

اثر فرآیندهای یخبندان - ذوب و گرمایش - سرمایش بر نفوذپذیری ماسه سنگ لوشان

مهدی حسینی^{۱*}، دانیال فخری^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

(دریافت ۱۳۹۷/۰۵/۲۷، پذیرش ۱۳۹۷/۰۹/۰۸)

چکیده

در بسیاری از محیط‌ها، سنگ‌ها معمولاً در معرض شرایط یخبندان - ذوب و یا گرمایش - سرمایش قرار می‌گیرند، بنابراین ضروری است که تاثیر این فرایندها بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ از جمله نفوذپذیری بررسی شود. در این تحقیق از نمونه‌های ماسه سنگ سازند منطقه لوشان برای مطالعه استفاده شد و تاثیر تعداد سیکل‌های انجماد - ذوب و دما در فرآیند گرمایش - سرمایش روی نفوذپذیری ماسه سنگ مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اثر تعداد سیکل‌ها آزمایش‌ها روی نمونه‌هایی که ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ سیکل انجماد - ذوب را تحمل کرده‌اند انجام شد. برای بررسی اثر گرمایش - سرمایش آزمایش‌ها بر روی نمونه‌هایی که یک سیکل گرمایش - سرمایش را تحمل کرده‌اند و در مرحله گرمایش دمای ۶۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد را تحمل کرده‌اند و در محیط سرد شده‌اند انجام شده است. 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 ۱۰ سیکل نفوذپذیری اندکی افزایش می‌یابد و در ۲۰ سیکل این افزایش چشمگیر است. همچنین با افزایش دما در مرحله گرمایش در فرآیند گرمایش - سرمایش نفوذپذیری ماسه سنگ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد کاهش و سپس افزایش می‌یابد. تغییرات نفوذپذیری در فرآیند گرمایش - سرمایش با تغییرات سرعت امواج طولی، وزن مخصوص خشک و تخلخل موثر تطابق دارد. مقدار سی تی محاسبه شده از تصاویر سی تی اسکن نیز تغییرات نفوذپذیری را تایید می‌کند.

کلمات کلیدی

ماسه سنگ، نفوذپذیری، فرآیند یخبندان - ذوب، فرآیند گرمایش - سرمایش، سنگ.

۱- مقدمه

شرایط سنگ تحت تاثیر یخبندان‌های طولانی و چرخه‌های متعدد یخبندان- ذوب قرار می‌گیرد، بنابراین ضروری است که تاثیر این فرآیندها بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ از جمله نفوذپذیری بررسی شود.

بررسی کتابخانه‌ای نشان می‌دهد که اکثر کارهای انجام شده در مورد اثر درجه حرارت، اثر فرآیند گرمایش- سرمایش و همچنین اثر فرآیند یخبندان- ذوب بر روی خواص فیزیکی شامل: وزن مخصوص، سرعت امواج طولی، درصد جذب آب و تخلخل و خواص مکانیکی شامل مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی انجام شده است. در خصوص اثر فرآیند گرمایش- سرمایش و یخبندان- ذوب روی چقرمگی شکست نیز تحقیقاتی انجام شده است. مشخصات تحقیقات انجام شده در خصوص اثر درجه حرارت، اثر گرمایش- سرمایش و اثر یخبندان- ذوب در جدول‌های ۱ و ۲ ارایه شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود اکثر پژوهش‌ها در دماهای

توده سنگ به طور روز افزون به عنوان بستر در محدوده وسیعی از فعالیت‌های انسانی به کار می‌رود. تاسیساتی مانند انبارهای ذخیره‌سازی، چاه‌ها، تونل‌ها و نیروگاه‌های زیرزمینی در بستر انواع سنگ‌های مختلف تحت شرایط مکانیک سنگی مختلف قرار می‌گیرند. ثبات و پایداری حفاری‌ها امری ضروری برای همه ساخت و سازها هم در حالت کوتاه مدت و هم بلند مدت است، بنابراین تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و عوامل تاثیرگذار بر آن‌ها برای طراحی و تحلیل سازه‌های سنگی امری بسیار ضروری است. سنگ‌ها در مواردی از قبیل انفجار و آتش‌سوزی تحت حرارت قابل توجهی قرار می‌گیرند و سپس در اثر خاموش کردن آتش و یا تهویه سرد می‌شوند و فرآیند گرمایش- سرمایش اتفاق می‌افتد. همچنین در استان‌های شمال‌غرب و غرب کشور که تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد دارند، بارندگی زیاد و برودت هوا از مشخصات زمستان‌های این مناطق به شمار می‌آید، در این

جدول ۱: برخی پژوهش‌های انجام شده در مورد اثر درجه حرارت و اثر فرآیند گرمایش- سرمایش بر روی خواص سنگ

نام پژوهشگران	نوع سنگ	دمای آزمایش (°C)	مدول الاستیسیته	مقاومت تراکمی	مقاومت کششی	سایر خواص
لیانگ و همکاران [۱]	نمک	۲۰-۲۴۰	کاهش	افزایش		
کیو و لین [۲]	گرانیت	۲۰-۸۰۰	کاهش	کاهش		
کوکا و همکاران [۳]	مرمر	۲۰-۷۰۰	کاهش	کاهش		
دوبودی و همکاران [۴]	گرانیت	۳۰-۱۶۰	کاهش- افزایش	کاهش- افزایش	کاهش	
زو و همکاران [۵]	گرانیت	۲۵-۱۳۰۰	کاهش	کاهش		
کشاوری و همکاران [۶]	گابرو	۲۵-۱۰۰۰	کاهش	کاهش		
لو و زانگ [۷]	گل سنگ	۲۰-۷۵۰	افزایش	افزایش		
رانجیت و همکاران [۸]	ماسه سنگ	۲۰-۹۵۰	افزایش- کاهش	افزایش- کاهش		
اسریاپه و همکاران [۹]	نمک	۰-۱۹۴	کاهش	کاهش	کاهش	
چن و همکاران [۱۰]	گرانیت	۲۰-۱۰۰۰	کاهش	کاهش		
بروتو و همکاران [۱۱]	کالکرنیت	۶۰-۱۰۵	کاهش	کاهش		
ژانگ و همکاران [۱۲]	گل سنگ	۲۵-۸۰۰	افزایش- کاهش	افزایش- کاهش		
حسینی [۱۳]	ماسه سنگ، توف و آندزیت	۲۵-۳۰۰			کاهش	کاهش سرعت امواج طولی
حسینی و همکاران [۱۴]	ماسه سنگ	۲۵-۱۵۰				کاهش انرژی شکست و چقرمگی شکست مود دوم

جدول ۲: برخی پژوهش‌های انجام شده در مورد اثر فرآیند یخبندان- ذوب بر روی خواص سنگ

نام پژوهشگران	نمونه مورد آزمایش	دمای یخبندان - ذوب (°C)	مدول الاستیسیته	مقاومت تراکمی	مقاومت کششی	سایر خواص
آزبک [۱۵]	ایگنمبریت مشکی ایگنمبریت زرد ایگنمبریت خاکستری ایگنمبریت قرمز	-۲۰-۲۰		کاهش		افزایش تخلخل و درصد جذب آب و کاهش سرعت امواج طولی و وزن مخصوص
مومنی و همکاران [۱۶]	مونزوگرانیت، تونالیت، گرانودیوریت	-۳۰-۴۰		کاهش	کاهش	افزایش تخلخل و درصد جذب آب و کاهش سرعت امواج طولی و وزن مخصوص
لی و همکاران [۱۷]	ماسه سنگ قرمز، شیل	-۲۰-۲۰	کاهش	کاهش		
تان و همکاران [۱۸]	گرانیت	-۴۰-۴۰	کاهش	کاهش		
خانلری و همکاران [۱۹]	ماسه سنگ	-۲۰-۲۰		کاهش		کاهش سرعت امواج طولی و افزایش تخلخل
قبادی و همکاران [۲۰]	توف	-۲۰-۲۰		کاهش		کاهش سرعت امواج طولی و افزایش تخلخل
آلتینداگ و همکاران [۲۱]	ایگنمبریت	-۲۰-۲۰		کاهش	کاهش	کاهش اندیس بارنقطه‌ای

