



اثر چرخه انجماد - ذوب بر چقرمگی شکست و پارامترهای مقاومتی سنگ تراورتن

فردین نظامی وند چگینی، مهدی حسینی*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۶
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰

کلمات کلیدی:

چرخه انجماد - ذوب
چقرمگی شکست
پارامترهای مقاومتی
سنگ تراورتن

خلاصه: در حال حاضر، با توسعه مداوم اقتصاد در مناطق سردسیر در سراسر جهان، بسیاری از پروژه‌های سنگی از قبیل استخراج معادن و اکتشاف نفت و گاز در این مناطق در حال اجرا است. در استان‌های شمال غرب و غرب ایران که دارای تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد می‌باشند، بارندگی زیاد و برودت هوا از مشخصات زمستان‌های این مناطق به شمار می‌آید. در این شرایط سنگ تحت تأثیر یخبندان‌های طولانی و چرخه‌های متعدد یخبندان - ذوب قرار می‌گیرد. بنابراین در مناطقی که احتمال رخ دادن این فرآیند است ضروری است تا تأثیر چرخه‌های متعدد یخبندان - ذوب بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح در نظر گرفته شود. در این پژوهش به بررسی تأثیر فرآیند یخبندان - ذوب روی چقرمگی شکست مود I و II و پارامترهای مقاومتی سنگ تراورتن پرداخته شده است. بدین منظور، برای بررسی اثر چرخه‌های یخبندان - ذوب بر چقرمگی شکست مود I و II، نمونه‌ها تحت ۰، ۱، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ چرخه یخبندان - ذوب قرار گرفته، و چقرمگی شکست مود I و II در چرخه‌های مختلف بررسی شده است. برای بررسی اثر یخبندان - ذوب روی پارامترهای مقاومتی سنگ تراورتن، نمونه‌ها تحت فشار محصور کننده ۰، ۲/۵ و ۵ مگاپاسکال قرار گرفته‌اند. همچنین برای بررسی و ارزیابی دقیق‌تر تغییرات ساختاری نمونه‌ها در اثر اعمال چرخه‌های یخبندان - ذوب مطالعات میکروسکوپی نیز انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان - ذوب چقرمگی شکست مود I و II به صورت نمایی کاهش می‌یابد. چقرمگی شکست مود I تراورتن سفید و قهوه‌ای بعد از ۶۴ سیکل نسبت به سیکل صفر به ترتیب ۳۵/۴۸ و ۳۷ درصد و چقرمگی شکست مود II تراورتن سفید و قهوه‌ای بعد از ۶۴ سیکل نسبت به سیکل صفر به ترتیب ۴۵/۷۵ و ۵۰ درصد کاهش یافت. مقاومت فشاری سه محوری، مقاومت فشاری تک محوری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با افزایش تعداد سیکل یخبندان - ذوب نسبت به سیکل صفر نیز کاهش می‌یابد. مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد، میکروتَرَک‌های موجود در سنگ در اثر چرخه‌های یخبندان - ذوب گسترش یافته و ترک‌های جدید به وجود آمده است..

۱- مقدمه

حال حاضر، با توسعه مداوم اقتصاد در مناطق سردسیر در سراسر جهان، بسیاری از پروژه‌های سنگی از قبیل استخراج معادن و اکتشاف نفت و گاز در این مناطق در حال اجرا است. در استان‌های شمال غرب و غرب ایران که دارای تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد می‌باشند، بارندگی زیاد و برودت هوا از مشخصات زمستان‌های این مناطق به شمار می‌آید. در این شرایط سنگ تحت تأثیر یخبندان‌های طولانی و چرخه‌های متعدد یخبندان - ذوب قرار می‌گیرند. بنابراین در مناطقی که احتمال رخ دادن این فرآیند است ضروری است تا تأثیر این فرآیند بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح در نظر گرفته شود. مقاومت سنگ در برابر چرخه‌های یخبندان - ذوب به مجموعه پیچیده‌ای از ویژگی‌های سنگ شامل ترکیب کانی شناسی [۳] اندازه و توزیع حفرات موجود در سنگ [۴] و متعاقب آن ویژگی‌های

مکانیک شکست در حل مسائل مربوط در مهندسی معدن و مهندسی عمران به طور فزاینده‌ای مهم است. برای مثال، مکانیک شکست می‌تواند برای طراحی شکستگی هیدرولیکی برای انرژی زمین گرمایی، بازیابی نفت و گاز طبیعی استفاده شود [۱]. عوامل محیطی مختلفی وجود دارند که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها را تحت عنوان عوامل هوازدگی تحت تأثیر قرار می‌دهند. تأثیر این عوامل می‌تواند به دو صورت فیزیکی و یا شیمیایی باشد. فرآیند یخبندان ذوب یکی از مهم‌ترین و قدرتمندترین عوامل هوازدگی از نوع فیزیکی می‌باشد که خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث کاهش دوام و پایداری سنگ می‌شود [۲]. در

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mahdi_hosseini1@eng.ikiu.ac.ir



هیدرولیکی سنگ [۵] و نیز ویژگی‌های مکانیکی به خصوص مقاومت کششی سنگ بستگی دارد [۶]. مکانیزمی که به موجب آن تبلور یخ منجر به ایجاد تنش در فابریک سنگ می‌گردد هنوز مورد بحث است. برای یک مدت طولانی افزایش حجم ناشی از انجماد آب موجود در حفرات به عنوان علت اصلی ایجاد تنش در داخل فابریک سنگ در نظر گرفته می‌شد. این فرضیه بر این پایه استوار بود که یک سانتی‌متر مکعب آب بعد از انجماد در حدود ۱/۰۹ سانتی‌متر مکعب فضا را اشغال می‌کند [۷]. چرخه‌های انجماد - ذوب منجر به کاهش یکپارچگی سنگ و تخریب سنگ می‌شود، بر همین اساس موتلتورک مدل تابع تخریب را برای تعیین نیمه عمر مقاومت مکانیکی سنگ‌ها پیشنهاد نمود [۸]. آلتینداگ و همکاران، کاهش در مقاومت مکانیکی آندزیت اسپارتر را در پایان ۵۰ چرخه یخبندان - ذوب مشاهده نموده و نیمه عمر خصوصیات مکانیکی آن را با استفاده از مدل تابع تخریب پیش‌بینی نموده است [۹]، همچنین این محقق تاثیر ۵۵ چرخه یخبندان - ذوب را بر روی اینگنیمبریت‌های بنگازی ترکیه مورد مطالعه قرار داده و نیمه عمر خصوصیات مکانیکی را برای این سنگ برآورد کرده‌اند [۱۰]. جمشیدی و همکاران با استفاده از مدل تابع تخریب و انجام آزمایش‌های بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزبلی، رفتار دوام‌پذیری ۱۴ نوع سنگ ساختمانی را که در معرض چرخه‌های یخبندان - ذوب قرار گرفته شدند مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که سرعت تخریب برای انواع مختلف سنگ‌ها متفاوت می‌باشد [۱۱]. مومنی و همکاران با اعمال ۳۰۰ چرخه روی نمونه‌های گرانیتی تاثیر یخبندان - ذوب را روی نمونه‌های گرانیتی مورد بررسی قرار داده‌اند و مشاهده کردند با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان - ذوب، مقادیر سرعت امواج طولی، مقاومت کششی و مقاومت فشاری تک محوره کاهش در حالی که مقادیر جذب آب و تخلخل افزایش پیدا کرده است این تغییرات برای جذب آب به صورت نمایی و برای بقیه پارامترها به صورت خطی است [۱۲]. یوجین و همکاران با اعمال ۱۲ چرخه یخبندان - ذوب روی نمونه‌های ماسه سنگ قرمز مشاهده کردند با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان - ذوب سرعت امواج طولی، مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری تک محوره به علت ایجاد ریز ترک‌های مختلف و شل شدن مواد سیمانی سنگ در اثر بارگذاری و باربرداری در فرآیند یخبندان - ذوب کاهش پیدا کرده است و همچنین ترک‌های ایجاد شده باعث افزایش نفوذپذیری شده است [۱۳]. اندازه دانه‌ها، تخلخل موثر و مقاومت فشاری تک محوره سنگ به تنهایی اطلاعات کافی درباره میزان تاثیر فرآیند یخبندان - ذوب بر سنگ را نمی‌دهد و میزان تخریب سنگ وابسته به

مشخصات حفرات داخل آن از جمله نحوه توزیع، اندازه، شکل و اتصال آن‌ها می‌باشد [۱۴]. لی و همکاران با استفاده از روش رزونانس مغناطیسی هسته‌ای و عکس‌برداری ام آر آی تاثیر یخبندان - ذوب را روی ویژگی‌های میکروسکوپی نمونه ماسه سنگ مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند با افزایش تعداد چرخه‌ها، تخلخل و جرم اشباع نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و عکس‌های ام آر آی گسترش و ایجاد حفرات در سنگ را نشان می‌دهد [۱۵]. آریک اثرات چرخه‌های مرطوب شدن - خشک شدن و یخبندان - ذوب را بر روی برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی اینگنیمبریت مورد بررسی قرار داد و وزن مخصوص، تخلخل، جذب آب، شاخص دوام، مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج (P) در همه نمونه‌های اینگنیمبریت قبل و بعد از ۱۰ چرخه یخبندان - ذوب برای هر نمونه (در مجموع ۵۰ چرخه) تعیین شد. در مرحله انجماد، نمونه‌ها در فریزر در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت قرار داده شدند و در مرحله ذوب، نمونه‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت قرار داده شدند. چرخه انجماد - ذوب باعث تغییرات بزرگتری در تخلخل ظاهری و جذب آب نسبت به چرخه تر شدن - خشک شدن شد و همچنین چرخه‌های انجماد - ذوب مختلف منجر به کاهش قابل توجه مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج P می‌شوند [۱۶]. حسینی و خدایاری اثر تعداد سیکل‌های یخبندان - ذوب بر مقاومت و پارامترهای مقاومتی ماسه سنگ را مورد بررسی قرار دادند. برای بررسی اثر تعداد چرخه‌های یخبندان - ذوب روی مقاومت و خواص مقاومتی سنگ، نمونه‌هایی که تحت دمای ۱۶- درجه سانتی‌گراد منجمد شده‌اند و به ترتیب ۱، ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ چرخه یخبندان - ذوب را تحمل کرده‌اند مورد آزمایش قرار گرفتند. یک سری آزمایش هم روی نمونه‌هایی که تحت دمای ۲۴- درجه سانتی‌گراد یخ زده‌اند و یک چرخه یخبندان - ذوب را تحمل کرده‌اند انجام شد. علاوه بر این، یک سری آزمایش هم بر روی نمونه‌هایی که چرخه یخبندان - ذوب را تحمل نکرده‌اند در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) انجام شد. و به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت فشاری سه محوری با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان - ذوب و دمای یخبندان کاهش می‌یابد و میزان کاهش مقاومت تراکم سه محوری کمتر از مقاومت تراکم تک محوری است و همچنین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها نیز با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان - ذوب و دمای یخبندان کاهش می‌یابد شدت کاهش چسبندگی بیشتر از زاویه اصطکاک داخلی نمونه است. وزن مخصوص خشک نمونه‌ها در اثر افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان - ذوب و دمای یخبندان کاهش و تخلخل موثر افزایش می‌یابد و علت آن گسترش

چرخه‌های یخبندان- ذوب (۰، ۷، ۱۵، ۴۰ و ۷۵) و فشار جانبی (۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ مگاپاسکال) تحت آزمایش سه محوری قرار گرفتند. هر چرخه یخبندان- ذوب شامل ۱۲ ساعت انجماد نمونه‌ها در دمای ۲۰- (نمونه‌ها در داخل فریزر که دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد داشت قرار گرفتند) درجه سانتی‌گراد و ۱۲ ساعت ذوب نمونه‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود (نمونه در داخل حمام آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند). تغییرات رخ داده در بافت و ریزساختارهای نمونه‌ها پس از فرآیند هوازگی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج SEM افزایش ترک‌های ریز و درشت در ساختار نمونه‌ها و ناپدید شدن سیمان در ملات آن‌ها را نشان داد همچنین، نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری، کاهش نمایی در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب را نشان داد. افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب منجر به کاهش در مقادیر مقاومت فشاری سه محوری می‌شود [۲۱].

