سیکل، تغییرات دما: ۲۰- تا ۲۰) آزمایش برزیلی و بارنقطه‌ای انجام دادند. و دوام طولانی مدت هر سنگ را در برابر فرایند انجماد- ذوب با استفاده از پارامترهای مدل تابع تخریب ارزیابی کردند.

نفوذپذیری نمونه‌ها افزایش یافته است. در پژوهش وانگ و همکاران خواص فیزیکی و مکانیکی (شامل مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، سرعت امواج طولی، تخلخل و نفوذپذیری) ماسه‌سنگ در ۱۰ سیکل انجماد-ذوب (تغییرات دما: ۲۰- تا ۲۰+) و شوک حرارتی تعیین شد و نتایج بدست آمده نشان داد با افزایش تعداد سیکل، کاهش مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، سرعت امواج طولی و افزایش تخلخل و نفوذپذیری اتفاق می‌افتد. سودپیمان و همکاران (۲۰۱۶) در این تحقیق خواص فیزیکی و مکانیکی (شامل تخلخل و مقاومت کششی غیرمستقیم) ماسه‌سنگ در ۱ سیکل انجماد-ذوب با کاهش دمای انجماد تعیین شده و نتایج حاکی از این بود که با کاهش دما انجماد در یک سیکل انجماد-ذوب (تغییرات دما: ۱۰- تا ۲۰ و ۲۰- تا ۲۰+)، مقاومت کششی نمونه کاهش می‌یابد. جمشیدی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی که روی ۱۲ نمونه سنگ تراورتن انجام دادند. محققین یک پارامتر فیزیکی- مکانیکی جدید برای تخمین مقاومت مکانیکی سنگ تراورتن بعد از تحمل سیکل‌های انجماد-ذوب ارائه کردند. در این تحقیق اسلامی و همکاران (۲۰۱۸) خواص فیزیکی و مکانیکی (شامل سرعت امواج طولی، تخلخل، مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، نفوذپذیری و مقاومت کششی غیرمستقیم) پنج نوع سنگ‌آهک در سیکل‌های مختلف یخبندان-ذوب تعیین شده و نتایج حاکی از این بود که با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب، مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی غیرمستقیم، سرعت امواج طولی کاهش و تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌ها افزایش یافته است. در این تحقیق فنگ و همکاران (۲۰۱۸) خواص مکانیکی (شامل مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته) ماسه‌سنگ زرد در پنج بازه‌ی دمایی با کاهش دمای انجماد در سیکل انجماد-ذوب با سه PH (۲، ۷ و ۱۲) تعیین شده و نتیجه بدست آمده حاکی از این بود که با کاهش دمای انجماد در سیکل انجماد-ذوب در نمونه ماسه‌سنگ زرد، مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته پیک تنش و شیب نمودار تنش- کرنش کاهش می‌یابد. هم‌چنین نمونه‌های ماسه‌سنگی که در محیط قلیایی قرار داشتند آسیب کمتری دیده بودند. در این تحقیق ژانگ و همکاران (۲۰۱۸) خواص فیزیکی

مغناطیسی هسته‌ای (NMR) پنج نوع ماسه‌سنگ در هر ۲۰ سیکل انجماد-ذوب (در مجموع ۱۴۰ سیکل، تغییرات دما: ۳۰- تا ۲۰+) اندازه‌گیری شده و نتایج حاکی از این بود که با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب، مدول الاستیسیته، کاهش و تخلخل و میزان روشنایی در عکس‌های هسته‌ای افزایش یافته است. در پژوهش والبرت و همکاران (۲۰۱۵) خواص فیزیکی و مکانیکی (شامل سرعت امواج طولی، تخلخل، مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری و چقرمگی) سه نوع سنگ‌آهک در سیکل‌های مختلف انجماد-ذوب (سیکل ۳۰، ۱۵۰ و ۳۲۰، تغییرات دما: ۱۰- تا ۱۰+) تعیین شده و نتیجه بدست آمده حاکی از این بود که به علت گسترش میکروتکرک‌ها در نمونه سنگ مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و سرعت امواج طولی کاهش و تخلخل افزایش داشته است. در تحقیق دیگری یو و همکاران (۲۰۱۵) خواص فیزیکی و مکانیکی (شامل سرعت امواج طولی، تخلخل، مقاومت تراکم سه‌محوری، مدول الاستیسیته، نفوذپذیری و فاکتور آسیب) ماسه‌سنگ قرمز در سیکل‌های مختلف انجماد-ذوب (سیکل ۴، ۸، ۱۲، تغییرات دما: ۲۰- تا ۲۰+) تعیین شد و نتایج بدست آمده کاهش سرعت امواج طولی، مقاومت تراکم سه‌محوری، مدول الاستیسیته و افزایش فاکتور آسیب، تخلخل و میزان نفوذپذیری را در پی دارد. جمشیدی و همکاران (۲۰۱۵) روی ۱۴ سنگ ساختمانی مختلف بعد از هر ۵ سیکل انجماد-ذوب (تا ۵۰ سیکل، تغییرات دما: ۲۰- تا ۲۰+) آزمایش برزیلی، بارنقطه‌ای و آزمایش تعیین سرعت امواج طولی انجام دادند. در نهایت، مدل‌های آماری برای تخمین خواص مهندسی سنگ بعد از تحمل سیکل‌های انجماد-ذوب به کمک رگرسیون چندمتغیره ارائه دادند. مومنی و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی خواص فیزیکی و مکانیکی (شامل چگالی خشک، سرعت امواج طولی، تخلخل، مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، نفوذپذیری و مقاومت کششی غیرمستقیم) سنگ گرانیتوئید (سنگ‌هایی که بیش‌تر از ۲۰ درصد کوارتز دارند) در هر ۵۰ سیکل انجماد-ذوب (در مجموع ۳۰۰ سیکل، تغییرات دما: ۳۰- تا ۴۰+) را تعیین کردند و نتایج حاکی از این بود که با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب، مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، مقاومت کشش غیرمستقیم، سرعت امواج طولی، چگالی خشک، کاهش و تخلخل و

چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در یک سیکل یخبندان- ذوب را که در پژوهش‌های قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته بررسی می‌کند.