در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به ۲/۸۵ درصد در دمای ۶۰۰ درجه افزایش می‌یابد که شدت این تغییرات در افزایش درجه حرارت از ۵۰۰ به ۶۰۰ مشاهده می‌شود به طوری که تخلخل در ۶۰۰ درجه، ۲/۵۹ برابر تخلخل در درجه حرارت ۵۰۰ درجه است. این موضوع در مورد نفوذپذیری نیز مشاهده می‌شود. به طوری که نفوذپذیری در دمای ۵۰۰ درجه حدود ۸ برابر نفوذپذیری در دمای ۱۰۵ درجه است و در دمای ۶۰۰ درجه این مقدار به بیش از ۱۰۰ برابر می‌رسد (شکل ۱) [۲۲].

چین و همکاران اثر یخبندان- ذوب را بر روی نفوذپذیری نمونه‌های ماسه سنگ قرمز که از یک معدن سنگ در یکی از ایالت‌های چین جمع‌آوری شده بود، بررسی کردند. نمونه‌های اشیاع ابتدا ۱۲ ساعت در فریزر در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد قرار داده شده‌اند تا منجمد شوند و سپس به مدت ۱۲ ساعت در آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا فرآیند ذوب تکمیل شود. این فرآیند مبین یک سیکل انجماد- ذوب است. بر روی نمونه‌ها آزمایش نفوذپذیری بعد از ۴، ۸ و ۱۲ سیکل فرآیند انجماد- ذوب انجام شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد- ذوب میزان نفوذپذیری افزایش می‌یابد [۲۳].

زیر ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و روی اثر گرمایش- سرمایش و یخبندان- ذوب روی وزن مخصوص، سرعت امواج طولی، تخلخل، مقاومت تراکم تک‌محوری و مقاومت کششی انجام شده است. بنابراین این تحقیق هم از جنبه بررسی روی نفوذپذیری و هم تغییر این پارامتر تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای نوآوری است و در ایران انجام نشده است و در دنیا هم تحقیق در این خصوص در حد محدود انجام شده است که به دو مورد از این تحقیقات اشاره می‌شود. تاکارلی^۱ و پرینس اگبدجان^۲ پژوهشی در مورد اثر درجه حرارت بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی گرانیت انجام داده‌اند. نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق سنگ گرانیت بود که از پیرینه در فرانسه برداشت شده است. ابعاد دانه‌ها در محدوده حدود ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر متغیر است. این سنگ از ۴۲ درصد کوارتز، ۴۶ درصد پلاژیوکلاز، ۸ درصد فلدسپار و ۴ درصد میکا تشکیل شده است. به نمونه‌ها تا دماهای ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ با آهنگ یک درجه سانتی‌گراد/ دقیقه گرما داده می‌شوند و سپس با آهنگ یک درجه سانتی‌گراد/ دقیقه خنک می‌شوند تا به دمای اتاق برسند. ابتدا در این تحقیق اثر درجه حرارت روی تخلخل نمونه‌ها بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد تخلخل از ۰/۶۸ درصد

چون رس‌ها و اکسید سیلیسیم در سیمانی کردن ذرات آن به یکدیگر نقش داشته‌اند [۲۴].



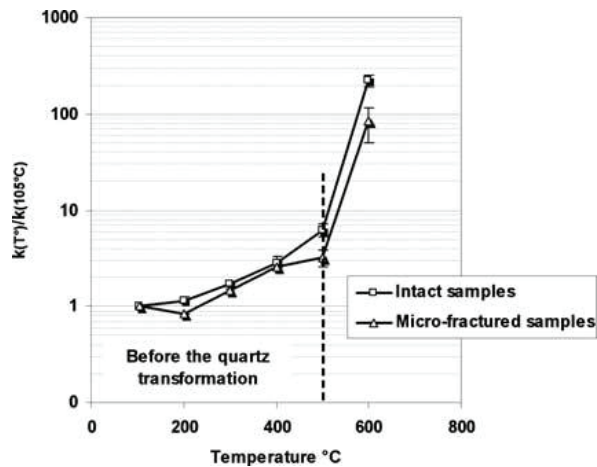
شکل ۲: ماسه سنگ لوشان

ماسه‌سنگ 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 کانی‌های اپک را نام برد. کانی‌های موجود با علائم اختصاری Qz، کوارتز، Cal: کلسیت، Opc: کانی‌های اپک بر روی تصاویر مشخص شده است (شکل ۳).

خمیره این ماسه‌سنگ، از دانه‌های ریز کوارتز و رس تشکیل شده است.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

در آزمایشگاه از بلوک‌های سنگی برای تهیه نمونه‌های استوانه‌ای شکل به منظور انجام آزمایش‌های متداول مکانیک



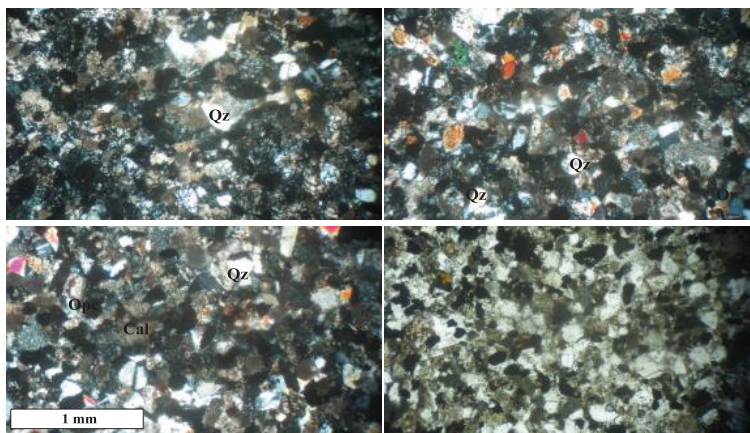
شکل ۱: تغییرات نفوذپذیری با افزایش درجه حرارت [۲۲]

در این پژوهش اثر فرآیند گرمایش-سرمایش تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و اثر فرآیند انجماد-ذوب تا ۲۰ سیکل روی نفوذپذیری ماسه‌سنگ لوشان بررسی شد.

۲- نمونه مورد مطالعه

۲-۱- مطالعه میکروسکوپی

نمونه مورد مطالعه در این تحقیق ماسه‌سنگ لوشان است (شکل ۲). ماسه‌سنگ نوعی سنگ رسوبی است که در تمامی دوران‌های زمین‌شناسی تشکیل آن ادامه یافته و عمدتاً از ذرات گرد ماسه و کانی‌های مختلف تشکیل شده است و رنگ‌های متنوعی دارد. این سنگ در دریاها، کم‌عمق و دلتاها، در امتداد سواحل و در بیابان‌های گرم تشکیل شده است و موادی



شکل ۳: تصویر میکروسکوپی از نمونه ماسه‌سنگ

۳- بررسی اثر فرآیند یخبندان- ذوب بر روی نفوذپذیری ماسه‌سنگ

۳-۱- وسایل آزمایش

برای آزمایش نفوذپذیری از روش بار ثابت استفاده می‌شود، سیال مورد استفاده آب است و نفوذپذیری طولی نمونه تعیین می‌شود. وسایل مورد نیاز برای آزمایش (شکل ۴) 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 جانبی و دو شیر یکی برای ورود روغن برای اعمال فشار جانبی و دیگری شیر هواگیری است (شکل ۵). این سلول برای آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵۴ میلی‌متر مناسب است.