حسینی و احمدی به بررسی تاثیر دمای انجماد در یک چرخه انجماد- ذوب با سه دمای انجماد ۲۰-، ۴۰-، ۶۰- بر روی نفوذپذیری، مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری سه محوری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های ماسه سنگ سازند لالون منطقه لوشان پرداختند. بررسی و تاثیرات دمای انجماد بر روی خواص ذکر شده مطالعه و با خواص نمونه‌هایی که چرخه انجماد- ذوب را تحمل نکرده‌اند مقایسه شد. نتایج به دست آمده حاکی از این بود که با کاهش دما در یک چرخه انجماد- ذوب، مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت فشاری سه محوری، چسبندگی و مدول الاستیسیته کاهش و نفوذپذیری افزایش می‌یابد [۲۲].

چن و همکاران به بررسی تاثیر تعداد چرخه انجماد- ذوب بر خواص ماسه سنگ پرداختند. دوازده نمونه ماسه سنگ تحت فشار سه محوری مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی ماسه سنگ به طور قابل توجهی با تعداد چرخه انجماد- ذوب کاهش یافت. حداکثر مقاومت فشاری ماسه سنگ بعد از ۲۱ سیکل ۳۷/۹۶٪ کمتر از نمونه‌هایی بود که تحت چرخه یخبندان- ذوب قرار نگرفتند [۲۳].

زو و همکاران مجموعه‌ای از آزمایش‌های فشاری سه محوری با قابلیت اندازه‌گیری انتشار آوایی (AE) را بر روی نمونه‌های گرانیته که چرخه‌های انجماد- ذوب را تحمل کرده بودند انجام داد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد- ذوب، سرعت موج P و شدت اوج AE

ترک‌های اولیه و ایجاد ترک‌های جدید است [۱۷]. هان و همکاران اثرات سیکل‌های یخبندان- ذوب بر خصوصیات مکانیکی نمونه‌های ماسه سنگ تحت اثرات محلول‌های مختلف شیمیایی (محلول اسیدی سدیم سولفات و بی‌کربنات سدیم و محلول بازی سدیم هیدروکسید) مورد بررسی قرار دادند. این نمونه‌ها تحت چرخه‌های (۰، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) یخبندان- ذوب قرار گرفته و چهار آزمایش برای هر محلول شیمیایی تحت هر سیکل آزمایش انجام شد. نتایج نشان داد مود I چقرمگی شکست، مقاومت کششی و مقاومت فشاری روند رو به کاهشی را با افزایش چرخه یخبندان- ذوب نشان داد. محلول‌های مختلف شیمیایی تأثیر متفاوتی بر میزان تخریب در نمونه‌های ماسه سنگ در اثر چرخه یخبندان- ذوب داشتند. تاثیر محلول اسیدی سدیم سولفات از بی‌کربنات سدیم بیشتر بود [۱۸]. نی و همکاران خواص فیزیکی و مکانیکی گرانیته را تحت اثر فرسایش شیمیایی و چرخه‌های یخبندان- ذوب مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌های گرانیته برای شبیه‌سازی فرایندهای شیمیایی به سه گروه تقسیم و هر گروه از نمونه‌ها به مدت ۹۰ روز در یکی از ظرف‌ها شامل آب، محلول سدیم هیدروکسید و محلول بی‌کربنات غوطه‌ور شدند. پس از آن، آزمایش یخبندان- ذوب در چرخه‌های ۰، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ انجام شد. سپس نمونه‌ها تحت شرایط بارگذاری فشاری تک محوری آزمایش شدند. نتایج نشان داد که با افزایش چرخه‌های یخبندان- ذوب، مدول یانگ، سرعت موج P و مقاومت فشاری تک محوره کاهش می‌یابد و گرانیته‌های غوطه‌ور در محلول بی‌کربنات نسبت به آن‌هایی که در آب و محلول سدیم هیدروکسید قرار گرفته‌اند سطح شکستگی بیشتری دارند. بیشترین تأثیر فرایندهای شیمیایی و یخبندان- ذوب بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی گرانیته در محلول بی‌کربنات مشاهده شد [۱۹]. عبدالغنی زاده و همکاران تأثیر چرخه یخبندان- ذوب و دمای انجماد بر چقرمگی شکست مود I و مود II ماسه سنگ لوشان را مورد بررسی قرار دادند برای این منظور، نمونه‌ها در معرض ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ چرخه انجماد- ذوب قرار گرفتند و چقرمگی شکست مود I و مود II در چرخه‌های مختلف ارزیابی شد. اثر دمای انجماد در چرخه یخبندان- ذوب بر چقرمگی شکست مود I و مود II نیز بررسی شد و به این نتیجه رسیدند که، چقرمگی شکست مود I و مود II با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد- ذوب و دمای انجماد به طور غیرخطی کاهش می‌یابد [۲۰]. سید موسوی و همکاران اثرات چرخه‌های یخبندان- ذوب بر روی نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری برای نمونه‌های سنگ شیبست از معدن روباز انگوران را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور ۳۰ نمونه از شیبست‌ها تحت



شکل ۱. نمونه‌های سنگ تراورتن (سفید و قهوه‌ای)

Fig. 1. Samples of travertine (white and brown)

۲- آماده‌سازی نمونه

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌های تراورتن برای آزمایش تعیین چقرمگی شکست در این پژوهش بلوک‌های تراورتن سفید و قهوه‌ای از یک سنگ‌بری در شهر صنعتی شمس آباد (واقع شده در ۴۰ کیلومتری از تهران در آزادراه تهران- قم) تهیه شد نمونه‌های سفید مربوط به یکی از معادن تراورتن شهرستان محلات در استان مرکزی و نمونه‌های قهوه‌ای مربوط به یکی از معادن تراورتن شهرستان کاشان واقع در استان اصفهان است (شکل ۱). طبق آنالیز XRF عمده ترکیبات نمونه‌های تراورتن از اکسید کلسیم می‌باشد همراه با ناخالصی‌هایی از اکسید سیلیسیم و اکسیدهای فلزاتی از جمله آهن، آلومینیوم، سدیم و منیزیم است (جدول ۱). در جدول ۱، L.O.I* مواد فرار و H_2O می‌باشد که با اشتعال نمونه در ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، وزن آن را به درصد حساب کرده و در لیست آنالیز شیمیایی قرار می‌دهند. از روش دیسک برزیلی دارای ترک چورون برای تعیین چقرمگی شکست مود I و II استفاده شده است. هندسه و نحوه‌ی بارگذاری در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای بی‌بعد برای توصیف هندسه ترک چورون در شکل ۲ و در روابط (۱ تا ۴) ارائه شده است [۲۵].

$$\alpha_1 = \frac{a_1}{R} \quad (1)$$

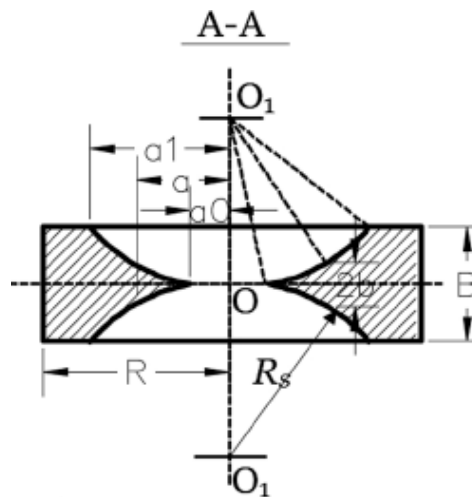
$$\alpha_B = \frac{B}{R} \quad (2)$$

گرانیت روند نزولی قابل توجهی را نشان می‌دهد [۲۴]. در این پژوهش به بررسی تاثیر چرخه‌های یخبندان- ذوب روی چقرمگی شکست مود I و II و پارامترهای مقاومتی سنگ تراورتن پرداخته شده است. بدین منظور، برای بررسی اثر چرخه‌های یخبندان- ذوب روی چقرمگی شکست مود I و II، نمونه‌ها تحت تاثیر ۰، ۱، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ چرخه یخبندان- ذوب قرار گرفتند و چقرمگی شکست نمونه‌ها با استفاده از روش دیسک برزیلی دارای ترک چورون (ترک شاخ بزی) تعیین شده است. برای بررسی اثر یخبندان- ذوب روی پارامترهای مقاومتی سنگ تراورتن، نمونه‌ها تحت فشار محصور کننده ۲/۵ و ۵ مگاپاسکال قرار گرفته‌اند. همچنین برای بررسی و ارزیابی دقیق‌تر تغییرات ساختاری نمونه‌ها در اثر اعمال چرخه‌های یخبندان- ذوب و تغییرات بافت آن‌ها، مطالعات میکروسکوپی نیز انجام گرفت. با توجه به این که تمرکز بیشتر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه روی ویژگی‌هایی از جمله تخلخل، وزن مخصوص، سرعت امواج طولی، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلی و مدول الاستیسیته می‌باشد در این پژوهش تاثیر چرخه‌های یخبندان- ذوب روی چقرمگی شکست مود I و II، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری سه محوری مورد بررسی قرار گرفته است. در ضمن تعداد محدودی پژوهش که در زمینه اثر چرخه یخبندان- ذوب روی چقرمگی شکست ارائه شده است روی ماسه سنگ انجام شده در حالی که در این پایان‌نامه پژوهش روی سنگ تراورتن است.

جدول ۱. نتایج آنالیز XRF نمونه‌های تراورتن

Table 1. Changes in the velocity of longitudinal waves of brown travertine samples in relation to freeze-thaw cycles

*L.O.I.	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	واحد	نمونه
۴۳/۱	۰/۲	۱/۲	۰/۵	۰/۱	۵۴/۷	<۰/۱	%	قهوه‌ای
۴۲/۴	۰/۲	۲/۳	۰/۵	۰/۲	۵۳/۸	۰/۲	%	سفید



شکل ۲. پارامترهای هندسی شکاف چورون

Fig. 2. Geometric parameters of the Chevron crack

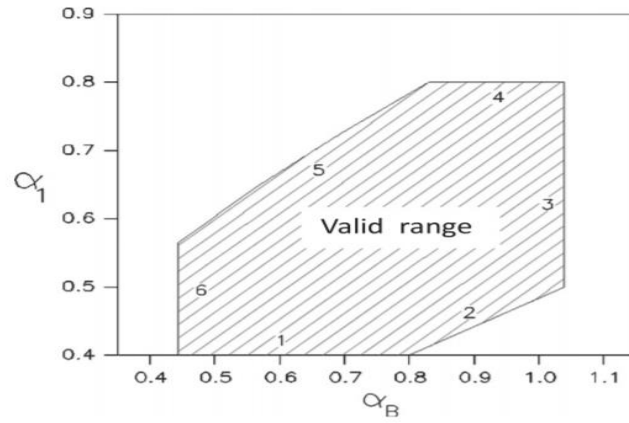
ضخامت ۲۴ میلی‌متر برش داده شده است. برای ایجاد ترک چورون با استفاده از فرز انگشتی (شکل ۵) که در قسمت جلوی آن یک تیغه الماسه به قطر ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر تعبیه شده است، در دو طرف نمونه شکافی به عمق ۱۳/۵ میلی‌متر ایجاد می‌شود با کامل شدن این مرحله، ترک چورون در مرکز دیسک ایجاد می‌شود. پس از این فرایند، نمونه‌ها کدگذاری شده و با توجه به روش آزمایش تحت چرخه‌های مختلف انجماد-ذوب قرار داده می‌شوند.