در این تحقیق تاثیر دمای یخبندان در یک سیکل انجماد- ذوب با سه دمای انجماد ۲۰-، ۴۰-، ۶۰- بر نفوذپذیری، مقاومت کششی، مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، مقاومت تراکم سه‌محوری در فشارهای محصور کننده ۳، ۵ و ۷ مگاپاسکال، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های ماسه‌سنگ سازند لالون منطقه لوشان بررسی و تاثیرات دمای انجماد بر روی خواص ذکر شده بررسی شده و با خواص نمونه‌هایی که سیکل انجماد- ذوب را تحمل نکرده‌اند مقایسه می‌شود.

۲- آماده‌سازی نمونه

نمونه ماسه‌سنگ استفاده شده در این تحقیق، از سازند لالون در منطقه لوشان از نزدیکی روستای میرخواند سفلی از توابع بخش طارم‌سفلی از یک معدن سنگ مالون برداشت شده است (شکل ۱). سازند لالون یکی از گسترده‌ترین سازندهای کامبرین پیشین ایران است که به تقریب در همه جا ترکیب سنگ‌شناسی مشابه دارد. شباهت‌های ظاهری به ویژه رنگ و سنگ‌شناسی این سازند با ماسه‌سنگ‌های دونین اروپا ماسه‌سنگ سرخ قدیم سبب شده بود تا این سازند به سندونین دانسته شود ولی جایگاه چینه‌شناسی و نشانه‌های فسیلی موجود تعلق آن را به کامبرین پیشین حتمی ساخته است. رنگ ماسه‌سنگی که به عنوان نمونه برداشت شده است به دلیل عدم وجود آهن در آن به رنگ خاکستری می‌باشد (حسینی و نعلبندان، ۱۳۹۸). ماسه سنگ مورد استفاده آهکی و دارای بافت آهکی- سیلیسی که نوع سیمان آن آهکی است. مطالعه میکروسکوپی نشان می‌دهد از جمله کانی‌های اصلی و فرعی این سنگ می‌توان کلسیت، فلدسپار آلکالن، کوارتز و کانی- های اپیک را نام برد (شکل ۲). در این پروژه نمونه مورد آزمایش مغزه‌های استوانه‌ای شکل به ارتفاع ۹۷ تا ۱۰۳ میلی‌متر و قطر ۵۴ میلی‌متر بوده (شکل ۳ الف) که از ۷ بلوک ماسه‌سنگ برای آزمایش تک‌محوری و سه‌محوری مغزه‌گیری شده است. نمونه‌هایی به صورت دیسکی شکل با ضخامت ۲۶ تا ۲۸ میلی‌متر و قطر ۵۴ میلی‌متر برای آزمایش برزیلی آماده شده است (شکل ۳ ب).

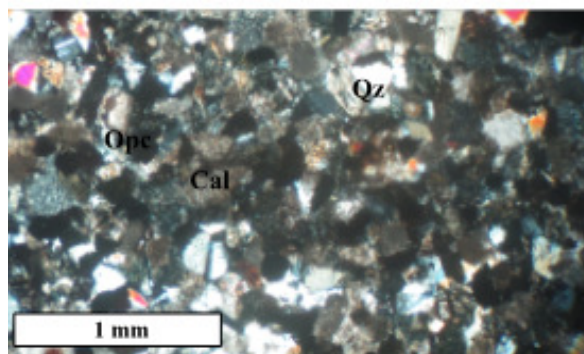
و مکانیکی (شامل تخلخل، مقاومت کششی غیرمستقیم، بارنقطه‌ای، رزونانس مغناطیسی هسته‌ای NMR) ماسه‌سنگ گرانیتوئید در هر ۱۰ سیکل انجماد- ذوب (در مجموع ۳۰ سیکل، تغییرات دما: ۲۰- تا ۲۰+) در PH های مختلف تعیین شده و نتایج حاکی از این بود که با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد- ذوب، مقاومت کششی غیرمستقیم، بارنقطه‌ای، کاهش و تخلخل و میزان روشنایی در عکس‌های هسته‌ای افزایش یافته است. نتایج پژوهش هاشمی و همکاران (۲۰۱۸) که روی ۹ سنگ کربناته انجام شده است نشان می‌دهد استفاده از چکش اشमित برای ارزیابی سریع دوام سنگ در برابر هوازدهی انجماد- ذوب قابل استفاده است.