ب- پمپ دستی: برای اعمال فشار جانبی به دور نمونه از پمپ دستی استفاده می‌شود.

پ- اکومولاتور: وظیفه ثابت نگاه داشتن فشار جانبی را به عهده دارد.

ت- 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

سنگی از جمله آزمایش تراکم تک محوری (برای تعیین مقاومت تراکم تک محوری، مدول الاستیسیته و ضریب پواسن) و آزمایش برزیلی (مقاومت کششی) مطابق با استاندارد ISRM استفاده شد [۲۵]. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

به منظور آماده‌سازی نمونه‌های سنگ برای آزمایش نفوذپذیری (برای سایر آزمایش‌ها فقط مراحل آماده‌سازی ۱ تا ۳ باید انجام شود) مراحل مختلفی طی شده که به شرح زیر است:

- مغزه‌گیری از بلوک سنگی

- برش نمونه‌های استوانه‌ای شکل

- ساب دادن نمونه‌های برش داده شده

- قرار دادن نمونه‌ها در کوره و سپس سرد کردن

نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه برای بررسی اثر فرآیند

گرمایش- سرمایش روی نفوذپذیری ماسه‌سنگ

- قرار دادن نمونه‌های اشباع از آب در فریزر برای انجماد و

سپس قرار دادن نمونه‌ها در آب برای ذوب شدن یخ‌ها به

منظور بررسی اثر فرآیند یخبندان- ذوب روی نفوذپذیری

ماسه‌سنگ

جدول ۳: خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ لوشان

مقاومت کششی (MPa)	ضریب پواسن	مقاومت تراکم تک محوری (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
۴٫۵۱	۰٫۲۵	۷۱٫۹	۱۷٫۲۵



شکل ۴: دستگاه آزمایش نفوذپذیری



شکل ۵: سلول هوک

ث- اعمال فشار جانبی به نمونه‌ای که در غشا قرار گرفته است برای آب‌بندی کردن سطوح جانبی نمونه، در این آزمایش فشار ۲٫۵ مگاپاسکال به نمونه‌ها اعمال می‌شود. این فشار در طول آزمایش با اکومولاتور ثابت نگاه داشته می‌شود. آب‌بندی کردن سطوح جانبی نمونه باعث می‌شود سیال فقط از نمونه عبور کند.

ج- اعمال فشار ثابت سیال (آب) به میزان یک مگاپاسکال در طول آزمایش

چ- ثبت زمان مورد نیاز برای خروج حجم مشخصی از سیال از نمونه، به عنوان مثال (یک سانتی‌متر مکعب) و از طریق آن شدت جریان سیال خروجی از نمونه اندازه‌گیری می‌شود. البته این اندازه‌گیری‌ها ادامه دارد تا شدت جریان به حالت یکنواخت برسد. این شدت جریان در محاسبات استفاده می‌شود.

۳-۳- نتایج آزمایش

برای محاسبه نفوذپذیری از رابطه ۱ استفاده شده است [۲۶]. این رابطه برای تعیین نفوذپذیری در حالتی که جریان سیال یکنواخت است، معتبر است.

$$k = \frac{\mu q L}{\Delta p A} \quad (1)$$

فشارسنج است.

ث- بورت: برای اندازه‌گیری حجم سیال خروجی از نمونه استفاده می‌شود.

ج- زمان سنج

۳-۲- مراحل انجام آزمایش

مراحل انجام آزمایش به شرح زیر است:

الف- قراردادن نمونه‌ها در تشت آب به مدت ۴۸ ساعت برای اشباع نمونه‌ها

ب- قرار دادن نمونه‌ها در فریزر به مدت ۱۸ ساعت در دمای ۱۶- درجه سانتی‌گراد

پ- گذاشتن نمونه‌ها در آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت

با طی شدن مراحل الف تا پ یک سیکل انجماد-ذوب تکمیل می‌شود. برای بررسی اثر تعداد سیکل‌ها، دمای انجماد ۱۶- درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. در این حالت آزمایش‌ها روی نمونه‌هایی که ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ سیکل انجماد-ذوب را تحمل کرده‌اند، انجام می‌شود. یک آزمایش هم بر روی نمونه‌ای که سیکل یخبندان-ذوب را تحمل نکرده است، انجام می‌شود.

ت- گذاشتن نمونه در سلول هوک

که در آن:

μ : ویسکوزیته دینامیکی سیال (آب) (MPa.S)

q : شدت جریان (m^3/s)

L : طول نمونه (m)

A : سطح مقطع نمونه (m^2)

Δp : اختلاف فشار سیال بین ورودی و خروجی (MPa) است.

بر اساس رابطه ۱، نفوذپذیری در حالت‌های مختلف تعیین شده است. در جدول ۴ مقادیر نفوذپذیری برای سیکل‌های مختلف انجماد- ذوب مشاهده می‌شود. هر حالت روی ۳ نمونه آزمایش انجام شده است و در جدول میانگین آن‌ها ارایه شده است.

۳-۴- تحلیل نتایج

برای بررسی علت وقوع این تغییرات ابتدا نمودار تغییرات نفوذپذیری بر حسب تعداد سیکل‌های انجماد- ذوب رسم شده است (شکل ۶). بر طبق شکل ۶ میزان نفوذپذیری بعد از یک سیکل کاهش می‌یابد و این کاهش تا ۵ سیکل ادامه می‌یابد، هر چند کاهش نفوذپذیری از یک تا ۵ سیکل بسیار ناچیز است. در ۱۰ سیکل نفوذپذیری اندکی افزایش می‌یابد و در ۲۰

سیکل این افزایش چشمگیر است به طوری که نفوذپذیری در ۲۰ سیکل ۱٫۳ مقدار اولیه است. برای بررسی علت این تغییرات سرعت امواج طولی، وزن مخصوص خشک و تخلخل موثر نیز تعیین شده است (شکل‌های ۷، ۸ و ۹). برای تعیین تخلخل موثر و وزن مخصوص خشک بعد از هر سیکل از روش اشباع و اندازه‌گیری ابعاد نمونه استفاده شده است و با استفاده از روابط ۲ تا ۴ این ویژگی‌ها تعیین شده است [۲۵].

