

## تأثیر تغییرات دمای ناشی از آتش سوزی و سرد شدن بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ تراورتن

مهدی حسینی<sup>۱</sup>، دانیال فخری<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین  
۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

(دریافت ۱۳۹۸/۰۸/۲۳، پذیرش ۱۳۹۸/۱۰/۱۴)

### چکیده

سنگ‌ها در مواردی از قبیل انفجار و آتش‌سوزی تحت حرارت قابل توجهی قرار می‌گیرند و با خاموش کردن آتش سرد می‌شوند و فرآیند گرمایش-سرمایش اتفاق می‌افتد. در این مقاله، هدف بررسی اثر دما در یک بازه گرمایش-سرمایش بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ تراورتن است. از آنجا که سنگ تراورتن در ایران استفاده فراوانی در نمای ساختمان‌ها دارد، به عنوان ماده مورد مطالعه انتخاب و تحقیق بر روی سه نوع سنگ تراورتن (تراورتن B، تراورتن D و تراورتن R) انجام شد. تخلخل موثر و نفوذپذیری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای تراورتن B، بیشتر از تراورتن D و تراورتن R است. همچنین سرعت امواج طولی، مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک‌محوری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای تراورتن B، کمتر از تراورتن D و تراورتن R است. در مرحله گرمایش در یک دوره گرمایش-سرمایش، آزمایش روی نمونه‌هایی که در معرض دمای ۱۵۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و سپس در دمای محیطی، به تدریج سرد شده‌اند، انجام شد. یک سری آزمایش نیز روی نمونه‌هایی که دوره گرمایش-سرمایش را تحمل نکرده‌اند، اجرا شد. این مقاله به بررسی اثر فرآیند گرمایش-سرمایش بر خواص فیزیکی آن شامل تخلخل موثر، سرعت امواج طولی و نفوذپذیری و خواص مکانیکی آن شامل مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک‌محوری می‌پردازد. نتایج نشان داد که در اثر افزایش دما، تخلخل موثر و نفوذپذیری، افزایش، و سرعت امواج طولی، مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک‌محوری کاهش می‌یابد. بیشترین افزایش تخلخل موثر و نفوذپذیری در اثر افزایش دما، مربوط به تراورتن B و کمترین افزایش، مربوط به تراورتن R است. بیشترین کاهش سرعت امواج طولی، مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک‌محوری در اثر افزایش دما، مربوط به تراورتن B و کمترین کاهش، مربوط به تراورتن R است.

### کلمات کلیدی

خواص فیزیکی، خواص مکانیکی، آتش‌سوزی، تراورتن، سنگ ساختمانی.

## ۱- مقدمه

یا آتش سوزی تحت حرارت قابل توجهی قرار می‌گیرند و سپس در اثر خاموش کردن آتش و یا تهویه، سرد می‌شوند. به عبارتی فرآیند گرمایش-سرمایش اتفاق می‌افتد.

در گذشته در مورد اثر درجه حرارت بر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها در فرآیند گرمایش پژوهش‌هایی انجام شده است. اما تحقیق در مورد اثر درجه حرارت بر روی نمونه‌هایی که در مرحله گرمایش تا درجه حرارت بالا، گرم و سپس در دمای محیط سرد شده و مورد آزمایش قرار گرفته باشند، محدود است. جدول ۱، خلاصه

سنگ‌ها به‌طور روزافزون به‌عنوان بستری در محدوده وسیعی از فعالیت‌های انسانی به‌کار می‌رود. انبارهای ذخیره‌سازی، چاه‌ها، تونل‌ها و نیروگاه‌های زیرزمینی و... در بستر انواع سنگ‌های مختلف با شرایط مکانیک-سنگی مختلف قرار می‌گیرند. 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

جدول ۱: برخی پژوهش‌های انجام‌شده در مورد اثر درجه حرارت

نام پژوهشگران	نوع سنگ	دمای آزمایش (°C)	مدول الاستیسیته	مقاومت تراکمی	مقاومت کششی	سایر خواص
زو و همکاران [۱]	گرانیت	۲۵-۱۳۰۰	کاهش	کاهش		
کشاوری و همکاران [۲]	گابرو	۲۵-۱۰۰۰	کاهش	کاهش		
لو و وانگ [۳]	گل سنگ	۲۰-۷۵۰	افزایش	افزایش		
دوبودی و همکاران [۴]	گرانیت	۳۰-۱۶۰	کاهش-افزایش	کاهش-افزایش	کاهش	
لیانگ و همکاران [۵]	نمک	۲۰-۲۴۰	کاهش	افزایش		
کیو و لین [۶]	گرانیت	۲۰-۸۰۰	کاهش	کاهش		
کوکا و همکاران [۷]	مرمر	۲۰-۷۰۰	کاهش	کاهش		
رانجیت و همکاران [۸]	ماسه سنگ	۲۰-۹۵۰	افزایش-کاهش	افزایش-کاهش		
اسریابه 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		
لو و همکاران [۱۳]	ماسه سنگ	۲۵-۹۰۰	-	-	کاهش	
حسینی [۱۴]	ماسه سنگ، توف و آندزیت	۲۵-۳۰۰			کاهش	کاهش سرعت امواج طولی
حسینی و همکاران [۱۵]	ماسه سنگ	۲۵-۱۵۰				کاهش انرژی شکست و چقرمگی شکست مود دوم
بیرو و همکاران [۱۶]	مرمر، گرانیت، تراورتن و لابرادوریت	۲۰-۸۰۰		افزایش-کاهش	افزایش-کاهش	کاهش مقاومت خمشی

این پژوهش‌ها را نشان می‌دهد.