دو تا از مهم‌ترین عواملی که باعث می‌شود چرخه یخبندان-ذوب روی خواص سنگ اثر متفاوت داشته باشد تخلخل و اندازه منافذ است که این مقادیر در تراورتن سفید و قهوه‌ای متفاوت است. به همین دلیل دو نوع تراورتن انتخاب شد.

$$\alpha_s = \frac{D_s}{2R} \quad (۳)$$

$$\alpha_0 = \frac{a_0}{R} \quad (۴)$$

که R شعاع دیسک، B ضخامت دیسک و قطر تیغه‌ی برش دهنده می‌باشد. ابعاد هندسی استاندارد نمونه‌ها با توجه به محدودیت‌های هندسی که توسط ISRM پیشنهاد شده، انتخاب شده است (شکل ۳) [۲۵]. از بلوک‌های تراورتن مغزه‌هایی به قطر ۷۴ میلی‌متر گرفته شده است (شکل ۴). پس از گرفتن مغزه‌ها از بلوک‌های سنگی، دیسک‌های دایره‌ای با



شکل ۳. شرایط هندسی لازم برای نمونه‌ی دیسک برزیلی دارای ترک چورون [۲۵]

Fig. 3. Necessary geometrical conditions for the sample of Brazilian disc with Chevron crack



شکل ۴. مغزه‌های آماده شده برای تهیه دیسک

Fig. 4. Cores prepared for disc preparation



شکل ۵. دستگاه فرز انگشتی برای ایجاد ترک چورون

Fig. 5. Finger milling machine to create Chevron crack

$$Y_{min}^* = ue^{va_1} \quad (۶)$$

در این رابطه u و v پارامترهای ثابتی هستند که از مقادیر α_0 و α_B تعیین می‌شوند (جدول ۲) [۲۵].
از رابطه (۷)، چقرمگی شکست مود Π خالص دیسک برزلی دارای شکاف چورون تعیین می‌شود.

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{\sqrt{\pi RB}} \sqrt{\frac{a}{R}} \sqrt{\frac{a_1 - a_0}{a - a_0}} \quad (۷)$$

که در آن Y_{Π} فاکتور هندسی مود Π خالص است که مقدار آن به نسبت (a/R) در نمونه‌ی دیسک برزلی بستگی دارد، که می‌توان این فاکتور هندسی را از دو روش نظری و عددی با استفاده از المان محدود به دست آورد. تغییرات Y_{Π} متناظر با (a/R) برای نمونه‌های دیسک برزلی در شکل ۶ نشان داده شده است [۲۵].

شکل ۷ تغییرات زاویه مود دو خالص (α_{Π}) نسبت به مقادیر مختلف a/R در نمونه‌ی دیسک برزلی دارای ترک چورون را نشان می‌دهد.
تخلخل موثر اولیه نمونه‌های تراورتن سفید و قهوه‌ای بر اساس استاندارد ISRM [۲۶] تعیین شده است. تخلخل موثر اولیه تراورتن سفید و قهوه‌ای به ترتیب ۲/۷۴ و ۱۰/۲۶ درصد است.

برای تعیین چقرمگی شکست در حالت مود I، بارگذاری در راستای ترک می‌باشد و برای تعیین چقرمگی شکست مود Π با توجه به شکل ۸، نمونه‌ها طوری تحت بارگذاری قرار می‌گیرند که راستای بارگذاری با راستای ترک، زاویه ۲۸ درجه بسازد.

چقرمگی شکست مود I و Π قبل از اعمال چرخه‌های یخبندان-ذوب و بعد از ۱، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ چرخه تعیین شد (جدول‌های ۳ و ۴). برای اطمینان از نتایج آزمایش و بررسی تکرارپذیری در هر چرخه یخبندان-ذوب روی ۴ نمونه آزمایش انجام شده است. میانگین نتایج در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است. به منظور بررسی رابطه بین چقرمگی شکست مود I و Π و تعداد چرخه‌های یخبندان-ذوب، بهترین منحنی که نشان دهنده تغییرات چقرمگی شکست با تعداد چرخه‌ها باشد متناسب با نقاط رسم شد (شکل ۹). سیکل صفر نشان دهنده نتایج نمونه‌هایی است که چرخه یخبندان-ذوب را تحمل نکرده‌اند.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها برای تعیین پارامترهای مقاومتی و سایر خواص سنگ تراورتن

برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها شامل تخلخل موثر، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، سرعت امواج طولی، وزن مخصوص خشک و اشباع و جذب آب، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت فشاری سه محوره و مقاومت کششی برزلی از روش استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ استفاده شده است [۲۶]. برای تعیین اثر چرخه‌های یخبندان-ذوب بر خواص مکانیکی سنگ تراورتن سفید، در مجموع تعداد ۲۸ مغزه از بلوک‌های تراورتن سفید با قطر متوسط ۵۴ میلی‌متر آماده‌سازی شد. نسبت طول به قطر برای آزمایش تک محوره و سه محوره تقریباً ۲/۵ و برای آزمایش برزلی ۰/۵ می‌باشد. برای اینکه دو سطح نمونه برای انجام آزمایش سه محوری و تک محوری فاقد ناصافی باشد نمونه‌ها با دستگاه، ساب داده می‌شود. برای انجام آزمایش یخبندان-ذوب، قبل از اعمال چرخه یخبندان-ذوب ابتدا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب و تحت فشار جو اشباع شده و برای دوره‌ی یخبندان نمونه‌ها با توجه به داده‌های هواشناسی مناطق غربی و شمال غرب ایران به مدت ۱۸ ساعت در دمای ۱۶- درجه سانتی‌گراد در داخل فریزر قرار گرفته است و برای دوره ذوب به مدت ۶ ساعت در تشت آب با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده است (پایان یک سیکل). لازم به ذکر است بعد از اینکه نمونه‌ها در فریزر قرار گرفتند فریزر روشن شد و دما به تدریج کاهش داده شد. در هنگام ذوب هم دمای آب توسط یک گرمکن قابل کنترل به تدریج افزایش داده شد تا به ۲۰ درجه سانتی‌گراد برسد.

۳- نتایج و تحلیل

۳-۱- اثر چرخه‌های یخبندان-ذوب روی چقرمگی شکست مود I و Π سنگ تراورتن سفید

چقرمگی شکست مود I دیسک برزلی دارای تک چورون را می‌توان با استفاده از روابط (۵) و (۶) تعیین کرد.

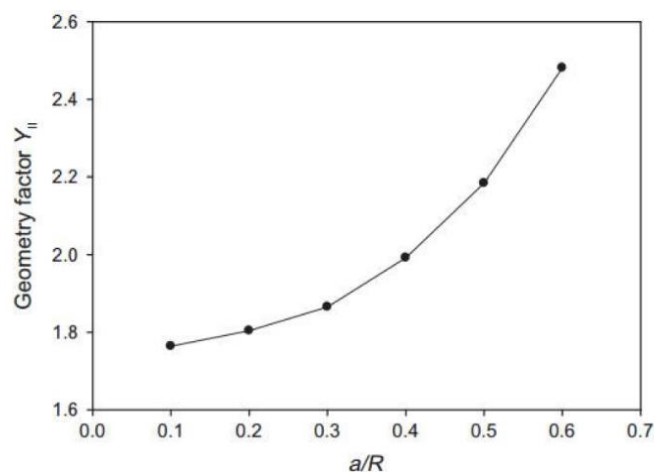
$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{D}} Y_{min}^* \quad (۵)$$

در این رابطه P_{max} نیروی شکست، B ضخامت دیسک، D قطر و Y_{min}^* (ضریب شدت تنش) از رابطه (۶) به دست می‌آید.

جدول ۲. مقادیر u و v برای α_0 و α_B مختلف [۲۷]

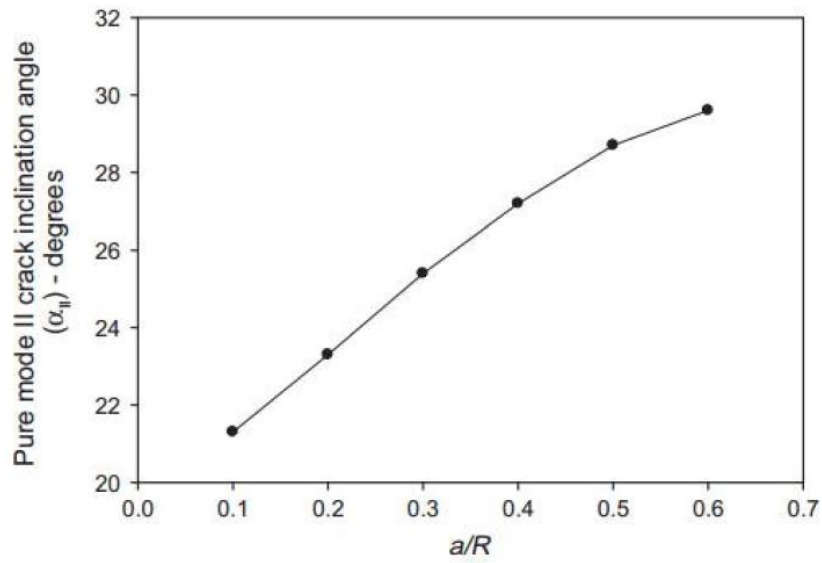
Table 2. Values of u and v for different α_0 and α_B