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (2)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V} \quad (3)$$

$$n_e = \frac{V_{ve}}{V} \quad (4)$$

در این رابطه‌ها:

W_s : وزن خشک

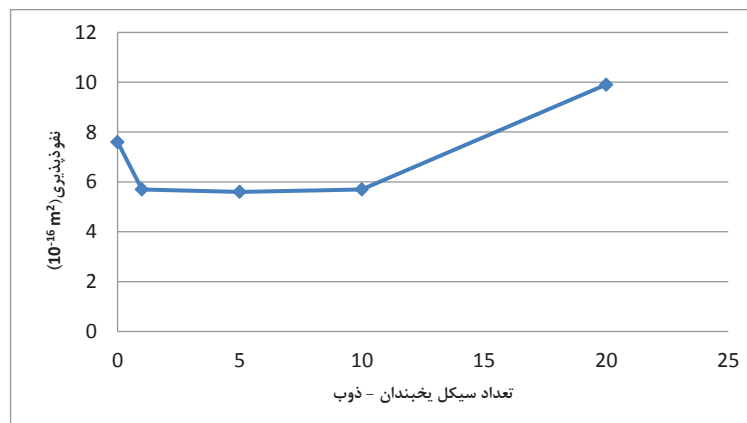
W_{sat} : وزن اشباع

n_e : حجم منافذ موثر

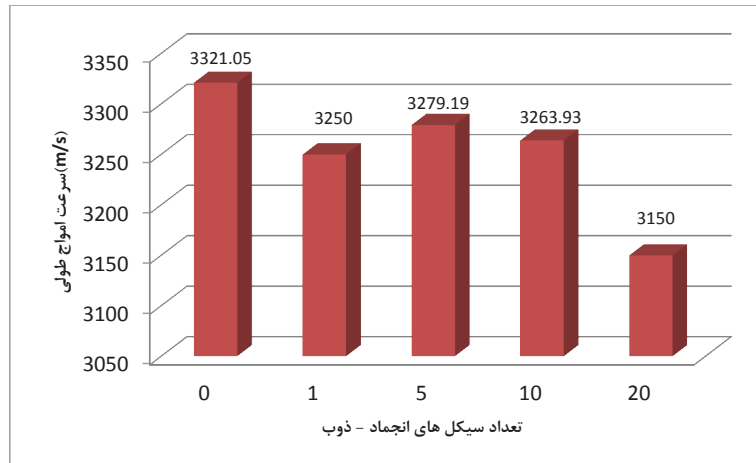
V_{ve} : حجم کل نمونه است.

جدول ۴: اثر سیکل انجماد- ذوب روی نفوذپذیری

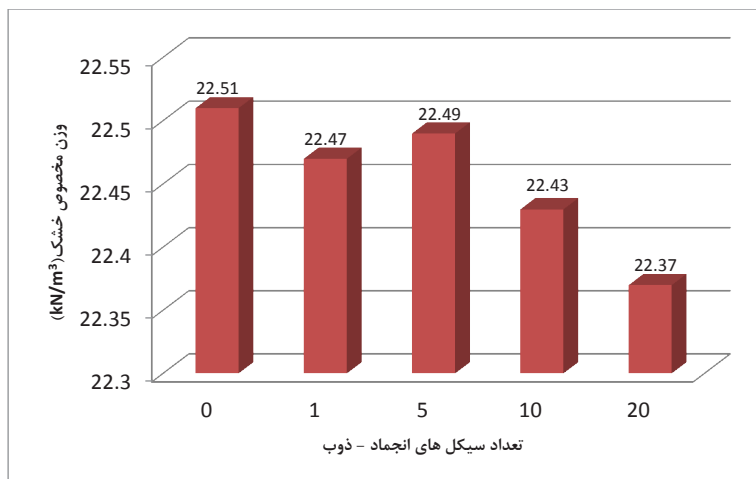
ردیف	دمای انجماد ($^{\circ}C$)	تعداد سیکل‌های انجماد- ذوب	نفوذپذیری (m^2)
۱	بدون سیکل انجماد- ذوب	۰	$7,6 \times 10^{-16}$
۲	-۱۶	۱	$5,7 \times 10^{-16}$
۳	-۱۶	۵	$5,6 \times 10^{-16}$
۴	-۱۶	۱۰	$5,7 \times 10^{-16}$
۵	-۱۶	۲۰	$9,9 \times 10^{-16}$



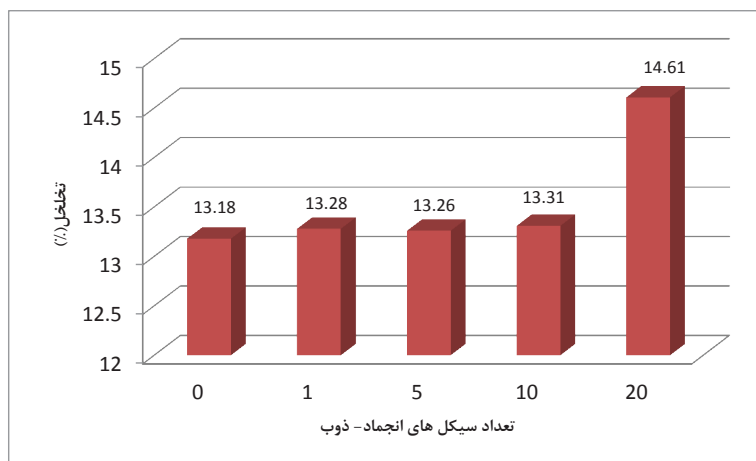
شکل ۶: تغییرات نفوذپذیری با تعداد سیکل‌های یخبندان- ذوب



شکل ۷: اثر تعداد سیکل های انجماد- ذوب روی سرعت امواج طولی



شکل ۸: اثر تعداد سیکل های انجماد- ذوب روی وزن مخصوص خشک



شکل ۹: اثر تعداد سیکل های انجماد- ذوب روی تخلخل موثر

۴- بررسی اثر فرآیند گرمایش - سرمایش بر روی نفوذپذیری ماسه‌سنگ

۴-۱- مراحل انجام آزمایش

مراحل انجام آزمایش به شرح زیر است:

الف- قراردادن نمونه‌ها در کوره: آهنگ افزایش دما $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ در نظر گرفته شده است.

ب- گذاشتن نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه: به منظور سرد شدن نمونه، تا دمای آن به دمای محیط آزمایشگاه (25°C) برسد. با اتمام مرحله الف و ب یک سیکل گرمایش - سرمایش به اتمام می‌رسد. این آزمایش بر روی نمونه‌هایی که یک سیکل گرمایش - سرمایش را تحمل کرده‌اند و در مرحله گرمایش دمای 60 ، 100 ، 200 ، 400 ، 600 ، 800 و 1000 را تحمل کرده‌اند و در محیط سرد شده‌اند، انجام شده است.

پ- قراردادن نمونه‌ها در تشت آب به مدت 48 ساعت برای اشباع نمونه‌ها

ت- سایر مراحل آزمایش مشابه مراحل آزمایش (ت)، (ث)، (ج) و (چ) آزمایش قبلی است.

۴-۲- نتایج آزمایش

بر اساس رابطه ۱، نفوذپذیری در حالت‌های مختلف تعیین شده است. در جدول ۵ مقادیر نفوذپذیری برای دماهای مختلف در فرآیند گرمایش - سرمایش مشاهده می‌شود. در هر حالت روی ۳ نمونه آزمایش انجام شده است و در جدول میانگین آن‌ها ارایه شده است.

۴-۳- تحلیل نتایج

برای بررسی علت وقوع این تغییرات ابتدا نمودار تغییرات نفوذپذیری بر حسب دما رسم شده است (شکل ۱۰) که با افزایش دما، تا 100 درجه سانتی‌گراد مقدار نفوذپذیری کاهش می‌یابد. با افزایش دما از 100 تا 400 درجه سانتی‌گراد آب آزاد و آب ترکیبی در کانی‌های سنگ که شامل کانی‌های رسی نیز است از بین رفته و در اثر آن ترک‌های جدید ایجاد می‌شود، بنابراین از دمای بیشتر از 100 درجه سانتی‌گراد نفوذپذیری افزایش می‌یابد. شدت این افزایش از 400 به 600 درجه سانتی‌گراد به علت آن که در این بازه دمایی انبساط حجمی کوارتز به صورت نمایی افزایش می‌یابد [۲۷] نسبت به 200 تا 400 درجه سانتی‌گراد بیشتر است. بیشترین نفوذپذیری مربوط به دمای 1000 درجه سانتی‌گراد است که

