

مطالعه آزمایشگاهی برای تعیین ضریب انبساط حرارتی سنگ

مهدی حسینی*^۱ و امیرحسین بابایی جوزانی^۲

۱ و ۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

نویسنده مسئول: meh_hosseini18@yahoo.com*

دریافت: ۹۷/۲/۲۳ پذیرش: ۹۷/۷/۱۴

چکیده

خاصیت حرارتی به معنای پاسخ ماده به اعمال حرارت می‌باشد. وقتی که یک ماده جامد، مقداری انرژی (در فرم حرارت) را جذب می‌کند درجه حرارت جسم و به دنبال آن ابعادش افزایش می‌یابد. انرژی ممکن است به مناطق خنک‌تر نمونه منتقل شود و حتی موجب ذوب شدن نمونه شود. ساز و کار انتقال گرما در سنگ‌ها بسیار پیچیده است. سنگ‌ها از کانی‌هایی با ترکیبات شیمیایی و درجات کریستالیزه‌شدگی مختلفی تشکیل شده‌اند؛ بنابراین خواص حرارتی سنگ‌ها نه تنها به فشار و دما، بلکه به ترکیبات کانی‌شناسی، ساختار و هندسه حفرات، اندازه ذرات و شکل ترک‌ها نیز بستگی دارد. ظرفیت گرمایی، رسانایی حرارتی، انتشار حرارتی و انبساط حرارتی اصلی‌ترین خواص حرارتی سنگ‌ها می‌باشند که در مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن اثر درجه حرارت مانند مدل‌سازی چاه‌های نفت، مخازن ذخیره‌سازی گاز، محل دفن زباله‌های هسته‌ای و معادن عمیق کاربرد دارد. در این پژوهش دستگاهی برای تعیین یکی از این خواص که ضریب انبساط حرارتی می‌باشد ساخته شده است. برای بررسی کارایی دستگاه این ضریب در سنگ‌های ماسه‌سنگ، آندزیت، توف سبز کرج و سنگ‌آهک تعیین شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی این نوع سنگ‌ها که در کتاب‌ها موجود است تطابق دارد.

واژه‌های کلیدی: حرارت، ضریب انبساط حرارتی، سنگ

۱- مقدمه

در بین خواص موجود در عناصر جامد، خواص حرارتی یکی از مهم‌ترین خواص مورد بحث می‌باشد، زیرا تغییرات دمایی و همچنین انتقال دما، جزء اتفاقاتی محسوب می‌شود که وقوع آن‌ها غیرقابل جلوگیری است. به عنوان یک مثال ساده می‌توان تغییرات دمایی در روز و شب یا حتی تغییرات فصلی را یکی از اتفاقاتی دانست که وقوع آن‌ها غیرقابل اجتناب بوده و این وقایع نیازمند دانش کافی در مورد پاسخ مواد مورد استفاده به تغییرات درجه حرارت توسط مهندس طراح یک پروژه می‌باشد (کوکنن و لیدبرگ، ۱۹۹۸).

انتقال حرارت در مواد موجود طبیعی شامل سنگ و خاک توسط طبیعت و فعالیت‌های بشری رخ می‌دهد. گرادیان‌های حرارتی طبیعی شامل تغییرات دمایی فصلی، فعالیت‌های آتشفشانی، حرکت مواد مذاب در زیرزمین و فعالیت‌های زمین گرمایی می‌باشد. گرادیان‌های حرارتی تولید شده توسط فعالیت‌های انسانی شامل تأسیسات تولید انرژی، تکنیک‌های تقویت زمین‌های نرم و روش‌های بازسازی محیط‌زیست پس از انجام پروژه‌های

خاصیت حرارتی سنگ، یکی از مهم‌ترین خواص سنگ می‌باشد. ظرفیت گرمایی، رسانایی حرارتی، انتشار حرارتی و انبساط حرارتی اصلی‌ترین خواص حرارتی سنگ‌ها می‌باشند که کاربردهای پرشماری در صنایع مختلف از قبیل نفت، انرژی هسته‌ای و کارهای معدنی دارد. از زمان قدیم از سنگ‌ها به خاطر دوام و مقاومت زیاد آن‌ها در احداث ساختمان‌ها و ابنیه مهم استفاده شده است. امروزه به دلیل پیشرفت فناوری در استخراج و حمل و نقل، استفاده از سنگ و خاک ابعاد گسترده‌تری یافته است و از آن‌ها، در زمینه‌های مختلف ساخت و ساز استفاده می‌شود. با این اوصاف می‌توان ادعا نمود مهم‌ترین موادی که به صورت مستقیم یا غیر مستقیم از قدیم تا به امروز در صنایع مورد استفاده قرار گرفته‌اند، خاک و سنگ می‌باشند. حال با توجه به این مهم که سنگ و خاک جزء لاینفک صنایع مورد استفاده بشر می‌باشند، شناخت خواص آن‌ها امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

حرارتی با ضریب انبساط حرارتی همانطور که در رابطه (۲) مشاهده می‌شود رابطه مستقیم دارد بنابراین در سنگ‌هایی که ضریب انبساط حرارتی بالاتری دارند زوال سنگ در دمای پایین‌تری شروع می‌شود.