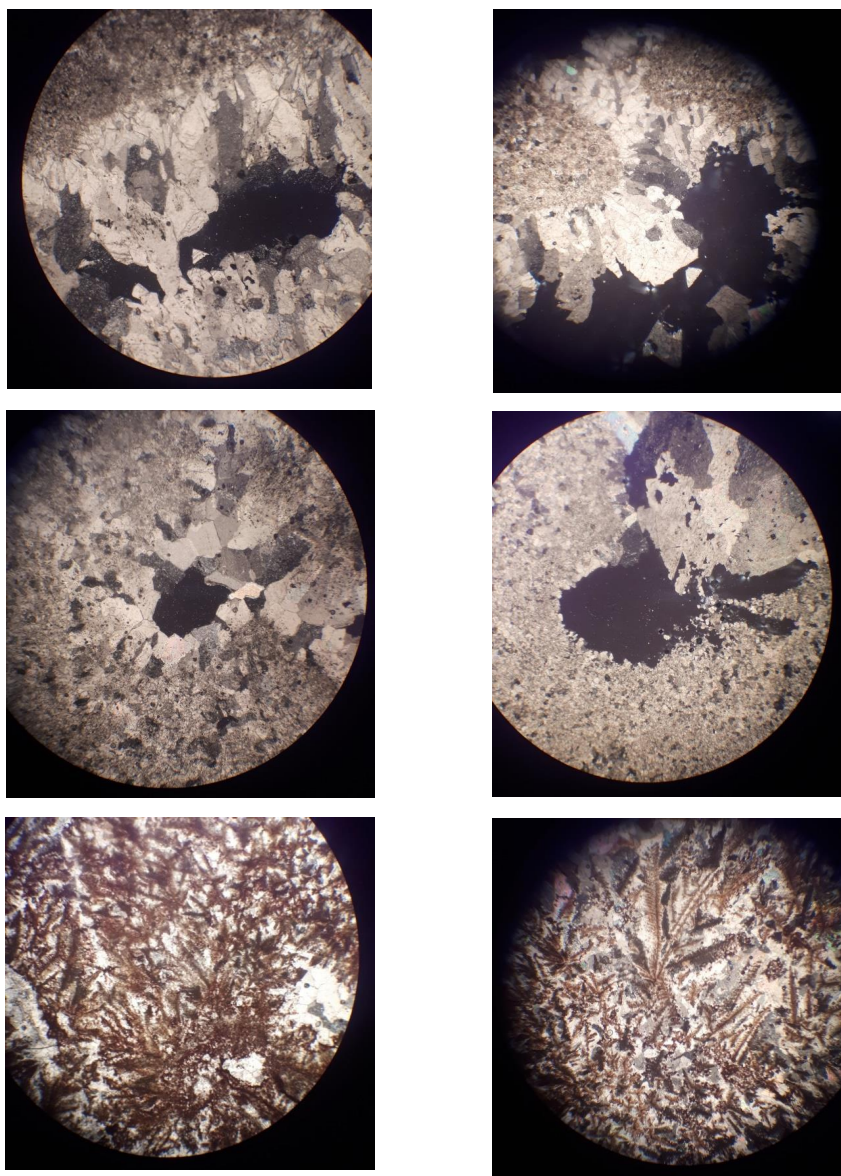
همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، اکثر پژوهش‌ها در مورد اثر درجه حرارت بر خواص فیزیکی و مکانیکی در فرآیند گرمایش انجام شده‌است. تحقیق در خصوص اثر درجه حرارت روی نمونه‌هایی که در مرحله گرمایش تا درجه حرارت بالا، گرم و سپس در دمای محیط سرد و در انتها روی آنها آزمایش انجام شده، محدود است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به مطالعات "کیم و همکاران" اشاره کرد. این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی بر روی نمونه‌هایی از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی انجام شده است. نمونه‌ها به آرامی تا دمای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم و سپس به سرعت با یک فن، خنک می‌شوند تا به دمای هوای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) برسند. نرخ افزایش درجه حرارت دقیقه/سانتی‌گراد ۲-۱ است. نتایج آزمایش‌ها که شامل تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در اثر تغییر درجه حرارت بر روی "ماسه سنگ کوکونینو" است، نشان می‌دهد مقاومت کششی از ۶ مگاپاسکال در نمونه‌های حرارت ندیده به ۵ مگاپاسکال در نمونه‌های که تا ۳۰۰ درجه حرارت داده و سپس، به سرعت سرد شده‌اند، کاهش پیدا کرده‌است [۱۷]. هم‌چنین "حسینی" به بررسی اثر درجه حرارت در مرحله گرمایش روی نمونه‌هایی از ماسه سنگ، توف و آندزیت که یک مسیر گرمایش-سرمایش را تحمل کرده‌اند، پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در مرحله گرمایش، در نمونه‌هایی که یک دوره گرمایش-سرمایش را تحمل کرده‌اند، مقاومت کششی و سرعت امواج طولی، کاهش و تخلخل، افزایش می‌یابد [۱۴]. "حسینی و خدایاری" پژوهشی در مورد اثر درجه حرارت بر چقرمگی شکست مود II ماسه-سنگ لوشان انجام دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد با افزایش دما تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در مرحله گرمایش نمونه‌هایی که یک دوره گرمایش-سرمایش را تحمل کرده‌اند، چقرمگی شکست مود II و انرژی شکست، کاهش می‌یابد [۱۵].

از آنجا که سنگ تراورتن در ایران کاربرد وسیعی در نمای ساختمان‌ها دارد، به عنوان ماده مورد مطالعه انتخاب شد. با این پژوهش، می‌توان پی‌برد کدام نوع سنگ تراورتن در مقابل تغییرات شدید دمایی ناشی از آتش‌سوزی و خاموش-کردن آتش، مقاوم‌تر است و باید این موضوع در انتخاب سنگ ساختمانی مدنظر قرار گیرد. البته در پژوهش‌های آینده، سایر سنگ‌های ساختمانی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲- نمونه‌های مورد مطالعه

### ۲-۱- مطالعه میکروسکوپی

برای مطالعه میکروسکوپی نمونه‌ها، مقطع نازک از نمونه‌های سه نوع تراورتن تهیه شد و در زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفت که شامل تراورتن دره بخاری محلات (با علامت D در متن مشخص شده)، تراورتن کرم کاشان (با علامت B در متن مشخص شده) و تراورتن قرمز آذرشهر (با علامت R در متن مشخص شده) است. شکل ۱، تصاویر مقطع نازک تهیه شده از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. شکل سمت چپ، مقطع نازک نمونه‌ای که بازه گرمایش-سرمایش را تحمل نکرده و شکل سمت راست، مقطع نازک نمونه‌ای که این دوره را تحمل کرده، نشان می‌دهد. این نمونه‌ها در مرحله گرمایش، دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کرده‌اند. کانی اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها، کلسیت است و به میزان ناچیزی کانی‌های اپک نیز موجود است. در تراورتن نوع R، اکسید آهن نیز وجود دارد که روی کلسیت‌ها را به شکل برگ‌مانند پوشانده است. بعد از یک بازه گرمایش-سرمایش، مقدار اکسید آهن کاهش می‌یابد و مشاهدات نیز نشان می‌دهد رنگ نمونه تراورتن آذرشهر که دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کرده، کاهش می‌یابد. اشکال نشان می‌دهند تخلخل تراورتن B بیشتر از تراورتن D و R است.



شکل ۱: مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های تراورتن به ترتیب از بالا به پایین تراورتن B، D و R شکل سمت چپ، نمونه قبل از گرمایش - سرمایش - شکل سمت راست، نمونه بعد از دوره گرمایش - سرمایش (در نور XPL با بزرگ‌نمایی ۵۰X)

مطابق با استاندارد ISRM تهیه شد [۱۸]. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها به شرح زیر است:

۱- مغزه‌گیری از بلوک سنگی.

۲- برش نمونه‌های استوانه‌ای شکل.

۳- ساب‌دادن نمونه‌های برش‌داده شده.

۴- قراردادن نمونه‌ها در کوره و سپس سردکردن نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه برای بررسی اثر فرآیند گرمایش - سرمایش روی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های تراورتن.

مقطع میکروسکوپی نمونه‌ها نیز نشان می‌دهد که میزان تخلخل بعد از یک بازه گرمایش - سرمایش، افزایش می‌یابد. در شکل ۱ رنگ سیاه پررنگ نشان دهنده تخلخل در نمونه است.

#### ۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

در آزمایشگاه نمونه‌های استوانه‌ای شکل از بلوک‌های سنگی برای انجام آزمایش‌های متداول مکانیک سنگ از جمله آزمایش تراکم تک‌محوری (برای تعیین مقاومت تراکم تک‌محوری) و آزمایش برزیلی (برای تعیین مقاومت کششی)

جدول ۲: خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های تراورتن

نوع سنگ تراورتن	سرعت امواج طولی (m/s)	وزن مخصوص خشک (kN/m <sup>3</sup> )	مقاومت تراکم تک محوری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
B	۵۴۷۹٫۴	۲۳٫۷۰	۲۹٫۸۴	۳٫۸۶
D	۵۷۷۳٫۲	۲۳٫۹۹	۴۵٫۳۶	۵٫۸۳
R	۶۰۰۲٫۵	۲۵٫۰۵	۵۱٫۴۵	۶٫۹۸

۳۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم و سپس در محیط سرد شده‌اند، انجام شد.