برای تعیین سرعت امواج طولی بعد از هر سیکل محل قرار گرفتن ترانس دیوسرها طوری روی سطوح انتهایی نمونه علامت‌گذاری می‌شود که محل عبوری از مراکز آن‌ها با محور مرکزی نمونه بیش از 2 درجه اختلاف نداشته باشد، سپس مسافت حرکت موج که فاصله مرکز تا مرکز ترانس دیوسرهاست اندازه‌گیری می‌شود. یک لایه نازک از وازلین در محل قرار گرفتن ترانس دیوسرها مالیده می‌شود تا انرژی عبوری از ترانس دیوسرها کاهش پیدا نکند. ترانس دیوسرها در محل علامت زده قرار می‌گیرند و فرستنده با فشاری معادل 10 نیوتن بر سانتی‌متر مربع به نمونه فشرده می‌شود و زمان عبور موج قرائت می‌شود. برای به دست آوردن سرعت امواج طولی در نمونه‌ها از رابطه ۵ استفاده می‌شود [۲۵].

$$V_p = \frac{L}{t} \times 1000 \quad (5)$$

که در آن:

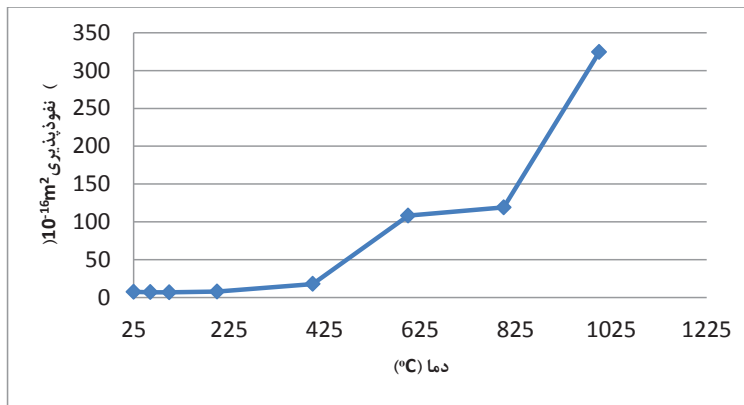
V_p : سرعت موج فشاری (m/s)

t: زمان گذر موج فشاری (μs) است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود به جز تغییرات سرعت امواج طولی، وزن مخصوص خشک و تخلخل موثر از صفر تا یک سیکل در بقیه سیکل‌ها تغییرات نفوذپذیری با تغییرات سرعت امواج طولی، وزن مخصوص خشک و تخلخل موثر مطابقت دارد. به طوری که با افزایش نفوذپذیری، سرعت امواج طولی و وزن مخصوص کاهش و تخلخل افزایش می‌یابد و با کاهش نفوذپذیری عکس این حالت اتفاق می‌افتد. در خصوص علت کاهش نفوذپذیری در یک سیکل در مقایسه با صفر سیکل علی‌رغم افزایش تخلخل موثر می‌توان گفت که در فرآیند یخبندان در اثر یخ زدن آب موجود در حفرات حجم حفرات افزایش می‌یابد، این افزایش باعث می‌شود که بعضی از مسیرهایی در سنگ که قبلاً سیال از آن‌ها جریان پیدا می‌کرده یا بسته شده یا تنگ‌تر شده است و به همین علت علی‌رغم افزایش تخلخل، میزان نفوذپذیری کاهش می‌یابد. بعد از 20 سیکل در اثر ایجاد مسیرهای جدید عبور سیال که در اثر ایجاد ترک‌های جدید بعد از 20 سیکل ایجاد شده است، نفوذپذیری به شدت افزایش می‌یابد و این افزایش در تخلخل نیز مشاهده می‌شود.

جدول ۵: اثر دما روی نفوذپذیری

ردیف	دما در مرحله گرمایش (°C)	تعداد سیکل های گرمایش - سرمایش	نفوذپذیری (m ²)
۱	بدون سیکل انجماد- ذوب	۰	$7,6 \times 10^{-16}$
۲	۶۰	۱	$7,1 \times 10^{-16}$
۳	۱۰۰	۱	$6,9 \times 10^{-16}$
۴	۲۰۰	۱	$7,9 \times 10^{-16}$
۵	۴۰۰	۱	$17,9 \times 10^{-16}$
۶	۶۰۰	۱	$10,8,2 \times 10^{-16}$
۷	۸۰۰	۱	$119,1 \times 10^{-16}$
۸	۱۰۰۰	۱	$324,4 \times 10^{-16}$



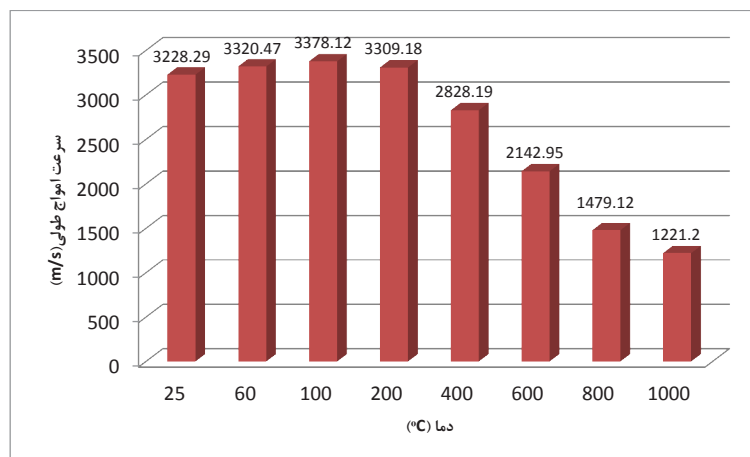
شکل ۱۰: تغییرات نفوذپذیری با دما

در مجموع دانسیته ترک‌ها افزایش می‌یابد و به علت افزایش دانسیته ترک‌ها است که میزان نفوذپذیری افزایش یافته است. علت افزایش شدید نفوذپذیری در ۶۰۰ درجه را می‌توان به تبدیل کوارتز α به β در دمای ۵۷۳ درجه سانتی‌گراد مرتبط دانست. این نتایج مطابق نتایج تحقیقات تاکارلی و پرینس اگبدجان است [۲۲].

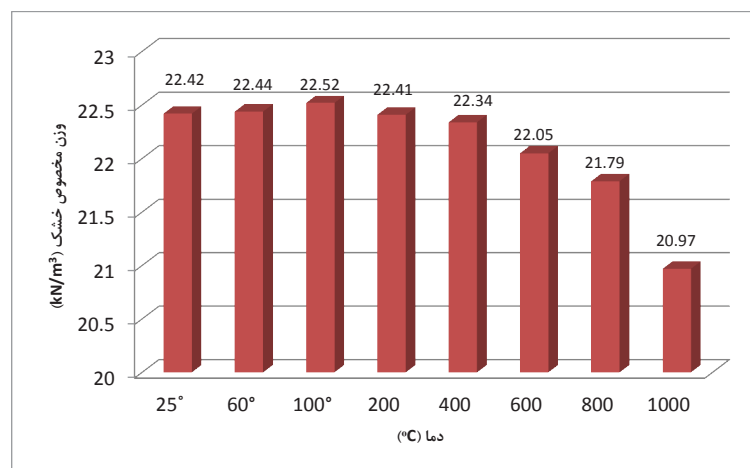
تصاویر (CT) سی‌تی‌اسکن نیز برای بررسی میزان آسیب ناشی از فرآیند گرمایش-سرمایش (در ۲۵، ۲۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) بر روی میزان نفوذپذیری نمونه‌های ماسه‌سنگ استفاده شده است.