سازوکار انتقال گرما در سنگ‌ها بسیار پیچیده است. پیش بینی صحیح رسانایی حرارتی مواد متخلخل کاری بسیار سخت و حتی در بعضی موارد غیر ممکن است. سنگ‌ها از ذرات کانی‌هایی با ترکیبات شیمیایی و درجات کریستالیزه شدگی مختلفی تشکیل شده‌اند؛ بنابراین خواص حرارتی سنگ‌ها نه تنها به فشار و دما، بلکه به ترکیبات کانی‌شناسی، ساختار و هندسه حفرات، اندازه ذرات و شکل ترک‌ها نیز بستگی دارد. هم‌چنین محاسبه انتقال حرارت در تشکیلات زیر سطحی نیازمند اطلاعاتی در زمینه خواص انبساط حرارتی سنگ‌ها و میزان گرمای واکنشی اجزای سازنده‌ی کانی‌ها می‌باشد (سان و همکاران، ۲۰۱۶).

در اغلب مواد وقتی به آن‌ها گرما داده می‌شوند منبسط و وقتی که به آن‌ها سرما داده می‌شود منقبض می‌شوند. تغییر شکلی که به واسطه تغییر یک درجه حرارت در ماده ایجاد می‌شود ضریب انبساط حرارتی (α) نامیده می‌شود. این ضریب با واحد $1/K$ یا $1/C$ و یا $1/F$ نمایش داده می‌شود. کرنش حرارتی با رابطه (۱) زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon = \alpha(T - T_0) \quad (1)$$

که در آن T_0 دمای اولیه و T دمای ثانویه یا کنونی ماده می‌باشد. اگر $T > T_0$ کرنش حرارتی مثبت و جسم منبسط می‌شود (شکل ۱). در حالت برعکس کرنش حرارتی منفی و جسم منقبض می‌شود.

در بیش‌تر مواد، کرنش حرارتی برگشت‌پذیر است. به یاد داشته باشید که اگر اطراف جسم آزاد باشد کرنش‌های حرارتی همراه با تنش نیستند؛ اما اگر جسم به جایی محکم شده باشد تنش حرارتی با تغییرات دما در جسم گسترش پیدا می‌کند. برای مثال تحت بارگذاری تک محوره، تنش طولی از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\sigma = -\alpha E(T - T_0) \quad (2)$$

که E مدول یانگ جسم است (امادی، ۲۰۱۱). در سنگ‌ها، انقباض و انبساط حرارتی در همه جهات یکسان نیستند، به دلیل آنکه سنگ‌ها حاصل تجمع دانه‌های کانی‌ها با درجات انبساط مختلفی است. به دلیل

مختلف از قبیل معدنکاری و راهسازی در محیط طبیعی می‌باشد.

خاصیت حرارتی به معنای پاسخ ماده به اعمال حرارت می‌باشد. وقتی که یک ماده جامد، مقداری انرژی (در فرم حرارت) را جذب می‌کند درجه حرارت و به دنبال آن ابعادش آن افزایش می‌یابد. انرژی ممکن است به مناطق خنک‌تر نمونه منتقل شود و حتی موجب ذوب شدن نمونه شود.

مهندسی معدن به خواص حرارتی سنگی که روی آن کار می‌کنند، علاقه‌مندند. اطلاع از خواص حرارتی سنگ، محاسبه ظرفیت تهویه مورد نیاز برای پراکنده کردن گرمای دریافت شده ناشی از گرمای موجود در عمق زمین در چاه معدن را ممکن می‌سازد. در معادن سنگ‌های ساختمانی به دلیل اینکه نیاز به سنگ کاملاً سالم می‌باشد بایستی دقت نمود که تغییرات درجه حرارت در معدن طی شبانه روز و یا فصول مختلف سبب ایجاد ترک و شکستگی در سنگ‌ها نشود (کوکین و لیدبرگ، ۱۹۹۸).

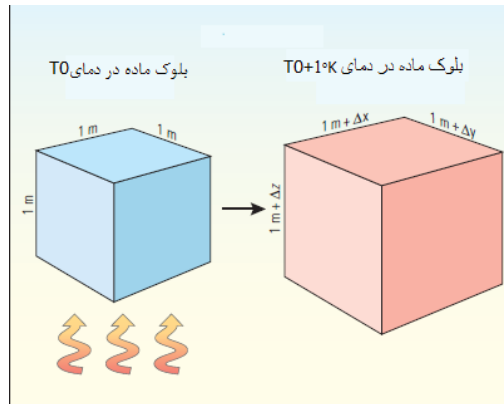
تحریک گرمایی سال‌ها روشی پیش‌تاز برای ازدیاد برداشت از مخزن نفت بوده است. طراحی برنامه‌های تحریکی جهت تولید این منابع به طور مؤثر و در مدت زمان طولانی، نیازمند فهم و اندازه‌گیری بهتر خواص حرارتی سنگ می‌باشد. امروزه حدود ۶۰٪ تولید نفت جهان بر پایه روش‌های ازدیاد برداشت از مخزن نفت هستند که همگی ناشی از تحریک گرمایی هستند (چکهنین و همکاران، ۲۰۱۲). در دهه اخیر محققین روی اثر درجه حرارت بر خواص سنگ پژوهش‌هایی انجام داده‌اند. این تحقیقات بر روی اثر درجه حرارت روی تخلخل، نفوذپذیری، سرعت امواج طولی، مقاومت کششی، مقاومت تراکم تک محوری و مدول الاستیسیته سنگ انجام شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد در اکثر حالات با افزایش درجه حرارت، میزان تخلخل و نفوذپذیری افزایش و سرعت امواج طولی، مقاومت کششی، مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. (دووودی و همکاران، ۲۰۰۸؛ کیم و همکاران ۲۰۱۴؛ یاوز و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژائو، ۲۰۱۶؛ تاکارلی و پرنس-اگبدجان، ۲۰۰۸). اثر حرارت روی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ به خواص حرارتی سنگ بستگی دارد. در اثر افزایش درجه حرارت تنش حرارتی افزایش می‌یابد و تنش

