

ارزیابی تغییرات چگالی و شاخص دوام سنگ شیست تحت تأثیر سیکل‌های انجماد-ذوب

سید زانیار سید موسوی^۱، حسین توکلی^۲، پرویز معارف‌وند^۳، محمد رضایی^{۴*}

۱. دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، s.zanyar.mousavi@gmail.com

۲. استادیار گروه مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، tavakoli@uk.ac.ir

۳. استادیار گروه مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، parvizz@aut.ac.ir

۴. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، m.rezaei@uok.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۹ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۵)

چکیده

هوازدگی سنگ در مناطق کوهستانی دوام و مقاومت آن را در طول زمان تحت تأثیر قرار می‌دهد. ارزیابی دوام و استحکام سنگ‌ها در اثر سیکل‌های انجماد-ذوب فاکتور اساسی برای تحلیل پایداری سنگ‌های بستر پروژه‌های مهندسی از قبیل تونل، معدن و نظایر آن است. در این مطالعه تأثیر سیکل‌های انجماد-ذوب بر روی شاخص دوام سیکل‌های دوم و پنجم، چگالی خشک و حجم سنگ شیست ارزیابی شده است. بدین منظور، ۱۳ گمانه در دیواره غربی معدن انگوران حفر و نمونه‌های مورد نیاز تهیه و آماده‌سازی شده است. در کل، ۷۵ سیکل انجماد-ذوب روی نمونه‌ها اعمال و در سیکل‌های ۰، ۷، ۱۵، ۴۰ و ۷۵، آزمایش‌های آزمایشگاهی از قبیل شاخص دوام سیکل‌های دوم و پنجم، چگالی خشک و اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها انجام شده است. بر این اساس، روابطی تجربی برای محاسبه شاخص دوام و چگالی خشک نمونه‌ها به ازای سیکل‌های انجماد-ذوب مختلف ارایه شده است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده کاهش نمایی شاخص دوام سیکل‌های دوم و پنجم و چگالی خشک است. همچنین، حجم نمونه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب، افزایش یافته است. همچنین، مشخصات کانی‌شناسی سنگ شیست هم با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان و آنالیز XRD مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان داد که کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده سنگ شیست شامل کوارتز، کلسیت، بیوتیت و کلریت است. در نهایت، برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده و بررسی دقیق بافت نمونه‌ها، سنگ شیست در حالت بکر و پس از اعمال ۷۵ سیکل انجماد-ذوب با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی مطالعه شد. نتایج نشان‌دهنده متراکم بودن بافت نمونه‌ها قبل از هوازدگی بوده که در آن فاصله بین سطوح شیستوزیته خیلی کم است. با این حال، پس از اعمال ۷۵ سیکل انجماد-ذوب، فاصله بین ناپیوستگی‌ها افزایش یافته و ترک‌های جدیدی در راستای عمود بر محور طولی نمونه‌ها ایجاد شده است.

کلمات کلیدی

معدن انگوران، شیست، فرآیند انجماد-ذوب، دوام، چگالی خشک.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

یکی از پارامترهای مهم برای ارزیابی و سنجش مقاومت سنگ در برابر هوازدهی، شاخص دوام آن است [۱۵]. دوام تعادل بین مقاومت ذاتی مصالح و پیشروی نیروهای تاثیرگذار در طول زمان سرویس‌دهی سنگ بستر است [۱۶]. شاخص دوام یک پارامتر مهم در ارزیابی و کنترل پایداری شیب‌ها و حفاری‌های زیرزمینی به شمار می‌آید [۱۷]. این پارامتر همچنین شاخصی بسیار مناسب برای نشان دادن حساسیت سنگ در مقابل هوازدهی مکانیکی است که روش تعیین آن توسط فرانکلین^۱ و چاندر^۲ [۱۸] در سال ۱۹۷۲ ارایه و در سال ۱۹۷۹ توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ^۳ به عنوان روشی صحیح برای انجام آزمایش شاخص دوام پیشنهاد شد [۱۹]. بنابراین، یکی از روش‌های موثر برای بررسی تاثیر هوازدهی بر روی استحکام و مقاومت سنگ، ارزیابی شاخص دوام آن قبل و بعد از هوازدهی است [۲۰]. اصولاً شاخص دوام پایین موجب جذب آب بیشتر و تشدید عملکرد عوامل هوازدهی می‌شود. بالعکس، هر چه شاخص دوام بیشتر باشد، میزان فرسایش، انحلال و خرد شدن سنگ در برابر هوازدهی کمتر خواهد بود. از مزایای قابل توجه آزمایش شاخص دوام، عدم نیاز به نمونه‌گیری (مشابه آنچه که در آزمایش‌های تراکمی تک محوره نیاز است) و هزینه بسیار پایین آزمایش در مقایسه با دیگر آزمایش‌ها است [۱۸]. ویژگی‌های فیزیکی سنگ از جمله چگالی، ترکیب کانی‌شناختی و بافت (اندازه، شکل و نحوه قرارگیری کانی‌ها در یک سنگ) به طور عمده با میزان دوام آن در ارتباط است [۲۱]. مطالعه ویژگی‌های یاد شده، اطلاعات مفیدی در زمینه ارتباط دوام با خواص فیزیکی و سنگ‌شناسی سنگ ارایه می‌کند. توپال^۴ و سونمز^۵ در سال ۲۰۰۰ تغییرات تخلخل، چگالی خشک و سرعت امواج فشاری سنگ توف را در اثر سیکل‌های انجماد-ذوب مورد بررسی قرار دادند [۲۲].

مطالعات مربوط به هوازدهی از یک سو به علت کندی عمل فرآیندها، به زمان زیادی نیاز دارد و از سوی دیگر در هر محل ممکن است بیش از یک فرآیند فعال باشد و اغلب نمی‌توان به درستی قضاوت کرد که اشکال به دست آمده نتیجه کدام فرآیند ویژه‌اند. بنابراین، در ربع قرن اخیر مطالعات مربوط به هوازدهی بر روی شبیه‌سازی