### ۳-۱- سرعت امواج طولی

سرعت امواج طولی با دستگاه اولتراسونیک اندازه‌گیری شد. محل قرارگرفتن ترانس دیوسرها طوری روی سطوح انتهای نمونه علامت‌گذاری شد تا محل عبوری از مراکز آنها با محور مرکزی نمونه، بیش از ۲ درجه اختلاف نداشته باشد. سپس، مسافت حرکت موج یعنی فاصله مرکز تا مرکز ترانس دیوسرها، محاسبه شد.

یک لایه نازک از وازلین در محل قرارگرفتن ترانس دیوسرها قرار گرفت تا انرژی عبوری از ترانس دیوسرها کاهش پیدا نکند. برای به‌دست آوردن سرعت امواج طولی در نمونه از رابطه ۱ استفاده شد [۱۸].

$$V_p = \frac{L}{t} \times 1000 \quad (1)$$

که در آن:

$V_p$ : سرعت موج طولی (ثانیه/متر)

$t$ : زمان گذر موج طولی (میکروثانیه)

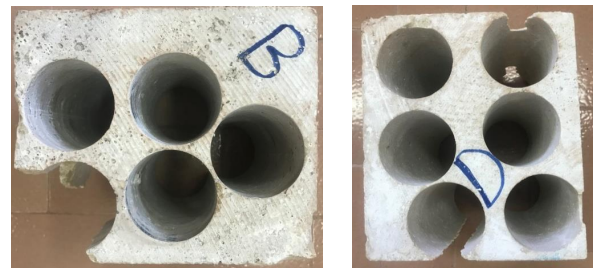
$L$ : طول نمونه (mm) است.

در جدول ۳، نتایج آزمایش‌ها همراه با میانگین سرعت امواج طولی برای هر دما مشاهده می‌شود. برای هر دما، آزمایش روی ۶ نمونه انجام شد. آزمایش‌هایی هم روی نمونه‌هایی که دوره گرمایش-سرمايش را تحمل نکرده‌اند، انجام شد.

### ۳-۲- تخلخل موثر

برای تعیین تخلخل موثر بعد از هر دوره از روش اشباع و اندازه‌گیری ابعاد نمونه استفاده شده و با استفاده از رابطه ۲ تعیین شده است [۱۸]. در جدول ۴، نتایج آزمایش‌ها مشاهده می‌شود.

آماده‌سازی برای آزمایش روی نمونه‌هایی که بازه گرمایش-سرمايش را تحمل نکرده‌اند شامل مراحل ۱ تا ۳ و برای آزمایش روی نمونه‌هایی که به‌منظور بررسی اثر آتش‌سوزی روی خواص سنگ آماده می‌شوند، شامل مراحل ۱ تا ۴ می‌شود. در شکل ۲ بلوک‌های سنگ‌های تراورتن را بعد از مغزه‌گیری مشاهده می‌کنید.



شکل ۲: بلوک‌های سنگ‌های تراورتن

### ۳-۳- بررسی اثر آتش‌سوزی روی خواص سنگ

برای بررسی اثر آتش‌سوزی روی نمونه‌های سنگ تراورتن، بعد از آن که نمونه‌ها دوره گرمایش-سرمايش را تحمل کردند (مرحله گرمایش نشان دهنده آتش سوزی و مرحله سرمايش نشان دهنده مرحله خاموش کردن آتش است). آزمایش‌هایی برای تعیین سرعت امواج طولی، تخلخل موثر، مقاومت تراکم تک‌محوری، مقاومت کششی و نفوذپذیری انجام شده است. این آزمایش‌ها روی نمونه‌هایی که در مرحله گرمایش ۱۵۰،

جدول ۳: تغییرات سرعت امواج طولی نمونه‌ها در اثر یک دوره گرمایش-سرمايش

نوع سنگ	درجه حرارت (°C)	سرعت امواج طولی (m/s)
تراورتن B	۲۵	۵۴۷۹٫۴
تراورتن D	۲۵	۵۷۷۳٫۲
تراورتن R	۲۵	۶۰۰۲٫۵
تراورتن B	۱۵۰	۳۴۹۹٫۴
تراورتن D	۱۵۰	۴۰۸۹٫۸
تراورتن R	۱۵۰	۴۶۰۱٫۸
تراورتن B	۳۰۰	۲۰۶۳٫۳
تراورتن D	۳۰۰	۲۹۷۳٫۳
تراورتن R	۳۰۰	۳۸۵۸٫۱
تراورتن B	۵۰۰	۱۲۷۵٫۹
تراورتن D	۵۰۰	۱۹۸۴٫۴
تراورتن R	۵۰۰	۲۵۷۱٫۳
تراورتن B	۸۰۰	۵۹۲٫۶
تراورتن D	۸۰۰	۱۷۶۵٫۱
تراورتن R	۸۰۰	۲۲۱۳٫۸

جدول ۴: تغییرات تخلخل موثر نمونه‌ها در اثر یک دوره گرمایش-سرمايش

نوع سنگ	درجه حرارت (°C)	تخلخل موثر (%)
تراورتن B	۲۵	۳٫۳۵
تراورتن D	۲۵	۲٫۹۲
تراورتن R	۲۵	۲٫۴۶
تراورتن B	۱۵۰	۳٫۹۱
تراورتن D	۱۵۰	۳٫۱۲
تراورتن R	۱۵۰	۲٫۵۷
تراورتن B	۳۰۰	۴٫۶۲
تراورتن D	۳۰۰	۳٫۵۷
تراورتن R	۳۰۰	۲٫۸۳
تراورتن B	۵۰۰	۵٫۷۳
تراورتن D	۵۰۰	۴٫۲۱
تراورتن R	۵۰۰	۳٫۱۵

برای هر دما، آزمایش روی ۶ نمونه انجام شد. در جدول ۴، میانگین تخلخل موثر برای هر دما ذکر شده است.

$$n_e = \frac{V_{ve}}{V} \quad (2)$$

که در آن:

$V_{ve}$ : حجم منافذ موثر

$V$ : حجم کل نمونه است.

### ۳-۳- نفوذپذیری

برای آزمایش نفوذپذیری از روش بار ثابت استفاده شد. سیال مورد استفاده آب است و نفوذپذیری طولی نمونه تعیین می‌شود. در شکل ۳ وسایل آزمایش نشان داده شده است.

مراحل آزمایش شامل:

الف) گذاشتن نمونه در سلول هوک.

ب) اعمال فشار جانبی برای آب‌بندی کردن سطوح جانبی نمونه‌ای که در غشا قرار گرفته است. به این منظور، فشار ۵٫۲ مگاپاسکال به نمونه‌ها اعمال شد. این فشار در طول آزمایش توسط 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 ۱ مگاپاسکال در طول آزمایش.

د) ثبت زمان مورد نیاز برای خروج حجم مشخصی از سیال از نمونه؛ مثلاً (یک سانتی‌متر مکعب) برای اندازه‌گیری شدت جریان سیال خروجی از نمونه. البته این اندازه‌گیری‌ها تا هنگامی که شدت جریان به حالت یکنواخت برسد، ادامه دارد. این شدت جریان در محاسبات استفاده می‌شود.