سنگ را می‌توان از ترکیب کانی‌شناسی و ضریب انبساط حرارتی حجمی هر یک از کانی‌ها به دست آورد (رابطه ۳) (امادی، ۲۰۱۱):

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot K_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^N K_i \cdot V_i} \quad (3)$$

در رابطه بالا α_i و K_i و V_i به ترتیب ضریب انبساط حرارتی، مدول بالک و درصد حجمی کانی i ام در سنگ هستند. برای نرخ‌های گرم کردن بیش از ۲ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و درجه حرارت بیش از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، ریشتر و سیمون دریافتند که آسیب‌های غیر قابل بازگشتی در مقیاس میکروسکوپی بر سنگ وارد می‌شود و مقدار ضریب انبساط حرارتی کاهش می‌یابد.

انبساط ناهمساگرد دانه‌های کانی‌های مختلف در یک سنگ، تنش‌هایی در دانه‌ها یا در سطح تماس آن‌ها ایجاد می‌شود. ترکیب تنش‌های برشی و فشاری باعث جدا شدن دانه‌ها یا جدایش‌ها در ترک‌های بین‌دانه‌ای می‌شود. نتایج آزمایش‌های ریشتر و سیمونز بر روی سنگ‌های آذرین در محدوده دمایی بین ۲۵ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده است که انبساط گرمایی به فاکتورهای مختلفی مانند نرخ گرم کردن، حداکثر دمایی که ماده قبلاً داشته، ترکیب کانی‌شناسی و تخلخل سنگ بستگی دارد. برای مثال آن‌ها دریافتند که در نرخ‌های گرم کردن پایین‌تر از ۲ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و دمای کمتر از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، منحنی‌های انبساط (T و ϵ) نشان داد که کرنش قابل برگشت است. آن‌ها همچنین دریافتند که ضریب انبساط حرارتی برای یک



شکل ۱. تصویر شماتیک از انبساط حرارتی اجسام (چکهنین و همکاران، ۲۰۱۲)

بالای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، حتی در مورد بلورهای منفرد، انبساط حرارتی تحت تأثیر تغییرات غیر قابل برگشتی است که در طول آزمایش به وسیله شکل‌گیری ترک‌های میکرونی و یا به وسیله اثرات شیمیایی نظیر اکسیداسیون، بی‌نظمی شیمیایی و تغییر فاز (حالت) پیش می‌آید (جدول ۱).

در ایران برای ساخت دستگاهی جهت تعیین خصوصیات حرارتی سنگ‌ها پژوهش منسجمی انجام نشده است این نقطه قوت این پژوهش است که با ساخت دستگاهی ضریب انبساط حرارتی سنگ‌ها قابل اندازه‌گیری است به منظور نشان دادن قابلیت دستگاه ساخته شده بر روی ۴ نوع سنگ آزمایش انجام شده است.

هومند-اتین و هوپرت نشان دادند که انبساط حرارتی حجمی یک سنگ بستگی به اندازه‌های دانه‌های آن دارد. برای مثال آن‌ها دریافتند که گرانیب با بلورهای بزرگ‌تر بیش از گرانیب با بلورهای کوچک‌تر به دما حساس است. همین نتایج در مورد اندازه دانه‌های آهک و ماسه‌سنگ به دست آمد. آن‌ها همچنین دریافتند که سنگ‌هایی با تخلخل بالا کمتر به دما حساس هستند (امادی، ۲۰۱۱). متوسط ضریب انبساط حرارتی حجمی مواد از رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$$\alpha = (1/V_0)(\Delta V / \Delta T) \quad (4)$$

در رابطه (۴) ΔV تغییر حجم، ΔT تغییر درجه حرارت و V_0 حجم اولیه ماده می‌باشد. محدوده دمایی جهت استفاده از رابطه (۴) بین ۲۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و فشار ۱ بار (bar) است. در دماهای

جدول ۱. ضریب انبساط حرارتی خطی برای انواع سنگ‌ها (امادی، ۲۰۱۱؛ رابرتسون، ۱۹۸۸؛ برودسکی و همکاران، ۱۹۹۷)

نوع سنگ	$\alpha (10^{-6} / K)$
بازالت	۵/۴
آهک	۲/۵ - ۲۰
گرانیت	۷/۵ - ۹
ماسه‌سنگ	۱۰
مرمر	۵/۴ - ۷
نمک	۴۰
آندزیت	۷
توف	۶/۳۹

نمونه سوم سنگ‌آهک و دارای زمینه و بافت کلسیت ریزبلور که بخشی از آن دچار تبلور مجدد شده، می‌باشد. از جمله کانی‌های اصلی آن می‌توان کلسیت را نام برد (شکل ۴).