حسینی و فخری (۱۳۹۷) در پژوهشی که روی ماسه‌سنگ لوشان انجام دادند به بررسی اثر تعداد سیکل انجماد- ذوب بر نفوذپذیری سنگ پرداختند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد- ذوب میزان نفوذپذیری بعد از یک سیکل کاهش پیدا کرد و این کاهش تا ۵ سیکل ادامه می‌یابد هر چند کاهش نفوذپذیری از ۱ سیکل تا ۵ سیکل بسیار ناچیز است. در سیکل ۱۰ نفوذپذیری اندکی افزایش می‌یابد و در سیکل ۲۰ این افزایش چشمگیر است. عبدالغنی‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی به بررسی اثر تعداد سیکل انجماد- ذوب بر تخلخل، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی ماسه‌سنگ لوشان و ملات سیمان پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش تعداد سیکل انجماد- ذوب، تخلخل نمونه‌ها افزایش و مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها کاهش یافت. در پژوهش دیگری عبدی و خانلری (۱۳۹۷) که روی ۱۲ بلوک ماسه‌سنگ انجام دادند. نمونه‌ها تحت ۳۰ سیکل انجماد- ذوب قرار گرفتند و در هر ۱۰ سیکل تخلخل، سرعت امواج طولی، مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته تعیین شدند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد- ذوب سرعت امواج طولی، مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته کاهش و تخلخل افزایش می‌یابد.

پژوهش ارائه شده در این مقاله نسبت به پژوهش‌های قبلی دارای این مزیت است که: اولاً: تا دمای یخبندان ۶۰- درجه سانتی‌گراد خواص ماسه‌سنگ را در یک سیکل یخبندان- ذوب بررسی می‌کند. ثانیاً: تغییرات



شکل ۱. موقعیت محل برداشت نمونه‌ها



شکل ۲. مقطع میکروسکوپی ماسه‌سنگ لویشان (کوارتز = Qz ، کلسیت = Cal و کانی‌های اپک = Opq)



شکل ۳. الف) مغزه‌های گرفته شده از ماسه‌سنگ و ب) نمونه‌های دیسکی شکل آزمایش برزلی

توجه به داده‌های هواشناسی مناطق غربی و شمال‌غرب ایران به مدت ۱۸ ساعت با توجه به دمای انجماد در نظر گرفته شده در داخل فریزر قرار گرفته و بعداً برای دوره‌ی ذوب به مدت ۶ ساعت در تشت آب با دمای ۲۰ درجه

نمونه‌ها بر اساس روش پیشنهادی *ISRM* تهیه شده است انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، ۲۰۰۷).

برای انجام آزمایش انجماد- ذوب ابتدا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب و تحت فشار جو اشباع شده سپس با

انجماد- ذوب در جدول ۱ ارائه شده است. میانگین مقاومت کششی برای نمونه‌هایی که سیکل انجماد- ذوب را تحمل نکرده اند ۴/۷۷ مگاپاسکال است. شکل ۴ ب تعدادی از نمونه‌ها را بعد از آزمایش برزیلی نشان می‌دهد.

۳-۲- آزمایش تراکم تک‌محوری

برای تعیین مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها بر روی نمونه‌ها آزمایش تراکم تک‌محوری انجام شده است. آزمایش‌ها بر طبق استاندارد *ISRM* انجام شده است (انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، ۲۰۰۷). در جدول ۲ میانگین نتایج آزمایش تراکم تک‌محوری بعد از یک سیکل انجماد- ذوب ارائه شده است. برای تعیین مدول الاستیسیته مماسی از کرنش سنج استفاده شده است. یکی از نمودارهای تنش محوری- کرنش محوری که مربوط به یکی از آزمایش‌ها است در شکل ۵ ارائه شده است. مدول الاستیسیته در قسمت خطی محاسبه شده که در شکل مشخص شده است.

ساتتی‌گراد قرار داده می‌شود به این ترتیب هر سیکل انجماد- ذوب ۲۴ ساعت زمان می‌برد. دماهای انجماد 20°C و 40°C با توجه به داده‌های هواشناسی کمترین دما در مناطق غربی و شمال‌غرب ایران انتخاب شده است. دمای 60°C بحرانی‌ترین دمایی است که به ندرت و در مناطقی مانند قله دماوند در زمستان اتفاق می‌افتد و بیش‌تر جنبه پژوهشی دارد.

۳- آزمایش‌های انجام شده

۳-۱- آزمایش برزیلی

برای تعیین مقاومت کششی بر روی نمونه‌ها آزمایش برزیلی انجام شده است. مقاومت کششی نمونه‌های سنگ از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، ۲۰۰۷). شکل ۴ الف یکی از نمونه‌های دیسکی آماده شده در حال آزمایش برزیلی را نشان می‌دهد.

$$\sigma_t = 0.636 \frac{P}{D.t} \quad (1)$$

در این رابطه P : بار در لحظه شکست (kN)، D : قطر نمونه (mm)، t : ضخامت نمونه (mm)، σ_t : مقاومت کششی (MPa) است. میانگین نتایج آزمایش برزیلی بعد از یک سیکل



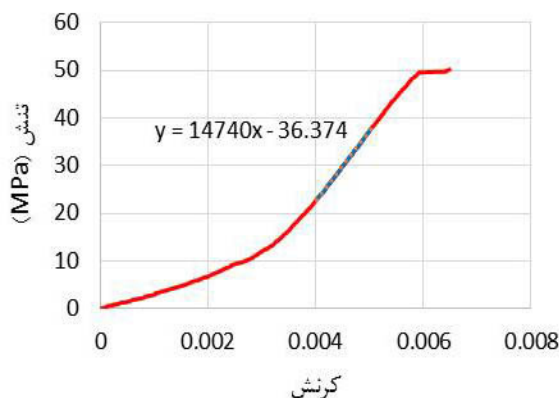
شکل ۴. الف) آزمایش برزیلی انجام شده روی یکی از نمونه‌ها و ب) تعدادی از نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش برزیلی

جدول ۱. میانگین نتایج آزمایش برزیلی

مقاومت کششی (MPa)	دمای انجماد ($^{\circ}\text{C}$)
۴/۳۹	-۲۰
۴/۳۱	-۴۰
۴/۰۶	-۶۰

جدول ۲. میانگین نتایج آزمایش تراکم تک‌محوری

مدول الاستیسیته مماسی (GPa)	مقاومت تراکم محوری (MPa)	دمای انجماد (°C)
۱۲/۷۱	۳۹/۰۵	-۲۰
۱۰/۵۲	۳۸/۶۹	-۴۰
۹/۴۱	۲۸/۰۲	-۶۰



شکل ۵. نمودار تنش محوری - کرنش محوری برای نمونه‌هایی که سیکل انجماد-ذوب را تحمل نکرده‌اند.