در مناطق کوهستانی روند ساخت پروژه‌های عمرانی و معدنی مانند سد، تونل، معادن روباز و نظایر آن در حال گسترش است. مقاومت سنگ بستر این پروژه‌ها زمانی که در معرض عوامل محیطی قرار می‌گیرند اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. فرآیند انجماد-ذوب عامل اصلی کاهش ویژگی‌های مقاومتی و دوام سنگ‌ها در مناطق یاد شده است. بنابراین، تعیین میزان تغییرات حاصل از این فرآیند قبل از طراحی این پروژه‌ها، ضروری به نظر می‌رسد. متوسط دمای سالانه و متوسط بارش سالانه دو متغیری است که در هوازدهی نقش عمده‌ای دارند و می‌توانند در شناسایی میزان هوازدهی مورد استفاده قرار گیرند [۱]. سنگ‌ها در مناطق سردسیر در هر سال حداقل یک دوره در معرض فرآیند انجماد-ذوب قرار می‌گیرند. این پدیده از جمله عوامل تاثیرگذار در تغییر شکل سنگ‌ها است که در آن با نفوذ آب در داخل شکاف سنگ‌ها، یخ زدن و ذوب مجدد آن باعث ترکیدن و گسترده شدن شکاف سنگ می‌شود. در اصل، فرآیند انجماد-ذوب (هوازدهی مکانیکی) در مناطق سردسیر و کوهستانی که شرایط هوازدهی مکانیکی بر هوازدهی شیمیایی ارجحیت دارد، رخ می‌دهد [۲، ۳]. در این فرآیند، تبدیل آب از حالت مایع به جامد با افزایش حجمی در حدود ۹ درصد همراه است. بنابراین، هنگامی که قطر داخلی حفره‌ها و شکل و ترتیب آن‌ها امکان هیچ‌گریزی را برای قطرات آب فراهم نیاورد، یخ بستن آب فشاری معادل ۱۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بر جداره حفره‌ها وارد می‌آورد [۴]. این افزایش حجم باعث ایجاد تنش کششی و در نهایت منجر به تخریب سنگ می‌شود. تکرار دوره‌های انجماد و ذوب باعث حرکت آب از طریق ترک‌های موجود و ریزترک‌های ایجاد شده می‌شود که در آن آسیب‌پذیری سنگ افزایش می‌یابد و جدا شدن قطعات و کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ رخ می‌دهد. میزان تخریب سنگ در این مناطق به تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب، نوع سنگ، میزان تنش وارد، درصد رطوبت، تراکم ناپیوستگی‌ها و دما بستگی دارد [۷-۵]. در یک دهه اخیر، محققان مطالعات مختلفی را در زمینه تاثیر سیکل‌های انجماد-ذوب بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها انجام داده‌اند [۱۳-۸]. این مطالعات عمدتاً در زمینه تعیین اثر پدیده انجماد-ذوب بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های ساختمانی از قبیل مقاومت، توزیع اندازه حفرات، نفوذپذیری و محتوای کانی‌شناسی تمرکز داشته‌اند [۱۴].

1- Franklin

2- Chandra

3- International Society for Rock Mechanics (ISRM)

4- Topal

5- Sözmen

تحقیق حاضر در نظر گرفته شده است. معدن انگوران در ۱۲۵ کیلومتری جنوب غربی زنجان و ۴۵۰ کیلومتری شمال غرب تهران قرار دارد. این معدن در ناحیه‌ای کوهستانی و در ارتفاع متوسط ۲۹۵۰ متری از سطح دریا واقع شده است. مختصات جغرافیایی معدن، طول ۴۷ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی و عرض ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی است. متوسط بارش سالانه معدن ۳۴۰ میلی‌متر گزارش شده است. معدن انگوران بزرگترین تولیدکننده روی در ایران است که به عنوان یک ذخیره بزرگ غیرسولفوری در مقیاس جهانی هم به شمار می‌رود. معدن در حال حاضر هم‌زمان به صورت روباز و زیرزمینی استخراج می‌شود. ماده معدنی مابین سنگ آهک به عنوان دیواره بالادست و سنگ شیست به عنوان دیواره پایین‌دست قرار دارد (شکل ۱) که در حال حاضر حدود ۶ میلیون تن از ذخیره آن باقی مانده است. محدوده معدن انگوران به دلیل قرار گرفتن در تراز ارتفاعی ۳۰۰۰ متر بالای سطح آب دریا، بیش از نیمی از سال پوشیده از برف است و دمای هوا به زیر صفر درجه سانتی‌گراد می‌رسد (شکل ۲). در حال حاضر قسمت عمده دیواره غربی معدن را سنگ شیست تشکیل می‌دهد (شکل ۳). سنگ شیست به دلیل ویژگی‌های کانی‌شناسی و وجود ناپیوستگی‌های متراکم (شیستوزیته، فولیاسیون و نظایر آن) در آن، تحت تاثیر عوامل جوی از قبیل آب، سرما، حرارت و نظایر آن، به سرعت هوازده شده و در نتیجه باعث ناپایداری دیواره یاد شده می‌شود. سالیانه هزینه‌های زیادی برای باطله‌برداری شیست‌های هوازده به معدن انگوران تحمیل می‌شود. بر همین اساس در این تحقیق تاثیر هوازده‌گی بر تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی سنگ شیست معدن انگوران بررسی شده است.

۲-۲- فرآیند انجماد-ذوب

برای اعمال سیکل‌های انجماد-ذوب در این تحقیق سعی شده است که مشابه شرایط جوی منطقه مورد مطالعه اقدام شود. در معدن انگوران، پله‌های معدن در بیشتر از نیمی از سال پوشیده از برف است و در نیمه دیگر سال هم این برف‌ها ذوب می‌شوند. همچنین، تغییرات دما در طول یکسال از ۲۰- درجه در زمستان تا ۲۰+ درجه در تابستان متغیر است. بنابراین، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب اشباع شده، سپس در فریز با دمای ۲۰- درجه به مدت ۱۲ ساعت قرار داده شده و در مرحله آخر به مدت ۱۲ ساعت در حمام آب گرم با دمای ۲۰+ درجه قرار گرفته‌اند. بر این اساس، هر

آزمایشگاهی متمرکز شده است تا به این ترتیب تاثیر فرآیندهای هوازده‌گی به طور مجزا تحت شرایط کنترل شده مطالعه و نتایج به دست آمده با شرایط طبیعی مقایسه شوند [۲۳، ۲۴]. مطالعات انجام شده قبلی عمدتاً بر روی سنگ‌های رسوبی و آذرین مانند تراورتن، ماسه سنگ و نظایر آن انجام گرفته است در حالی که سنگ بستر بسیاری از پروژه‌های بزرگ از جمله معدن روباز، تونل‌های راه، سد و نظایر آن، اغلب بر روی سنگ‌های دگرگونی قرار دارند. در سنگ‌های دگرگونی به دلیل تکتونیک ساختمانی منطقه، عواملی همچون درزه و شکاف و گسل می‌توانند به هوازده‌گی بیشتر سنگ کمک کنند. از طرفی، به دلیل مشکلات مغزه‌گیری و هزینه‌بر بودن آن‌ها، مطالعات گسترده و مناسبی در زمینه بررسی تاثیر هوازده‌گی بر روی خواص فیزیکی و مقاومتی این سنگ‌ها تاکنون انجام نشده است. از طرف دیگر، این سنگ‌ها در ترکیب کانی‌شناسی خود کانی‌های رسی دارند که در فرآیند انجماد-ذوب، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها را دستخوش تغییر قرار داده است و پایداری پروژه‌های عمرانی و معدنی احداث شده در این مناطق را به خطر می‌اندازد.

