

بررسی تاثیر انجماد - ذوب بر ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی بر اساس اندازه‌گیری سرعت سیر موج و تخلخل

یاسین عبدی^{۱*} و غلامرضا خانلری^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی‌سینا

نویسنده مسئول: abdi.ya@lu.ac.ir *

دریافت: ۹۶/۱/۱۹ پذیرش: ۹۶/۹/۲۵

چکیده

هدف از این تحقیق تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد - ذوب می‌باشد. به‌همین منظور تعداد ۶ بلوک بزرگ از نقاط مختلف سازند قرمز بالایی در غرب قم برداشته شده است. در این پژوهش آزمایش انجماد و ذوب در ۳۰ چرخه انجام شده است. در پایان هر ۱۰ چرخه، تغییرات سرعت موج طولی، تخلخل، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها مطابق با استاندارد ISRM اندازه‌گیری شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد و ذوب، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و سرعت سیر موج طولی نمونه‌های ماسه‌سنگ کاهش می‌یابد، در حالی که تخلخل مؤثر روندی افزایشی را نشان می‌دهد. بر این اساس مشاهده شده است که مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها بین ۴۱ تا ۸۵ درصد کاهش داشته است، در حالی که میزان کاهش مدول الاستیسیته بین ۴۷ تا ۷۰ درصد می‌باشد. در نهایت یک‌سری روابط تجربی به منظور تخمین ویژگی‌های مقاومتی ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از سرعت سیر موج و تخلخل مؤثر در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد - ذوب ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: ماسه‌سنگ، انجماد - ذوب، سازند قرمز بالایی، مقاومت فشاری تک‌محوری، سرعت موج طولی

مقدمه

ذوب بر روی دوام‌پذیری و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها توسط بسیاری از محققین انجام شده است. چن و همکاران (۲۰۰۴) بیان کرده‌اند که تخریب توفها توسط عمل انجماد و ذوب به پارامترهای تخلخل، توزیع اندازه حفرات، درجه اشباع، نوع کانی‌ها، منشاء سنگ و دامنه تغییرات دمای محیط بستگی دارد. نتایج مطالعات هاله و شکور (۲۰۰۳) نشان می‌دهد که تأثیر چرخه‌های انجماد و ذوب بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری ماسه-سنگ‌های با تخلخل بین ۲ تا ۷ درصد، قابل‌ملاحظه است. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که توزیع اندازه حفرات یکی از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار بر روی میزان تخریب ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها در مقابل فرآیند انجماد و ذوب است. یاووز و همکاران (۲۰۰۶) ویژگی‌های مهندسی نمونه‌هایی از سنگ‌های کربناته، شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، سرعت موج P و سختی چکش اشمیت در چرخه‌های ذوب و انجماد را بررسی کرده‌اند. نتایج کار این محققین، نشان داده است که مقادیر این

هوازدگی و تخریب سنگ ناشی از چرخه‌های انجماد - ذوب در مناطق سرد، برای بسیاری از پروژه‌های مهندسی از قبیل راه‌سازی، راه‌آهن، خطوط انتقال و ساختمان‌سازی به‌عنوان یک نگرانی و دغدغه مهم محسوب می‌گردد (گروسو و همکاران ۲۰۰۷، ژانگ و همکاران ۲۰۰۴). انجماد - ذوب به‌عنوان یکی از عوامل هوازدگی فیزیکی، می‌تواند باعث تغییراتی سریع در ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها و کاهش دوام‌پذیری آن‌ها گردد. بنابراین قبل از انتخاب سنگ به‌عنوان مصالح ساختمانی، پایداری سنگ در برابر تجزیه و تخریب ناشی از عوامل جوی باید بررسی گردد (زاپیا و همکاران ۱۹۹۸). بخاطر گستردگی زیاد ماسه‌سنگ‌ها و هم‌چنین کاربرد فراوان آن‌ها هم به‌عنوان مصالح ساختمانی و هم در اجرای پروژه‌های مهندسی، بررسی تأثیر چرخه‌های انجماد و ذوب بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها امری مهم به نظر می‌رسد. تأثیر چرخه‌های انجماد-

ویژگی‌ها در چرخه‌های ذوب و انجماد با درجات مختلفی که به مقادیر اولیه هر یک از این ویژگی‌ها بستگی دارد، کاهش پیدا کرده‌اند. مؤمنی (۱۳۹۲) با انجام ۳۰۰ چرخه آزمون ذوب و انجماد بر روی گرانیت‌های الوند همدان نشان داد که عملکرد این فرآیند هوازدگی باعث افزایش تخلخل و جذب آب و کاهش سرعت سیر موج فشاری، چگالی، مقاومت‌های فشاری و کششی سنگ‌های مورد مطالعه شده است. بنابراین، از مهم‌ترین عوامل محیطی که باعث تغییر در ویژگی‌های مهندسی، مقاومت و طول دوام سنگ‌ها می‌شود، چرخه‌های ذوب و انجماد است. بایرام (۲۰۱۲) یک مدل آماری به منظور پیش‌بینی میزان افت مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌های آهکی ترکیه ارائه نمود. بینال و کاساپوگلو (۲۰۰۴) تأثیر چرخه‌های ذوب و انجماد بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری اینگیمبریت‌های سلیم را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین توپال و سوزمن (۲۰۰۰) تأثیر عمل انجماد و ذوب را بر روی دانسیته خشک، تخلخل، مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت سیر موج توف‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. تان و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر فرآیند انجماد و ذوب بر روی سنگ‌ها را با استفاده از یک سری آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و سه‌محوری ارزیابی نمودند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش تعداد چرخه‌ها، مقاومت فشاری کاهش یافته و کرنش متناظر با تنش بیشینه، افزایش می‌یابد. بر اساس مشاهدات آن‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته سنگ‌های مورد نظر در پایان ۱۵۰ چرخه انجماد و ذوب، به ترتیب ۵۹ و ۶۱ درصد کاهش را نشان می‌دهد. همچنین لو و همکاران (۲۰۱۳) با انجام ۳۰ چرخه انجماد و ذوب در دماهای مختلف بر روی دیابازهای سالم و هوازده، مشاهده کردند که مقاومت فشاری تک‌محوری، تخلخل و سرعت سیر موج این دسته از سنگ‌ها با تعداد و دمای چرخه‌های انجماد و ذوب ارتباط دارند. مؤمنی و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثر چرخه‌های انجماد و ذوب بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های سخت گرانیتوئیدی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد و ذوب، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی و سرعت موج طولی افزایش می‌یابند. در حالی که تخلخل و درصد جذب آب نمونه‌ها روندی افزایشی را نشان می‌دهد. خانلری و عبدی‌لر