تصاویر سی‌تی نمونه‌ای از ماسه‌سنگ در دماهای مختلف در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این تکنیک ناحیه تیره‌تر نشان‌دهنده مواد با چگالی پایین‌تر و ناحیه روشن‌تر نشان‌دهنده مواد با تراکم بالاتر است [۲۹]. در شکل ۱۴ هیچ تفاوت قابل مشاهده‌ای بین این تصاویر وجود ندارد. بنابراین، یک پارامتر مناسب برای اندازه‌گیری وضعیت آسیب نمونه مورد

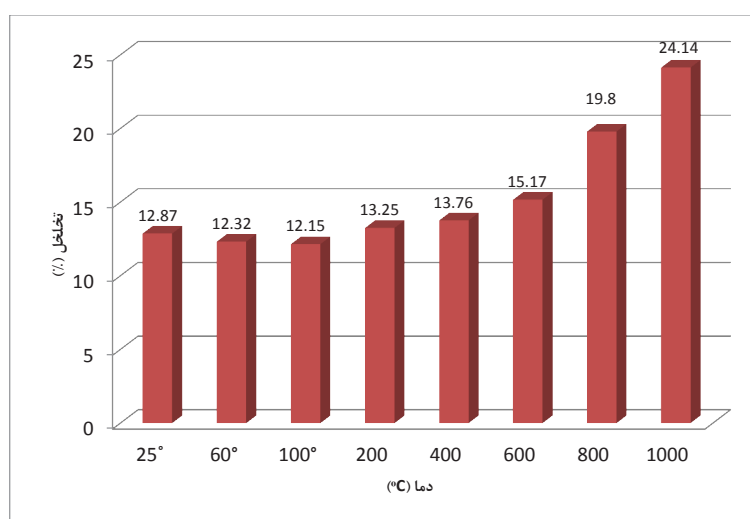
۴۲,۷ برابر مقدار نفوذپذیری اولیه است. تغییرات نفوذپذیری با تغییرات سرعت امواج طولی، وزن مخصوص خشک و تخلخل نیز مطابقت دارد (شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳)، به طوری که تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد سرعت امواج طولی و وزن مخصوص خشک افزایش و تخلخل کاهش می‌یابد و بعد از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد سرعت امواج طولی و وزن مخصوص خشک کاهش و تخلخل افزایش می‌یابد. علت کاهش نفوذپذیری تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش عرض ترک‌های اولیه است. بعد از بسته شدن ترک‌های اولیه در اثر افزایش درجه حرارت در سنگ تنش حرارتی ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه ضریب انبساط حرارتی کانی‌های مختلف متفاوت است، این تنش‌ها در مرز کانی‌های مختلف متمرکز می‌شود و اگر از مقاومت کششی و یا برشی سنگ‌ها بیشتر شود ترک‌های جدید ایجاد می‌شود و یا ترک‌های قبلی افزایش می‌یابد [۲۸]. علاوه بر این در طی مرحله خنک شدن نمونه‌ها نیز ترک‌های جدید در اثر انقباض نمونه به ویژه در مرز کانی‌های مختلف شکل می‌گیرد، بنابراین



شکل ۱۱: تغییرات سرعت امواج طولی با دما



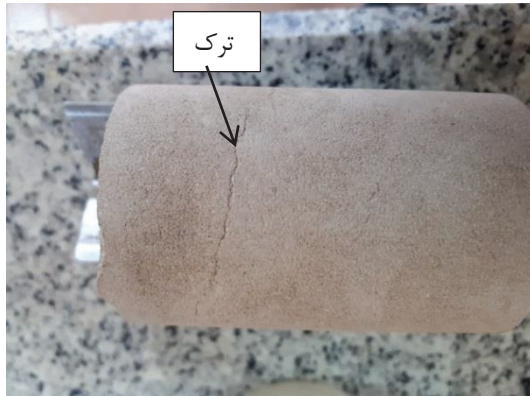
شکل ۱۲: تغییرات وزن مخصوص خشک با دما



شکل ۱۳: تغییرات تخلخل موثر با دما

جدول ۶: مقدار سی تی و متغیر آسیب در دماهای مختلف

متغیر آسیب (%)	مقدار سی تی (HU)	دما (°C)
۰	۱۷۷۰	۲۵
۱,۷۵	۱۷۳۹	۲۰۰
۶,۷۷	۱۶۵۰	۶۰۰



شکل ۱۵: ترک در نمونه‌ای که تا ۸۰۰ درجه گرم و در محیط سرد شده

بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتیگراد کوارتز از کوارتز بتا به کوارتز بتا تریدیمیت تبدیل می‌شود و در اثر آن تخلخل دوبار افزایش می‌یابد [۲۷] به همین علت تعداد ترک‌های بزرگ نسبت به حالت قبل زیادتر شد. علت افزایش شدید تخلخل در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد همین پدیده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌هایی برای بررسی اثر فرآیند یخبندان- ذوب و گرمایش- سرمایش روی نفوذپذیری ماسه

نیاز است. این پارامتر مقدار سی تی است. واحد این اعداد به دست آمده به احترام هانسفیلد که در ابداع سیتی‌اسکن نقش بسیار مهمی را ایفا کرده است، واحد هانسفیلد (Hu) انتخاب شده است. مقدار سی تی نمونه، ترکیب و ساختار در ماده را بازتاب می‌دهد [۳۰].

از متغیر آسیب (D) برای توصیف آسیب ناشی از عملیات حرارتی بر اساس میانگین سی تی استفاده می‌شود (رابطه ۶) [۳۱].

$$D = \frac{H_0 - H}{H_0} \quad (۶)$$

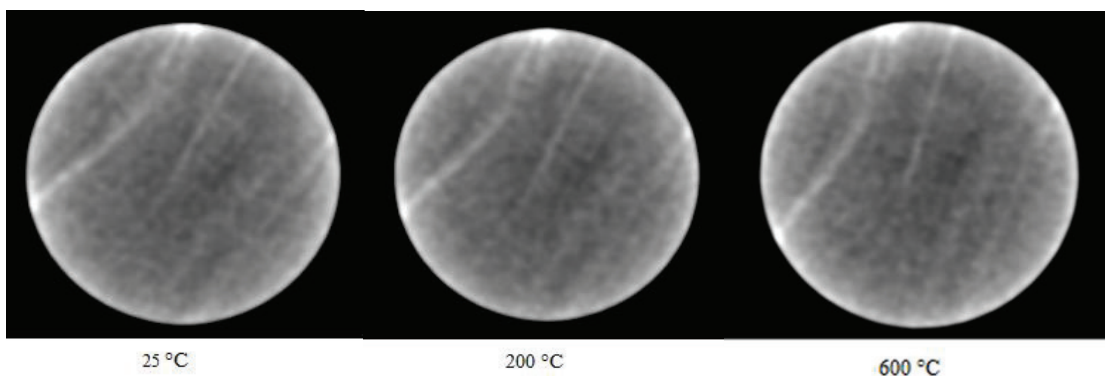
که در آن:

برای نمونه گرم داده شده CT: مقدار متوسط H

برای نمونه ۲۵ درجه سانتیگراد CT: مقدار متوسط H₀

مقادیر محاسبه شده متغیر آسیب (D) در جدول ۶ ارائه شده است. مقادیر متغیر آسیب ماسه‌سنگ با درجه حرارت عملیات حرارتی افزایش می‌یابد. این نتایج با آنچه که توسط هوانگ و شیا [۳۰] به دست آمد، سازگار است. مقادیر سی تی از طریق نرم‌افزار eFilm Workstation (نسخه ۴.۲.۲) محاسبه شده است.