برای پوشش ضعف‌های یاد شده، در این پژوهش ابتدا اثر سیکل‌های مختلف انجماد-ذوب بر روی سنگ شیست دیواره معدن انگوران مورد آزمایش قرار گرفته است. سپس، تاثیر این سیکل‌ها بر چگالی و ترکیب کانی‌شناسی سنگ بررسی و ارتباط آن با تغییرات دوام ارزیابی شده است.

۲- روش کار

در این تحقیق تغییرات شاخص دوام سیکل دوم و پنجم، چگالی خشک و حجم نمونه‌های سنگ شیست در سیکل‌های انجماد-ذوب ۰، ۷، ۱۵، ۴۰ و ۷۵ ارزیابی شده است. آزمایش شاخص دوام بر اساس روش پیشنهادی ISRM (۱۹۸۱) [۱۹] در سیکل‌های دوم و پنجم اندازه‌گیری شده است. در هر سیکل هوازده‌گی، دو سری نمونه و مجموع ۲۰ سری مورد آزمایش قرار گرفته است. چگالی خشک نمونه‌ها هم طبق روش پیشنهادی ISRM (۱۹۸۱) [۱۹] اندازه‌گیری شده است به طوری که در هر سیکل هوازده‌گی، چگالی ۱۰ عدد نمونه و در مجموع ۵۰ عدد نمونه اندازه‌گیری شده است.

۲-۱- مطالعه موردی

با توجه به مشکلات پایداری شیب معدن سرب و روی انگوران در گذشته، این معدن به عنوان مطالعه موردی در

شماره ۱۱ ویژگی‌های سنگ‌شناسی متفاوتی دارد به طوری که نوع سنگ آن آمفیبولیت شیست است.

در این تحقیق، ویژگی‌های سنگ‌شناسی از جمله ترکیب کانی‌شناسی، ساخت و بافت نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان و آنالیز XRD (برای ۳ نمونه) بررسی شده است. نتایج مقطع نازک و آنالیز XRD به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. نتایج این آنالیز نشان می‌دهد که سنگ شیست مورد مطالعه عمدتاً از کانی‌های کوارتز، بیوتیت، کلسیت و کلریت تشکیل شده است. کانی‌های بیوتیت و کلریت عامل عمده کاهش مقاومت سنگ و افت پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن است که در مواقع تماس با آب، افزایش حجم داده و سست می‌شوند. کانی‌های کلسیت و کوارتز مقاومت بیشتری در مقابل عوامل هوازدگی دارند. بر اساس مطالعه مقاطع نازک و آنالیز XRD، درصد حجمی میانگین عناصر تشکیل‌دهنده سنگ شیست مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۵- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ شیست

برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی مهم سنگ شیست مورد مطالعه مطابق روش‌های پیشنهادی ISRM [۱۹] در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. برای هر پارامتر پنج نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است و میانگین آن‌ها محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- درصد حجمی کانی‌های موجود در نمونه شیستی.

کانی	کلسیت	کوارتز	بیوتیت	کلریت	اوپاک
درصد حجمی	۲۰	۲۰	۲۵	۲۵	۱۰

جدول ۲- پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ شیست مورد مطالعه.

پارامتر	مقدار
وزن مخصوص	۲٫۵۴ (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
مقاومت فشاری تک محوری	۴۵ (مگاپاسکال)
تخلخل	۲٫۴ (درصد)
سرعت موج فشاری	۳۸۰۰ (متر بر ثانیه)
مقاومت کششی (غیرمستقیم)	۱٫۵۵ (مگاپاسکال)

سیکل انجماد- ذوب ۲۴ ساعت طول کشیده است (شکل ۴). در این مطالعه، سیکل‌های انجماد- ذوب ۰، ۷، ۱۵، ۴۰ و ۷۵ برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. تصویر نمونه‌ها در حالت بکر و همچنین پس از اعمال ۷۵ سیکل انجماد- ذوب به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پس از طی ۷۵ سیکل انجماد- ذوب، ترک‌ها در جهت موازی شیستوزیته سنگ ایجاد شده و همچنین بازشدگی ناپیوستگی‌ها افزایش یافته است.

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

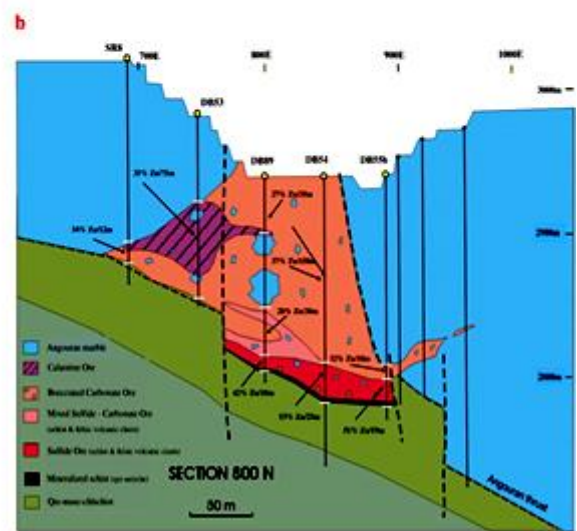
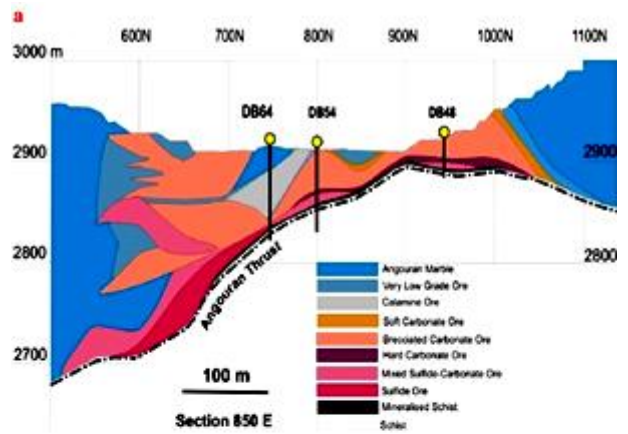
برای مغزه‌گیری و تهیه نمونه‌های مورد نیاز از سنگ شیست، تعدادی گمانه در محدوده معدن انگوران حفر شد (شکل ۷). با توجه به اینکه در این تحقیق اندازه‌گیری شاخص دوام سیکل‌های دوم و پنجم مد نظر بوده است، بنابراین در هر سیکل مشخص انجماد- ذوب (۰، ۷، ۱۵، ۲۵، ۴۰ و ۷۵) دو سری نمونه برای شاخص دوام سیکل دوم و دو سری نمونه برای شاخص دوام سیکل پنجم و در مجموع ۲۴ سری نمونه آزمایش شده است (شکل ۸). اندازه‌گیری چگالی خشک و حجم نمونه‌ها هم در سیکل‌های هوازدگی مشخص برای ۱۰ نمونه انجام گرفته است (شکل ۹). برای محاسبه حجم، قطر و ارتفاع نمونه‌ها با استفاده از کولیس دیجیتالی انجام شده است. در نهایت پس از تعیین جرم خشک نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتالی، چگالی خشک آن‌ها اندازه‌گیری شده است.