برای محاسبه نفوذپذیری از رابطه ۳ استفاده شده است [۱۹]. این رابطه برای تعیین نفوذپذیری در جریان سیال یکنواخت، معتبر است

$$k = \frac{\mu q L}{\Delta p A} \quad (3)$$

که در آن:

$\mu$ : ویسکوزیته دینامیکی سیال (آب) برحسب (ثانیه/مگاپاسکال)

$q$ : شدت جریان بر حسب (ثانیه/مترمکعب)

$L$ : طول نمونه (متر)

$A$ : سطح مقطع نمونه (مترمربع)

$\Delta p$ : اختلاف فشار سیال بین ورودی و خروجی (مگاپاسکال) است.

در جدول ۵، نتایج آزمایش نفوذپذیری ارائه شده است.



شکل ۳: دستگاه آزمایش نفوذپذیری

$$\sigma_t = 0.636 \frac{P}{D.t} \quad (4)$$

که در آن:

P: بار در لحظه شکست (کیلو نیوتن)

D: قطر نمونه (میلی متر)

t: ضخامت نمونه (میلی متر)

$\sigma_t$ : مقاومت کششی (مگاپاسکال) است.



شکل ۴: تعدادی از نمونه‌های آماده شده برای آزمایش برزلی

جدول ۵: تغییرات نفوذپذیری نمونه‌ها در اثر یک دوره گرمایش-سرمایش

نوع سنگ	درجه حرارت (°C)	نفوذپذیری (m <sup>2</sup> )
تراورتن B	۲۵	$۲,۲۳ \times ۱۰^{-۱۷}$
تراورتن D	۲۵	$۲,۱۸ \times ۱۰^{-۱۷}$
تراورتن R	۲۵	$۲,۲۵ \times ۱۰^{-۱۸}$
تراورتن B	۱۵۰	$۱,۱۵ \times ۱۰^{-۱۶}$
تراورتن D	۱۵۰	$۱,۰۸ \times ۱۰^{-۱۶}$
تراورتن R	۱۵۰	$۲,۵ \times ۱۰^{-۱۸}$
تراورتن B	۳۰۰	$۲,۲۱ \times ۱۰^{-۱۶}$
تراورتن D	۳۰۰	$۲,۰۷ \times ۱۰^{-۱۶}$
تراورتن R	۳۰۰	$۲,۸۸ \times ۱۰^{-۱۸}$
تراورتن B	۵۰۰	$۱,۶۶ \times ۱۰^{-۱۵}$
تراورتن D	۵۰۰	$۱,۴۳ \times ۱۰^{-۱۵}$
تراورتن R	۵۰۰	$۷,۰۷ \times ۱۰^{-۱۷}$

#### ۴-۳- مقاومت کششی

برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها بر روی نمونه‌ها آزمایش برزلی انجام شد. مقاومت کششی نمونه‌های سنگ از رابطه ۴ محاسبه می‌شود [۱۸]. شکل ۴ یک مجموعه از نمونه‌های دیسکی آماده شده برای آزمایش برزلی را نشان می‌دهد.

۱۸]. برای هر دما، آزمایش روی ۵ نمونه صورت گرفت. در جدول ۷، میانگین مقاومت تراکم تک‌محوری برای هر دما ارایه شده‌است. شکل ۵ یک گروه از نمونه‌های آماده‌شده برای آزمایش تراکم تک‌محوری را نشان می‌دهد.

جدول ۷: تغییرات مقاومت تراکم تک‌محوری نمونه‌ها در اثر یک دوره گرمایش - سرمایش

مقاومت تراکم تک محوری (MPa)	درجه حرارت (°C)	نوع سنگ
۲۹,۸۴	۲۵	تراورتن B
۴۵,۳۶	۲۵	تراورتن D
۵۱,۴۵	۲۵	تراورتن R
۲۱,۰۵	۱۵۰	تراورتن B
۳۷,۵۱	۱۵۰	تراورتن D
۴۴,۹۲	۱۵۰	تراورتن R
۱۸,۲	۳۰۰	تراورتن B
۳۱,۶۷	۳۰۰	تراورتن D
۳۸,۹۵	۳۰۰	تراورتن R
۱۵,۵۱	۵۰۰	تراورتن B
۲۶,۰۷	۵۰۰	تراورتن D
۳۱,۳۹	۵۰۰	تراورتن R
۶,۸۳	۸۰۰	تراورتن B
۲۱,۷	۸۰۰	تراورتن D
۲۵,۵۲	۸۰۰	تراورتن R

برای هر دما، آزمایش روی ۵ نمونه انجام شد. در جدول ۶، میانگین مقاومت کششی برای هر دما ذکر شده است.

جدول ۶: تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در اثر یک دوره گرمایش - سرمایش

مقاومت کششی (MPa)	درجه حرارت (°C)	نوع سنگ
۳,۸۶	۲۵	تراورتن B
۵,۸۳	۲۵	تراورتن D
۶,۹۸	۲۵	تراورتن R
۳,۱۶	۱۵۰	تراورتن B
۴,۹۳	۱۵۰	تراورتن D
۶,۲۷	۱۵۰	تراورتن R
۲,۵۷	۳۰۰	تراورتن B
۴,۳۹	۳۰۰	تراورتن D
۵,۸۳	۳۰۰	تراورتن R
۱,۷۲	۵۰۰	تراورتن B
۳,۴۷	۵۰۰	تراورتن D
۵,۱۸	۵۰۰	تراورتن R
۰,۶۱	۸۰۰	تراورتن B
۲,۲۶	۸۰۰	تراورتن D
۲,۹۵	۸۰۰	تراورتن R

### ۳-۵- آزمایش تراکم تک محوری

برای تعیین مقاومت تراکم تک‌محوری نمونه‌ها، آزمایش تراکم تک‌محوری و بر اساس استاندارد ISRM انجام شد



شکل ۵: تعدادی از نمونه‌های آماده‌شده برای آزمایش تراکم تک‌محوری



## ۴- تحلیل نتایج

برای بررسی و تحلیل نتایج، تغییرات خواص سنگ‌های تراورتن بر روی نمودار نشان داده و در شکل ۶، تغییرات سرعت امواج طولی برای هر سه نوع تراورتن رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر سه نوع تراورتن با افزایش دما در مرحله گرمایش، سرعت امواج طولی کاهش می‌یابد. تراورتن B، کمترین سرعت و تراورتن R، بیشترین سرعت را دارد. سرعت امواج در تراورتن D، بین تراورتن B و R است. در جدول ۸، میزان تغییرات سرعت امواج طولی برای انواع تراورتن‌های مورد آزمایش در دماهای مختلف نسبت به سرعت امواج طولی در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش سرعت امواج طولی در تراورتن نوع B و کمترین کاهش

جدول ۸: نسبت سرعت امواج طولی در نمونه‌های سنگ تراورتن بعد از یک دوره گرمایش- سرمایش به سرعت امواج طولی در نمونه‌های اولیه

نوع سنگ تراورتن	B	D	R	دما (°C)
	۰٫۶۴	۰٫۷۱	۰٫۷۶	۱۵۰
	۰٫۳۸	۰٫۵۱	۰٫۶۴	۳۰۰
	۰٫۲۳	۰٫۳۴	۰٫۴۲	۵۰۰
	۰٫۱۱	۰٫۳	۰٫۳۷	۸۰۰