نمونه چهارم سنگی از نوع آندزیت و دارای بافت پورفیری می‌باشد. کانی اصلی آن پلاژیوکلاز و کانی‌های فرعی آن کوارتز، آمفیبول و کانی‌های اپک می‌باشد. دگرسانی این سنگ از نوع سریستی و آهکی می‌باشد (شکل ۵).

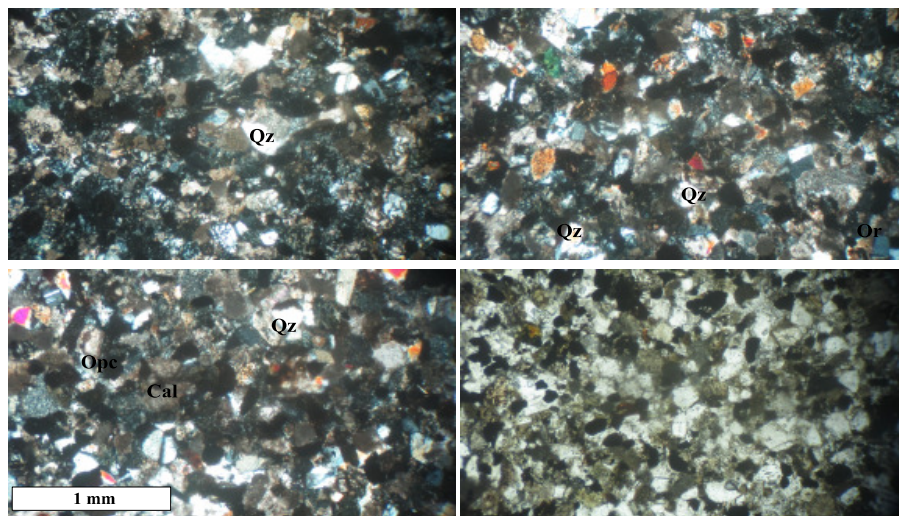
تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها بر اساس استانداردهای (انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، ۲۰۰۷) انجام گرفته است. خواص فیزیکی نمونه‌ها در جدول (۲) و خواص مکانیکی شامل مقاومت تراکم تک‌محوری و مقاومت کششی در جدول (۳) و جدول (۴) ارائه شده است.

۲- نمونه مورد آزمایش

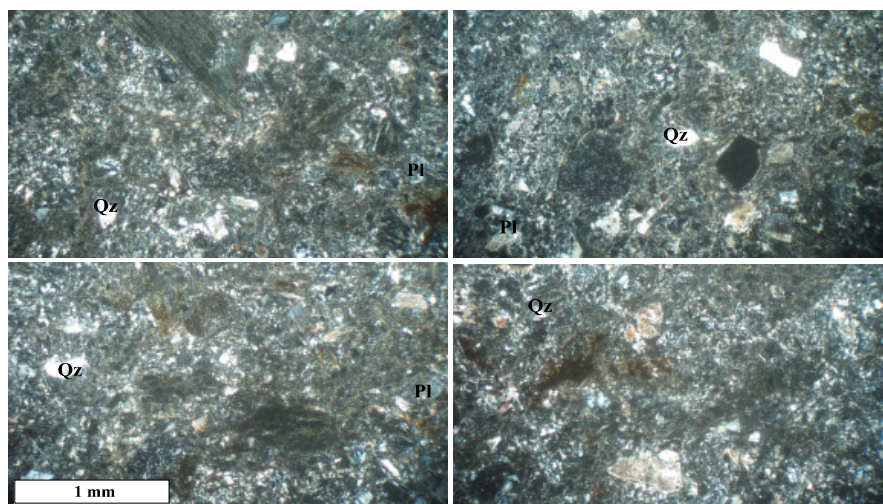
آزمایش بر روی نمونه‌های ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک، آندزیت و توف انجام شده است. که ترکیب کانی‌شناسی آن به شرح ذیل است:

نمونه‌های ماسه‌سنگ نوعی ماسه‌سنگ آهکی است که سیمان آن آهکی می‌باشد. از جمله کانی‌های اصلی و فرعی این سنگ می‌توان کلسیت، فلدسپار آلکالن، کوارتز و کانی‌های اپک را نام برد. دیاژنز این سنگ از نوع سریستی‌شدن، چرتی‌شدن و کلسیتی‌شدن است. کوارتزهای شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار همراه با کلسیت، از جمله شکل‌دهنده اصلی این سنگ می‌باشند (شکل ۲).