α_0	۰/۲۰۰	۰/۲۵۰	۰/۲۷۵	۰/۳۰۰	۰/۳۲۵	۰/۳۵۰	۰/۳۷۵	۰/۴۰۰
α_B	u							
۰/۶۸۰	۰/۲۶۶۷	۰/۲۷۰۴	۰/۲۷۱۸	۰/۲۷۴۴	۰/۲۷۷۴	۰/۲۸۰۷	۰/۲۸۴۸	۰/۲۸۸۸
۰/۷۲۰	۰/۲۶۵۰	۰/۲۶۸۳	۰/۲۷۰۵	۰/۲۷۲۷	۰/۲۷۶۳	۰/۲۷۹۴	۰/۲۸۳۱	۰/۲۸۷۱
۰/۷۶۰	۰/۲۶۳۷	۰/۲۶۶۸	۰/۲۶۹۳	۰/۲۷۱۹	۰/۲۷۴۴	۰/۲۷۸۱	۰/۲۸۱۹	۰/۲۸۶۰
۰/۸۰۰	۰/۲۶۲۵	۰/۲۶۵۷	۰/۲۶۸۰	۰/۲۷۰۶	۰/۲۷۳۶	۰/۲۷۷۲	۰/۲۸۱۱	۰/۲۸۴۵
۰/۸۴۰	۰/۲۶۱۲	۰/۲۶۴۹	۰/۲۶۷۲	۰/۲۶۹۹	۰/۲۷۲۷	۰/۲۷۶۳	۰/۲۸۰۱	۰/۲۸۳۱
۰/۸۸۰	۰/۲۶۰۲	۰/۲۶۴۲	۰/۲۶۶۸	۰/۲۶۹۱	۰/۲۷۲۳	۰/۲۷۵۴	۰/۲۷۹۳	۰/۲۸۱۶
۰/۹۲۰	۰/۲۵۹۸	۰/۲۶۳۴	۰/۲۶۵۸	۰/۲۶۸۴	۰/۲۷۱۶	۰/۲۷۴۷	۰/۲۷۸۲	۰/۲۸۱۱
۰/۹۶۰	۰/۲۵۹۳	۰/۲۶۳۳	۰/۲۶۵۵	۰/۲۶۸۵	۰/۲۷۱۰	۰/۲۷۴۶	۰/۲۷۶۷	۰/۲۷۹۹
۱/۰۰۰	۰/۲۵۹۱	۰/۲۶۳۰	۰/۲۶۵۳	۰/۲۶۷۹	۰/۲۷۰۹	۰/۲۷۳۸	۰/۲۷۶۸	۰/۲۷۸۶
	v							
۰/۶۸۰	۱/۷۶۷۶	۱/۷۷۱۱	۱/۷۷۵۷	۱/۷۷۵۹	۱/۷۷۴۵	۱/۷۷۴۱	۱/۷۷۰۰	۱/۷۶۶۶
۰/۷۲۰	۱/۷۶۴۷	۱/۷۶۹۸	۰/۷۷۰۸	۱/۷۷۲۲	۱/۷۶۹۳	۱/۷۶۸۳	۱/۷۶۵۲	۱/۷۶۱۷
۰/۷۶۰	۱/۷۶۰۰	۱/۷۶۶۵	۱/۷۶۴۹	۱/۷۶۵۲	۱/۷۶۶۲	۱/۷۶۲۴	۱/۷۵۹۳	۱/۷۵۵۴
۰/۸۰۰	۱/۷۵۵۷	۱/۷۶۱۱	۱/۷۶۱۳	۱/۷۶۰۳	۱/۷۵۹۶	۱/۷۵۶۱	۱/۷۵۲۵	۱/۷۵۱۲
۰/۸۴۰	۱/۷۵۲۲	۱/۷۵۴۷	۱/۷۵۵۱	۱/۷۵۴۸	۱/۷۵۳۵	۱/۷۴۹۹	۱/۷۴۶۹	۱/۷۴۷۳
۰/۸۸۰	۱/۷۴۸۷	۱/۷۴۹۲	۱/۷۴۷۸	۱/۷۴۸۷	۱/۷۴۶۳	۱/۷۴۵۲	۱/۷۴۰۳	۱/۷۴۳۴
۰/۹۲۰	۰/۷۴۲۳	۱/۷۴۴۶	۱/۷۴۴۳	۱/۷۴۳۲	۱/۷۴۱۱	۱/۷۳۸۹	۱/۷۳۶۰	۱/۷۳۶۳
۰/۹۶۰	۱/۷۳۷۰	۱/۷۳۷۳	۱/۷۳۷۲	۱/۷۳۴۶	۱/۷۳۴۴	۱/۷۳۰۹	۱/۷۳۴۳	۱/۷۳۳۱
۱/۰۰۰	۱/۷۳۰۸	۱/۷۳۰۷	۱/۷۳۰۶	۱/۷۲۹۷	۱/۷۲۷۳	۱/۷۲۷۰	۱/۷۲۵۸	۱/۷۳۰۲



شکل ۶. تغییرات فاکتور هندسی مود II متناظر با a/R برای نمونه‌ی دیسک برزیلی دارای ترک چورون [۲۵]

Fig. 6. Variations of geometric factor of mode II corresponding to a/R for sample of Brazilian disc with Chevron crack



شکل ۷. زاویه (α_{II}) برای حالت مود II خالص متناظر با a/R های مختلف [۲۵]

Fig. 7. Angle (α_{II}) for pure mode II corresponding to different a/R



شکل ۸. بارگذاری دیسک‌های برزیلی برای تعیین چقرمگی شکست مود II توسط دستگاه بارگذاری

Fig. 8. Loading Brazilian discs to determine II-mode fracture toughness by loading device

جدول ۳. میانگین نتایج چقرمگی شکست مود I نمونه‌های تراورتن سفید در چرخه‌های ۰، ۱، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴

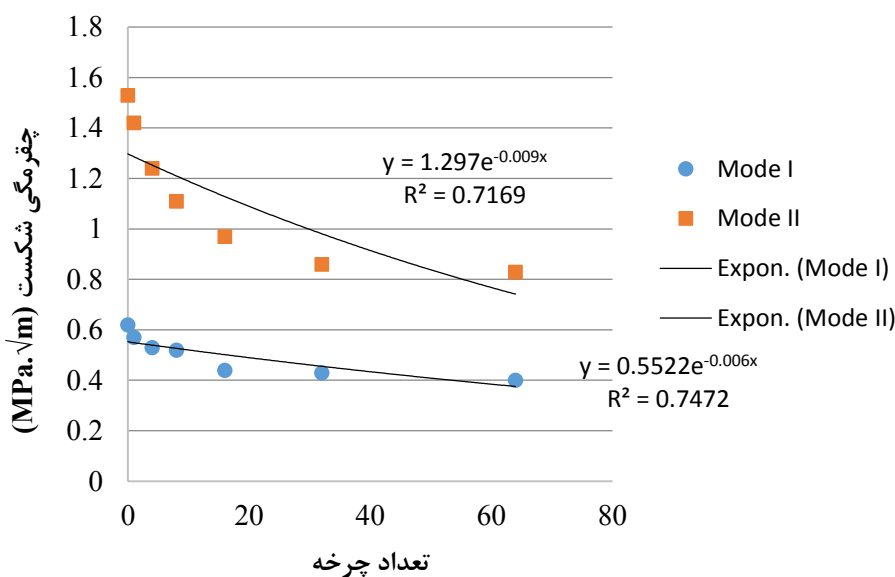
Table 3. Average results of mode I fracture toughness of white travertine samples in cycles 0, 1, 4, 8, 16, 32 and 64

تعداد چرخه‌ها	چقرمگی شکست مود I (MPa.m ^{1/2})
۰	۰/۶۲
۱	۰/۵۷
۴	۰/۵۳
۸	۰/۵۲
۱۶	۰/۴۴
۳۲	۰/۴۳
۶۴	۰/۴۰

جدول ۴. میانگین نتایج چقرمگی شکست مود II نمونه‌های تراورتن سفید در چرخه‌های ۰، ۱، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴

Table 4. Average results of mode II fracture toughness of white travertine samples in cycles 0, 1, 4, 8, 16, 32 and 64

تعداد چرخه‌ها	چقرمگی شکست مود II (MPa.m ^{1/2})
۰	۱/۵۳
۱	۱/۴۲
۴	۱/۲۴
۸	۱/۱۱
۱۶	۰/۹۷
۳۲	۰/۸۶
۶۴	۰/۸۳



شکل ۹. تغییرات چقرمگی شکست مود I و مود II نمونه‌های تراورتن سفید با تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب

Fig. 9. Variations of mode I and mode II fracture toughness of white travertine samples with the number of freeze-thaw cycles

انجام شده توسط هان و همکاران می‌باشد [۱۸]، این پژوهش برای بررسی مکانیسم تخریب و خصوصیات مکانیکی نمونه‌های ماسه سنگ تحت اثرات محلول‌های مختلف شیمیایی و سیکل‌های یخبندان- ذوب مورد بررسی گرفته است که چقرمگی شکست مود I با افزایش سیکل‌های یخبندان- ذوب کاهش یافته است. عبدالغنی زاده و همکاران [۲۰] تأثیر چرخه یخبندان- ذوب را بر چقرمگی شکست مود I و مود II ماسه سنگ لوشان را مورد بررسی قرار دادند نتایج پژوهش عبدالغنی زاده نشان داد چقرمگی شکست مود I و مود II با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب به صورت به صورت نمایی کاهش می‌یابد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. چقرمگی شکست مود I تراورتن سفید بعد از ۶۴ چرخه نسبت به چرخه صفر ۳۵/۴۸ درصد و چقرمگی شکست مود II تراورتن سفید بعد از ۶۴ چرخه نسبت به چرخه صفر ۴۵/۷۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که میزان کاهش چقرمگی شکست در شرایط مود II یا مود برشی بیشتر از شرایط مود I یا مود کششی است. چقرمگی شکست مود I با مقاومت کششی برزیلی [۱۸] و چقرمگی شکست مود II با مقاومت برشی رابطه دارد به طوری که با افزایش مقاومت کششی برزیلی، چقرمگی شکست مود I و با افزایش مقاومت برشی، چقرمگی شکست مود II افزایش می‌یابد. برای بررسی علت کاهش بیشتر چقرمگی شکست مود II نسبت به مود I، مقاومت کششی برزیلی

معادله همبستگی بین چقرمگی شکست مود I نمونه‌های تراورتن سفید با تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب در روابط ۸ و ۹ ارائه شده است (برازش نمایی بالاترین ضریب تعیین را در برابر سایر توابع داشت که انتخاب شد).

$$K_{ICN} = 0.5522e^{-0.006N} \quad (۸)$$

$$K_{IICN} = 1.297e^{-0.009N} \quad (۹)$$

در این رابطه K_{ICN} و K_{IICN} به ترتیب چقرمگی شکست مود I در چرخه N و چقرمگی شکست مود II در چرخه N برای تراورتن سفید است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، چقرمگی شکست مود I و II نمونه‌های تراورتن سفید با افزایش چرخه‌های یخبندان- ذوب روند کاهشی داشته است. این روند کاهشی غیرخطی و به صورت نمایی است. چقرمگی به ترتیب با ضرایب تعیین ۰/۷۴ (برای چقرمگی شکست مود I) و ۰/۷۲ (برای چقرمگی شکست مود II) کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به علت گسترش ترک‌های اولیه و همچنین بیشتر شدن میکروتورک‌های موجود در نمونه‌های تراورتن در اثر فرآیند یخبندان- ذوب باشد. این نتایج شبیه مطالعه

جدول ۵. میانگین نتایج چقرمگی شکست مود I نمونه‌های تراورتن قهوه‌ای در چرخه‌های ۰، ۱، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴

Table 5. Average results of mode I fracture toughness of brown travertine samples in cycles 0, 1, 4, 8, 16, 32 and 64

تعداد چرخه‌ها	چقرمگی شکست مود I (MPa.m ^{1/2})
۰	۰/۴۶
۱	۰/۴۱
۴	۰/۳۸
۸	۰/۳۵
۱۶	۰/۳۳
۳۲	۰/۳۲
۶۴	۰/۲۹

۳-۲- اثر فرآیند یخبندان- ذوب روی چقرمگی شکست مود I و II سنگ تراورتن قهوه‌ای

چقرمگی شکست مود I و II قبل از اعمال چرخه‌های یخبندان- ذوب و بعد از ۱، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ چرخه تعیین شد. برای اطمینان از نتایج آزمایش در هر سیکل از ۴ نمونه استفاده شده است. میانگین نتایج در جدول‌های ۵ و ۶ آمده است. به منظور بررسی رابطه بین چقرمگی شکست مود I و II و تعداد سیکل‌های یخبندان- ذوب، تغییرات چقرمگی شکست با تعداد سیکل‌ها و رسم شد (شکل ۱۰). معادله همبستگی بین چقرمگی شکست مود I نمونه‌های تراورتن سفید با تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب آورده شده است در روابط ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

$$K_{ICN} = 0.3977e^{-0.006N} \quad (10)$$

$$K_{IICN} = 0.9871e^{-0.008N} \quad (11)$$

در این رابطه K_{ICN} و K_{IICN} به ترتیب چقرمگی شکست مود I در چرخه N و چقرمگی شکست مود II در چرخه N برای تراورتن قهوه‌ای است.