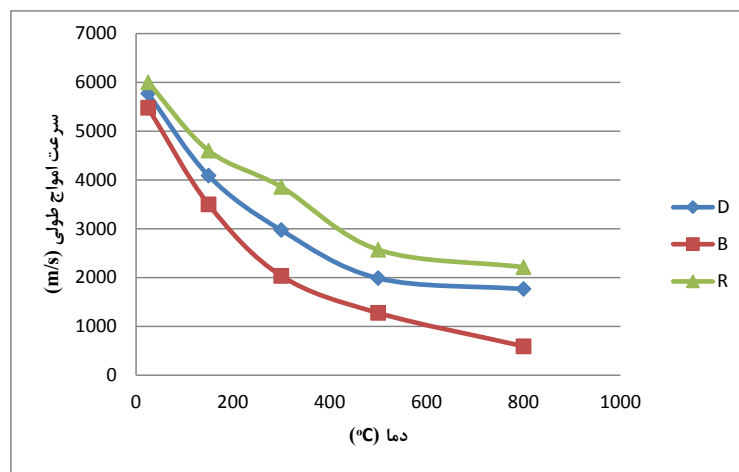
در تراورتن R اتفاق می‌افتد. این کاهش به دلیل ایجاد و گسترش ریزترک‌ها در نمونه‌های سنگ است. این کاهش سرعت امواج طولی در اثر افزایش درجه حرارت در مرحله گرمایش در نمونه‌هایی که یک دوره گرمایش-سرمایش را تحمل کرده‌اند، در پژوهش "حسینی" که بر روی ماسه سنگ، آندزیت و توف انجام داده است نیز مشاهده می‌شود [۱۴].

نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد در هر سه نوع تراورتن، تخلخل موثر با افزایش درجه حرارت، افزایش می‌یابد. این افزایش در اثر ایجاد و گسترش ریز ترک‌ها اتفاق افتاده است. مطابق جدول ۹، بیشترین افزایش تخلخل موثر در تراورتن نوع B و کمترین افزایش در تراورتن R اتفاق می‌افتد.

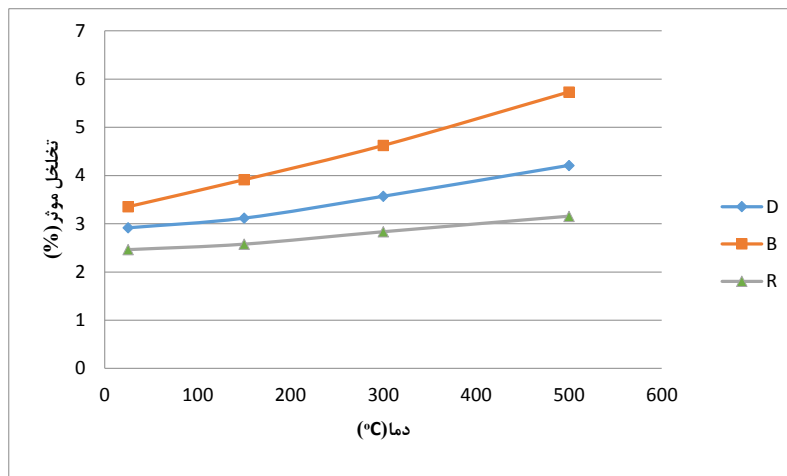
نتایج آزمایش نفوذپذیری که در شکل ۸ ارایه شده، نشان می‌دهد در هر سه نوع تراورتن، نفوذپذیری با افزایش درجه حرارت افزایش می‌یابد. این افزایش در اثر ایجاد و گسترش ریز ترک‌ها اتفاق افتاده است. این نتایج با نتایج پژوهش "حسینی و فخری" که روی ماسه سنگ لوشان انجام شده، مطابقت دارد.

جدول ۹: نسبت تخلخل موثر در نمونه‌های سنگ تراورتن بعد از یک دوره گرمایش- سرمایش به تخلخل موثر در نمونه‌های اولیه

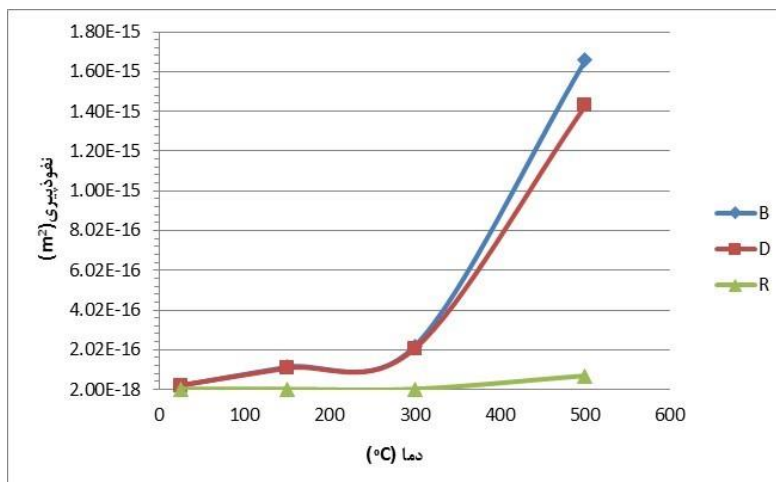
نوع سنگ تراورتن	B	D	R	دما (°C)
	۱٫۱۷	۱٫۰۷	۱٫۰۴	۱۵۰
	۱٫۳۸	۱٫۲۳	۱٫۱۵	۳۰۰
	۱٫۷۱	۱٫۴۵	۱٫۲۸	۵۰۰



شکل ۶: تغییرات سرعت امواج طولی در سه نوع تراورتن در اثر یک دوره گرمایش- سرمایش



شکل ۷: تغییرات تخلخل موثر در سه نوع تراورتن در اثر یک دوره گرمایش - سرمایش



شکل ۸: تغییرات نفوذپذیری در سه نوع تراورتن در اثر یک دوره گرمایش - سرمایش

نتایج این پژوهش با مطالعات "بیرو و همکاران" و "حسینی" مطابقت دارد [۱۳، ۱۴].

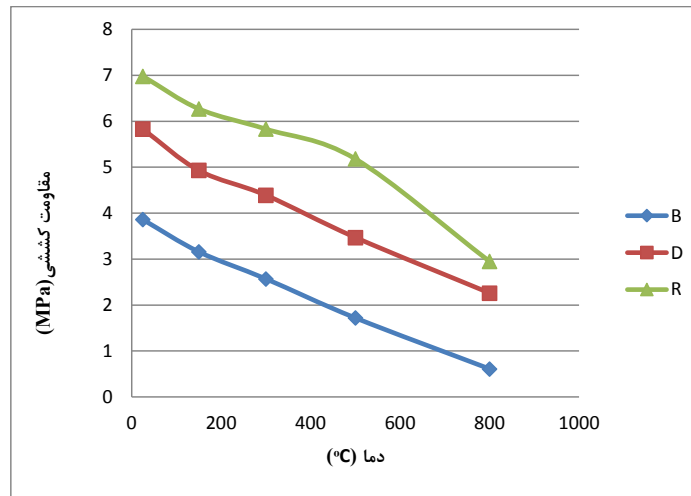
جدول ۱۰: نسبت نفوذپذیری در نمونه‌های سنگ تراورتن بعد از یک دوره گرمایش - سرمایش به نفوذپذیری در نمونه‌های اولیه

نوع سنگ تراورتن	D	B	R
۱۵۰ (°C) دما	۴٫۹۵	۵٫۱۵	۱٫۱۱
۳۰۰	۹٫۴۹	۹٫۹۱	۱٫۲۸
۵۰۰	۶۵٫۵۹	۷۴٫۴۳	۳۱٫۴۲