۲-۴- مطالعات سنگ‌شناسی

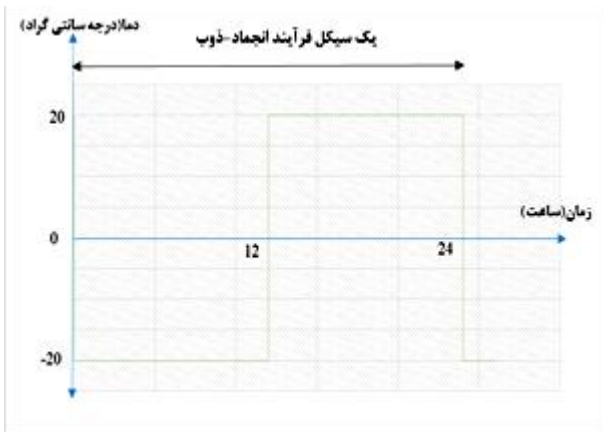
مطالعه سنگ‌شناسی نمونه‌ها نه تنها اطلاعاتی را در مورد ترکیب کانی‌شناسی و منشا سنگ ارائه می‌دهد، بلکه در ارزیابی میزان دوام سنگ‌ها در برابر عوامل هوازدگی شیمیایی و فیزیکی نیز ابزاری مهم به شمار می‌آید [۲۵]. میزات دوام سنگ در برابر عوامل هوازدگی مکانیکی، سایش و فرآیند انجماد- ذوب به مقدار زیادی به ترکیب کانی‌شناسی بستگی دارد. سنگ‌ها به دلیل داشتن کانی‌های تشکیل‌دهنده متفاوت، دوام متفاوتی در برابر این عوامل از خود نشان می‌دهند. با انجام دادن مطالعات سنگ‌شناسی، هم کانی‌ها و نوع سنگ مشخص می‌شود و هم پتانسیل دوام و زوال‌پذیری سنگ ارزیابی می‌شود [۲۵]. مطالعه ویژگی‌های سنگ‌شناسی بر روی هر ۱۳ گمانه حفاری شده در معدن انجام گرفته است که نتایج ۱۲ گمانه مشابه بوده و نوع سنگ آن کالک شیست است. بر این اساس، تنها گمانه



شکل ۳- وضعیت قراگیری لایه شیستی در دیواره غربی معدن.



شکل ۱- مقطع زمین‌شناسی ذخیره معدن انگوران. (a) مقطع شمالی-جنوبی (b) مقطع شرقی- غربی.



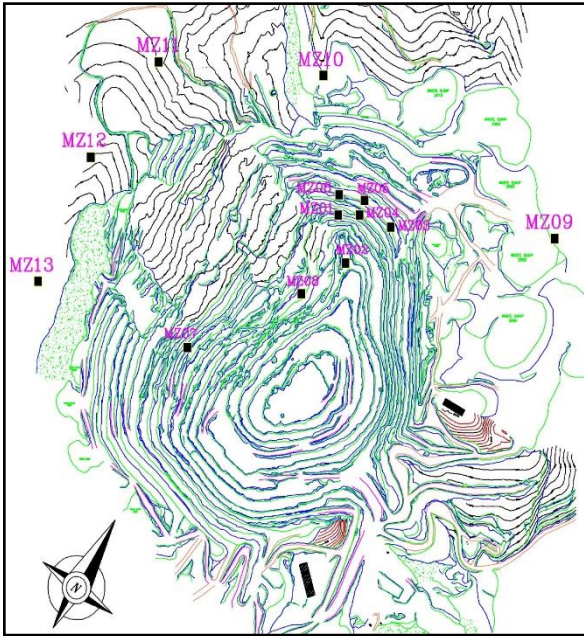
شکل ۴- شرایط اعمال یک سیکل فرآیند انجماد-ذوب.



شکل ۵- تصویر نمونه‌های بکر.



شکل ۲- پوشیده شدن پله‌های معدن از برف در فصل پاییز و زمستان.



شکل ۷- موقعیت گمانه‌های حفر شده در محدوده معدن انگوران.



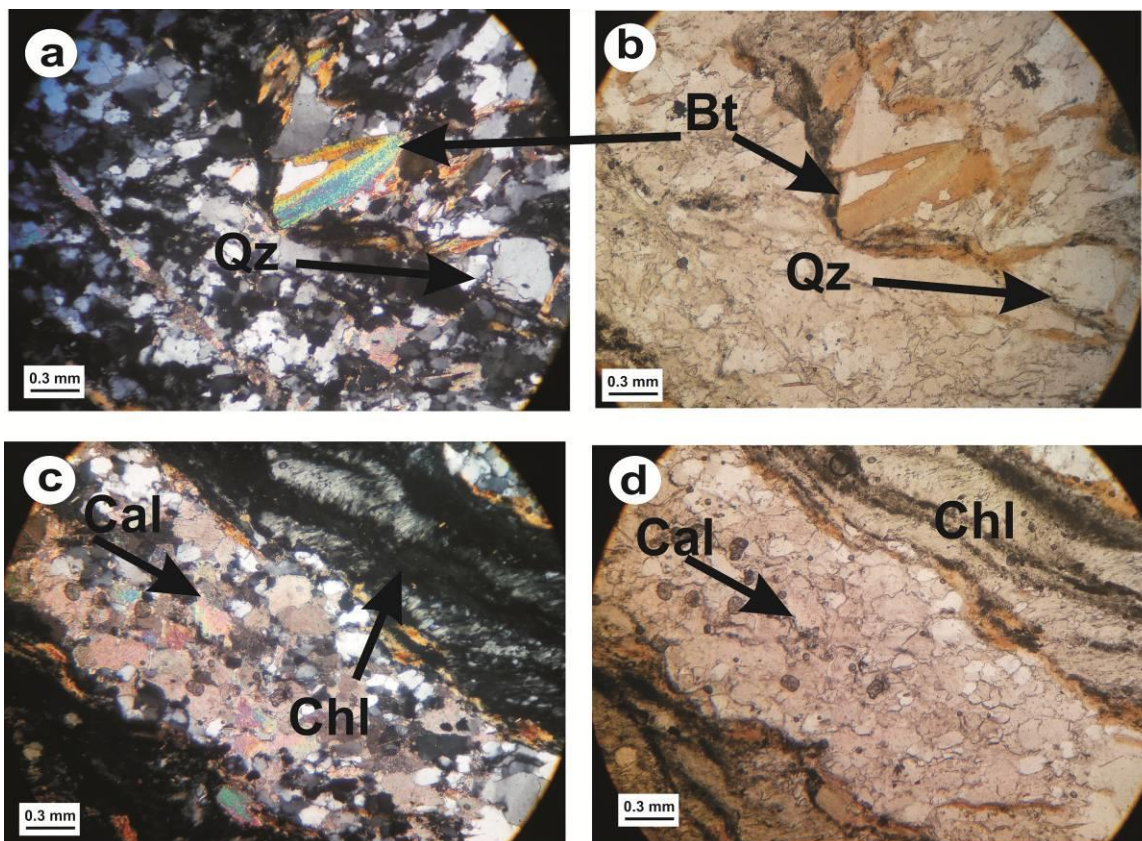
شکل ۶- تصویر نمونه‌ها پس از ۷۵ سیکل انجماد-ذوب.