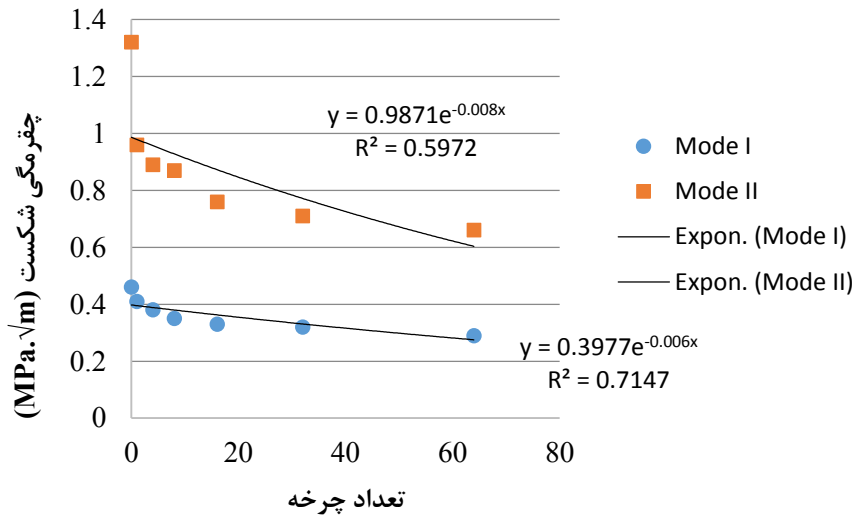
همانطور که در شکل‌های ۱۰ مشاهده می‌شود، چقرمگی شکست مود

و پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ تراورتن تعیین شده است. میانگین مقاومت کششی تراورتن سفید بعد از ۶۴ چرخه یخبندان- ذوب ۴/۱۷ مگاپاسکال است. درصد کاهش مقاومت کششی نمونه‌ها بعد از ۶۴ چرخه یخبندان- ذوب نسبت به سیکل صفر که ۵/۳۲ مگاپاسکال است محاسبه شده است برای تراورتن سفید کاهش مقاومت کششی ۲۱/۶٪ به دست آمد. بعد از انجام آزمایش‌های سه محوری، چسبندگی بعد از ۶۴ چرخه برای تراورتن سفید ۴/۲۷ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی ۳۶/۵۵ درجه به دست آمده است. چسبندگی که پارامتر مهمی در مقاومت برشی است بعد از ۶۴ چرخه یخبندان- ذوب نسبت به سیکل صفر حدود ۳۱/۵۷ درصد کاهش یافته است. تانژانت زاویه اصطکاک داخلی نیز بعد از ۶۴ چرخه ۳۱/۸۹ درصد نسبت به سیکل صفر کاهش یافته است. کاهش چسبندگی و تانژانت زاویه اصطکاک داخلی بعد از ۶۴ چرخه یخبندان- ذوب، موجب کاهش مقاومت برشی می‌شود. با توجه به نتایج، میزان کاهش مقاومت برشی در نمونه‌های تراورتن بعد از ۶۴ چرخه یخبندان- ذوب نسبت به چرخه صفر بیشتر از کاهش مقاومت کششی است. بنابراین می‌توان کاهش بیشتر چقرمگی شکست تراورتن بعد از اعمال چرخه‌های یخبندان- ذوب در شرایط مود II یا مود برشی نسبت به مود I یا مود کششی را ناشی از کاهش بیشتر مقاومت برشی نسبت به مقاومت کششی دانست. به دلیل اینکه مقاومت برشی که با چقرمگی شکست مود II رابطه مستقیم دارد بیشتر از مقاومت کششی برزلی که با چقرمگی شکست مود I رابطه مستقیم دارد کاهش یافته است.

جدول ۶. میانگین نتایج چقرمگی شکست مود II نمونه‌های تراورتن قهوه‌ای در چرخه‌های ۰، ۱، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴

Table 6. Average results of mode II fracture toughness of brown travertine samples in cycles 0, 1, 4, 8, 16, 32 and 64

تعداد چرخه‌ها	چقرمگی شکست مود II (MPa.m ^{1/2})
۰	۱/۳۲
۱	۰/۹۶
۴	۰/۸۹
۸	۰/۸۷
۱۶	۰/۷۶
۳۲	۰/۷۱
۶۴	۰/۶۶



شکل ۱۰. تغییرات چقرمگی شکست مود I و مود II نمونه‌های تراورتن قهوه‌ای نسبت به تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب

Fig. 10. Variations of mode I and mode II fracture toughness of brown travertine samples with the number of freeze-thaw cycles

کاهش چقرمگی شکست در تراورتن قهوه‌ای بیشتر از تراورتن سفید است. برای بررسی علت از رابطه (۱۲) [۲۸] استفاده شد که پارامتر فیزیکی- مکانیکی ((physico-mechanical parameter(PMP)) برای هر دو تراورتن محاسبه شد.

$$PMP(N.\sqrt{m}) = \left(\frac{MS \times MPS}{P} \right) \quad (12)$$

I و II نمونه‌های تراورتن قهوه‌ای با افزایش چرخه‌های یخبندان- ذوب روند کاهشی داشته است. این روند کاهشی غیرخطی و به صورت نمایی است. چقرمگی به ترتیب با ضرایب تعیین ۰/۷۱ (برای چقرمگی شکست مود I) و ۰/۵۹ (برای چقرمگی شکست مود II) کاهش می‌یابد. چقرمگی شکست مود I تراورتن قهوه‌ای بعد از ۶۴ چرخه نسبت به چرخه صفر ۳۷ درصد و چقرمگی شکست مود II تراورتن سفید بعد از ۶۴ چرخه نسبت به چرخه صفر ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که میزان



شکل ۱۲. نمونه سنگ تراورتن سفید در آزمایش فشار سه محوری

Fig. 12. White travertine sample in triaxial compression test



شکل ۱۱. نمونه سنگ تراورتن سفید در آزمایش فشار تک محوری

Fig. 11. White travertine sample in uniaxial compression test

فشار محصور کننده ۲/۵ و ۵ مگاپاسکال انجام می‌گیرد. برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری، از دستگاه بارگذاری محوری ساخت شرکت ELE و برای تعیین مقاومت فشاری سه محوری از دستگاه بارگذاری تک محوری، دستگاه اعمال فشار جانبی و سلول هوک استفاده شده است (شکل ۱۲). زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌ها با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) تعیین شده است [۱۷].

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{m-1}{m+1} \right) \quad (13)$$

$$C = b \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi} \quad (14)$$

که در آن m شیب خط پوش گسیختگی و b عرض از مبدأ پوش گسیختگی در نمودار $\sigma_1 - \sigma_3$ می‌باشد. پارامترهای m و b از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به دست آمده است.

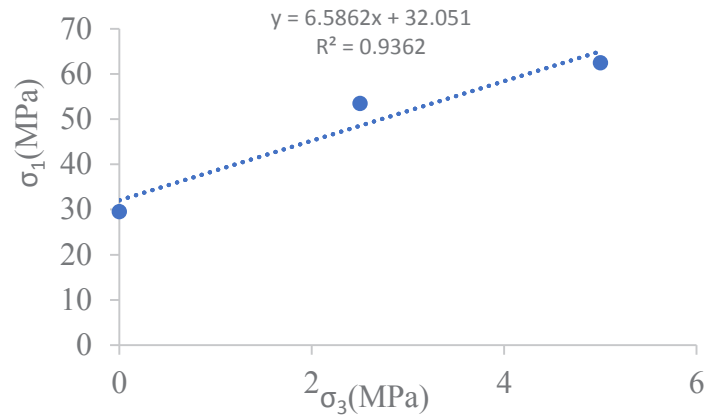
در شکل ۱۴ معادله پوش گسیختگی برای سیکل‌های مختلف یخبندان -

که در آن MS مقاومت مکانیکی اولیه نمونه‌ها (چقرمگی شکست)، MPS و P به ترتیب میانگین اندازه منافذ و تخلخل موثر هستند. برای این منظور مقاطع نازک از تراورتن سفید و قهوه‌ای تهیه شد. با بررسی مطالعات میکروسکوپی انجام شده روی نمونه‌های تراورتن سفید و قهوه‌ای می‌توان گفت که میانگین اندازه منافذ برای تراورتن سفید و قهوه‌ای به ترتیب ۶۶ و ۱۰۵ میکرون است. مقدار تخلخل موثر تراورتن سفید حدود ۲/۷۴ درصد و برای تراورتن قهوه‌ای حدود ۱۰/۲۶ درصد می‌باشد.

با قرار دادن مقادیر ذکر شده در رابطه ۱۲، PMP برای تراورتن سفید و قهوه‌ای به ترتیب ۰/۰۱۵ و ۰/۰۴۷ نیوتن در جذر متر به دست می‌آید. در تراورتن سفید بیشتر از تراورتن قهوه‌ای است در نتیجه اثر چرخه یخبندان - ذوب بر تراورتن سفید کمتر از قهوه‌ای است و چقرمگی شکست در تراورتن سفید کمتر کاهش می‌یابد.

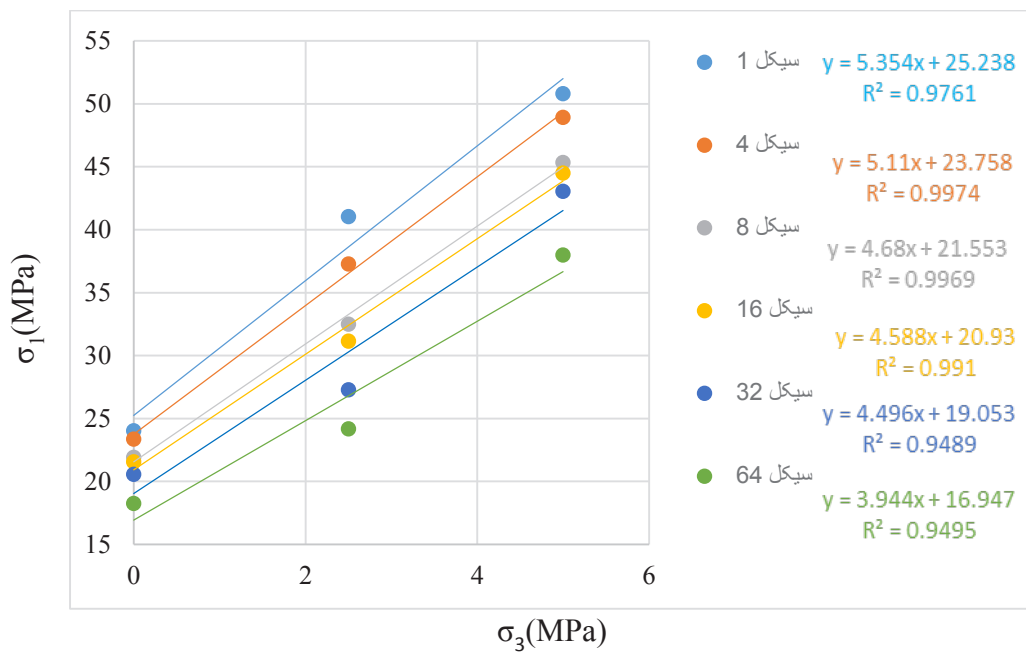
۳-۳ اثر چرخه‌های سیکل‌های یخبندان - ذوب بر روی پارامترهای مقاومتی سنگ تراورتن سفید

برای بررسی اثر چرخه‌های یخبندان - ذوب بر روی پارامترهای مقاومتی تراورتن سفید، آزمایش فشاری تک محوری (شکل ۱۱) و سه محوری در



شکل ۱۳. پوش گسیختگی برای نمونه‌هایی که سیکل یخبندان - ذوب را تحمل نکرده‌اند.