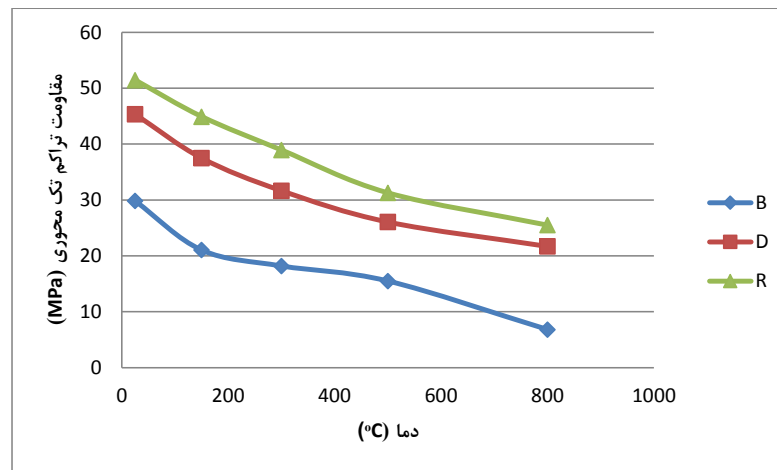
در آن تحقیق نیز با افزایش دما، نفوذپذیری افزایش می‌یابد [۲۰]. جدول ۱۰ نشان می‌دهد بیشترین افزایش نفوذپذیری در تراورتن نوع B و کمترین افزایش در تراورتن R اتفاق می‌افتد. نتایج آزمایش برزلی نیز نشان‌دهنده کاهش مقاومت کششی با افزایش دما است (شکل ۹). نتایج این پژوهش با پژوهش "بیرو و همکاران" در سال ۲۰۱۹ مطابقت دارد [۱۳].

جدول ۱۱ نشان می‌دهد بیشترین کاهش مقاومت کششی در تراورتن نوع B و کمترین کاهش در تراورتن R اتفاق می‌افتد. مقاومت کششی در تراورتن نوع B در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به شدت کاهش می‌یابد.

نتایج آزمایش تراکم تک‌محوری نیز نشان‌دهنده کاهش مقاومت تراکم تک‌محوری با افزایش دما است (شکل ۱۰).



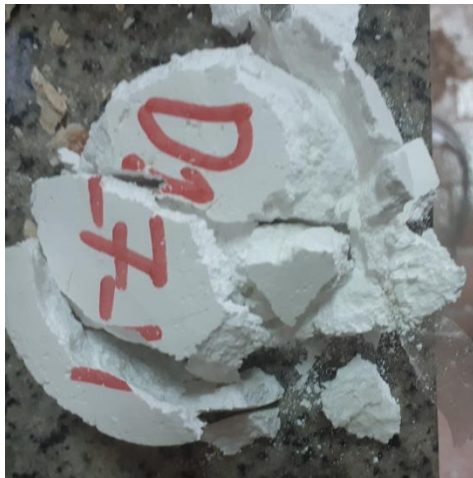
شکل ۹: تغییرات مقاومت کششی در سه نوع تراورتن در اثر یک دوره گرمایش - سرمایش



شکل ۱۰: تغییرات مقاومت تراکم تک محوری در سه نوع تراورتن در اثر یک دوره گرمایش - سرمایش

جدول ۱۱: نسبت مقاومت کششی در نمونه‌های سنگ تراورتن بعد از یک دوره گرمایش - سرمایش به مقاومت کششی در نمونه‌های اولیه

نوع سنگ تراورتن	B	D	R
دما (°C) ۱۵۰	۰٫۸۲	۰٫۸۵	۰٫۸۹
دما (°C) ۳۰۰	۰٫۶۶	۰٫۷۵	۰٫۸۴
دما (°C) ۵۰۰	۰٫۴۴	۰٫۵۹	۰٫۷۴
دما (°C) ۸۰۰	۰٫۱۶	۰٫۳۹	۰٫۴۲



شکل ۱۱: نمونه‌ای از تراورتن D (با تحمل دمای ۸۰۰ درجه و سردشدن بعد از یک روز، به علت جذب رطوبت هوا متلاشی شده‌است).



شکل ۱۲: نمونه‌ای از تراورتن B (با تحمل دمای ۸۰۰ درجه و سرد شدن در محیط آزمایشگاه، در آب به آهک مرده تبدیل می‌شود).

شکل ۱۳ سمت چپ یکی از مقاطع نمونه تراورتن B قبل از فرآیند گرمایش-سرمایش و شکل ۱۳ سمت راست همان مقطع نمونه تراورتن B را بعد از تحمل فرآیند گرمایش-سرمایش، نشان می‌دهد. این نمونه در مرحله گرمایش دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کرده است. همان‌طور که در شکل سمت راست مشخص است، منطقه سیاهی در داخل نمونه وجود دارد که نشان‌دهنده ایجاد تخلخلی است که در نمونه اولیه وجود نداشته است. البته این دستگاه، توانایی تشخیص میکروترک‌ها را ندارد.

جدول ۱۲ نشان می‌دهد بیشترین کاهش مقاومت تراکم تک‌محوری در تراورتن نوع B و کمترین کاهش در تراورتن R اتفاق می‌افتد. مقاومت تراکم تک‌محوری در تراورتن نوع B در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به شدت کاهش آید.

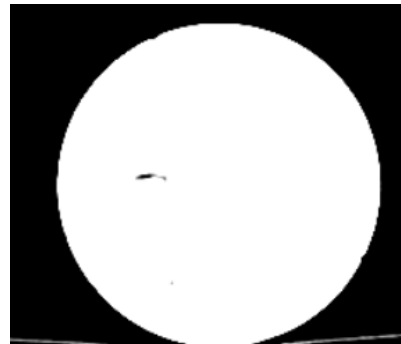
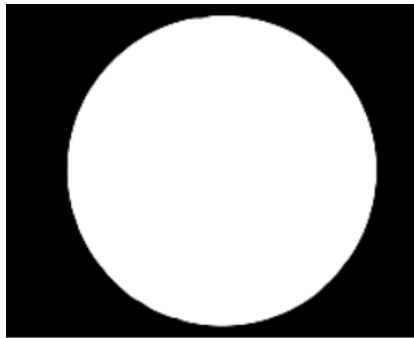
جدول ۱۲: نسبت مقاومت تراکم تک‌محوری در نمونه‌های سنگ تراورتن بعد از یک دوره گرمایش-سرمایش به مقاومت تراکم تک‌محوری در نمونه‌های اولیه

R	D	B	نوع سنگ تراورتن
			دما (°C)
۰٫۸۷	۰٫۸۳	۰٫۷۰	۱۵۰
۰٫۷۶	۰٫۷۰	۰٫۶۱	۳۰۰
۰٫۶۱	۰٫۵۸	۰٫۵۲	۵۰۰
۰٫۵۰	۰٫۴۸	۰٫۲۳	۸۰۰

در نهایت می‌توان گفت در اثر یک دوره گرمایش-سرمایش از بین این سه نوع تراورتن، تراورتن B ضعیف‌ترین تراورتن در برابر آتش‌سوزی است و بعد از تراورتن D، مقاوم‌ترین تراورتن در برابر آتش‌سوزی تراورتن R است. شدت این کاهش در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد از سایر دماها بیشتر است. واکنش شیمیایی که در این دما اتفاق می‌افتد، تبدیل کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) به اکسید کلسیم ( $\text{CaO}$ ) و آزادسازی گاز دی‌اکسید کربن است [۱۳].