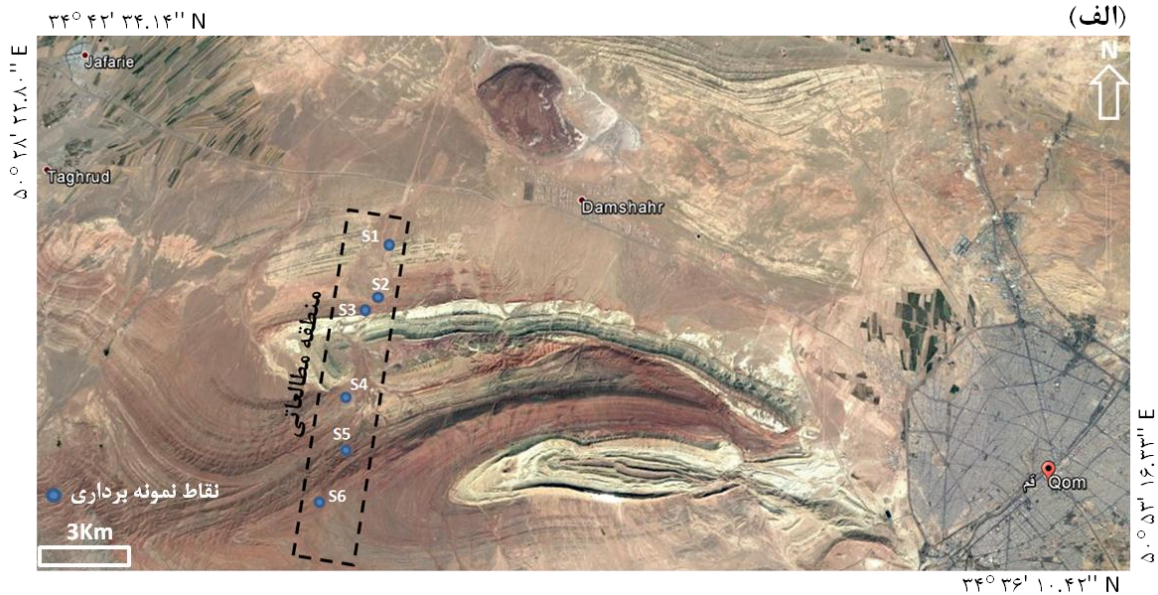
(۲۰۱۵) به بررسی اثر چرخه‌های تر و خشک، سرد و گرم و انجماد و ذوب بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تأثیر چرخه‌های انجماد و ذوب به‌مراتب بیش‌تر از چرخه‌های تر و خشک و سرد و گرم است. همچنین خانلری و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها مشاهده نمودند که با افزایش تعداد چرخه‌ها مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت موج طولی کاهش پیدا می‌کنند، اما درصد تخلخل نمونه‌ها دچار افزایش می‌شود. با توجه به مطالب عنوان شده، ملاحظه می‌شود که محققین زیادی به بررسی اثر چرخه‌های انجماد - ذوب بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی انواع مختلف سنگ‌ها پرداخته‌اند. اما تاکنون روابطی به‌منظور پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد-ذوب با استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب از قبیل سرعت موج طولی و تخلخل ارائه نشده است. با توجه به این موضوع که آزمایش انجماد-ذوب وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشد، ارائه روابطی به‌منظور تخمین ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی، می‌تواند در صرف زمان و هزینه مفید واقع گردد. بر این اساس، در این مطالعه سعی شده است که علاوه بر بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها در آزمایش انجماد-ذوب، روابطی نیز به‌منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته با استفاده از سرعت سیر موج و تخلخل مؤثر ارائه شود.

مواد و روش‌ها

به منظور انجام آزمایش انجماد و ذوب بر روی ماسه‌سنگ‌های مورد نظر، تعداد ۶ بلوک بزرگ در ابعاد $40 \times 40 \times 20$ سانتی‌متر از بخش‌های مختلف سازند قرمز بالایی در غرب قم انتخاب و به آزمایشگاه انتقال داده شده‌اند. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱ و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. این ماسه‌سنگ‌ها بطور گسترده‌ای به‌عنوان مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سن سازند قرمز بالایی در منطقه مورد مطالعه متعلق به میوسن میانی تا بالایی

یک میکروسکوپ نوری مطالعه شده است. علاوه بر این برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پایه نمونه‌ها شامل دانسیته خشک، تخلخل، سرعت سیر موج طولی، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نیز اندازه‌گیری شده است.

می‌باشد (درویش‌زاده ۱۳۷۲). در آزمایشگاه از بلوک‌های تهیه شده با استفاده از یک دستگاه مغزه‌گیر دورانی اقدام به مغزه‌گیری و تهیه نمونه‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر بین ۲/۵۰ تا ۳/۰۰ شده است. خصوصیات پتروگرافی نمونه‌ها با استفاده از



شکل ۱. (الف) موقعیت نقاط نمونه‌برداری، (ب) تصاویری از ایستگاه‌های نمونه‌برداری

جدول ۱. مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری

مختصات جغرافیایی		شماره ایستگاه
عرض	طول	
۵۰° ۳۸' ۳۱.۲۵" E	۳۴° ۴۲' ۳۴.۱۴" N	ایستگاه اول (S1)
۵۰° ۳۸' ۱۰.۴۵" E	۳۴° ۴۱' ۳۴.۹۹" N	ایستگاه دوم (S2)
۵۰° ۳۸' ۱۰.۴۵" E	۳۴° ۴۱' ۲۵.۲۵" N	ایستگاه سوم (S3)
۵۰° ۳۷' ۳۵.۲۷" E	۳۴° ۳۹' ۵۶.۳۳" N	ایستگاه چهارم (S4)
۵۰° ۳۷' ۱۹.۸۴" E	۳۴° ۳۸' ۲۷.۲۹" N	ایستگاه پنجم (S5)
۵۰° ۳۷' ۰۶.۷۴" E	۳۴° ۳۶' ۲۸.۰۴" N	ایستگاه ششم (S6)

برای ماسه‌سنگ شماره ۱ و ۴ با ۱۲۸/۸۰ و ۱۹/۹۴ مگاپاسکال مشاهده شده است. هم‌چنین بیش‌ترین و کم‌ترین مدول الاستیسیته (E) برای ماسه‌سنگ شماره ۱ و ۴ به ترتیب با ۱۶/۰۵ و ۲/۹۳ گیگاپاسکال حاصل شده است.

آزمایش انجماد و ذوب

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، در این پژوهش آزمایش انجماد و ذوب در ۳۰ چرخه انجام شده است. هم‌چنین در پایان هر ۱۰ چرخه، تغییرات سرعت موج طولی، تخلخل مؤثر، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها مطابق با استاندارد (ISRM) (۱۹۸۱) اندازه‌گیری شده است.

تغییرات تخلخل مؤثر و سرعت موج طولی نمونه‌ها

در پایان هر ۱۰ چرخه آزمایش انجماد و ذوب و قبل از انجام آزمایش فشاری تک‌محوری، تغییرات تخلخل مؤثر و سرعت موج طولی نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. نتایج مربوط به تغییرات تخلخل مؤثر نمونه‌ها در شکل ۲ - الف نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد-ذوب، تخلخل مؤثر نمونه‌ها روندی افزایشی را نشان می‌دهد. بر این اساس حداکثر و حداقل افزایش میزان تخلخل با ۶۵ و ۳۱ درصد به ترتیب مربوط به نمونه ماسه‌سنگ ۵ و ۳ می‌باشد. علاوه بر این در شکل ۲-ب ارتباط بین تخلخل مؤثر نرمال شده (نسبت تخلخل مؤثر در هر چرخه از آزمایش انجماد-ذوب به تخلخل مؤثر نمونه‌ها قبل از آزمایش یا چرخه صفر) و تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد-ذوب نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد - ذوب، تخلخل مؤثر نرمال شده نیز به‌صورت یک تابع نمایی و با ضریب رگرسیون ۰/۷۴ افزایش پیدا می‌کند (رابطه ۱).

$$n_x = n_0(0.992e^{0.014N}) \quad (R^2 = 0.744) \quad (1)$$

در این رابطه n_x ، تخلخل مؤثر در هر چرخه از آزمایش انجماد - ذوب، n_0 ، تخلخل مؤثر قبل از آزمایش انجماد - ذوب و N تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد - ذوب می‌باشد.