(د) دستگاه اعمال فشار ثابت: این دستگاه ظرفیت اعمال فشار تا ۳/۵ مگاپاسکال را دارد و برای تزریق سیال (آب) تحت فشار ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه دارای فشارسنج است.

(ه) پورت: برای اندازه‌گیری حجم سیال خروجی از نمونه استفاده می‌شود.

(و) زمان‌سنج: برای محاسبه نفوذپذیری از رابطه (۲) استفاده شده است (بولین و همکاران، ۲۰۱۲). این رابطه برای تعیین نفوذپذیری در حالتی که جریان سیال یکنواخت است معتبر است.

$$k = \frac{\mu q L}{\Delta p A} \quad (2)$$

در این رابطه:

μ : ویسکوزیته دینامیکی سیال (آب) بر حسب (MPa.S)،
 q : شدت جریان بر حسب (m^3/s) ، L : طول نمونه (m)
 A : سطح مقطع نمونه (m^2) ، Δp : اختلاف فشار سیال بین ورودی و خروجی (MPa) است.

در جدول ۳ نتایج آزمایش نفوذپذیری بعد از یک سیکل انجماد-ذوب ارائه شده است. مقدار نفوذپذیری برای نمونه‌ای که سیکل انجماد-ذوب را تحمل نکرده $10^{-14} \times 0.12$ مترمربع است.

میانگین مقاومت تراکم تک‌محوری و مقدار مدول الاستیسیته مماسی برای نمونه‌هایی که سیکل انجماد-ذوب را تحمل نکرده‌اند به ترتیب ۵۳/۴۶ مگاپاسکال و ۱۴/۷۴ گیگاپاسکال است. شکل ۶ یکی از نمونه‌ها را بعد از آزمایش تراکم تک‌محوری نشان می‌دهد.

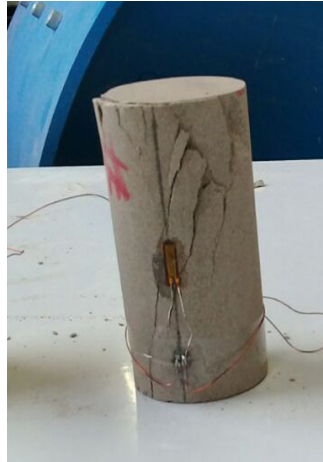
۳-۳- آزمایش نفوذپذیری

برای آزمایش نفوذپذیری از روش بارثابت استفاده می‌شود؛ سیال مورد استفاده آب است و نفوذپذیری طولی نمونه تعیین می‌شود. وسایل مورد نیاز برای آزمایش (شکل ۷) عبارتند از:

(الف) سلول هوک: سلول هوک دارای دو درپوش مخصوص آزمایش نفوذپذیری، یک غشای انعطاف‌پذیر برای در برگرفتن نمونه سنگ در هنگام اعمال فشار محصور کننده و دو شیر یکی برای ورود روغن برای اعمال فشار محصور کننده و دیگری شیر هواگیری می‌باشد. این سلول برای آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵۴ میلی‌متر مناسب است.

(ب) پمپ دستی: برای اعمال فشار محصورکننده به دور نمونه از پمپ دستی استفاده می‌شود.

(ج) اکومولاتور: وظیفه ثابت نگاه داشتن فشار محصورکننده را به عهده دارد.



شکل ۶. یکی از نمونه‌ها بعد از آزمایش تراکم تک‌محوری



شکل ۷. دستگاه آزمایش نفوذپذیری

جدول ۳. نتایج آزمایش نفوذپذیری

دمای انجماد (°C)	نفوذپذیری (m ²)
-۲۰	۱۰ ^{-۱۴} × ۰/۰۱۳
-۴۰	۱۰ ^{-۱۴} × ۰/۰۱۴
-۶۰	۱۰ ^{-۱۴} × ۰/۰۱۷

آزمایش بر روی نمونه‌ها تحت فشار محصورکننده ۳، ۵ و ۷ مگاپاسکال انجام شده است. نتایج را در جداول ۴، ۵، ۶ و ۷ مشاهده می‌کنید. می‌توان با استفاده از روابط (۳) و (۴) به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی را برای نمونه‌های ماسه‌سنگی به دست آورد (حسینی و ملکی، ۱۳۹۵). نتایج در جدول (۸) ارائه شده است.

$$\phi = \sin^{-1} \frac{m-1}{m+1} \quad (3)$$

$$C = b \frac{1-\sin\phi}{2\cos\phi} \quad (4)$$

در روابط (۳) و (۴)، ϕ : زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه، C : چسبندگی بر حسب مگاپاسکال، m : شیب

۳-۴- آزمایش تراکم سه‌محوری

برای مطالعه تأثیر دمای انجماد در یک سیکل انجماد-ذوب روی مقاومت فشاری سه‌محوری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، بر روی نمونه‌ها آزمایش فشاری سه‌محوری انجام شد. نمونه‌ها پس از طی مراحل آماده‌سازی ابتدا در داخل سلول هوک قرار داده شده، پس از آن سلول به جک بارگذاری محوری وارد شده و بعد از تنظیم فشار محصورکننده، فشار محوری تا شکست نمونه ادامه پیدا می‌کند (شکل ۸). آزمایش‌ها مطابق استاندارد *ISRM* انجام شد (انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، ۲۰۰۷).