در اثر این فرآیند، افت شدید جرم در نمونه‌های تراورتن در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد. به طوری که نمونه‌های تراورتن B، D و R بعد از تحمل کردن دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۹۲٫۵ گرم، ۸۲ گرم و ۷۵ گرم از وزنشان کاسته شد. هرگاه بر روی اکسید کلسیم (آهک زنده) آب ریخته شود، بر اثر واکنش با آب، گرما ایجاد می‌کند که موجب بخار شدن قسمتی از آب می‌شود (اشکال ۱۱ و ۱۲). در این عمل، آهک بر اثر جذب آب، متورم می‌شود و سپس به صورت گرد سفیدی درمی‌آید که در اصطلاح "آهک مرده" نامیده می‌شود (زیرا در تماس با آب، دیگر واکنشی از خود نشان نمی‌دهد). به همین دلیل امکان تعیین نفوذپذیری و تخلخل موثر نمونه‌هایی که تا ۸۰۰ درجه گرم و سپس در محیط سرد شده‌اند، وجود نداشت.

از تصاویر سی‌تی‌اسکن (CT) نیز برای مشاهده تخلخل‌های ایجادشده در اثر فرآیند گرمایش-سرمایش استفاده شد.



شکل ۱۳: تصاویر سی‌تی‌اسکن تهیه‌شده از یکی مقاطع نمونه تراورتن B، شکل سمت چپ قبل از فرآیند گرمایش-سرمايش و شکل سمت راست بعد از فرآیند گرمایش-سرمايش

### ۵- نتیجه‌گیری

کاهش سرعت امواج طولی در تراورتن B، به علت دارابودن ریزترک‌های بیشتر از دو نوع تراورتن دیگر و کمترین کاهش در تراورتن R اتفاق می‌افتد.

شدت کاهش همه خواص تراورتن‌ها در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به علت تبدیل کربنات کلسیم به اکسیدکلسیم، نسبت به سایر دماها بیشتر است.

تراورتن R، مقاوم‌ترین تراورتن در برابر آتش‌سوزی است و بعد از آن تراورتن D و B قرار می‌گیرند.

در این مقاله اثر دما در یک دوره گرمایش-سرمايش روی خواص فیزیکی و مکانیکی سه نوع سنگ تراورتن (B، D و R) بررسی شد. خصوصیات فیزیکی بررسی‌شده شامل تخلخل موثر، سرعت امواج طولی و نفوذپذیری و خواص مکانیکی بررسی‌شده شامل مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک‌محوری است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد:

با افزایش دما در هر سه نوع تراورتن، نفوذپذیری و تخلخل موثر نسبت به تخلخل موثر اولیه افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش تخلخل موثر و نفوذپذیری در تراورتن B و کمترین افزایش در تراورتن R اتفاق می‌افتد.

تخلخل موثر در نمونه‌های تراورتن‌های B، D و R که در مرحله گرمایش، دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کرده‌اند، به ترتیب ۱،۷۱، ۱،۴۵ و ۱،۲۸ برابر میزان تخلخل اولیه و میزان نفوذپذیری در تراورتن B، D و R برای نمونه‌هایی که در مرحله گرمایش دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کرده‌اند، به ترتیب ۷۴،۴۳، ۶۵،۵ و ۳۱،۴۲ برابر میزان نفوذپذیری اولیه است.

با افزایش دما در هر سه نوع تراورتن، سرعت امواج طولی نسبت به سرعت امواج اولیه کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش سرعت امواج طولی در تراورتن B و کمترین کاهش در تراورتن R اتفاق می‌افتد. این موضوع نشان می‌دهد که ایجاد و گسترش ریزترک‌ها در اثر فرآیند گرمایش-سرمايش در تراورتن B، بیشتر از سایر تراورتن‌ها است.

با افزایش دما در هر سه نوع تراورتن، مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک‌محوری نسبت به مقاومت کششی و مقاومت تراکم تک‌محوری اولیه کاهش می‌یابد. بیشترین

### ۶- سپاس‌گزاری

این اثر با حمایت مالی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام گرفته است از اینرو از مسوولان دانشگاه تقدیر و تشکر می‌شود.

### ۷- مراجع

- [1] 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". *Procedia Earth and Planetary Science*, 1: 432-437.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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.

- Lu, L. (2017). "The effect of high temperature on tensile strength of sandstone". Applied Thermal Engineering, 111: 573-579.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Biró, A., Hlavička, V., and Lublőy, É. (2019). "Effect of fire-related temperatures on natural stones". Construction and Building Materials, 212: 92-101.
- [17] Kim, K., Kemeny, J., and Nickerson, M. (2014). "Effect of rapid thermal cooling on mechanical rock properties". Rock Mechanics and Rock Engineering, 47: 2005-2019.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] حسینی، م.، فخری، د.؛ ۱۳۹۷؛ "اثر فرآیندهای یخبندان - ذوب و گرمایش - سرمایش بر نفوذپذیری ماسه سنگ لوشان". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره سوم، شماره ۴، ص ۷۰-۵۷.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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 uniaxial 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 Mechanics and Rock Engineering, 47: 1479-1484.
- [13] Lü, C., Sun, Q., Zhang, W., Geng, J., Qi, Y., and

<sup>1</sup> Coconino



Imam Khomeini International University  
Vol. 5, No. 2, Summer 2020, pp. 16-19



نشریه مهندسی منابع معدنی  
Journal of Mineral Resources Engineering  
(JMRE)

DOI: 10.30479/jmre.2020.12032.1337

## Influence of Temperature Changes Caused by Firing and Cooling on the Physical and Mechanical Properties of Travertine

Hosseini M.<sup>1\*</sup>, Fakhri D.<sup>2</sup>

1- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Imam Khomeini International university, Qazvin, Iran  
ma.hosseini@eng.ikiu.ac.ir

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

(Received: 14 Nov. 2019, Accepted: 04 Jan. 2020)

**Abstract:** In the case of explosions and fires, the rocks undergo cycles of heating and cooling, that is, they are exposed to considerable heat first and then cooled after extinguishing the fire. The purpose of this paper is to study how the temperature in a heating-cooling cycle can affect the physical and mechanical properties of travertine. In Iran, travertine stone is widely used for building facades, so travertine was chosen as the material of study. In this study, three types of travertine (Travertine B, Travertine D and Travertine R) were studied. The effective porosity and permeability at 25 °C for Travertine B is greater than Travertine D and Travertine D is greater than Travertine R. Also, the longitudinal wave velocity, tensile strength and uniaxial compressive strength at 25 °C for Travertine B are lower than Travertine D and Travertine D is lower than Travertine R. During the heating phase in a heating-cooling cycle, experiments were performed on specimens that were initially exposed to temperatures of 150, 300, 500 and 800 °C and then cooled gradually to ambient temperature. A series of experiments were performed on specimens that were not exposed to a heating-cooling cycle. This paper investigates the effect of the heating-cooling process on its physical properties including effective porosity, longitudinal wave velocity and permeability, and its mechanical properties including tensile strength and uniaxial compressive strength. The results showed that as the temperature increases, the effective porosity and permeability increased and the longitudinal wave velocity, tensile strength and uniaxial compressive strength decreased. The highest increase in effective porosity and permeability due to increasing temperature was related to travertine B and the lowest increase was related to travertine R. The highest decrease in longitudinal wave velocity, tensile strength, and uniaxial compressive strength due to increasing temperature was related to travertine B and the lowest decrease was related to travertine R.