در این پژوهش آزمایش انجماد و ذوب در ۳۰ چرخه انجام شده است. هم‌چنین در پایان هر ۱۰ چرخه، تغییرات سرعت موج طولی، تخلخل، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها مطابق با استانداردهای^۱ ISRM (۱۹۸۱) اندازه‌گیری شده است. به‌منظور انجام این آزمایش ابتدا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب کاملاً اشباع شده‌اند. بعد از اشباع شدن نمونه‌ها، آن‌ها را در داخل یخچال با دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ ساعت قرار داده تا کاملاً منجمد شوند. پس از پایان این مدت، نمونه‌ها را از یخچال خارج کرده و در داخل وان آب گرم به مدت ۹ ساعت قرار داده تا یخ نمونه‌ها کاملاً آب شود. بنابراین مدت زمان یخ زدن (۱۵ ساعت) و زمان ذوب شدن (۹ ساعت) یک سیکل ۲۴ ساعته را تشکیل می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری

مطالعات پتروگرافی

برای انجام آنالیز پتروگرافی از هر بلوک دو مقطع نازک عمود بر هم تهیه شده است. به‌منظور تعیین خصوصیات پتروگرافی از یک میکروسکوپ پلاریزان نوری استفاده شده است. نتایج آنالیز پتروگرافی در جدول ۲ ارائه شده است. ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه بر اساس روش پیشنهاد شده توسط فولک (۱۹۷۴) طبقه‌بندی شده‌اند.

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها (دانسیته خشک، تخلخل مؤثر، سرعت سیر موج طولی، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته) مطابق با استاندارد ISRM (۱۹۸۱) تعیین شده است. برای هر نوع ماسه‌سنگ حداقل ۵ نمونه آماده شده و بر روی آن‌ها آزمایش‌های مورد نظر انجام شده است. نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی در جدول ۳ ارائه شده است. براساس نتایج حاصل شده، دانسیته خشک (γ_d) نمونه‌ها بین ۲/۱۱ تا ۲/۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، تخلخل مؤثر (n) بین ۵/۰۷ تا ۱۵/۰۹ درصد و سرعت موج طولی (V_p) نمونه‌ها بین ۱۲۹۰ تا ۲۹۸۰ متر بر ثانیه متغیر است. نتایج آزمایش‌های مکانیکی هم نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل مقاومت فشاری تک‌محوری (σ_{UCS}) به ترتیب

¹ International Society of Rock Mechanics

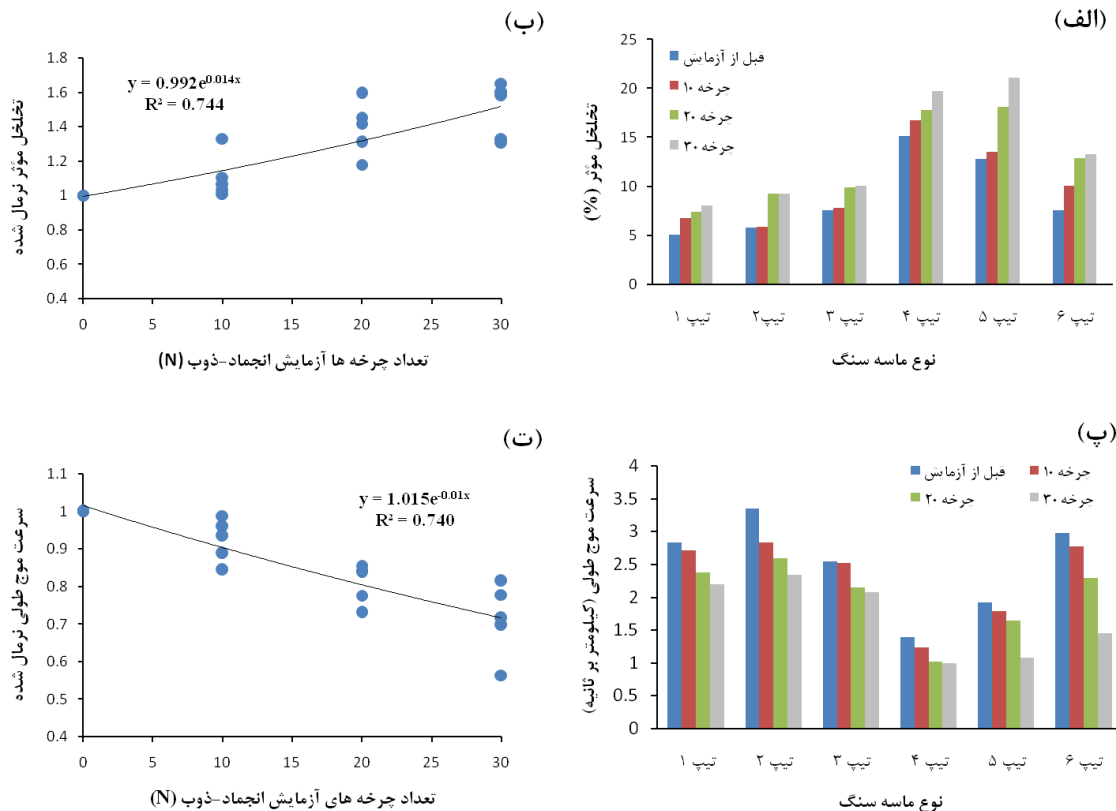
² Uniaxial Compressive Strength

جدول ۲. نتایج مطالعات پتروگرافی

نام سنگ	اندازه متوسط ذرات (mm)	سیمان کلسیتی (%)	ترکیب کانی‌شناسی			نمونه ماسه‌سنگ
			خرد سنگ (%)	فلدسپات (%)	کوارتز (%)	
فلدسپاتیک لیت‌آرنایت	۰/۰۸	۱۰	۵۰	۳۱	۹	۱
کالک لیت‌آرنایت	۰/۱۷	۱۲	۶۶	۱۱	۱۱	۲
ولکانیک آرنایت	۰/۴۱	۱۰	۶۹	۱۲	۹	۳
کالک لیت‌آرنایت	۰/۲۱	۵	۷۶	۱۱	۸	۴
ولکانیک آرنایت	۰/۲۵	۳۵	۴۳	۹	۱۳	۵
ولکانیک آرنایت	۰/۵۲	۲۳	۶۱	۸	۸	۶

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی برای ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه

تعداد نمونه‌ها	E (GPa)	UCS (MPa)	V _p (m/sec)	n (%)	γ _d (gr/cm ³)	نمونه
۶	۱۶/۰۵	۱۲۸/۸۰	۲۹۸۰	۵/۰۷	۲/۵۱	۱
۵	۱۵/۶۹	۹۴/۶۹	۲۹۰۰	۵/۷۸	۲/۴۸	۲
۶	۱۰/۵۰	۴۶/۳۱	۲۹۰۰	۷/۵۳	۲/۴۵	۳
۶	۲/۹۳	۱۹/۹۴	۱۲۹۰	۱۵/۰۹	۲/۱۱	۴
۵	۵/۵۴	۶۹/۸۲	۱۹۷۰	۱۲/۷۵	۲/۱۲	۵
۶	۱۱/۲۵	۸۹/۴۷	۲۹۸۰	۷/۵۳	۲/۲۴	۶



شکل ۲. (الف) تغییرات تخلخل مؤثر در چرخه‌های مختلف، (ب) ارتباط بین تخلخل مؤثر نرمال شده ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه با تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد و ذوب، (پ) تغییرات سرعت موج طولی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه در چرخه‌های مختلف و (ت) ارتباط بین سرعت موج طولی نرمال شده و تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد-ذوب

تک‌محوری قبل از آزمایش انجماد - ذوب و N تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد - ذوب می‌باشد. مشابه با آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، در پایان هر ۱۰ چرخه آزمایش انجماد - ذوب، تغییرات مدول الاستیسیته نمونه‌های ماسه‌سنگ مورد مطالعه نیز بررسی و تعیین شده است (شکل ۳- پ و ت). بر اساس نتایج حاصل شده مشخص شد که با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب، مدول الاستیسیته برای تمامی ماسه‌سنگ‌های بررسی شده، روندی کاهش را نشان می‌دهد. بر این اساس مشاهده شده است که حداکثر و حداقل میزان کاهش مدول الاستیسیته به ترتیب معادل ۷۰ و ۴۷ درصد برای نمونه‌های ۴ و ۳ حاصل شده است. علاوه بر این ارتباط بین مدول الاستیسیته نرمال شده و تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد - ذوب به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$Et_x = Et_0(0.992e^{0.014N}) \quad (R^2 = 0.770) \quad (۴)$$

در این رابطه Et_x ، مدول الاستیسیته نمونه سنگ در هر چرخه از آزمایش انجماد - ذوب، Et_0 مدول الاستیسیته قبل از آزمایش انجماد - ذوب و N تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد - ذوب می‌باشد.