نمودار تنش محوری- فشار محصورکننده و b : عرض از مبدأ نمودار تنش محوری- فشار محصورکننده می‌باشد. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه‌هایی که

سیکل انجماد- ذوب را تحمل نکرده‌اند به ترتیب ۱۰/۶۹ مگاپاسکال و ۴۸/۵۲ درجه است.



شکل ۸. آزمایش تراکم سه‌محوری

جدول ۴. نتایج آزمایش تراکم سه‌محوری روی نمونه‌های اولیه

$\sigma_1 (MPa)$	$\sigma_3 (MPa)$
۸۲/۳۱	۳
۹۱/۸۵	۵
۱۰۲/۴۳	۷

جدول ۵. نتایج آزمایش تراکم سه‌محوری روی نمونه‌ها بعد از یک سیکل انجماد ($20^\circ C$) - ذوب

$\sigma_1 (MPa)$	$\sigma_3 (MPa)$
۶۷/۸۶	۳
۸۲	۵
۸۸/۸۵	۷

جدول ۶. نتایج آزمایش تراکم سه‌محوری روی نمونه‌ها بعد از یک سیکل انجماد ($40^\circ C$) - ذوب

$\sigma_1 (MPa)$	$\sigma_3 (MPa)$
۵۷/۳۴	۳
۶۸/۳۵	۵
۸۶/۴۸	۷

جدول ۷. نتایج آزمایش تراکم سه‌محوری روی نمونه‌ها بعد از یک سیکل انجماد ($60^\circ C$) - ذوب

$\sigma_1 (MPa)$	$\sigma_3 (MPa)$
۵۲/۲۰	۳
۶۶/۳۷	۵
۸۵/۲۳	۷

۴- تحلیل نتایج

برای تحلیل نتایج، تغییرات خواص ماسه‌سنگ لوشان بر روی نمودار نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد مقاومت کششی در دمای $60^\circ C$ - درجه سانتی‌گراد نسبت

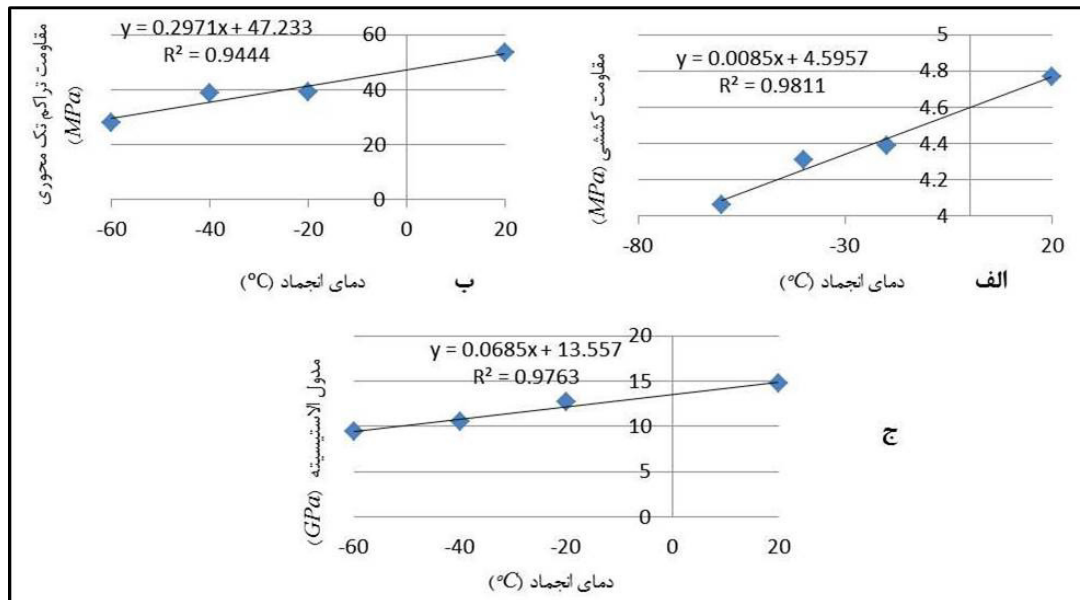
به مقاومت کششی نمونه‌هایی که سیکل انجماد- ذوب را تحمل نکرده‌اند حدود ۱۵ درصد کاهش یافته است. این نتایج با نتایج پژوهش سودیسمان و همکاران که با کاهش دمای انجماد، مقاومت کششی نمونه کاهش می‌یابد

تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌هایی که سیکل انجماد-ذوب را تحمل نکرده‌اند به ترتیب ۴۷/۵ و ۳۶/۱ درصد کاهش یافته است. در نتیجه با افزایش دمای انجماد در یک سیکل انجماد-ذوب مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد که با نتایج پژوهش وانگ و همکاران مطابقت دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۶).