Fig. 13. Failure envelope in $\sigma_1 - \sigma_3$ diagram for samples that have endured 1, 4, 8, 16, 32 and 64 freeze-thaw cycles



شکل ۱۴. پوش گسیختگی در نمودار $\sigma_1 - \sigma_3$ برای نمونه‌هایی که ۱، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ چرخه یخبندان-ذوب را تحمل کرده‌اند.

Fig. 14. Failure envelope for samples that have not endured the freeze-thaw cycle

جدول ۷. نتایج حاصل از آزمایش فشار سه محوری روی نمونه‌های تراورتن سفید

Table 7. The results of triaxial compression test on white travertine samples

مقاومت فشاری سه محوره (MPa)	فشار محصور کننده (MPa)	تعداد چرخه‌ها
۵۳/۴۸	۲/۵	۰
۶۲/۵	۵	۰
۴۱/۰۴	۲/۵	۱
۵۰/۸۰	۵	۱
۳۷/۲۹	۲/۵	۴
۴۸/۹۳	۵	۴
۳۲/۵۰	۲/۵	۸
۴۵/۳۳	۵	۸
۳۱/۱۴	۲/۵	۱۶
۴۴/۵	۵	۱۶
۲۷/۲۸	۲/۵	۳۲
۴۳/۰۴	۵	۳۲
۲۴/۱۸	۲/۵	۶۴
۳۷/۹۸	۵	۶۴

و برای فشار ۵ مگاپاسکال ۳۹/۲۸ درصد می‌باشد. برای بررسی رابطه بین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تراورتن، نمودار این پارامترها نسبت به چرخه‌های یخبندان- ذوب رسم شده است (شکل‌های ۱۸ و ۱۹). با توجه به شکل‌های ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تراورتن با افزایش چرخه‌های یخبندان- ذوب به صورت نمایی کاهش پیدا کرده است. این نتایج شبیه مطالعه انجام شده توسط حسینی و همکاران روی نمونه‌های ماسه سنگ می‌باشد [۱۷]، نتایج پژوهش انجام شده توسط حسینی و همکاران نشان می‌دهد با افزایش تعداد چرخه یخبندان- ذوب مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت فشاری سه محوری کاهش پیدا کرده است. همچنین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی روند کاهشی داشته است.

برای بررسی اثر چرخه‌های یخبندان- ذوب روی ایجاد و گسترش ترک‌های اولیه درصد جذب آب و سرعت امواج طولی تعیین شد (جدول‌های ۱۰ و ۱۱) و تغییرات آن‌ها در مقابل تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب رسم

ذوب داده شده است. در این معادلات پارامتر σ_1 و پارامتر X مبین σ_3 است. میانگین نتایج آزمایش فشاری سه محوری و تک محوری در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در جدول ۹ آورده شده است.

برای بررسی اثر چرخه‌های یخبندان- ذوب روی مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت فشاری سه محوری سنگ‌های تراورتن سفید، نمودار این پارامترها نسبت به چرخه‌های یخبندان- ذوب رسم شده است (شکل‌های ۱۵ الی ۱۷).

همانطور که از نمودارها مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری تک محوری سنگ تراورتن سفید با افزایش چرخه‌های یخبندان- ذوب کاهش پیدا کرده است که این کاهش در پایان چرخه ۶۴ ۳۸/۲۲ درصد نسبت به چرخه صفر می‌باشد. و همچنین مقاومت فشاری سه محوری (فشار محصور کننده ۲/۵ و ۵ مگاپاسکال) با افزایش چرخه‌های یخبندان- ذوب کاهش پیدا کرده است که این کاهش در پایان چرخه ۶۴ برای فشار ۲/۵ مگاپاسکال ۵۴/۷۸ درصد

جدول ۸. نتایج حاصل از آزمایش فشار تک محوری روی نمونه‌های تراورتن سفید

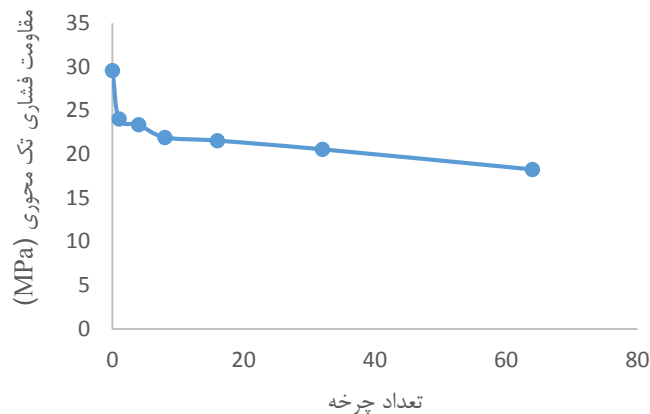
Table 8. The results of uniaxial compression test on white travertine samples

مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	فشار محصور کننده (MPa)	تعداد چرخه‌ها
۲۹/۵۶	۰	۰
۲۴/۰۳	۰	۱
۲۳/۳۸	۰	۴
۲۱/۹۳	۰	۸
۲۱/۵۶	۰	۱۶
۲۰/۵۶	۰	۳۲
۱۸/۲۶	۰	۶۴

جدول ۹. مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تراورتن سفید

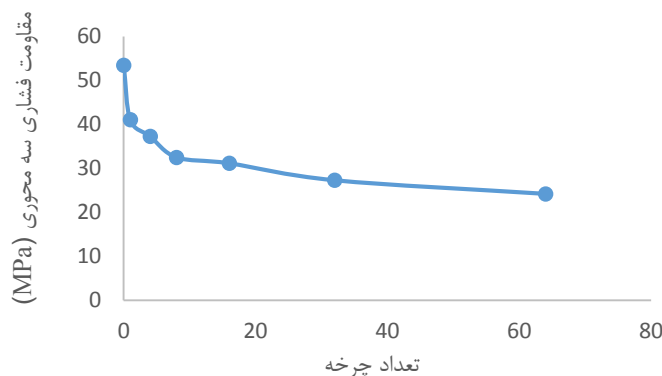
Table 9. Cohesion values and internal friction angle of white travertine samples

زاویه اصطکاک داخلی (°)	چسبندگی (MPa)	تعداد چرخه‌ها
۴۷/۴۲	۶/۲۴	۰
۴۳/۲۶	۵/۴۵	۱
۴۲/۲۸	۵/۲۶	۴
۴۰/۳۸	۴/۹۸	۸
۳۹/۹۴	۴/۸۹	۱۶
۳۹/۵۰	۴/۴۹	۳۲
۳۶/۵۵	۴/۲۷	۶۴



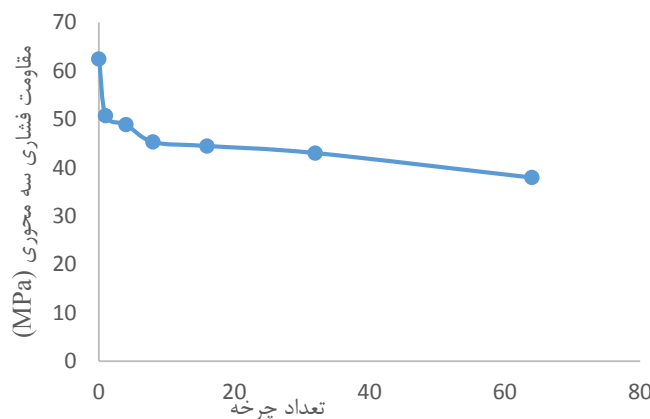
شکل ۱۵. تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تراورتن سفید نسبت به چرخه‌های یخبندان-ذوب

Fig. 15. Changes in uniaxial compressive strength of white travertine samples in relation to freeze-thaw cycles



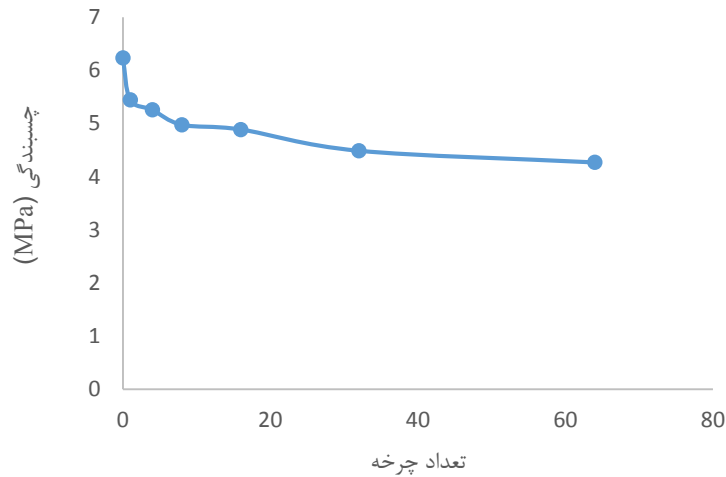
شکل ۱۶. تغییرات مقاومت فشاری سه محوری نمونه‌های تراورتن سفید (فشار محصور کننده ۲/۵ مگاپاسکال) نسبت به چرخه‌های یخبندان-ذوب

Fig. 16. Changes in triaxial compressive strength of white travertine samples (confining pressure 2.5 MPa) compared to freeze-thaw cycles



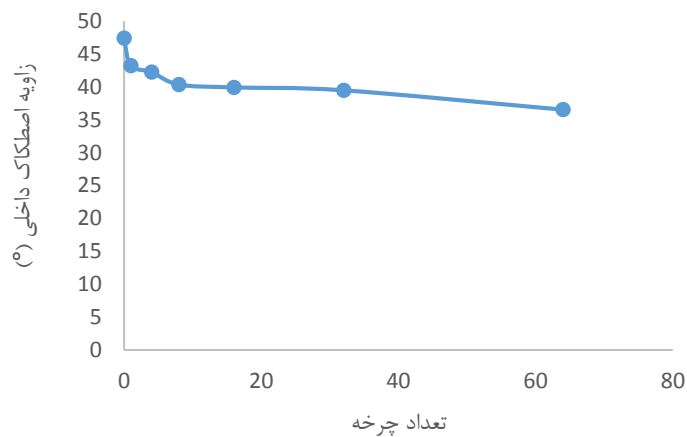
شکل ۱۷. تغییرات مقاومت فشاری سه محوری نمونه‌های تراورتن سفید (فشار محصور کننده ۵ مگاپاسکال) نسبت به چرخه‌های یخبندان-ذوب

Fig. 17. Changes in triaxial compressive strength of white travertine samples (confining pressure 5 MPa) compared to freeze-thaw cycles



شکل ۱۸. تغییرات چسبندگی نمونه‌های تراورتن سفید نسبت به چرخه‌های یخبندان-ذوب

Fig. 18. Changes in cohesive of white travertine samples in relation to freeze-thaw cycles



شکل ۱۹. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تراورتن سفید نسبت به چرخه‌های یخبندان-ذوب

Fig. 19. Variations of internal friction angle of white travertine samples with respect to freeze-thaw cycles

ترک‌ها است به همین علت چقرمگی شکست و پارامترهای مقاومتی سنگ نیز کاهش یافته است.