در شکل (۴) برخی از نمونه‌های گسیخته شده در آزمایش فشاری تک‌محوری در انتهای ۳۰ چرخه آزمایش انجماد و ذوب نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که تشخیص الگوی گسیختگی به غیر از نمونه ۳، در سایر نمونه‌ها مشکل است. بر این اساس، حتی شناسایی یک سطح شکست مشخص در این نمونه‌ها نیز به سختی انجام می‌شود. هم‌چنین در پایان چرخه ۳۰ انجماد و ذوب، هیچ کدام از نمونه‌ها به صورت انفجاری و شکننده، دچار گسیختگی نشده‌اند.

ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت موج در چرخه‌های مختلف

به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد و ذوب با استفاده از نتایج سرعت موج طولی نمونه‌ها، آنالیز رگرسیون غیرخطی انجام شده است. تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری با سرعت موج طولی در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد - ذوب در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نشان

هم‌چنین تغییرات سرعت موج طولی و سرعت موج طولی نرمال شده نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد و ذوب در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۲- پ نشان داده شده است، با افزایش تعداد چرخه‌ها، سرعت موج طولی نمونه‌ها روندی کاهشی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر میزان کاهش سرعت موج طولی با ۵۱ درصد مربوط به نمونه ۶ و حداقل میزان کاهش با ۱۸ درصد برای نمونه ۳ مشاهده شده است. در شکل ۲- ت نیز ارتباط بین سرعت موج طولی نرمال شده (سرعت موج طولی نمونه‌ها در هر چرخه آزمایش انجماد - ذوب به سرعت موج طولی نمونه قبل از آزمایش) با تعداد چرخه‌های آزمایش به صورت یک تابع توانی می‌باشد که روندی نزولی را نشان می‌دهد (رابطه ۲).

$$Pw_x = Pw_0(0.992e^{0.014N}) \quad (R^2 = 0.740) \quad (۲)$$

در این رابطه Pw_x ، سرعت موج طولی در هر چرخه از آزمایش انجماد - ذوب، Pw_0 سرعت موج طولی قبل از آزمایش انجماد - ذوب و N تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد - ذوب می‌باشد.

تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته

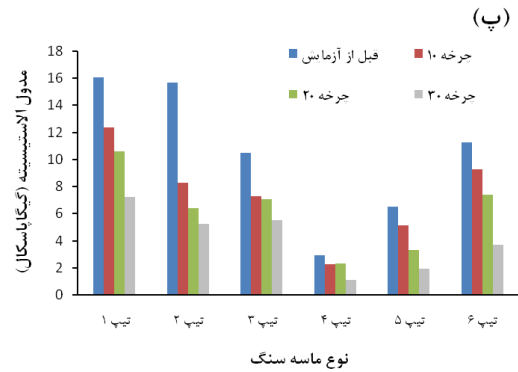
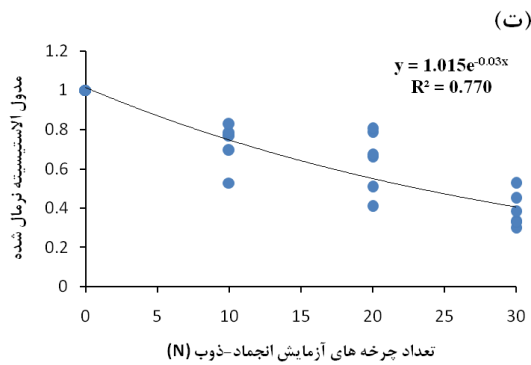
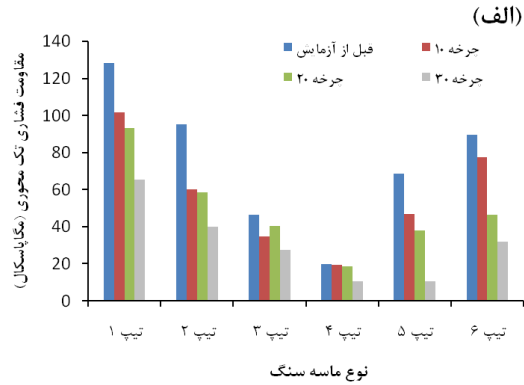
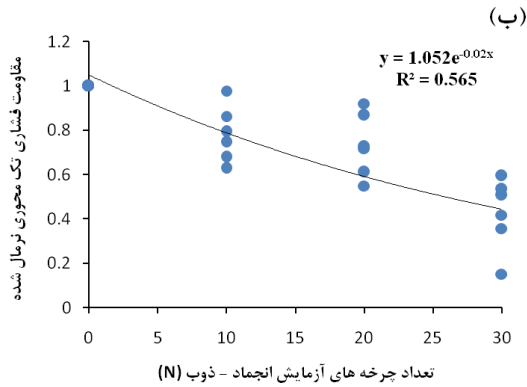
در پایان هر ۱۰ چرخه آزمایش انجماد-ذوب علاوه بر اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی ماسه‌سنگ‌ها، تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و مدول الاستیسیته (E) آن‌ها نیز تعیین شده است. همان طور که در شکل ۳- الف نشان داده شده است، با افزایش تعداد چرخه‌ها، مقاومت ماسه‌سنگ‌ها روندی کاهشی را از خود به نمایش می‌گذارد. بر این اساس بیش‌ترین میزان کاهش مقاومت در پایان چرخه ۳۰ آزمایش انجماد-ذوب برای نمونه ۵ با ۸۴ درصد کاهش مشاهده شده است. این در حالی است که کمترین میزان کاهش مقاومت ۴۰ درصد است که به نمونه ۳ تعلق دارد. در شکل ۳- ب نیز ارتباط بین مقاومت فشاری نرمال شده و تعداد چرخه‌ها نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که این ارتباط به صورت یک تابع نمایی است که با معادله زیر نشان داده شده است:

$$UCS_x = UCS_0(0.992e^{0.014N}) \quad (R^2 = 0.560) \quad (۳)$$

در این رابطه UCS_x ، مقاومت فشاری تک‌محوری در هر چرخه از آزمایش انجماد - ذوب، UCS_0 مقاومت فشاری

همان‌طور که در شکل ۵- پ نشان داده شده است، با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد و ذوب از صفر تا ۳۰ چرخه، مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج طولی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه کاهش یافته است.