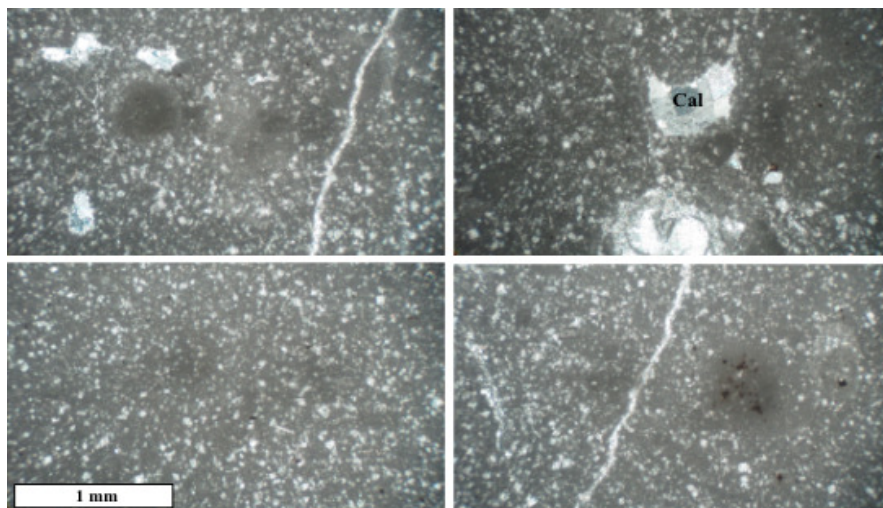
سنگ توف از نوع توف آندزیتی و دارای بافت پورفیری می‌باشد. کانی اصلی آن پلاژیوکلاز و کانی‌های فرعی آن فلدسپار آلکالن، کوارتز و کانی‌های اپک می‌باشد. دگرسانی این سنگ از نوع سیلیسی، کلسیتی و سریستی می‌باشد (شکل ۳).



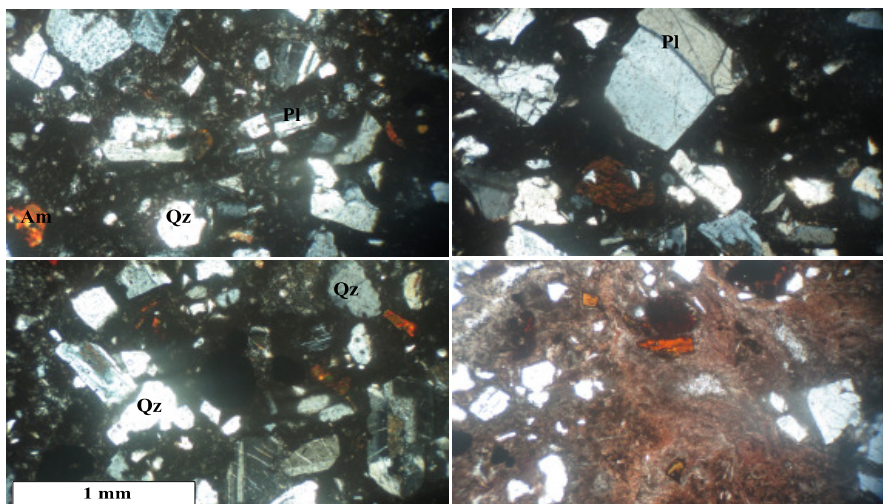
شکل ۲. تصویر میکروسکوپی از نمونه ماسه‌سنگ



شکل ۳. تصویر میکروسکوپی از نمونه توف



شکل ۴. تصویر میکروسکوپی از نمونه سنگ آهک



شکل ۵. تصویر میکروسکوپی از نمونه آندزیت (در شکل‌های ۲ تا ۵ کانی‌های موجود با علائم اختصاری زیر بر روی تصاویر مشخص گردیده است. Qz: کوارتز، Cal: کلسیت، Opc: کانی‌های اپک، Or: اورتوکلاز، Pl: پلاژیوکلاز و Am: آمفیبول)

جدول ۲. مقادیر چگالی و تخلخل مؤثر نمونه سنگ‌های مورد آزمایش قرارگرفته در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد)

پارامتر	ماسه‌سنگ	سنگ آهک	توف	آندزیت
چگالی (gr/cm^3)	۲/۳۸	۲/۶۹	۲/۲۳	۲/۵
تخلخل مؤثر (%)	۹/۸۴	۰/۲۳	۶/۷۲	۱/۳۰

جدول ۳. مقاومت تراکم تک‌محوره

پارامتر	ماسه‌سنگ	سنگ آهک	آندزیت	توف
مقاومت تراکمی تک‌محوره (MPa)	۷۷/۶۲	۱۴۵/۴۵	۱۴۵/۷۳	۱۱۷/۸۵

جدول ۴. مقاومت کششی نمونه‌ها

پارامتر	ماسه‌سنگ	سنگ آهک	آندزیت	توف
مقاومت کششی (MPa)	۸/۳۴	۱۰/۲۹	۱۰/۶۹	۱۲/۰۴

هم‌چنین افزایش دما به وسیله‌ی المنت الکتریکی انجام می‌شود. دمای سلول در هر لحظه توسط ترموکوپل الکتریکی و دماسنج دیجیتال متصل به آن نشان داده می‌شود. زمانی‌که دمای محفظه سلول به دمای مورد نظر رسید جریان المنت الکتریکی توسط کنداکتور دستگاه قطع می‌شود. شکل ۸ نمایی کلی از تجهیزات اعمال دما و سلول به همراه محفظه‌ی دما را نشان می‌دهد.