**Keywords:** Physical properties, Mechanical properties, Fire, Travertine, Building stone.

### INTRODUCTION

Rocks are occasionally exposed to elevated temperature which creates thermal stress and affects their properties. Thermal loading can generate two types of micro cracks in rocks via different mechanisms:

cycling cracks and thermal gradient-induced cracks. Cycling cracks form because of a mismatch between thermal expansion coefficients of adjacent mineral grains in a homogeneous temperature field, while thermal gradient-induced cracks result from thermal stresses induced by temperature gradients exceeding the local grain strength [1]. In theory, a maximum thermal stress of  $E\alpha\Delta T/(1 - \nu)$  could be generated (where  $E$  is the Young's modulus,  $\alpha$  is the coefficient of thermal expansion,  $\Delta T(T_o - T_a)$  is the change in temperature, and  $\nu$  is Poisson's ratio). Some of previous researches are presented in Table 1.

**Table 1.** Previous Studies on effect of temperature on properties of various rocks

References	Rock type	Test temperature	Sample size	Elastic modulus	Compressive strength	Tensile strength
[2]	Salt	20–240	ISRM SM	Decrease	Increase	
[3]	Granite	20–800	5cm( $\phi$ ) $\times$ 10cm	Decrease	Decrease	
[4]	Marble	20–700	ISRM SM	Decrease	Decrease	
[5]	Granite	30–160	ISRM SM	Decrease–increase	Decrease–increase	Decrease
[6]	Granite	25–1300	2.5cm( $\phi$ ) $\times$ cm	Decrease	Decrease	
[7]	Gabbro	25–1000	4cm( $\phi$ ) $\times$ 9cm	Decrease	Decrease	

One of the studies conducted in this regard is a laboratory study by Kim et al. on the samples of igneous, sedimentary and metamorphic rocks. Samples were slowly heated to the temperatures of 100°C, 200°C and 300 °C and then quickly cooled down with a fan to the room temperature (25 °C). The rate of temperature rise was 1-2°C/min. The test results including the tensile strength of the samples due to temperature changes on Coconino sandstone showed, the tensile strength reduced from 6 MPa in unheated samples to 5 MPa in the samples which were heated up to 300°C and cooled rapidly. In addition to this test, the effect of cycles of heating up to 100°C and then cooling on the tensile strength of Coconino sandstones was also investigated. In this case, samples underwent 10, 15 and 20 cycles of heating and cooling. On account of these cycles, the tensile strength decreased from 6.3 to 6 MPa [8]. The researcher also investigated the various effects of heating and cooling cycles on different rocks. In this respect, samples were heated up to 5 cycles at 100°C. Results of the studies conducted on Sierrita granite showed that the samples undergoing 5 cycles of heating and cooling exhibited lower longitudinal wave velocity and greater porosity than unheated samples. In these examples, cycles of heating and cooling caused increases in the crack widths and densities.

These changes were different in Diabase. The results showed that the samples enduring 5 heating and cooling cycles had higher longitudinal wave velocity and porosity compared to the unheated ones. Crack density decreased as they were subject to compressive stress which also led to decreased porosity. The same scenario was observed in Skarn, diabase and quartzite. For this reason, the samples enduring five heating and cooling cycles exhibited greater tensile strength compared to the unheated samples.

Most research conducted around the world is focused on the effects of temperature on rock properties in a heating process. Little research has been conducted on the effects of the heating - cooling process on rock properties. Moreover, such studies have mostly been conducted on granite and sandstone. This study provides a new perspective in terms of the studied samples as well as the effect of the heating - cooling process on the properties of rocks.

## MATERIALS STUDIED AND THE METHOD OF EXPERIMENT

In this study, three types of travertine (Travertine B, Travertine D and Travertine R) were studied. Travertine blocks from mines were transferred to the laboratory. For microscopic studies, a thin section was prepared from the specimen and examined under a microscope.

The physical and mechanical properties of the specimen including dry weight, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, and longitudinal wave velocity were determined using the methods proposed by the International Society of Rock Mechanics [9]. To determine the uniaxial compressive



strength and the Brazilian tensile strength, cores with a diameter of 54 mm and a length/diameter ratio of 2 were used for uniaxial compressive strength and a diameter-to-thickness ratio of 2 for the Brazilian tensile strength. Saturation and immersion methods were used to determine the dry weight and effective porosity of the specimen. The results have been presented in Table 2.

**Table 2.** Physical and mechanical properties of sandstone

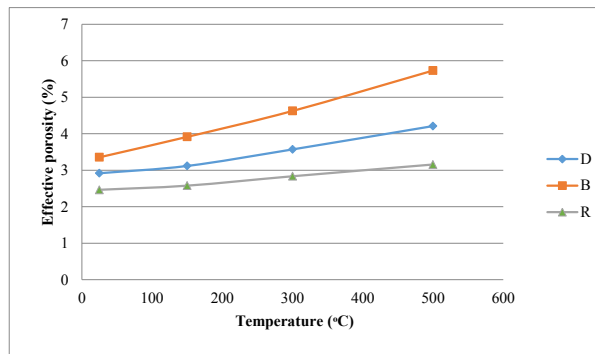
Type of travertine	Dry unit weight (KN/m <sup>3</sup> )	Longitudinal wave velocity (m/s)	Tensile strength (MPa)	Uniaxial compressive strength (MPa)
B	23.70	5479.4	3.86	29.84
D	23.99	5773.2	5.83	45.36
R	25.05	6002.5	6.98	51.45

In this study, three types of travertine (Travertine B, Travertine D and Travertine R) were studied.

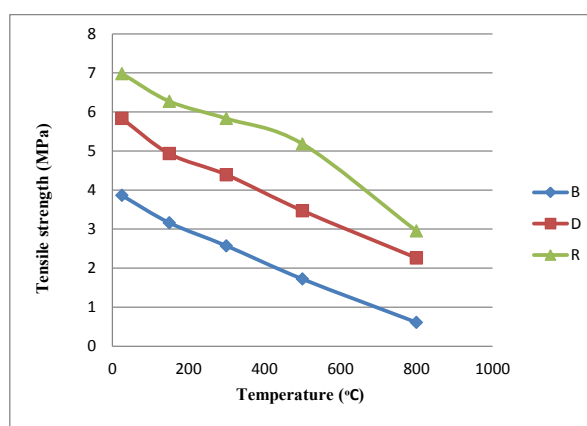
During the heating phase in a heating-cooling cycle, experiments were performed on specimens that were initially exposed to temperatures of 150, 300, 500 and 800 °C and then cooled gradually to ambient temperature. A series of experiments were performed on specimens that were not exposed to a heating-cooling cycle.

### TEST RESULTS

The results showed that as the temperature increases, the effective porosity (Figure 1) and permeability increased and the longitudinal wave velocity, tensile strength (Figure 2) and uniaxial compressive strength decreased.



**Figure 1.** Effective porosity changes in three types of travertine due to a heating-cooling cycle



**Figure 2.** Tensile strength changes in three types of travertine due to a heating-cooling cycle

## CONCLUSION

The results of the present study on three types of travertine showed that by increasing temperature, longitudinal wave velocity and tensile strength of the samples decreased, while their porosity increased. Reduction of properties was different in three type travertine; so that the maximum reduction in longitudinal wave velocity, tensile strength, and uniaxial compressive was seen in the travertine B and the minimum reduction in the travertine R. Increase of properties was different in three type travertine; so that maximum increase in effective porosity and permeability was seen in the travertine B and the minimum increase in the travertine R.

## REFERENCES

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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". Procedia Earth and Planetary Science, 1: 432-437.
- [7] 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.
- [8] Kim, K., Kemeny, J., and Nickerson, M. (2014). "Effect of rapid thermal cooling on mechanical rock properties". Rock Mechanics and Rock Engineering, 47: 2005-2019.
- [9] International Society for Rock Mechanics and Ulusay, R. (2007). "The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006". International Soc. For Rock Mechanics, Commission on Testing Methods.