البته در نمونه‌هایی که تا ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد گرم و سپس سرد شده است، ترک‌های ایجاد شده با چشم قابل مشاهده است. شکل ۱۵ ترک در نمونه‌ای را که تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد گرم و سپس سرد شده است را نشان می‌دهد. در تحقیقات لو و همکارانش که روی ماسه سنگ انجام داده‌اند نیز در دمای ۸۰۰ درجه به علت تولید گاز دی‌اکسید کربن تخلخل افزایش و ریز ترک‌ها به ترک‌های بزرگ تبدیل شد. در دمای



شکل ۱۴: تصاویر سی تی اسکن نمونه ماسه‌سنگ در دماهای مختلف

- [4] Dwivedi, R. D., Goel, R. K., Prasad, V. V. R., and Sinha, A. (2008). "Thermo- mechanical properties of Indian and other granites". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45: 303-315.
- [5] Xu, X. L., Kang, Z. X., Ji, M., Ge, W. X., and Chen, J. (2009). "Research of microcosmic mechanism of brittle-plastic transition for granite under high temperature". Proc Earth and Planetary Science, 1: 432-437.
- [6] Keshavarz, M., Pellet, F., and Loret, B. (2010). "Damage and changes in mechanical properties of a gabbro thermally loaded up to 1000°C". Pure and Applied Geophysics, 167: 1511-1523.
- [7] Luo, J. A., and Wang, L. (2011). "High-temperature mechanical properties of mudstone in the process of underground coal gasification". Rock Mechanics and Rock Engineering, 44: 749-754.
- [8] Ranjith, P. G., Viete, D. R., Chen, B. J., and Perera, M. S. A. (2012). "Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behavior of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure". Engineering Geology, 151: 120-127.
- [9] Sriapai, T., Walsri, C., and Fuenkajorn, K. (2012). "Effects of temperature on compressive and tensile strengths of salt". ScienceAsia, 38: 166-174.
- [10] Chen, Y. L., Ni, J., Shao, W., and Azzam, R. (2012). "Experimental study on the influence of temperature on the mechanical properties of granite under uni-axial compression and fatigue loading". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 56: 62-66.
- [11] Broto'ns, V., Alarco'n, J. C., Toma's, R., and Ivorra, S. (2013). "Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julians calcarenite". Engineering Geology, 167: 117-127.
- [12] Zhang, L., Mao, X., Liu, R., Guo, X., and Ma, D. (2014). "The mechanical properties of mudstone at high temperatures: an experimental study". Rock Mech Rock Eng, 47: 1479-1484.
- [13] Hosseini, M. (2017). "Effect of temperature as well as heating and cooling cycles on rock properties". Journal of Mining and Environment, 8(4): 631-644.
- [14] Hosseini, M., and Khodayari, A. R. (2018). "Effects of temperature and confining pressure on mode II fracture toughness of rocks (Case study: Lushan Sandstone)". Journal of Mining and Environment, 9(2): 379-391.
- [15] Özbek, A. (2014). "Investigation of the effects of wetting-drying and freezing-thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(2): 595-609.
- سنگ لوشان انجام شده است. برای تحلیل نتایج علاوه بر آزمایش نفوذپذیری، آزمایش‌هایی برای تعیین تخلخل موثر، وزن مخصوص و سرعت امواج طولی نیز انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها به شرح زیر است:
- در فرآیند یخبندان- ذوب:
- میزان نفوذپذیری بعد از یک سیکل کاهش یافته و این کاهش تا ۵ سیکل ادامه می‌یابد.
- در ۱۰ سیکل نفوذپذیری اندکی افزایش می‌یابد و در ۲۰ سیکل این افزایش چشمگیر است.
- نفوذپذیری در ۲۰ سیکل ۱٫۳ برابر مقدار اولیه است.
- در فرآیند گرمایش- سرمایش:
- با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نفوذپذیری کاهش یافت.
- با افزایش دما بعد از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نفوذپذیری افزایش یافت.
- سرعت امواج طولی و وزن مخصوص خشک تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش و تخلخل کاهش پیدا کرد.
- سرعت امواج طولی و وزن مخصوص خشک بعد از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش و تخلخل افزایش پیدا کرد.
- مقادیر سی‌تی که از تصاویر سی‌تی‌اسکن به دست آمد، نشان داد متغیر آسیب با افزایش دما از ۲۰۰ تا ۶۰۰ درجه افزایش یافت.
- ### ۶- سپاس‌گزاری
- این اثر با حمایت مالی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام گرفته است، بنابراین از مسوولین دانشگاه تقدیر و تشکر می‌شود.
- ### ۷- مراجع
- [1] Liang, W., Xu, S., and Zhao, Y. (2006). "Experimental study of temperature effects on physical and mechanical characteristics of salt rock". Rock Mechanics and Rock Engineering, 39: 469-482.
- [2] Qiu, Y. P., and Lin, Z. Y. (2006). "Testing study on damage of granite samples after high temperature". Rock and Soil Mechanics, 27: 1005-1010.
- [3] Koca, M. Y., Ozden, G., Yavuz, A. B., Kincal, C., Onargan, T., and Kucuk, K. (2006). "Changes in the engineering properties of marble in fire- exposed columns". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43: 520-530.

- [24] Pettijohn, F. J., Potter, P. E., and Siever, R. (1987). "Sand and Sandstone". 2nd Edition, Springer-Verlag, New York, pp. 553.
- [25] 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, pp. 628.
- [26] Boulin, P. F., Bretonnier, P., Gland, N., and 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.
- [27] Lü, C., Sun, Q., Zhang, W., Geng, J., Qi, Y., and Lu, L. (2017). "The effect of high temperature on tensile strength of sandstone". Applied Thermal Engineering, 111: 573-579.
- [28] Zhao, Z. (2016). "Thermal Influence on Mechanical Properties of Granite: A Micro cracking Perspective". Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(3): 747-762.
- [29] Yao, W., Xu, Y., Wang, W., and Kanopolous, P. (2016). "Dependence of dynamic tensile strength of longyou sandstone on heat-treatment temperature and loading rate". Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(10): 3899-3915.
- [30] Yao, W., Liu, H. W., Xu, Y., Xia, K., and Zhu, J. (2017). "Thermal degradation of dynamic compressive strength for two mortars". Construction and Building Materials, 136: 139-152.
- [31] Huang, S., and Xia, K. (2015). "Effect of heat-treatment on the dynamic compressive strength of Longyou sandstone". Engineering Geology, 191: 1-7.
- [16] Momeni, A., Abdilor, Y., Khanlari, G. R., Heidari, M., and 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.
- [17] Li, J. L., Zhou, K. P., Liu, W. J., and Deng, H. W. (2016). "NMR research on deterioration characteristics of microscopic structure of sandstones in freeze-thaw cycles". Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 26(11): 2997-3003.
- [18] 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(3): 130-138.
- [19] Khanlari, G., Sahamieh, R. Z., and 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.
- [20] Ghobadi, M. H., Beydokhti, A. T., Nikudel, M. R., Asiabanha, A., and Karakus, M. (2016). "The effect of freeze-thaw process on the physical and mechanical properties of tuff". Environmental Earth Sciences, 75(9): 846.
- [21] 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(6): 1023-1028.
- [22] Takarli, M., and Prince-Agbojjan¹, W. (2008). "Temperature effects on physical properties and mechanical behavior of granite: experimental investigation of material damage". Journal of ASTM International, 5(3): 1-13.
- [23] Yu, J., Chen, X., Li, H., Zhou, J. W., and 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.