نمونه‌های سنگ به صورت مکعب مستطیلی و در ابعاد ۱۰ در ۱۰ در ۸ سانتی‌متر به وسیله دستگاه برش موجود در آزمایشگاه مکانیک سنگ بریده شدند. سپس سه وجه هرکدام از نمونه‌ها جهت برقراری تماس مناسب بین کرنش‌سنج و سطح نمونه ساب داده شدند. این سه وجه طوری انتخاب شدند که در راستای محورهای x و y و z نمونه باشند. پس از آن سه کرنش‌سنج در سطوح ساب داده شده و در جهات x و y و z نصب گردید. به هر کرنش‌سنج دو رشته سیم برای اتصال آن به دستگاه data logger لحیم شد (شکل ۹ الف). پس از نصب کرنش‌سنج‌ها به سه وجه هر نمونه و اتصال دو رشته سیم به هر کرنش‌سنج، سیم‌های متصل شده به کرنش‌سنج به دستگاه data logger وصل می‌شود. پس از آن ترموکوپل را با توجه به دمای نهایی مورد نظر (در این آزمایش ۶۰ درجه سانتی‌گراد) تنظیم کرده و آن را روی یک وجه از نمونه که کرنش‌سنج به آن متصل نیست قرار داده و به کمک سیم به نمونه بسته می‌شود (شکل ۹ ب).

در مرحله بعدی نمونه و ترموکوپل متصل به آن را داخل اتاقک تنظیم دمایی که حرارت در آن جا به نمونه منتقل می‌شود قرار داده و از سوراخی که در بدنه این اتاقک قرار دارد سیم‌های متصل به نمونه عبور داده می‌شود. سپس

۳- دستگاه آزمایش و نحوه اجرای آزمایش

دستگاه آزمایش از وسایل زیر تشکیل شده است:

۳-۱- کرنش‌سنج الکتریکی

کرنش‌سنج‌ها که در سال ۱۹۸۳ توسط سیمونز و روگا ابداع شدند وسیله‌ای هستند که از آن‌ها به منظور اندازه‌گیری کرنش اجسام استفاده می‌شود. کرنش‌سنج‌ها را با استفاده از چسب‌های مخصوصی روی نمونه سنگ می‌چسبانند. معمولاً طراحی کرنش‌سنج‌ها بدین گونه است که سیم‌هایی با جنس مس و نیکل به شکل رفت و برگشت مابین پلاستیک‌های مقاومی قرار می‌گیرند. ابعاد آن‌ها از چند میلی‌متر مربع تا چند سانتی‌متر مربع متغیر است و دارای مقاومتی از چند ده تا چند هزارم اهم می‌باشند (کوشی و یعقوبی، ۲۰۱۱). برای انجام این آزمایش از کرنش‌سنج ۳۵۰ اهم استفاده شده است. در شکل ۶ تصویر شماتیک کرنش‌سنج نمایش داده شده است.

۳-۲- دستگاه ثبت داده‌ها

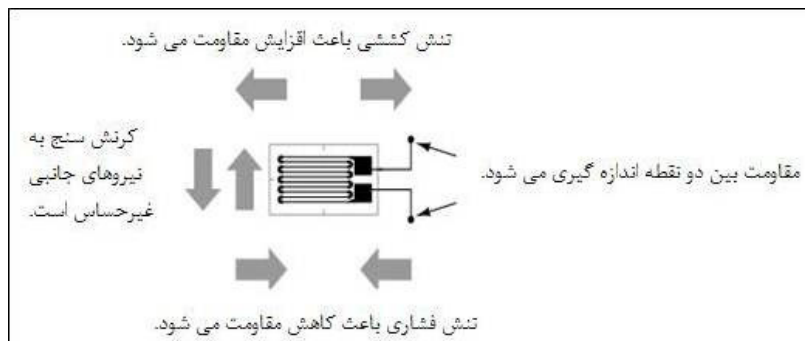
این دستگاه دارای ۸ کانال می‌باشد که در این پژوهش از ۳ کانال آن استفاده شده است. سیم‌های کرنش‌سنج به دستگاه ثبت داده‌ها متصل می‌گردد، دستگاه ثبت داده‌ها نیز به کامپیوتر متصل است و حین آزمایش کرنش‌ها بر روی مونیتر کامپیوتر قابل مشاهده است و می‌توان آن‌ها را در یک فایل ذخیره کرد. شکل ۷ دستگاه Data logger را نشان می‌دهد.

۳-۳- تجهیزات اعمال دما

برای اینکه آزمایش باید در دماهای مختلف ولی ثابت انجام شود از یک محفظه‌ی بسته استفاده شده است.

logger متصل است، ثبت می‌شود. به محض اینکه دما به ۶۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد ترموکوپل قطع شده و آزمایش به اتمام می‌رسد (شکل ۱۰).