مطابقت دارد (سودیسمان و همکاران، ۲۰۱۶). هم‌چنین بر اساس رابطه خطی ارائه شده در شکل ۹ الف می‌توان مقاومت کششی را تخمین زد. در شکل‌های ۹ ب و ج به ترتیب رابطه‌های خطی که برای تخمین تغییرات مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته در اثر تغییرات دمای انجماد رخ می‌دهد ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته در دمای ۶۰- درجه سانتی‌گراد نسبت به مقاومت تراکم

جدول ۸. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها بعد از یک سیکل انجماد-ذوب

دمای انجماد (°C)	C (MPa)	∅ (°)
-۲۰	۷/۸۵	۴۹/۲۵
-۴۰	۷/۳۰	۴۷/۶۷
-۶۰	۴/۸۸	۵۱/۱۹



شکل ۹. الف) تغییرات مقاومت کششی با تغییرات دمای انجماد در یک سیکل انجماد-ذوب، ب) تغییرات مقاومت تراکم تک‌محوری با تغییرات دمای انجماد در یک سیکل انجماد-ذوب و ج) تغییرات مدول الاستیسیته با تغییرات دمای انجماد در یک سیکل انجماد-ذوب

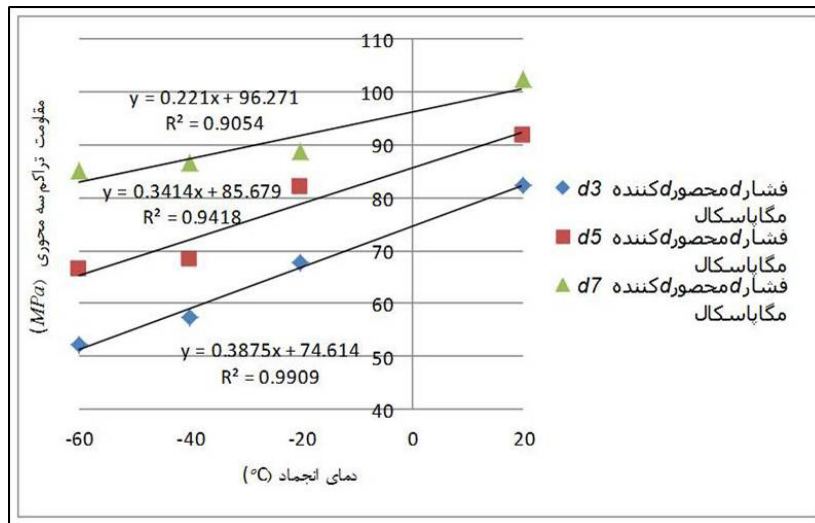
سانتی‌گراد نسبت به مقاومت تراکم سه‌محوری نمونه‌هایی که سیکل انجماد-ذوب را تحمل نکرده‌اند (در همان فشارهای محصورکننده) به ترتیب ۳۶/۵، ۲۸ و ۱۷ درصد کاهش یافته است.

در شکل ۱۱ رابطه خطی که برای تخمین تغییرات چسبندگی در اثر تغییرات دمای انجماد رخ می‌دهد ارائه شده است. چسبندگی ماسه‌سنگ با افزایش دمای انجماد کاهش می‌یابد. چسبندگی ماسه‌سنگ در دمای ۶۰- درجه سانتی‌گراد نسبت به چسبندگی نمونه‌هایی که

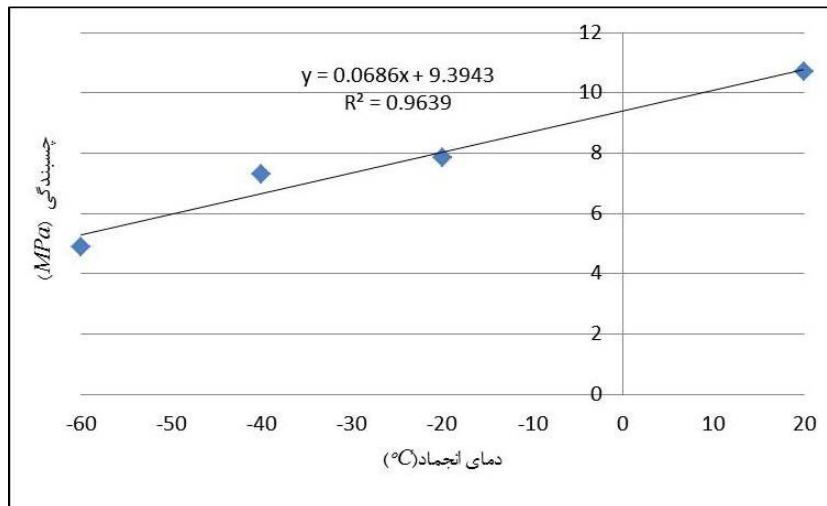
در شکل ۱۰ سه رابطه خطی برای تخمین مقاومت تراکم سه‌محوری برای فشارهای محصورکننده ۳، ۵ و ۷ مگاپاسکال ارائه شده است. این روابط تغییرات مقاومت تراکم سه‌محوری با دمای انجماد در یک سیکل انجماد-ذوب را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود با افزایش دمای انجماد مقاومت تراکم سه‌محوری کاهش می‌یابد روند تغییرات با پژوهش یو و همکاران مطابقت دارد (یو و همکاران، ۲۰۱۵). مقاومت تراکم سه‌محوری در سه فشار محصورکننده ۳، ۵ و ۷ مگاپاسکال در دمای ۶۰- درجه

فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ وجود ترک‌ها و حفرات داخل سنگ می‌باشد، در اقلیم‌های سردسیر هنگامی که 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 (فریر لیستا و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین در اثر توسعه ریزترک‌ها نفوذپذیری افزایش و مقاومت کششی، مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، مقاومت تراکم سه‌محوری و چسبندگی کاهش می‌یابد.