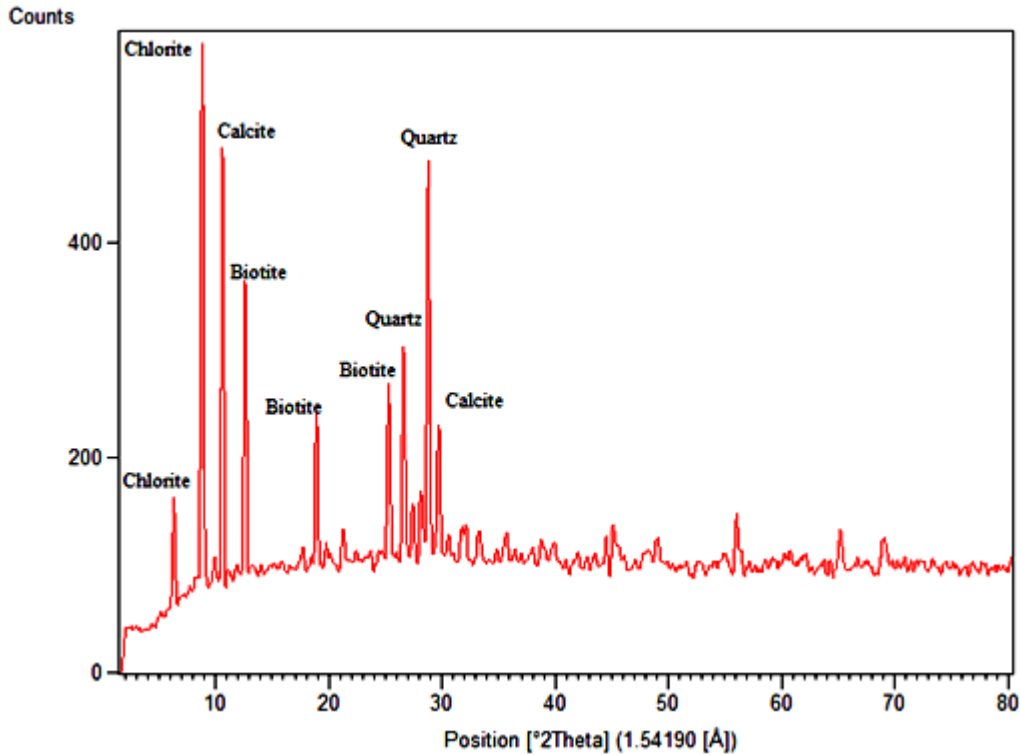
شکل ۸- مراحل مختلف انجام آزمایش دوام.



شکل ۹- اندازه‌گیری حجم و چگالی خشک نمونه‌ها.



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی از مقاطع نازک سنگ شیست: (a) و (b) کانی‌های کوارتز (Qz) و بیوتیت (Bt) که به ترتیب در نور ppl و xpl مشخص شده است، (c) و (d) کانی‌های کلسیت (Cal) و کلریت (Chl) که به ترتیب در نور ppl و xpl مشخص شده است.



شکل ۱۱- نتایج آنالیز XRD سنگ شیست مورد مطالعه.

۳- نتایج و بحث

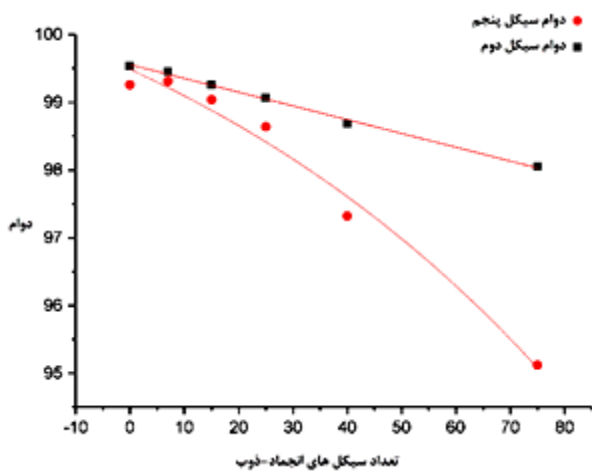
$$Id_2 = 433.13 - 333.57e^{6.09N} \quad (1)$$

$$Id_5 = 102.7 - 3.22e^{0.0115N} \quad (2)$$

۳-۱- تغییرات شاخص دوام

که در آن:
 Id_2 شاخص دوام سیکل دوم
 Id_5 شاخص دوام سیکل پنجم
 N تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب