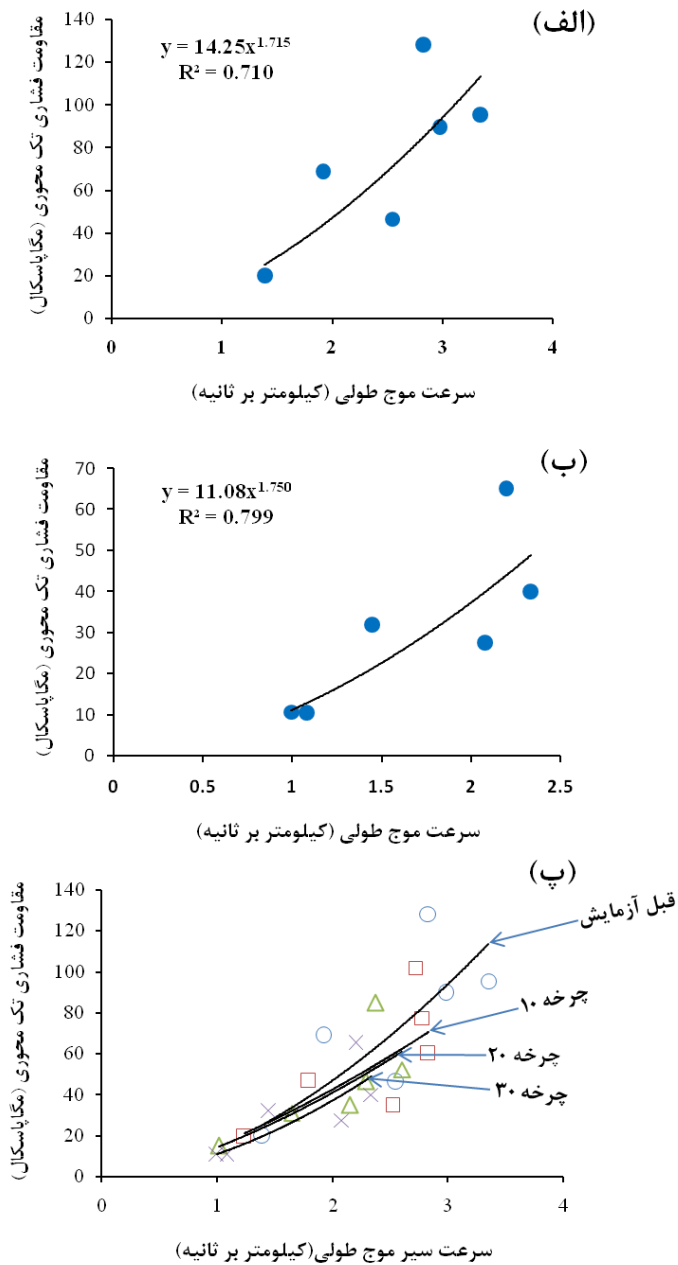
داده شده است، مقاومت فشاری تک‌محوری با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد و ذوب، به‌صورت توابع توانی با ضرایب رگرسیون بالا، کاهش یافته است. روابط بین مقاومت و سرعت موج طولی نمونه‌ها برای چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد-ذوب، در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۳. (الف) و (ب) تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت فشاری تک‌محوری نرمال شده در مقابل تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد-ذوب، (پ) و (ت) تغییرات مدول الاستیسیته و مدول الاستیسیته نرمال شده در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد-ذوب



شکل ۴. برخی از نمونه‌های ماسه‌سنگ شکسته شده در آزمایش فشاری تک‌محوری در پایان ۳۰ چرخه آزمایش انجماد و ذوب



شکل ۵. ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج طولی برای (الف) شرایط قبل از آزمایش انجماد و ذوب، (ب) چرخه ۳۰، (پ) هر چهار چرخه

جدول ۴: روابط بین مقاومت فشاری تک محوری و سرعت سیر موج در چرخه های مختلف آزمایش انجماد و ذوب

شماره رابطه	شماره چرخه	R^2	رابطه
رابطه ۵	قبل از آزمایش	۰/۷۱۰	$UCS = 14.25V_p^{1.715}$
رابطه ۶	(چرخه ۱۰)	۰/۶۶۷	$UCS = 15.61V_p^{1.450}$
رابطه ۷	(چرخه ۲۰)	۰/۸۱۰	$UCS = 14.454V_p^{1.502}$
رابطه ۸	(چرخه ۳۰)	۰/۷۹۹	$UCS = 11.08V_p^{1.750}$

غیرخطی توانی و با ضرایب رگرسیون بالا افزایش پیدا می‌کند. این ارتباط برای شرایط قبل از آزمایش انجماد و ذوب، چرخه ۱۰، چرخه ۲۰ و چرخه ۳۰ در شکل ۷ نشان داده شده است. بنابراین به‌منظور تخمین مدول الاستیسیته ماسه‌سنگ‌ها در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد و ذوب با استفاده از آزمایش سرعت موج طولی، می‌توان از روابط جدول ۶ استفاده کرد.

هم‌چنین روابط بین مدول الاستیسیته و تخلخل مؤثر در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد-ذوب در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، برای تمامی چرخه‌های آزمایش انجماد-ذوب ارتباط بین مدول الاستیسیته و تخلخل مؤثر، یک رابطه معکوس است. به عبارت دیگر با افزایش تخلخل، میزان مدول الاستیسیته نمونه‌ها دچار کاهش شده است. علاوه بر این مطابق با شکل ۸-پ، با افزایش تعداد چرخه‌ها مدول الاستیسیته کاهش یافته است. این در حالی است که میزان تخلخل نمونه‌ها روندی افزایشی را با توجه به افزایش چرخه‌ها نشان می‌دهد. به‌منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها با استفاده از نتایج تخلخل مؤثر، می‌توان از معادلات توانی جدول ۷ استفاده نمود:

مشابه با نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری، معادلات زیر به منظور تخمین مدول الاستیسیته ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه با استفاده از سرعت موج طولی و تخلخل مؤثر نمونه‌ها پیشنهاد می‌گردد:

$$E = aV_p^b \quad (23)$$

$$E = an^{-b} \quad (24)$$

در این روابط a و b ضرایبی هستند که با توجه به تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد - ذوب تغییر می‌کنند. بر این اساس با توجه به معادلات پیش‌بینی کننده مدول الاستیسیته با استفاده از سرعت موج طولی (جدول ۶) ضرائب a و b به ترتیب بین $1/723$ تا $1/904$ و $1/479$ تا $1/716$ تغییر می‌کنند. بنابراین به منظور مقاصد عملی مقادیر ضرایب a و b به ترتیب $1/813$ و $1/597$ پیشنهاد می‌شود. این در حالی است که این مقادیر برای روابط بین مدول الاستیسیته و تخلخل (جدول ۷)، $1/415$ و $154/3$ توصیه می‌گردد.

ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و تخلخل مؤثر در چرخه‌های مختلف

در شکل ۶ ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و درصد تخلخل مؤثر نمونه‌ها برای ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه در شرایط قبل از شروع آزمایش انجماد و ذوب، چرخه ۱۰، چرخه ۲۰ و چرخه ۳۰ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش تعداد چرخه‌ها به تدریج از مقاومت فشاری کاسته شده است. این در حالی است که درصد تخلخل مؤثر نمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه‌ها، دچار افزایش شده است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و درصد تخلخل مؤثر برای شرایط قبل از شروع آزمایش، چرخه ۱۰، چرخه ۲۰ و چرخه ۳۰، به صورت جدول ۵ می‌باشد. با توجه به مطالب عنوان شده، شکل کلی معادلات پیش‌بینی کننده مقاومت فشاری نمونه‌های ماسه‌سنگ مورد مطالعه به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$UCS = aV_p^b \quad (13)$$