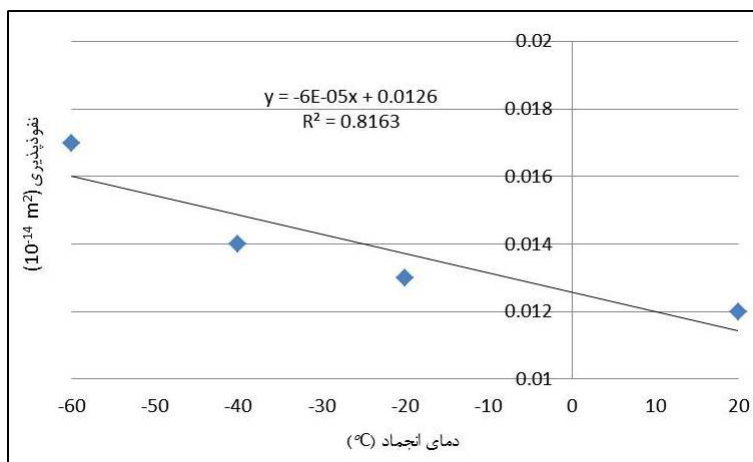
سیکل انجماد- ذوب را تحمل نکرده‌اند ۵۴ درصد کاهش یافته است. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با دمای انجماد روند مشخصی را نشان نمی‌دهد. در شکل ۱۲ رابطه‌ای که برای تخمین نفوذپذیری در اثر تغییرات دمای انجماد رخ می‌دهد ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای انجماد، مقدار نفوذپذیری افزایش می‌یابد. روند تغییرات نفوذپذیری با نتایج پژوهش یو و همکاران مطابقت دارد (یو و همکاران، ۲۰۱۵). نفوذپذیری ماسه‌سنگ در دمای ۶۰- درجه سانتی‌گراد نسبت به نفوذپذیری نمونه‌ای که سیکل انجماد- ذوب را تحمل نکرده ۴۱ درصد افزایش یافته است. علت تاثیر فرآیند انجماد- ذوب بر روی خواص



شکل ۱۰. تغییرات مقاومت تراکم سه‌محوری در سه فشار محصورکننده با تغییرات دمای انجماد در یک سیکل انجماد- ذوب



شکل ۱۱. تغییرات چسبندگی با تغییرات دمای انجماد در یک سیکل انجماد- ذوب



شکل ۱۲. تغییرات نفوذپذیری با تغییرات دمای انجماد در یک سیکل انجماد-ذوب

می‌یابد. نفوذپذیری نمونه در دمای ۶۰- درجه سانتی‌گراد نسبت به نفوذپذیری نمونه‌ای که سیکل انجماد-ذوب را تحمل نکرده‌اند حدود ۴۱ درصد افزایش یافته است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از داوران محترم مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

حسینی، م. ملکی، س (۱۳۹۵) بررسی معیار شکست‌های هوک و همکاران، بیناوسکی و جانستون در خصوص تخمین مناسب مقاومت ماسه‌سنگ، سومین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، برق، مکانیک و معماری ایران.

حسینی، م. نعلبندان، م (۱۳۹۸) تاثیر سیکل‌های تر-خشک شدن بر خواص فیزیکی، مکانیکی و گسیختگی ماسه‌سنگ. نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره ۴، شماره ۱، ص ۷۹-۹۵.

حسینی، م. فخری، د (۱۳۹۷) اثر فرآیندهای یخبندان-ذوب و گرمایش-سرمایش بر نفوذپذیری ماسه‌سنگ لوشان. نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره ۳، شماره ۴، ص ۷۵-۹۱.

عبدالغنی‌زاده، ک. حسینی، م. ثقفی‌یزدی، م (۱۳۹۷) تاثیر تعداد سیکل‌های یخبندان ذوب روی خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ لوشان و ملات سیمان. مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد ۱۱، شماره ۴، ص ۲۵-۳۹.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر دمای یخبندان در یک سیکل انجماد-ذوب با سه دمای انجماد ۲۰-، ۴۰-، ۶۰- روی مقاومت کششی، مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، مقاومت تراکم سه‌محوری، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و نفوذپذیری ماسه‌سنگ لوشان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که:

- ✓ با افزایش دمای انجماد در یک سیکل انجماد-ذوب مقاومت کششی نمونه‌ها به صورت خطی کاهش می‌یابد و مقاومت کششی در دمای ۶۰- درجه سانتی‌گراد نسبت به مقاومت کششی نمونه‌هایی که سیکل انجماد-ذوب را تحمل نکرده‌اند حدود ۱۵ درصد کاهش یافته است.
- ✓ با افزایش دمای انجماد در یک سیکل انجماد-ذوب مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، مقاومت تراکم سه‌محوری و چسبندگی به صورت خطی کاهش می‌یابد. مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، مقاومت تراکم سه‌محوری (در فشار محصورکننده ۳ مگاپاسکال) و چسبندگی در دمای ۶۰- درجه سانتی‌گراد نسبت به مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته، مقاومت تراکم سه‌محوری (در فشار محصورکننده ۳ مگاپاسکال) و چسبندگی نمونه‌هایی که سیکل انجماد-ذوب را تحمل نکرده‌اند به ترتیب ۴۷/۵، ۳۶/۱، ۳۶/۵ و ۵۴ درصد کاهش یافته است.
- ✓ نفوذپذیری ماسه‌سنگ با افزایش دمای انجماد در یک سیکل انجماد-ذوب به صورت خطی افزایش