شده است (شکل‌های ۲۰ الی ۲۳).

با توجه به نمودارهای رسم شده ملاحظه می‌شود که درصد جذب آب نمونه‌های تراورتن (سفید و قهوه‌ای) با افزایش چرخه‌های یخبندان-ذوب روندی رو به افزایش داشته است این کاهش می‌تواند به علت از بین رفتن مواد سیمانی موجود در ساختار نمونه‌های تراورتن باشد. و همچنین افزایش درصد جذب آب می‌تواند ناشی از گسترش ترک‌های اولیه و ایجاد ترک‌های جدید باشد. سرعت امواج طولی نمونه‌های تراورتن سفید و قهوه‌ای با افزایش چرخه‌های یخبندان-ذوب، روند کاهشی داشته است و علت آن افزایش

۳-۴- بررسی عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM)

برای اعتبارسنجی نتایج آزمایش‌های انجام شده و همچنین بررسی و ارزیابی دقیق‌تر تغییرات ساختاری نمونه‌ها در اثر اعمال چرخه‌های یخبندان-ذوب و تغییرات بافت آن‌ها، مطالعات میکروسکوپی نیز انجام گرفت. برای این منظور، نمونه‌های دیسکی سنگ تراورتن قبل از اعمال چرخه یخبندان-

جدول ۱۰. تغییرات درصد جذب آب نمونه تراورتن سفید و قهوه‌ای نسبت به چرخه‌های یخبندان- ذوب

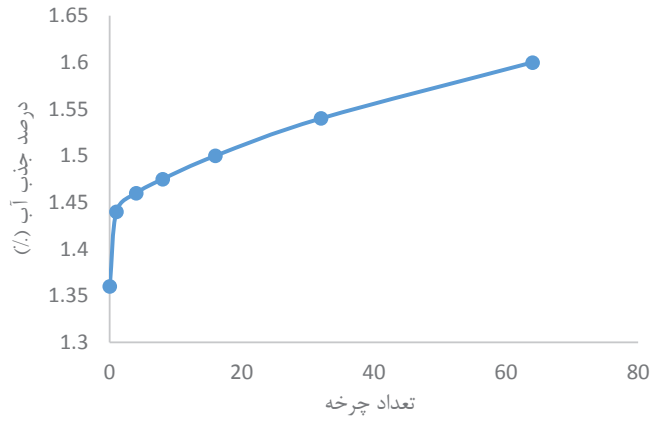
Table 10. Changes in water absorption percentage of white and brown travertine samples with respect to freeze-thaw cycles

تعداد چرخه‌ها	درصد جذب آب (%) (تراورتن سفید)	درصد جذب آب (%) (تراورتن قهوه‌ای)
۰	۱/۳۶	۴/۴۴
۱	۱/۴۴	۴/۶۵
۴	۱/۴۶	۴/۶۸
۸	۱/۴۷	۴/۷۰
۱۶	۱/۵۰	۴/۷۵
۳۲	۱/۵۴	۴/۸۲
۶۴	۱/۶۰	۴/۹۱

جدول ۱۱. تغییرات سرعت امواج طولی نمونه تراورتن سفید و قهوه‌ای نسبت به چرخه‌های یخبندان- ذوب

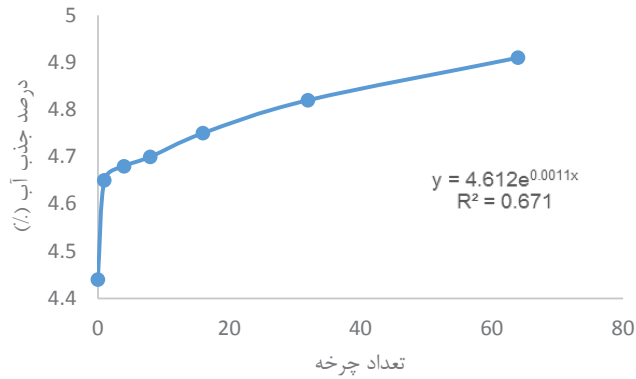
Table 11. Changes in the longitudinal waves velocity of white and brown travertine samples with respect to freeze-thaw cycles

تعداد چرخه‌ها	سرعت امواج طولی (m/s) (تراورتن سفید)	سرعت امواج طولی (m/s) (تراورتن قهوه‌ای)
۰	۵۶۹۸/۳	۵۲۷۶/۲
۱	۵۶۶۶/۶	۵۲۳۵/۵
۴	۵۵۸۰/۹	۵۲۲۸/۳
۸	۵۵۴۳/۴	۵۲۱۵/۸
۱۶	۵۴۸۳/۸	۵۱۹۸/۶
۳۲	۵۴۲۵/۵	۵۱۶۴/۵
۶۴	۵۲۵۷/۷	۴۹۵۴/۸



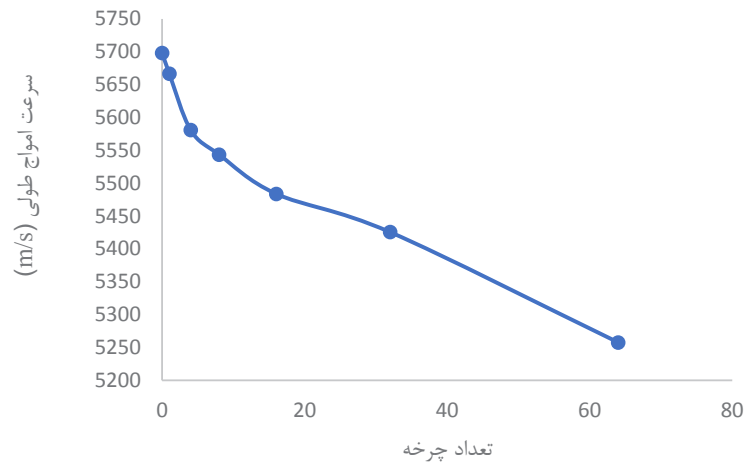
شکل ۲۰. تغییرات درصد جذب آب نمونه تراورتن سفید نسبت به چرخه‌های یخبندان-ذوب

Fig. 20. Changes in water absorption percentage of white travertine samples with respect to freeze-thaw cycles



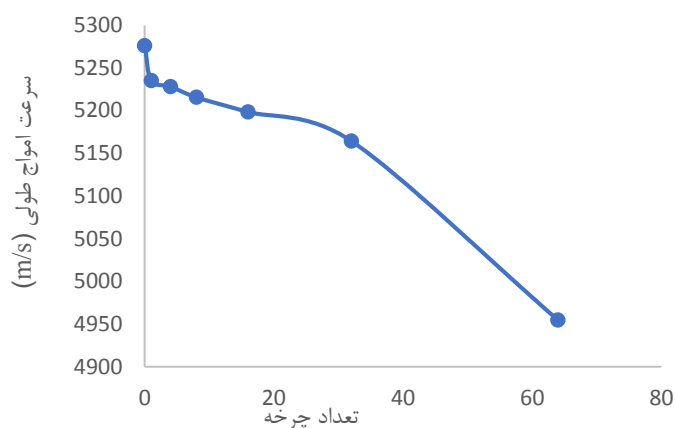
شکل ۲۱. تغییرات درصد جذب آب نمونه تراورتن قهوه‌ای نسبت به چرخه‌های یخبندان-ذوب

Fig. 21. Changes in water absorption percentage of brown travertine samples with respect to freeze-thaw cycles



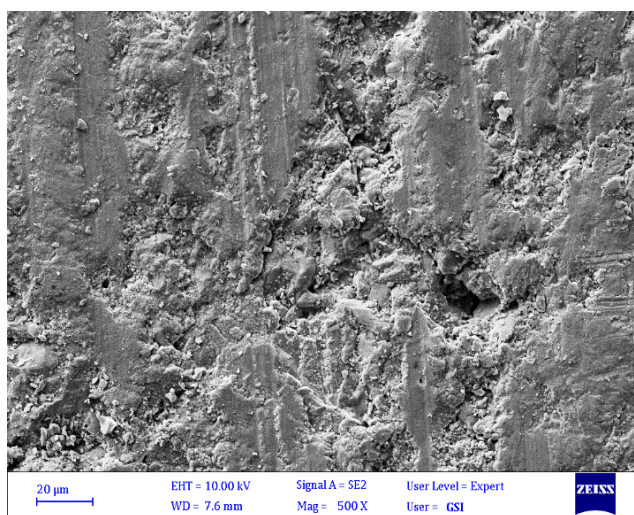
شکل ۲۲. تغییرات سرعت امواج طولی نمونه تراورتن سفید نسبت به چرخه‌های یخبندان-ذوب

Fig. 22. Changes in the longitudinal waves velocity of white travertine samples in relation to freeze-thaw cycles



شکل ۲۳. تغییرات سرعت امواج طولی نمونه تراورتن قهوه‌ای نسبت به چرخه‌های یخبندان- ذوب

Fig. 23. Changes in the longitudinal waves velocity of brown travertine samples in relation to freeze-thaw cycles

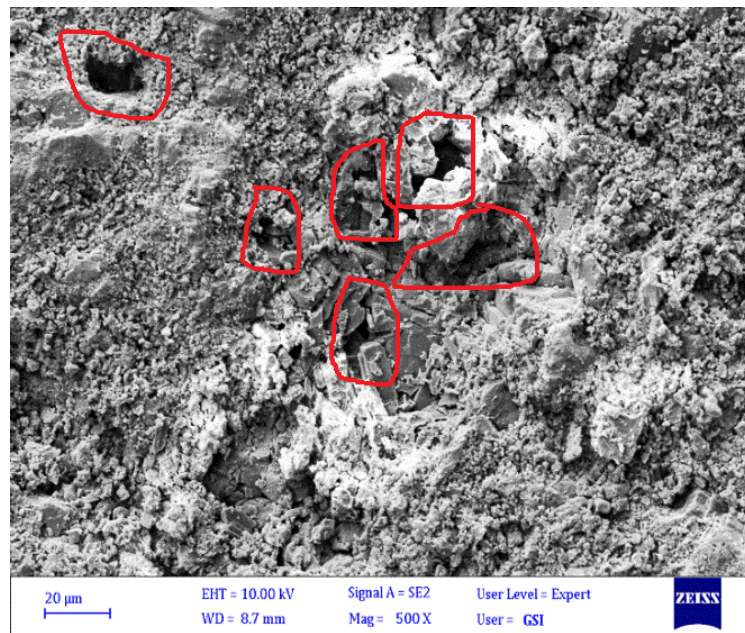


شکل ۲۴. عکس میکروسکوپ الکترونی سنگ تراورتن سفید قبل از اعمال چرخه یخبندان- ذوب

Fig. 24. Scanning electron microscopy photo of white travertine before freeze-thaw cycle

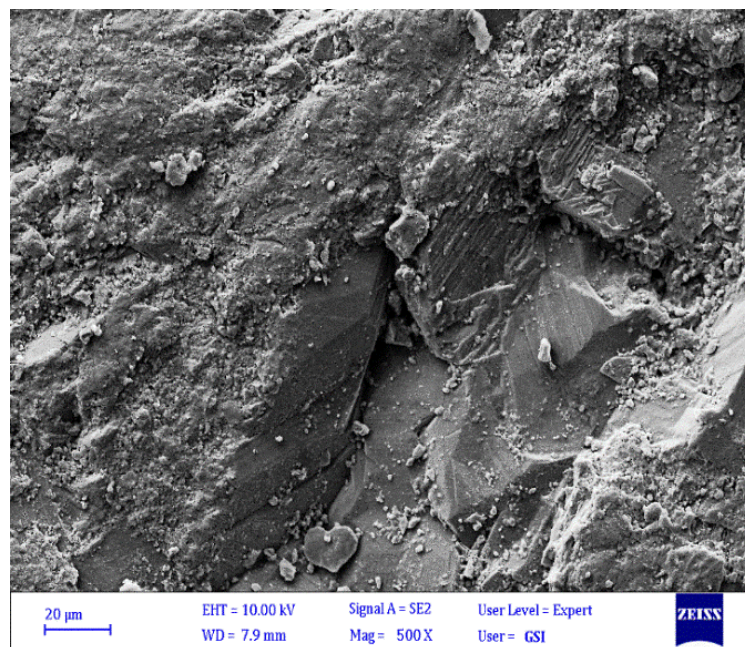
به علت از بین رفتن مواد سیمانی موجود در ساختار نمونه‌های تراورتن نسبت به نمونه‌هایی که چرخه یخبندان- ذوب را تحمل نکرده‌اند (شکل‌های ۲۴ و ۲۶) افزایش یافته است و ترک‌های جدیدی ایجاد شده است. ترک‌ها و حفرات ایجاد شده بعد از ۶۴ چرخه در شکل‌های ۲۵ و ۲۷ با خطوط قرمز نشان داده شده است به همین دلیل چقرمگی شکست در نمونه‌های تراورتن سفید و قهوه‌ای بعد از افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب کاهش یافته است.