آزمایش شاخص دوام سنگ مربوط به دو سیکل دوم و پنجم در سیکل‌های انجماد-ذوب ۰، ۷، ۱۵، ۲۵، ۴۰ و ۷۵ انجام شده است. هر تست شاخص دوام بر روی دو سری نمونه انجام شده و میانگین آن‌ها در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۱۲ تغییرات شاخص دوام در برابر افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات شاخص دوام در مقابل افزایش سیکل‌های انجماد-ذوب هم در سیکل دوم و هم در سیکل پنجم به صورت نمایی کاهش است. با این حال، شیب تغییرات در سیکل دوم کمتر از سیکل پنجم است. همچنین در هر سیکل دوام با افزایش درجه هوازدگی، شیب نمودار افزایش یافته است. دلیل این امر وجود کانی‌های مقاوم مانند کوارتز در ترکیب سنگ است که در سیکل‌های ابتدایی دوام و درجه‌های پایین هوازدگی، کمتر تحت تاثیر قرار می‌گیرند. تغییرات در شیب نمودارها ممکن است ناشی از وجود کانی کلسیت باشد که باعث افزایش ناهمگنی در سنگ شده و موجب شده است که رفتار و مقاومت آن در طول زمان متغیر باشد. با توجه به نمودار فوق، روابط ۱ و ۲ برای محاسبه شاخص دوام بر حسب تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب استخراج و ارزیابی می‌شود:



شکل ۱۲- تغییرات شاخص دوام سیکل‌های دوم و پنجم در مقابل افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب

۳-۲- تغییرات چگالی نمونه‌ها

چگالی خشک نمونه‌ها نیز در سیکل‌های انجماد-ذوب ۰، ۷، ۱۵، ۴۰ و ۷۵، بر اساس روش پیشنهادی ISRM (۱۹۸۱) اندازه‌گیری شده است به طوری که در هر یک از سیکل‌های انجماد-ذوب فوق، چگالی ۱۰ عدد نمونه غیرمنظم (در مجموع ۵۰ عدد نمونه) بر اساس روش غوطه‌وری و اشباع اندازه‌گیری و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای آماری نتایج آزمایش تعیین چگالی خشک بر روی نمونه‌های شیبست در سیکل‌های انجماد-ذوب مختلف.

N	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
۰	۲٫۵۲	۰٫۰۸۴۴۴	۲٫۴۵	۲٫۶۶
۷	۲٫۵۰	۰٫۰۷۷۹۱	۲٫۴۵	۲٫۶۱
۱۵	۲٫۴۳	۰٫۰۴۰۶۲	۲٫۴۰	۲٫۴۹
۴۰	۲٫۳۱	۰٫۱۱۱۳۶	۲٫۱۷	۲٫۴۵
۷۵	۲٫۱۲	۰٫۰۸۳۹۶	۲٫۰۳	۲٫۱۹

تغییرات میانگین چگالی خشک نمونه‌ها در مقابل افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سیکل‌های ابتدایی چگالی خشک نمونه‌ها کمتر تحت تاثیر عوامل هوازگی قرار گرفته است که این امر به دلیل مقاومت سنگ در برابر عوامل هوازگی در سیکل‌های ابتدایی انجماد-ذوب است. با افزایش درجه هوازگی، چگالی نمونه‌ها بیشتر کاهش یافته است.

دلیل این رفتار سنگ مورد مطالعه، مقاومت اولیه کانی کلسیت در مقابل عوامل هوازگی است. با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب کانی کلسیت و سایر کانی‌های موجود در بافت سنگ مقاومت خود را از دست می‌دهند و بیشتر تحت تاثیر پدیده هوازگی قرار می‌گیرند. بنابراین، همان‌طور که در شکل ۱۳ هم به وضوح قابل مشاهده است، تاثیر پدیده هوازگی بر روی نمونه مورد مطالعه به دلیل وجود کانی کلسیت در بافت آن، در سیکل‌های بالای انجماد-ذوب بیشتر است.

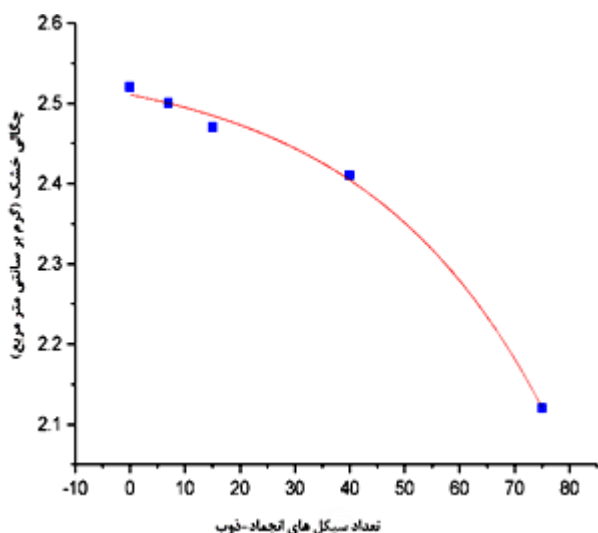
بر اساس شکل ۱۳، رابطه ۳ برای محاسبه چگالی خشک نمونه‌ها در سیکل‌های انجماد-ذوب مختلف استخراج ارائه شده است.

$$\gamma_d(N) = 2.56 - 0.0455e^{0.03012N} \quad (3)$$

که در آن:

γ_d چگالی خشک (گرم بر سانتی‌متر مربع)

N تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب



شکل ۱۳- تغییرات چگالی خشک نمونه‌ها در مقابل افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب.

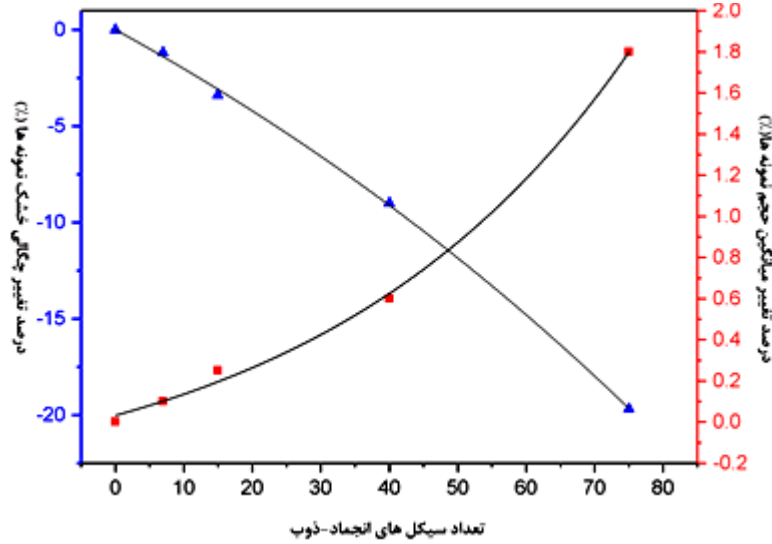
تغییرات حجم نمونه‌ها با استفاده از کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شده است به طوری که قطر هر نمونه در سه مقطع بالا، وسط و پایین ارتفاع اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها در محاسبات تاثیر داده شده است. برای اندازه‌گیری ارتفاع نمونه‌ها نیز از همین روش استفاده شده است. برای هر سیکل مشخص هوازگی (۰، ۷، ۱۵، ۴۰، ۷۵)، حجم پنج عدد نمونه محاسبه شده و میانگین آن‌ها در محاسبات مد نظر قرار گرفته است. در شکل ۱۴ تغییرات درصد حجم و چگالی خشک نمونه‌ها در مقابل تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب به صورت هم‌زمان نشان داده شده است. تغییرات هر دو پارامتر حجم و چگالی به صورت نمایی است. با این حال، تغییرات در سیکل‌های ابتدایی انجماد-ذوب کم است و با افزایش درجه هوازگی، افزایش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، دلیل این امر وجود کانی‌های مقاوم مانند کوارتز در ترکیب کانی‌شناسی سنگ مورد مطالعه است. همچنین، نرخ میانگین تغییرات چگالی بیشتر از حجم است، به طوری که بیشترین تغییرات برای چگالی حدود ۲۰ درصد و برای حجم حدود ۱/۸ درصد است.