¹ Takarli² Prince - Agbojjan



DOI: 10.30479/jmre.2019.1584

Effect Of Freeze-Thaw And Heating-Cooling Processes On Permeability Of: Lushan Sandstone

Hosseini M.^{1*}, Fakhri D.²

1- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Imam Khomeini International university, Qazvin
meh_hosseini18@yahoo.com

2- B.Sc Student, Dept. of Mining Engineering, Imam Khomeini International university, Qazvin
danialfakhri.fkh@gmail.com

(Received: 18 Aug. 2018, Accepted: 29 Nov. 2018)

Abstract: Rocks are usually exposed to freeze-thaw and/or heating-cooling conditions in many environments. In cold regions, rocks are affected by long-time freeze and several freeze-thaw cycles. In addition, rocks are exposed to significant heat in some cases, such as explosions and fires; they are then cooled down due to fire extinguishing or cold ventilation and a heating-cooling- process occurs. Therefore, it is necessary to investigate the effects of these processes on the physical and mechanical properties of rocks, including permeability. In this research, sandstone specimens of Lushan area were applied to investigate the impact of number of freeze-thaw cycles and the effect of temperature in the heating-cooling process on sandstone permeability. The freezing temperature of -16°C was considered to study the effect of number of cycles. In this state, the tests were carried out on the specimens withstood 1, 5, 10, and 20 freeze-thaw cycles. To study the effect of heating-cooling, the tests were conducted on the specimens that withstood one heating-cooling cycle. The specimens withstood temperatures of 60, 100, 200, 400, 600, 800, and 1000°C at the heating process and then cooled in the laboratory environment. Results indicated that permeability rate was reduced after one cycle of freeze-thaw cycles the reduction continued to 5 cycles; although, permeability reduction was negligible from cycle 1 to cycle 5. Permeability increased slightly in 10 cycles and the increase was significant in 20 cycles. Sandstone permeability was reduced up to 100°C and then was increased with the temperature increasing at the heating-cooling process. Permeability changes in the heating-cooling process were consistent with the variations of velocity of longitudinal waves, dry unit weight, and effective porosity. CT scan images were used to examine permeability changes in the heating-cooling process and the CT value calculated by the images confirms the permeability variations.

Keywords: Sandstone, Permeability, Freeze-thaw process, Heating-cooling process, Rock.

INTRODUCTION

Northwestern and western provinces of the country have temperate summers and cold winters. High precipitation and cold weather is characteristic of winter in these regions. At these conditions, rocks are

exposed to long frosts and numerous freeze-thaw cycles. It is therefore necessary to investigate the effect of these processes on the physical and mechanical properties of rocks, such as permeability.

The review of literature indicates that most studies have investigated the subject of temperature, the effect of heating and cooling, and the effect of freeze-thaw processes on physical properties including: specific gravity, longitudinal wave velocity, water absorption percentage and porosity, as well as mechanical properties including uniaxial compressive strength, elasticity modulus and tensile strength. In this research, sandstone specimens of Lushan area were used to investigate the impact of number of freeze-thaw cycles and the effect of temperature in the heating-cooling process on sandstone permeability.

METHODS

The sandstone sample used in this study was obtained from the Lalun formations of the Lushan region, which consists of 15 percent Quartz, 7 percent Feldspar, 15 percent Calcite, 8 percent Chert, 7 percent opaque minerals, and 48 percent of this rock were small quartz and clay particles.

The experiment stages for investigating the effect of the number of freeze-thaw cycles on permeability are as follows:

A) The samples were placed in the water basin for 48 hours to be saturated.

B) The samples were placed in the freezer for 18 hours at -16°C .

C) The samples were placed in 20°C water for 6 hours. A freeze-thaw cycle is completed by going through steps A through C. To investigate the cycle number effect, the freeze temperature was set at -16°C . Samples that were subjected to 1, 5, 10 and 20 freeze-thaw cycles were experimented on in this condition. An experiment was also performed on the sample that was not subjected to the freeze-thaw cycle.

The experiment stages for investigating the effect of the number of heating-cooling cycles on permeability are as follows:

A) The samples were put in the oven. The rate of temperature rise is set to $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

B) All samples were placed in the lab environment to cool down and for their temperatures to reach the lab ambient temperature (25°C). A heating-cooling cycle is completed by completing stages A and B. This experiment was performed on samples that were subjected to one heating-cooling cycle, and also were subjected to temperatures of 60, 100, 200, 400, 600, 800, and 1000 degrees in the heating cycle and cooled down in the environment.

C) The samples were placed in the water basin for 48 hours to be saturated.

D) Performing the permeability test.

FINDINGS AND ARGUMENT

This study investigated the effect of freeze-thaw and heating-cooling processes on the permeability of Lushan sandstones. In addition to permeability tests, experiments were also conducted for determining effective porosity, specific gravity, and longitudinal wave velocity. The results of this experiment are as follows:

In the freeze-thaw process:

- The amount of permeability is reduced after one cycle and this reduction continues for 5 cycles.
- In the tenth cycle, the permeability is slightly increased, and in the twentieth cycle the increase is significant.

- In the twentieth cycle, permeability is 1.3 the initial amount.

In the heating-cooling process:

- Increasing temperature to 100°C reduces permeability.

Increasing temperature beyond 100°C increases permeability. This is compatible with the findings of YU et al. in 2015 [1].

- Up to 100°C , longitudinal wave velocity (Figure 1) and dry specific gravity increases while porosity decreases.

- After 100°C , longitudinal wave velocity and dry specific gravity is reduced while porosity is

increased.

- The amount of CT obtained from CT scan images indicate that increasing temperature from 200 to 600 °C increases the damage variable.

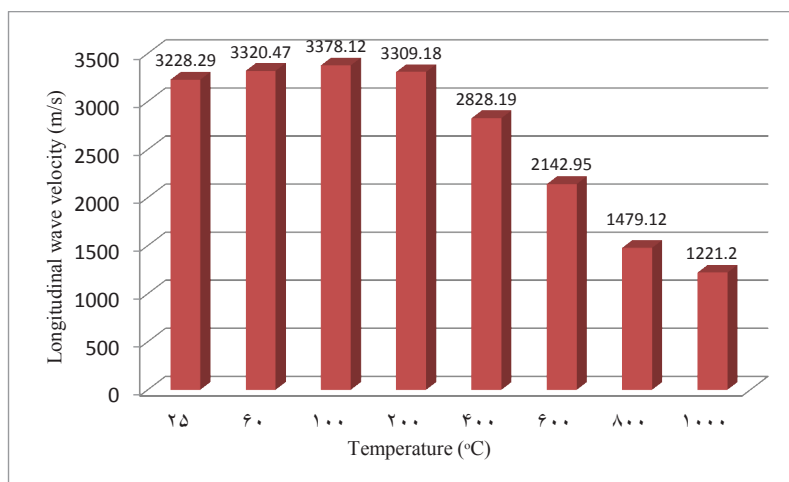


Figure 1. Longitudinal wave velocity as a function of the temperature

CONCLUSIONS

In this research, sandstone specimens of Lushan area were applied of the investigation of the influence of number of freeze-thaw cycles and the effect of temperature in the heating-cooling process on sandstone permeability.

Results indicated that permeability rate was reduced after one cycle of freeze-thaw cycles the reduction continued to 5 cycles; although, permeability reduction was negligible from cycle 1 to cycle 5. Permeability was increased slightly in 10 cycles and the amount of increment was significant in 20 cycles. Sandstone permeability was reduced up to 100 °C and then was increased with the temperature increasing at the heating-cooling process. Permeability changes in the heating-cooling process were consistent with the variations of velocity of longitudinal waves, dry unit weight, and effective porosity. CT scan images were used to examine permeability changes in the heating-cooling process and the CT value calculated by the images confirms the permeability variations.

REFERENCES

- [1] Yu, J., Chen, X., Li, H., Zhou, J. W., and 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.