دریچه اتاقک تنظیم دما را بسته به طوری که هوای داخل اتاقک با هوای بیرون تبادل حرارتی نداشته باشد. نمونه که در مجاورت المنت قرار دارد به تدریج گرم شده و تغییرات کرنش آن در کامپیوتری که به دستگاه data



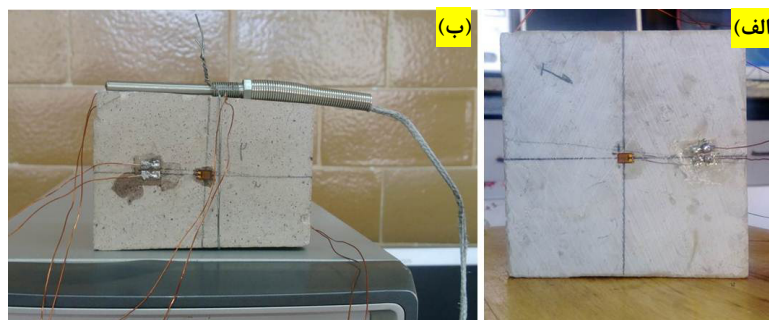
شکل ۶. تصویر شماتیک کرنش‌سنج (کوشی و همکاران، ۲۰۱۱)



شکل ۷. دستگاه data logger



شکل ۸. نمایی کلی از تجهیزات اعمال دما به همراه محفظه‌ی دما: (الف) ترموکوپل الکتریکی، (ب) المنت الکتریکی، (ج) محفظه‌ی دما، (د) کنداکتور به همراه دماسنج دیجیتال



شکل ۹. تصویری از نمونه سنگ، کرنش‌سنج و کنکتور نصب شده روی یکی از سطوح و سیم‌های وصل شده به آن‌ها، (ب) ترموکوپل متصل به نمونه به همراه کرنش‌سنج، کنکتور و سیم‌های متصل به آن‌ها

۴- نتایج آزمایش

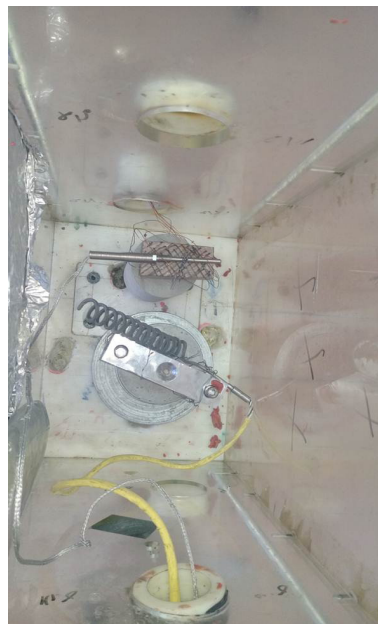
با داشتن کرنش در سه جهت ϵ_x و ϵ_y و ϵ_z کرنش حجمی قابل محاسبه است (رابطه ۵).

$$\epsilon_V = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \quad (5)$$

ضریب انبساط حرارتی حجمی (α) نیز از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$\alpha = \frac{\epsilon_V}{\Delta\theta} \quad (6)$$

که ϵ_x و ϵ_y و ϵ_z کرنش در راستای x و y و z هستند. همچنین با دانستن اینکه ضریب انبساط حرارتی حجمی مواد تقریباً ۳ برابر ضریب انبساط حرارتی خطی است. ضریب انبساط حرارتی خطی را نیز می‌توان محاسبه کرد. در جدول (۵) ضریب انبساط حرارتی حجمی و در جدول (۶) ضریب انبساط حرارتی خطی حاصل از آزمایش روی نمونه‌های سنگ ارائه شده است.



شکل ۱۰. نمایی از داخل اتاقک تنظیم دما به همراه نمونه سنگ، ترموکوپل و المنت الکتریکی

جدول ۵. مقادیر به دست آمده برای ضریب انبساط حرارتی حجمی نمونه‌ها ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

میانگین	۶۰	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}$)
						نمونه سنگ
آهک	۴۶/۹۵	۴۶/۸۳	۴۶/۸۷	۴۷/۴۵	۴۸/۱۴	۵۰/۴۹
توف	۱۹/۵۱	۲۰/۰۱	۱۹/۷۲	۱۹/۳۴	۱۹/۳۸	۱۹/۰۷
آندزیت	۲۱/۱۲	۲۲/۲۶	۲۱/۱۳	۲۱/۰۸	۲۰/۵۶	۲۰/۱۲
ماسه‌سنگ	۳۵/۵۳	۳۴/۲۴	۳۴/۸۱	۳۵/۴۳	۳۶/۵۸	۳۶/۵۷

جدول ۶. مقادیر به دست آمده برای ضریب انبساط حرارتی خطی نمونه‌ها ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

میانگین	۶۰	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}$)
						نمونه سنگ
آهک	۱۵/۹۸	۱۵/۶۱	۱۵/۶۲	۱۵/۸۲	۱۶/۰۵	۱۶/۸۳
توف	۶/۵۰	۶/۶۷	۶/۵۷	۶/۴۵	۶/۴۶	۶/۳۵
آندزیت	۷/۰۵	۷/۴۲	۷/۲۱	۷/۰۳	۶/۸۵	۶/۷۱
ماسه‌سنگ	۱۱/۸۴	۱۱/۴۱	۱۱/۶۰	۱۱/۸۱	۱۲/۱۹	۱۲/۱۹

۵- نتیجه‌گیری

دانستن خواص حرارتی سنگ کمک چشم‌گیری در مدل‌سازی عددی انواع پروژه‌های عمرانی، معدنی، نفتی، انرژی هسته‌ای و بسیاری از زمینه‌های دیگر می‌کند. یکی از این خواص ضریب انبساط حرارتی می‌باشد. پارامترهای حرارتی سنگ به صورت بنیادین به ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل، منشأ تشکیل و ساختار میکروسکوپی سنگ بستگی دارد. به همین دلیل است که ممکن است دو نمونه از یک نوع سنگ ویژگی‌های