۳-۳- مطالعه میکروسکوپی بافت نمونه‌ها

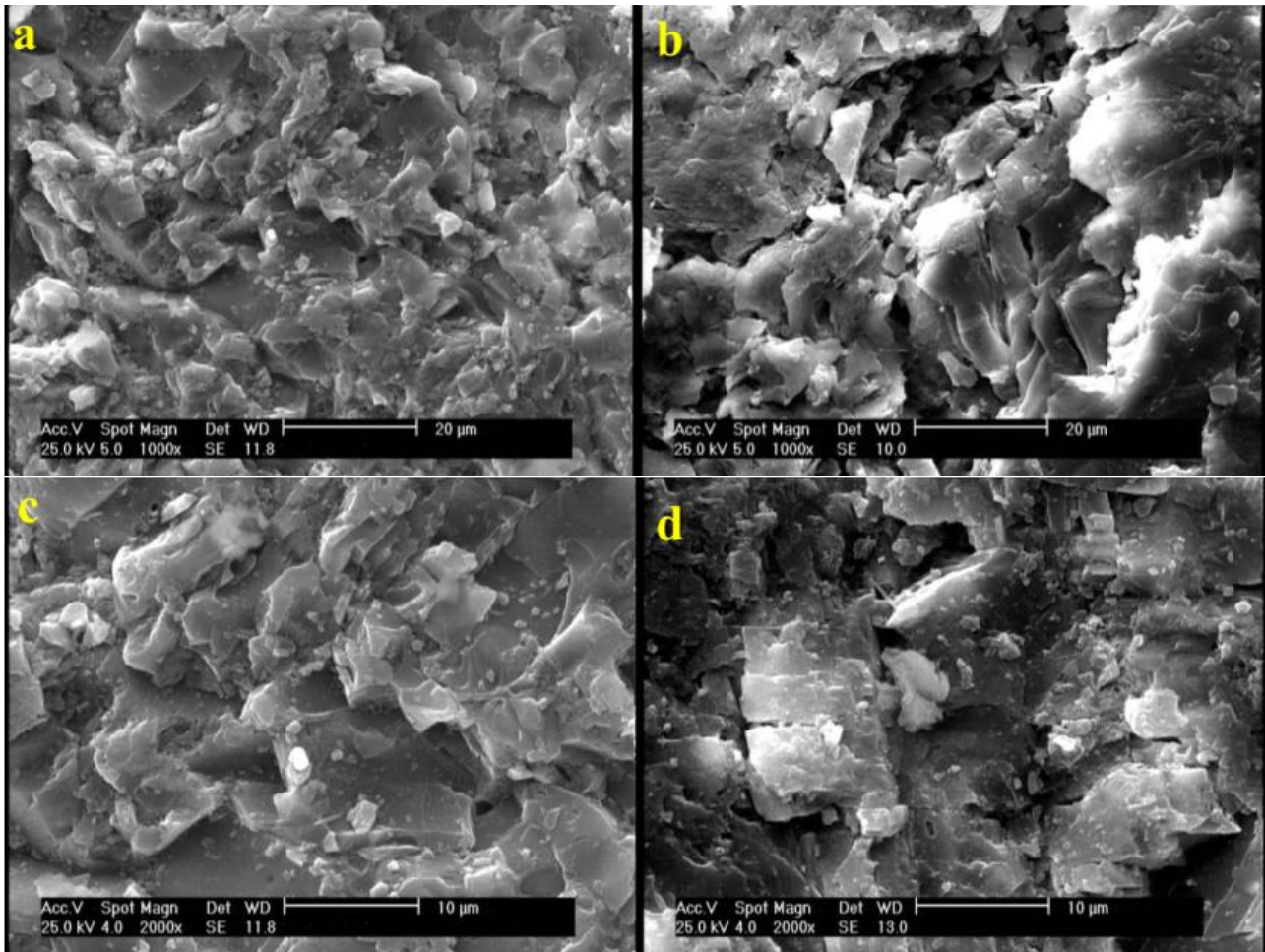
برای اعتبارسنجی نتایج آزمایش‌های انجام شده و همچنین بررسی دقیق‌تر تغییرات ساختاری نمونه‌ها در اثر اعمال سیکل‌های انجماد-ذوب و تاثیر هوازگی بر روی تراکم ذرات و تغییرات بافت آن‌ها، مطالعات میکروسکوپی نیز انجام گرفت. بدین منظور، نمونه‌های سالم و دست‌نخورده (بکر) و همچنین نمونه‌های هوازده (پس از اعمال ۷۵ سیکل انجماد-ذوب)، با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی مطالعه شد. نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها به صورت واضح مشاهده می‌شود،

می‌شود، بازشدگی مابین کانی‌های ورقه‌ای افزایش یافته است. همچنین، ترک‌هایی در راستای عمود بر سطح شیستوزیته نمونه‌ها ایجاد شده است. به طور کلی، میکروتِرک‌های موجود در سنگ در اثر هوازدگی گسترش یافته و ترک‌های جدید نیز ایجاد شده است.

تراکم ذرات و کانی‌ها در نمونه بکر بالا بوده و کانی‌های ورقه‌ای سنگ شیست (همانند میکا) به صورت فشرده بر روی هم قرار گرفته‌اند. پس از هوازدگی سیمان سنگ که عمدتاً به صورت کلسیتی است و در اثر تکرار سیکل‌های انجماد-ذوب با آب موجود حل شده و حذف



شکل ۱۴- آهنگ تغییرات میانگین چگالی خشک و حجم نمونه‌ها در مقابل افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب.