ذوب و همچنین نمونه‌ها پس از اعمال ۶۴ چرخه یخبندان- ذوب، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مطالعه شد. نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی در شکل‌های ۲۴ الی ۲۷ با بزرگنمایی ۵۰۰ نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌های ۲۵ و ۲۷ که تصاویر میکروسکوپ الکترونی از تراورتن سفید و قهوه‌ای بعد از ۶۴ چرخه یخبندان- ذوب که با بزرگنمایی ۵۰۰ تهیه شده مشخص است پس از اعمال چرخه‌های یخبندان- ذوب، بازشدگی مابین کانی‌ها و همچنین ترک‌ها و حفرات



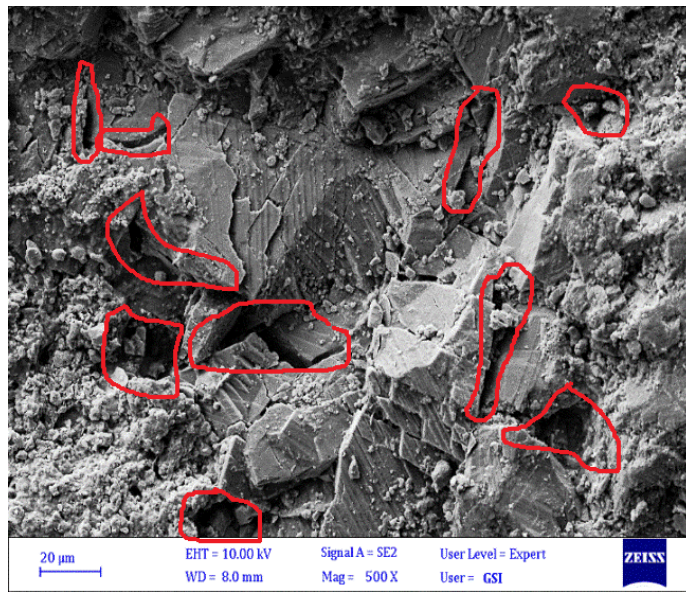
شکل ۲۵. عکس میکروسکوپ الکترونی سنگ تراورتن سفید بعد از اعمال ۶۴ چرخه یخبندان- ذوب

Fig. 25. Scanning electron microscopy photo of white travertine after 64 freeze-thaw cycles



شکل ۲۶. عکس میکروسکوپ الکترونی سنگ تراورتن قهوه‌ای قبل از اعمال چرخه یخبندان- ذوب

Fig. 26. Scanning electron microscopy photo of brown travertine before freeze-thaw cycle



شکل ۲۷. عکس میکروسکوپ الکترونی سنگ تراورتن قهوه‌ای بعد از اعمال ۶۴ چرخه یخبندان- ذوب

Fig. 27. Scanning electron microscopy photo of brown travertine after 64 freeze-thaw cycles

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب روی چقرمگی شکست مود I و II و پارامترهای مقاومتی نمونه‌های سنگ تراورتن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب، چقرمگی شکست مود I و II نمونه‌های تراورتن سفید و قهوه‌ای به صورت نمایی کاهش پیدا کرده است.

- اثر چرخه‌های یخبندان- ذوب روی چقرمگی شکست تراورتن سفید، کمتر از قهوه‌ای است.

- با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تراورتن به صورت نمایی کاهش پیدا کرده است. مقدار این کاهش در پایان چرخه ۶۴، ۲۸/۲۲ درصد بوده است.

- با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب، مقاومت فشاری سه محوری نمونه‌های تراورتن به صورت نمایی کاهش پیدا کرده است. مقدار این کاهش در پایان چرخه ۶۴ برای فشار ۲/۵ مگاپاسکال ۵۴/۷۸ درصد و برای فشار ۵ مگاپاسکال ۳۹/۲۳ درصد بوده است.

- با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب، چسبندگی و زاویه

اصطکاک داخلی نمونه‌های تراورتن به صورت نمایی کاهش پیدا کرده است. مقدار این کاهش در پایان چرخه ۶۴ برای چسبندگی ۳۱/۵۷ درصد و برای زاویه اصطکاک داخلی ۲۲/۹۲ درصد بوده است. چسبندگی بیشتر از زاویه اصطکاک داخلی کاهش پیدا کرده است.

- با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب، درصد جذب آب نمونه‌های تراورتن سفید و قهوه‌ای به صورت نمایی افزایش پیدا کرده است. افزایش درصد جذب آب ناشی از گسترش ترک‌های اولیه و ایجاد ترک‌های جدید است.

- با افزایش تعداد چرخه‌های یخبندان- ذوب، سرعت امواج طولی نمونه‌های تراورتن سفید و قهوه‌ای به صورت نمایی کاهش پیدا کرده است و علت آن افزایش میکروتُرک‌ها است.

منابع

- [1] D.T. Nicholson, F.H. Nicholson, Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering, *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 25(12) (2000) 1295-1307.
- [2] G. Zappia, C. Sabbioni, C. Riontino, G. Gobbi, O.

- 1649-1656.
- [13] J. Yu, X. Chen, H. Li, J.-w. Zhou, Y.-y. Cai, Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties and permeability of red sandstone under triaxial compression, *Journal of Mountain Science*, 12(1) (2015) 218-231.
- [14] G. Khanlari, R.Z. Sahamieh, Y. Abdilor, 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) (2015) 5991-6001.
- [15] J.-l. Li, K.-p. Zhou, W.-j. Liu, H.-w. Deng, NMR research on deterioration characteristics of microscopic structure of sandstones in freeze-thaw cycles, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(11) (2016) 2997-3003.
- [16] A. Özbek, 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) (2014) 595-609.
- [17] M. Hosseini, A. Khodayari, Effect of freeze-thaw cycle on strength and rock strength parameters (A Lushan sandstone case study), *Journal of Mining and Environment*, 10(1) (2019) 257-270.
- [18] T. Han, J. Shi, X. Cao, Fracturing and damage to sandstone under coupling effects of chemical corrosion and freeze-thaw cycles, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(11) (2016) 4245-4255.
- [19] J. Ni, Y.-L. Chen, P. Wang, S.-R. Wang, B. Peng, R. Azzam, Effect of chemical erosion and freeze-thaw cycling on the physical and mechanical characteristics of granites, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(1) (2017) 169-179.
- [20] K. Abdolghanizadeh, M. Hosseini, M. Saghafiyazdi, Effects of number of freeze-thaw cycles and freezing temperature on mode I and mode II fracture toughness of cement mortar, *Journal of Mining and Environment*, 10(4) (2019) 967-978.
- [21] S.Z.S. Mousavi, H. Tavakoli, P. Moarefvand, M. Rezaei, Assessing the effect of freezing-thawing cycles on the results of the triaxial compressive strength test for calc-
Favoni, Exposure tests of building materials in urban atmosphere, *Science of the total environment*, 224(1-3) (1998) 235-244.
- [3] J.R. Dunn, P.P. Hudec, *Water, clay and rock soundness*, (1966).
- [4] D. Everett, Complementary information to capillary properties of some model pore systems with special reference to frost damage, *Rilem Bulletin*, (27) (1965).
- [5] A. Prick, Dilatometrical behaviour of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles, *Catena*, 25(1-4) (1995) 7-20.
- [6] M. Nakamura, T. Togaya, S. Okuda, Effect of dimensional distribution of pores in porous ceramics on frost resistance under one dimensional cooling. *Yogyo – Kyokai – Shi*, 85 (1997) 549-554.
- [7] J. Walder, B. Hallet, A theoretical model of the fracture of rock during freezing, *Geological Society of America Bulletin*, 96(3) (1985) 336-346.
- [8] M. Mutlutürk, R. Altindag, G. Türk, A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling, *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 41(2) (2004) 237-244.
- [9] R. Altindag, M. Mutlutürk, R. Karaguzel, The effects of freezing-thawing cycles on the use ability of Isparta andesite as a building stone, in: *Proceedings of International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones*, 2003, pp. 289.
- [10] R. Altindag, I. Alyildiz, T. Onargan, Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze-thaw cycles, *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 41(6) (2004) 1023-1028.
- [11] A. Jamshidi, M.R. Nikudel, M. Khomehchiyan, Predicting the long-term durability of building stones against freeze-thaw using a decay function model, *Cold Regions Science and Technology*, 92 (2013) 29-36.
- [12] A. Momeni, Y. Abdilor, G. Khanlari, M. Heidari, A. Sepahi, The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4) (2016)

- under pure modes I and II loading—A statistical approach, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 69 (2014) 17-25.
- [26] ISRM, *Rock characterization, testing and monitoring*, in, Pergamon Press Oxford, 1981, pp. 211.
- [27] R. Fowell, J. Hudson, C. Xu, X. Zhao, Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens, in: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, pp. 322A.
- [28] A. Jamshidi, M.R. Nikudel, M. Khamsehchiyan, 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) (2017) 181-190.
- schist rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 123 (2019) 104090.
- [22] M. Hosseini, A. Ahmari, The effect of freezing temperature in the freeze-thaw process on the Physical and Mechanical properties of sandstone, *New Findings in Applied Geology*, 15(29) (2021) 122-134.
- [23] L. Chen, K. Li, G. Song, D. Zhang, C. Liu, Effect of freeze-thaw cycle on physical and mechanical properties and damage characteristics of sandstone, *Scientific Reports*, 11(1) (2021) 1-10.
- [24] Z. Su, K. Geng, F. Zhou, J. Sun, H. Yu, Influence of Freeze-Thaw Cycles on Acoustic Emission Characteristics of Granite Samples under Triaxial Compression, *Advances in Civil Engineering*, (2021).
- [25] M. Aliha, M. Ayatollahi, Rock fracture toughness study using cracked chevron notched Brazilian disc specimen

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Nezamivand Chegini, M. Hosseini, Effect of Freeze-Thaw Cycles on Fracture Toughness and Strength Parameters of Travertine, Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4589-4614.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20757.7521