در این جداول ضرایب انبساط حرارتی حجمی و خطی از دمای ۴۰ درجه تا ۶۰ درجه تعیین شده است و سپس میانگین این ضرایب در ستون آخر محاسبه شده است. مقایسه این نتایج با نتایج جدول ۱ که برای سنگ‌ها ارائه شده است نشان می‌دهد نتایج به دست آمده برای ضریب انبساط خطی ماسه‌سنگ، آهک، توف و آندزیت با نتایج ارائه شده در جدول قابل انطباق بوده که این مطلب نشان از کارایی دستگاهی است که برای تعیین ضریب انبساط حرارتی خطی سنگ ساخته شده است.

- Sun, Q., Lu, C., Cao, L., Li, W., Geng, J., & Zhang, W (2016) Thermal properties of sandstone after treatment at high temprature. *international journal of rock mechanics & mining sciences*, 85: 60-66.
- Takarli1, M., and Prince-Agbodjan1, W (2008) Temperature effects on physical properties and mechanical behavior of granite: experimental investigation of material damage. *Journal of ASTM International*, 5(3).
- Yavuz, H., Demirdag, S., Caran, S (2012) Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*, 47: 94-103.
- Zhao, Z (2016) Thermal influence on mechanical properties of granite: A microcracking perspective. *Rock Mech Rock Eng*, 49: 747-762.
- حرارتی متفاوتی داشته باشند، بنابراین برای رجوع به خواص حرارتی یک نوع سنگ، باید خاستگاه آن سنگ و میزان تخلخل و نوع مواد پرکننده تخلخل‌های سنگ مشخص باشد و آن‌ها را در نظر گرفت بنابراین تعیین این نوع ضرایب در آزمایشگاه ضروری است.
- در این پژوهش دستگاهی برای تعیین یکی از این خواص که ضریب انبساط حرارتی می‌باشد ساخته شده است. برای بررسی کارایی دستگاه این ضریب در سنگ‌های ماسه‌سنگ، آندزیت، توف سبز کرج و سنگ‌آهک تعیین شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی این نوع سنگ‌ها که در کتاب‌ها موجود است تطابق دارد.

منابع

- Amadei, B (2011) Thermal and hydraulic properties of rocks. Lecture notes 4.
- Brodsky, N. S., Riggins, M., & Connolly, J (1997) Thermal expansion, thermal conductivity, and heat capacity measurements at Yucca Mountain Nevada. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34 (3-4).
- Chekhonin, E., Parshin, A., Pissarenko, D., Popov, Y., Romushkevich, R., Safonov, S., Spasennykh, m (2012) When rocks get hot: thermal properties of reservoir rocks. *Oilfield Review*, 24 (3): 20-37.
- Dwivedi, R. D., Goela, R. K., Prasada, V. V. R., Sinhab, A (2008) Thermo-mechanical properties of Indian and other granites. *Int J Rock Mech Min Sci*, 45: 303-315.
- 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.
- Kim, K., Kemeny, J., Nickerson, M (2014) Effect of rapid thermal cooling on mechanical rock properties. *Rock Mech Rock Eng*, 47: 2005-2019.
- Kooshki, O. and Yaghoobi, M. P (2011) Measurement systems mentor, Mechanical Engineering department, Shahrood University of Technology.
- Kukkonen, I., & Lindberg, A (1998) Thermal properties of rocks at the investigation sites :measured and calculated thermal conductivity. specific heat and thermal diffusivity. Espoo: Geological Survey of Finland.
- Robertson, E. C (1988) Thermal properties of rocks. Virginia: UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR.

An Experimental Study for Determining the Coefficient of Thermal Expansion in Rock

M. Hosseini^{1*} and A. H. Babaei Jozani²

1, 2- Dept., of Mining Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin

*meh_hosseini18@yahoo.com

Received: 2018/5/13 Accepted: 2018/10/6

Abstract

Thermal property means the material's response to heat application. When energy (in the form of heat) is absorbed by a solid material, its temperature, and subsequently its dimensions, increase. The energy may be transferred to the cooler regions of the sample and even melt the sample. The mechanism of heat transfer in rocks is very complicated. Rocks are composed of mineral particles with various chemical compositions and various degrees of crystallization. Therefore, the thermal properties of rocks depend not only on the pressure and temperature, but also on the mineralogical composition, the structure and geometry of pores, the size of the particles and the shapes of cracks. The main thermal properties of rocks include heat capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity and thermal expansion, which they are needed for numerical modeling, considering the effects of temperature, including the modeling of oil wells, gas storage caverns, nuclear waste disposal site, and deep mines. In the present study a device for determining one of these properties, the coefficient of thermal expansion, is developed. To evaluate the efficiency of the device, the values of this coefficient in the sandstone, andesite, the green tuffs of the Karaj formation and limestone are determined. The results are consistent with the results of the experimental studies on rocks found in the literature.

Keywords: Heat, Coefficient of thermal expansion, Rock