شکل ۱۵- مطالعه بافت نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر فرآیند انجماد-ذوب بر روی پارامترهای شاخص دوام سیکل‌های دوم و پنجم، چگالی خشک و حجم سنگ بررسی شده که در آن، آزمایش‌های یاد شده در سیکل‌های هوازدگی مختلف شامل ۰، ۷، ۱۵، ۴۰ و ۷۵ انجام و مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب، شاخص دوام سیکل دوم، شاخص دوام سیکل پنجم و چگالی خشک نمونه‌ها به صورت نمایی کاهش می‌یابد. همچنین، شیب تغییرات شاخص دوام سیکل پنجم بیشتر از شاخص دوام سیکل دوم است که این امر نشان‌دهنده مقاومت اولیه کانی‌های مقاوم موجود در بدنه سنگ شیست (مانند کوارتز) در سیکل‌های اولیه شاخص دوام است. با افزایش سیکل‌ها، کانی‌های ورقه‌ای سنگ نیز تحت تأثیر قرار گرفته و مقاومت سنگ کاهش می‌یابد. علاوه بر این در سیکل‌های اولیه، چگالی خشک کمتر تحت تأثیر هوازدگی می‌گیرد اما با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب، مقدار کاهش این پارامتر بیشتر خواهد شد. حجم نمونه‌های مورد مطالعه نیز پس از ۷۵ سیکل انجماد-ذوب، حدود ۲ درصد افزایش داشته است که در اثر ایجاد ترک‌های جدید و بازشدگی ترک‌های قبلی است. همچنین، روابط تجربی برای محاسبه مقدار دوام سیکل دوم، دوام سیکل پنجم و چگالی خشک نمونه‌ها به ازای تعداد سیکل‌های مختلف انجماد-ذوب ارائه شد. در نهایت، از یک میکروسکوپ الکترونیکی برای بررسی بافت نمونه‌ها قبل و بعد از هوازدگی استفاده شد. نتایج حاصل از مطالعه میکروسکوپی نشان‌دهنده تراکم زیاد کانی‌ها در نمونه‌های بکر است. با این حال، پس از ۷۵ سیکل هوازدگی، بازشدگی مابین کانی‌های ورقه‌ای زیاد شده و همچنین ترک‌های جدید در راستای محور عرضی نمونه‌ها تشکیل می‌شود. در نهایت، نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش حفره‌ها و همچنین بازشدگی بین کانی‌ها در اثر حل شدن سیمان سنگ در آب که از نوع کلسیتی است، به وجود آمده است.

منابع

1. Reiche, I.; 1950; "A Survey of Weathering Processes and Products", Revised Edition University of New Mexico Publishers. Geol., no. 3. 95 p. 1950.
2. Fowler, Rell; Petersen, James.; 2003; "A Spatial representation of Louis peltier's weathering, erosion and climatic graphs using geographic information systems (GIS)", geo
3. Dash, j. g. and rempel, j. s. wettlaufer, rev.; 2006; "Med". phys.78, 695.
4. Bell FG.; 2000; "Engineering properties of soils and rocks", 4th end. Blackwell Science, Oxford.
5. Selby, M.J.; 1993; "Hillslope Material and Processes", Oxford. 21(5):491-492.
6. Chen, T. C., Yeung, M. R., & Mori, N.; 2004; "Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action", Cold Regions Science and Technology, 38(2-3), 127-136.
7. Tan, X., Chen, W., Yang, J., & Cao, J.; 2011: "Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles", Cold Regions Science and Technology, 68(3), 130-138.
8. Binal, A., Kasapoglu, K. E., Sensogut, C., & Ozkan, I.; 2002; "Effects of freezing and thawing process on physical and mechanical properties of Selime ignimbrite outcrops in Aksaray-Ihlara valley", In VI Regional Rock Mechanics Symposium. Turkish National Society for Rock Mechanics, Seljuk University, Konya (Vol. 189, p. 196).
9. Penttala, V., Al-Neshawy, F.; 2002; "Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles", Cement and Concrete Research 32, 1407-1420.
10. Altindag, R., Alyildiz, I. S., & Onargan, T.; 2004; "Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze-thaw cycles", International journal of rock mechanics and mining sciences, 6(41), 1023-1028.
11. Ruedrich, J., Siegesmund, S.; 2007; "Salt and ice crystallization in porous sandstones", Environmental Geology 52, 225-249.
12. Karaca, Z., Deliormanli, A.H., Elci, H., Pamukcu, C.; 2010; "Effect of freeze-thaw process on the abrasion loss value of stones", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 47, 1207-1211.
13. Wang, P., Xu, J., Fang, X., Wang, P., Zheng, G., & Wen, M.; 2017; "Ultrasonic time-frequency method to evaluate the deterioration properties of rock suffered from freeze-thaw weathering", Cold Regions Science and Technology, 143, 13-22.
14. Ghobadi, M. H., & Babazadeh, R.; 2015;

- Breathitt shale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties*”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36, 139-153.
21. Gupta, V., and Ahmed, I.; 2007; “*Effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India*”, Engineering Geology, 95: 79-87.
 22. Topal, T., Sözmen, B.; 2000; “*Freeze-Thaw Resistance of the Yazilikaya Tuffs*”, 9th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, pp. 275–281.
 23. Fookes PG, Gourley CS, Ohikere C.; 1988; “*Rock weathering in engineering time*”, Quaterly Journal of Engineering Geology 21, 33–57.
 24. Rabinson, D.A.; 2000; “*Weathering processes, products and environments*”, Earth Sur. Pro. And land forms. Vol.25.
 25. Dreesen R., Dusar M.; 2004; “*Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): role of petrography in provenance and durability assessment*”, Materials Characterization, Vol.53: 273-287.
 - “*Experimental studies on the effects of cyclic freezing–thawing, salt crystallization, and thermal shock on the physical and mechanical characteristics of selected sandstones*”, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(3), 1001-1016.
 15. Bell F.G.; 1993; “*Engineering geology*”, Blackwell Scientific Publications, London.
 16. Latham, J.P., Lienhart, D. and Dupray, S.; 2006; “*Rock quality, durability and service life prediction of armourstone*”, Engineering geology, 87: 122- 140.
 17. Dhakal G., Yoneda T., Kato M., Kaneko K.; 2002; “*Slakedurability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks*”, Engineering Geology 65: 31-45.
 18. Franklin, J.A. and Chandra, R.; 1972; “*The slake-Durability test*”, International Journal of Mechanics and Mining Science, 9: 325-341.
 19. I.S.R.M.; 1981; “*Rock characterization, Testing and monitoring*” In: Brown ET, editor. ISRM suggested methods. Oxford: Pergamon Press, 211.
 20. Koncagül, E., and Santi, P.; 1999; “*Predicting the 12nconfined compressive strength of the*