$$UCS = an^{-b} \quad (14)$$

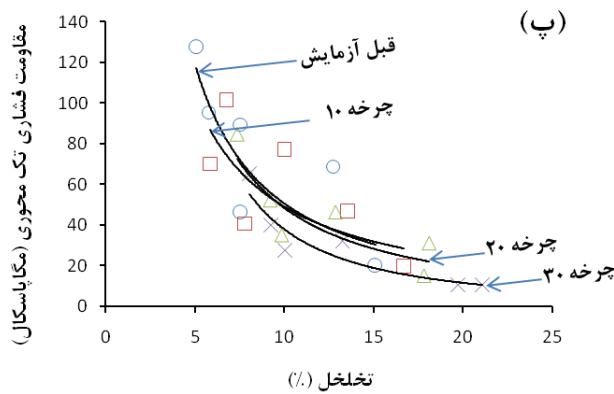
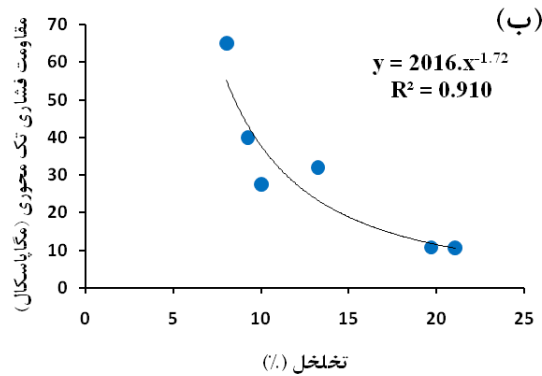
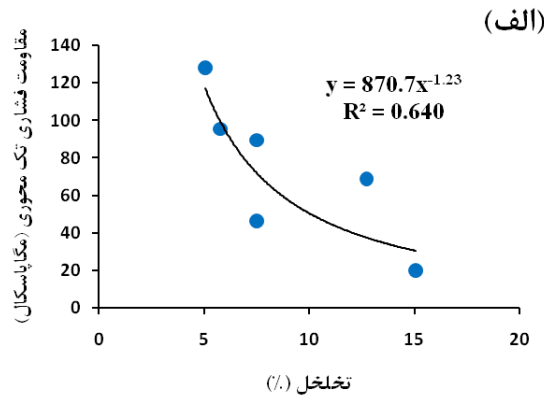
در این روابط، a و b ضرائب ثابتی هستند که با توجه به تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب تغییر می‌کنند. همان‌طور که در روابط ۵ تا ۸ نشان داده شد، ضریب a بین $1/45$ تا $1/75$ متغیر است. در حالی که مقادیر مربوط به ضریب b بین $11/08$ تا $15/61$ تغییر می‌کند. بر این اساس برای مقاصد عملی می‌توان مقدار ضرائب a و b را به ترتیب $1/60$ و $13/34$ در نظر گرفت. هم‌چنین با توجه به روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و تخلخل (جدول ۵) مقادیر ضرائب a و b برای مقاصد عملی، 1292 و $1/90$ پیشنهاد می‌شود.

ارتباط بین مدول الاستیسیته با سرعت موج و تخلخل مؤثر در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد-ذوب

به منظور توصیف ارتباط بین مدول الاستیسیته و سرعت موج طولی در چرخه‌های مختلف، آنالیز رگرسیون غیر خطی انجام شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزایش سرعت موج طولی، مدول الاستیسیته ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه نیز به صورت یک معادله

جدول ۵. روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و درصد تخلخل مؤثر در چرخه های مختلف آزمایش انجماد و ذوب

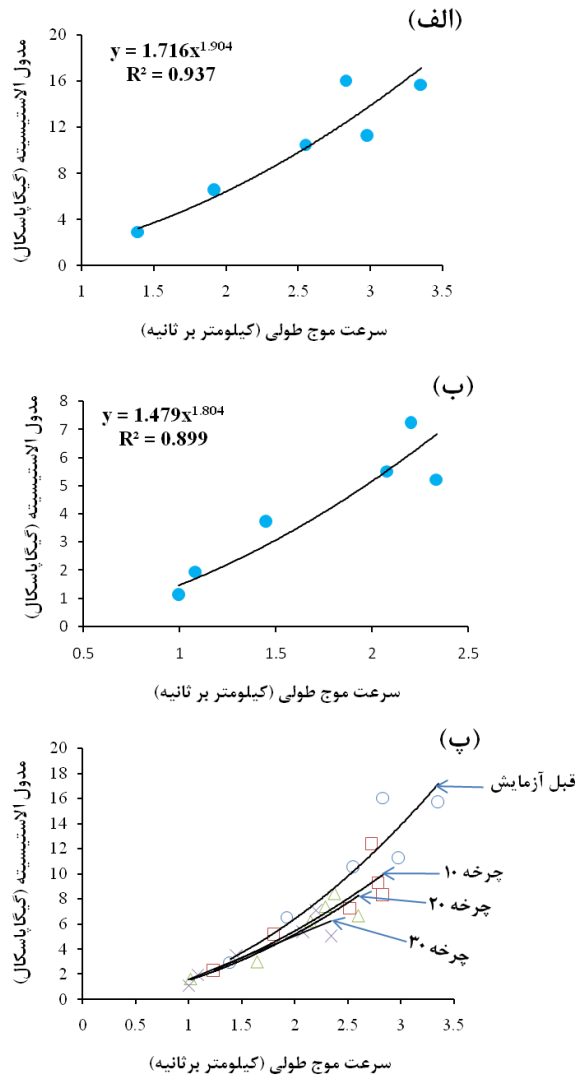
شماره رابطه	شماره چرخه	R^2	رابطه
رابطه ۹	قبل از آزمایش	۰/۶۴۰	$UCS = 870.7n^{-1.23}$
رابطه ۱۰	(چرخه ۱۰)	۰/۵۵۰	$UCS = 569.2n^{-1.06}$
رابطه ۱۱	(چرخه ۲۰)	۰/۶۹۹	$UCS = 1031n^{-1.32}$
رابطه ۱۲	(چرخه ۳۰)	۰/۹۱۰	$UCS = 2016.0n^{-1.72}$



شکل ۶. ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و تخلخل برای (الف) شرایط قبل از آزمایش انجماد و ذوب، (ب) چرخه ۳۰، (پ) هر چهار چرخه

جدول ۶. روابط بین مدول الاستیسیته و سرعت سیر موج در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد و ذوب

شماره رابطه	شماره چرخه	R^2	رابطه
رابطه ۱۵	قبل از آزمایش	۰/۹۳۷	$E = 1.716V_p^{1.904}$
رابطه ۱۶	(چرخه ۱۰)	۰/۹۱۷	$E = 1.6605V_p^{1.723}$
رابطه ۱۷	(چرخه ۲۰)	۰/۹۳۲	$E = 1.504V_p^{1.779}$
رابطه ۱۸	(چرخه ۳۰)	۰/۸۹۹	$E = 1.479V_p^{1.809}$



شکل ۷. ارتباط بین مدول الاستیسیته و سرعت موج طولی برای (الف) شرایط قبل از آزمایش انجماد و ذوب، (ب) چرخه ۳۰، (پ) هر چهار چرخه

جدول ۷. روابط بین مدول الاستیسیته و تخلخل مؤثر در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد و ذوب

شماره رابطه	شماره چرخه	R^2	رابطه
رابطه ۱۹	قبل از آزمایش	۰/۹۱۲	$E = 184.4n^{-1.42}$
رابطه ۲۰	(چرخه ۱۰)	۰/۶۹۳	$E = 100.8n^{-1.21}$
رابطه ۲۱	(چرخه ۲۰)	۰/۷۷۷	$E = 154.7n^{-1.42}$
رابطه ۲۲	(چرخه ۳۰)	۰/۸۹۳	$E = 207.8n^{-1.62}$

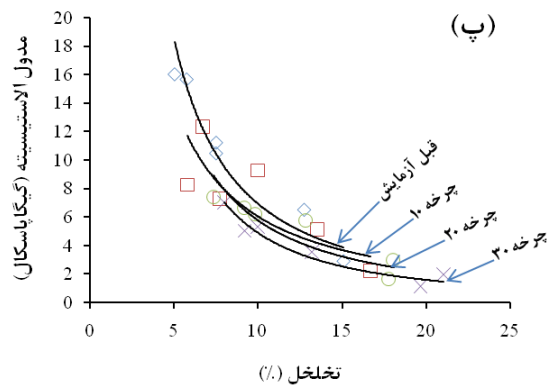
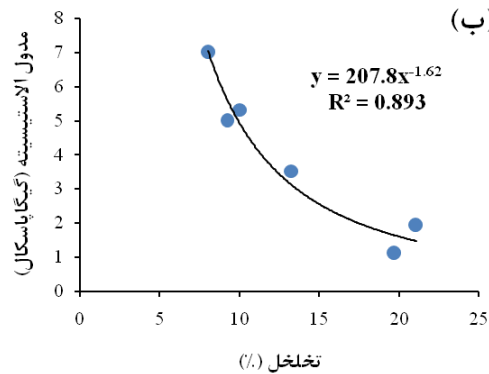
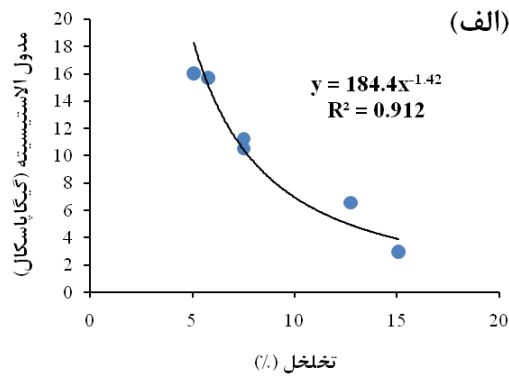
آنالیز رگرسیون خطی چند متغییره