- of Sciences and Technology, Transaction A: Science, 39A2: 147-163.
- Jamshidi, A., Nikudel, M. R., Khamehchiyan, M (2017) A novel physico-mechanical parameter for estimating the mechanical strength of travertines after a freeze-thaw test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(1):181-190.
- Khanlari, G., Sahamieh, R. Z., & Abdilor, Y (2015) The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of Upper Red Formation sandstones. *Central part of Iran. Arabian Journal of Geosciences*, 8(8): 5991-6001.
- Momeni, A., Abdilor, Y., Khanlari, G. R., Heidari, M., & Sepahi, A. A (2016) The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4): 1649-1656.
- Sudisman, R. A., Yamabe, T., Osada, M (2016) Strain and Strength of Saturated and Dried Rock Samples Under a Freeze-Thaw Cycle. *9th Asian Rock Mechanics Symposium*.
- Wang, P., Xu, J., Liu, S., Wang, H., & Liu, S (2016) Static and dynamic mechanical properties of sedimentary rock after freeze-thaw or thermal shock weathering. *Engineering geology*, 210: 148-157.
- Walbert, C., Eslami, J., Beaucour, A. L., Bourges, A., & Noumowe, A (2015) Evolution of the mechanical behaviour of limestone subjected to freeze-thaw cycles. *Environmental earth sciences*, 74(7): 6339-6351.
- Yu, J., Chen, X., Li, H., Zhou, J. W., & Cai, Y. Y (2015) Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties and permeability of red sandstone under triaxial compression. *Journal of Mountain Science*, 12(1): 218-231.
- Zhang, J., Deng, H., Taheri, A., Ke, B., Liu, C., & Yang, X (2018) Degradation of physical and mechanical properties of sandstone subjected to freeze-thaw cycles and chemical erosion. *Cold Regions Science and Technology*, 155: 37-46.
- Zhou, K. P., Bin, L. I., Li, J. L., Deng, H. W., & Feng, B. I. N (2015) Microscopic damage and dynamic mechanical properties of rock under freeze-thaw environment. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(4): 1254-1261.
- عبیدی، ی. خانلری، غ (۱۳۹۷) بررسی تاثیر انجماد- ذوب بر ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی بر اساس اندازه‌گیری سرعت موج و تخلخل. *مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی* دوره ۱۲، شماره ۲۳، ص ۹۱-۷۵.
- Altindag, R., Alyildiz, I. S., & Onargan, T (2004) Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze-thaw cycles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 6(41):1023-1028.
- Boulin, P. F., Bretonnier, P., Gland, N., & Lombard, J. M (2012) Contribution of the steady state method to water permeability measurement in very low permeability porous media. *Oil & Gas Science and Technology- Revue d'IFP Energies nouvelles*, 67(3): 387-401.
- Chen, Y. L., Ni, J., Jiang, L. H., Liu, M. L., Wang, P., & Azzam, R (2014) Experimental study on mechanical properties of granite after freeze-thaw cycling. *Environmental earth sciences*, 71(8): 3349-3354.
- Eslami, J., Walbert, C., Beaucour, A. L., Bourges, A., & Noumowe, A (2018) Influence of physical and mechanical properties on the durability of limestone subjected to freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 162: 420-429.
- Fang, X., Xu, J., & Wang, P (2018) Compressive failure characteristics of yellow sandstone subjected to the coupling effects of chemical corrosion and repeated freezing and thawing. *Engineering Geology*, 233: 160-171.
- Freire-Lista, D. M., Fort, R. and Varas-Muriel, M. J (2015) Freeze-thaw fracturing in building granites. *Cold Regions Science and Technology*, 113 :40-51.
- Hashemi, M., Bashiri Goudarzi, M., Jamshidi, A., (2018) Experimental investigation on the performance of Schmidt hammer test in durability assessment of carbonate building stones against freeze-thaw weathering. *Environmental Earth Science*, 77: 1-15.
- ISRM (2007) In: Ulusay, Hudson (Eds.), *Suggested methods prepared by the commission on testing methods*, International Society for Rock Mechanics. ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.
- Jamshidi, A., Nikudel, M. R., Khamehchiyan, M (2013) Predicting the long-term durability of building stones against freeze-thaw using a decay function model. *Cold Regions Science and Technology*, 92: 29-36.
- Jamshidi, A., Nikudel, M. R., Khamehchiyan, M. (2015) Estimating the engineering properties of building stones after freeze-thaw using multiple regression analysis. *Iranian Journal*

The effect of freezing temperature in the freeze-thaw process on the Physical and Mechanical properties of sandstone

M. Hosseini^{1*} and A. M. Ahmari²

1- Assoc. Prof., Dept., of Mining Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin

2-M. Sc., student. of Mining Engineering, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran

** mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir*

Recieved: 2020/8/16 Accepted: 2020/11/11

Abstract

Rocks in cold environments are usually exposed to freezing and thawing conditions. The freeze–thaw process is one of the most important and intense physical weathering processes that affects the physical and mechanical properties of rocks by reducing the durability and stability of rocks. In this study, the effect of freezing temperature in a freeze–thaw cycle with three freezing temperatures of -20, -40, -60 on permeability, tensile strength, uniaxial compressive strength, modulus of elasticity, triaxial compressive strength at confining pressures 3, 5 and 7 MPa, cohesive and internal friction angle of sandstone samples of Lalon formation in Lushan region was investigated and the effects of freezing temperature on the mentioned properties were studied and compared with the properties of samples that did not undergo the freeze–thaw cycle. The results showed that with decreasing freezing temperature in a freeze–thaw cycle, tensile strength, uniaxial compressive strength, triaxial compressive strength, cohesive and modulus of elasticity decrease and permeability increases.

Keywords: *Freezing temperature, Freeze–thaw, Physical properties, Mechanical properties, Sandstone*