آنالیز رگرسیون به وسیله پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، مدول الاستیسیته (E)، سرعت موج طولی (Vp)، تخلخل مؤثر (n) و تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد - ذوب (N) انجام شده است. به منظور تخمین ویژگی‌های مقاومتی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه، بهترین

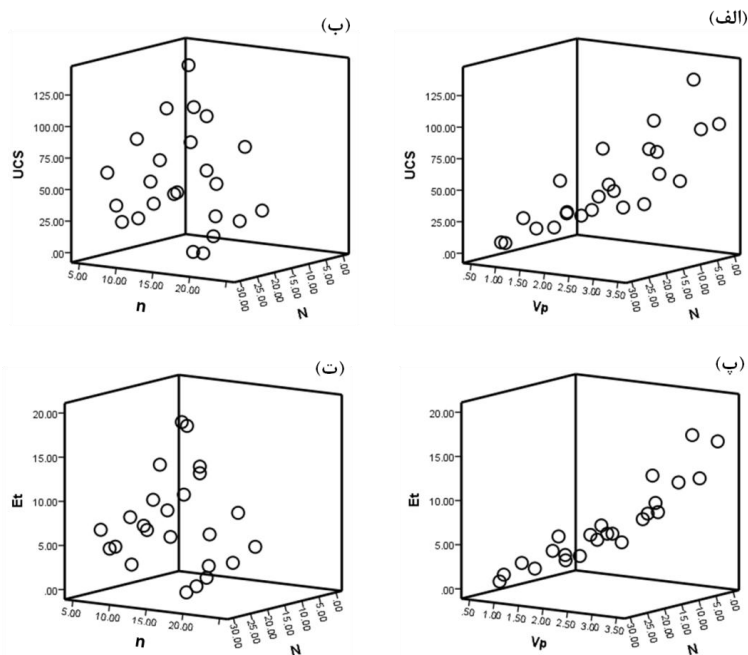
روابط خطی چند متغییره بین پارامترهای UCS-Vp-N، UCS-n-N، E-Vp-N و E-n-N استخراج شده است که نتایج حاصل شده در جدول ۸ و شکل ۹ نشان شده است. بر این اساس، سطح معناداری ضرایب رگرسیونی معادلات ۲۷ و ۳۰ با استفاده از آزمون‌های t و F ارزیابی شده است. مقادیر t برای آنالیز رگرسیون خطی چند متغییره مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته در

جدول ۹ ارائه شده است. سطوح معناداری برای تمامی پارامترها در آزمون t کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که یک ارتباط مهم و معناداری بین متغیرهای مستقل و وابسته به صورت انفرادی وجود دارد. همچنین مقادیر F برای مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته به ترتیب ۱۴/۲۶۴ و ۳۹/۱۶۰ می‌باشد که در جدول ۱۰ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که سطح معناداری آماره F برای مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته کم‌تر از

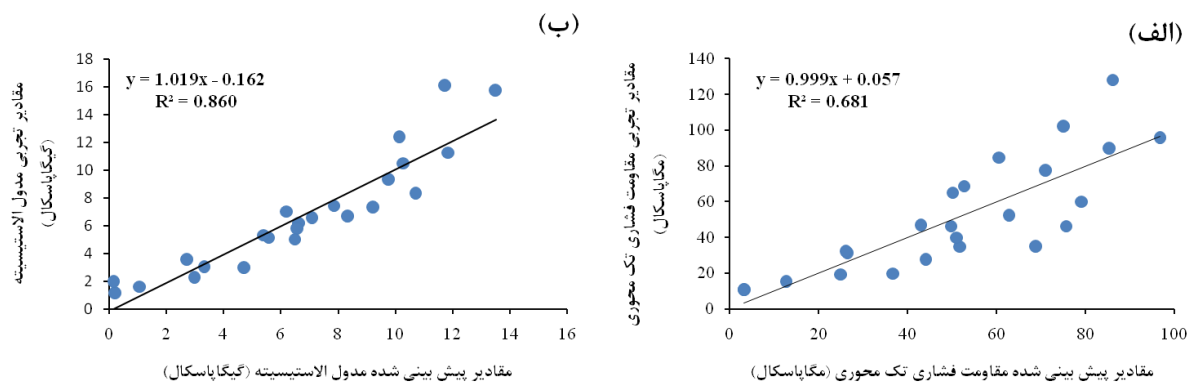
۰/۰۵ است. این بدین معنی است که نتایج حاصل شده به‌وسیله این مدل اتفاقی نیست. با بررسی نتایج آزمون t و F می‌توان نتیجه گرفت که روابط تجربی توسعه داده شده بین متغیرهای وابسته (مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته) و متغیرهای مستقل (تخلخل، سرعت موج طولی، تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد - ذوب) معنادار هستند. ارتباط بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده با استفاده از معادلات ۲۷ و ۳۰ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۸. ارتباط بین مدول الاستیسیته و تخلخل مؤثر برای (الف) شرایط قبل از آزمایش انجماد و ذوب، (ب) چرخه ۳۰، (پ) هر چهار چرخه



شکل ۹. ارتباط بین (الف) مقاومت فشاری تک‌محوری، سرعت موج و تعداد چرخه‌ها، (ب) مقاومت فشاری تک‌محوری، تخلخل و تعداد چرخه‌ها، (پ) مدول الاستیسیته، سرعت موج و تعداد چرخه‌ها و (ت) مدول الاستیسیته، تخلخل و تعداد چرخه‌ها



شکل ۱۰. ارتباط بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای (الف) مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از معادله ۲۷ و (ب) مدول الاستیسیته با استفاده از معادله ۳۰

جدول ۸. معادلات پیش‌بینی کننده مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته

متغیر وابسته	متغیر مستقل	R ²	معادله	شماره رابطه
UCS (MPa)	V _p , N*	0.671	UCS = 33.43V _p - 0.523N - 11.77	(۲۵)
	n*, N	0.640	UCS = 112.62-0.74N - 4.44n	(۲۶)
	V _p , n, N	0.680	UCS = 22.69V _p - 1.65n - 0.56N + 30.17	(۲۷)
E (GPa)	V _p , N	0.848	E = 4.78V _p - 0.087N - 2.131	(۲۸)
	n, N	0.80	E = 15.58 - 0.624n - 0.120N	(۲۹)
	V _p , n, N	0.855	E = 3.641V _p - 0.176n - 0.091N + 2.34	(۳۰)

n* (تخلخل)، N (تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد-ذوب)

جدول ۹. نتایج آزمون t برای مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته

سطح معناداری	آزمون t	ضرایب استاندارد		مدل
		ضرایب استاندارد بتا	ضرایب غیراستاندارد خطای استاندارد B	
				نتایج آزمون t برای مقاومت فشاری تک‌محوری
0.193	0.543	-	55.59	ضرایب ثابت 30.17 5
0.047	1.510	0.485	15.02	سرعت موج (Vp) 22.68
0.034	-0.798	-0.246	2.065	تخلخل (n) - 1.648
0.044	-1.410	-0.202	0.396	تعداد چرخه‌ها (N) - 0.558
				نتایج آزمون t برای مدول الاستیسیته
0.338	0.478	-	4.907	ضرایب ثابت 2.345
0.012	2.746	0.596	1.326	سرعت موج (Vp) 3.641
0.046	-0.965	-0.201	0.182	تخلخل (n) - 0.176
0.017	-2.605	-0.252	0.035	تعداد چرخه‌ها (N) - 0.091

جدول ۱۰. نتایج آزمون F برای مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته

سطح معناداری	آزمون F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
0.000	14.264	5210.362	3	15631.087	رگرسیون (regression)
		365.288	20	7305.758	مانده (residual)
			23	22936.845	کل (total)
					نتایج آزمون F برای مدول الاستیسیته
0.000	39.160	111.410	3	334.229	رگرسیون (regression)
		2.845	20	56.900	مانده (residual)
		-	23	391.129	کل (total)

نتیجه‌گیری

۱- نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و سرعت موج طولی نمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد - ذوب روندی کاهشی را نشان می‌دهند. در حالی که میزان تخلخل نمونه‌ها دچار افزایش می‌گردد.

۲- میزان کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و سرعت موج طولی در پایان ۳۰ چرخه آزمایش انجماد - ذوب به ترتیب ۸۴ درصد، ۷۰ درصد و

در این مطالعه سعی شده است که با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی شامل تخلخل مؤثر و سرعت موج طولی در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد - ذوب، ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌ها شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته تخمین زده شود. بر این اساس مهم‌ترین نتایج تحقیق حاضر به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

مؤمنی، ع (۱۳۹۲) ارزیابی رفتار تابع زمان گرانیته‌یادهای الوند همدان با تأکید بر هوازدگی و خستگی. پایان‌نامه دکترا، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، ۲۵۹ ص.

Bayram, F (2012) Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions. *Cold Region Science Technology*, 83-84: 98-102

Binal, A., Kasapoglu, KE (2002) Effects of freezing and thawing process on physical and mechanical properties of Selime ignimbrite outcrops in Aksaray-Ihlara valley. *Proceedings of sixth Regional Rock Mechanics Symposium*. Konya-Turkey: p. 189-96

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: 127-136

Folk, RL (1974) *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill, Austin

Grossi, C.M., Brimblecombe, P., Harris I (2007) Predicting long term freeze-thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. *Science Total Environment*, 377(2):273-281

Hale, P.A., Shakoor, A (2003) A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones. *Environmental Engineering Geoscience*, 9:117-130

ISRM (1981) *Rock Characterization, Testing and Monitoring*. In: Brown, E.T. (Ed.), ISRM suggested methods. Pergamon Press, Oxford (211 pp.).

Khanlari, G.H., Abdilor, Y (2015) The influence of wet-dry, freeze-thaw and heat-cool cycles on physical and mechanical properties of upper red sandstones, central part of Iran. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 74:1287-1300

Khanlari, G.H., Zarei, Sahamieh., R., Abdi, Y (2015) The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of Upper Red Formation sandstones, central part of Iran. *Arabian Journal of Geoscience*, 8:5991-6001

Luo, X., Jiang, N., Zuo, C., Dai, Z., Yan, S (2013) Damage characteristics of altered and unaltered diabases subjected to extremely cold freeze-thaw cycles. *Rock Mechanics and Rock Engineering*: DOI 10.1007/s00603-013-0516-2

Momeni, A., Abdilor, Y., Khanlari, G.R., Heidari, M., Sepahi, AA (2015) The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, DOI 10.1007/s10064-015-0787-9

Tan X, Chen W, Tian H, Cao J (2011) Laboratory investigations on the mechanical properties

۵۱ درصد است. در حالی که حداکثر میزان افزایش تخلخل نمونه‌ها در پایان چرخه ۳۰، ۶۵ درصد می‌باشد.

۳- نتایج آنالیز رگرسیون غیرخطی نشان می‌دهد که پیش‌بینی ویژگی‌های مقاومتی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد - ذوب امکان‌پذیر است و بر این اساس معادلات پیش‌بینی کننده به صورت کلی زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$UCS = aVp^b \quad UCS = an^b, E = aVp^b, \\ E = an^b,$$

ضرایب a و b با توجه به تعداد چرخه‌های آزمایش انجماد - ذوب تغییر می‌کنند.

در این روابط، a و b ضرایب ثابتی هستند که با توجه به تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب تغییر می‌کنند. برای UCS-Vp ضریب a بین ۱/۴۵ تا ۱/۷۵ متغیر است. در حالی که مقادیر مربوط به ضریب b بین ۱۱/۰۸ تا ۱۵/۶۱ تغییر می‌کند. بر این اساس برای مقاصد عملی می‌توان مقدار ضرایب a و b را به ترتیب ۱/۶۰ و ۱۳/۳۴ در نظر گرفت. همچنین برای UCS-n مقادیر ضرایب a و b برای مقاصد عملی، ۱۲۹۲ و ۱/۹۰ پیشنهاد می‌شود. بر اساس نتایج حاصل شده، مقادیر ضرایب a و b به منظور اهداف عملی و کاربردی برای رابطه E-Vp، به ترتیب ۱/۸۱۳ و ۱/۵۹۷ در حالی که این مقادیر برای روابط بین مدول الاستیسیته و تخلخل، ۱/۴۱۵ و ۱۵۴/۳ پیشنهاد می‌گردد.

۴- مطالعه نشان می‌دهد که امکان پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از آزمایش‌های فیزیکی و غیرمخرب در چرخه‌های مختلف آزمایش انجماد - ذوب وجود دارد. اگرچه به منظور تأیید این روابط نیاز به آزمایش‌ها و بررسی‌های بیشتر می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان کمال تشکر را از گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی‌سینا به‌خاطر فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی برای انجام این پژوهش دارند.

منابع

درویش‌زاده، ع (۱۳۷۲) زمین‌شناسی ایران. انتشارات ندا، ۷۵۱ ص.

- degradation of granite under freeze–thaw cycles. *Col Reg Sci Technol* 68:130–138
- 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
- Yavuz, H., Altindag, R., Sarac, S., Ugur, I., Sengun, N (2006) Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze–thaw and thermal shock weathering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43: 767–775
- Zappia G, Sabbioni C, Riontino C, Gobbi G, Favoni O (1998) Exposure tests of building materials in urban atmosphere. *Science Total Environment*, 224:235–244
- Zhang SJ, Lai YM, Zhang XF, Pu YB, Yu WB (2004) Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze–thaw cycle condition. *Tunneling Underground Space Technology* 19:295–302

Investigation of effect of freeze-thaw on mechanical properties of Upper Red Formation sandstones based on measurement of P-wave velocity and porosity

Y. Abdi^{*1} and Gh .R. Khanlari²

1- Dept., of Geology, Lorestan University

2- Dept., of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan

* abdi.ya@lu.ac.ir

Recieved: 2017/4/8 Accepted: 2017/12/16

Abstract

The aim of this research is the estimation of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity of Upper Red Formation sandstones using the physical properties in different cycles of freeze-thaw test. For this purpose, 6 large rock blocks from different locations of Upper Red Formation in southwestern of Qom were obtained. In this research, the freeze-thaw test was carried out in 30 cycles. Freeze-thaw test was carried out for 30 cycles and the variations of P-wave velocity, porosity, uniaxial compressive strength and modulus of elasticity of specimens were determined after every 10 cycles according to ISRM. The results of this study show that an increase in number of freeze-thaw cycles decreases uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and P wave velocity, whereas the effective porosity increases. Based on this, it was observed that uniaxial compressive strength of specimens decreases between 41 and 85%, whereas the modulus of elasticity decreases between 47 and 70%. Finally, for prediction of strength properties of selected sandstones using the P-wave velocity and effective porosity in different cycles of freeze-thaw test, a series of predictive relationships were also proposed.

Keywords: Sandstone; Freeze-thaw; Upper Red Formation; Uniaxial compressive strength; P-wave velocity