

بررسی ویژگیهای مهندسی نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی در چرخه‌های انجماد و ذوب آب

محمد رضا نیکودل*، امین جمشیدی

گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*مسئول مکاتبات - آدرس الکترونیکی: nikudelm@modares.ac.ir

(دریافت: ۸۸/۶/۱۵؛ پذیرش: ۸۸/۱۲/۱۵)

چکیده

مصالح سنگی از جمله مصالح طبیعی و پر مصرف در ساخت انواع سازه‌های مهندسی، به ویژه ساختمان‌ها هستند. از مهمترین عوامل محیطی که باعث تغییر در ویژگی‌های مهندسی، مقاومت و طول دوام سنگ‌ها می‌شود، چرخه‌های انجماد و ذوب آب است. در این تحقیق ۱۴ نمونه سنگ ساختمانی با منشأهای مختلف تهیه شد، سپس آزمایش انجماد و ذوب آب تا ۳۰ چرخه انجام شد و بعد از هر ۵ چرخه مقادیر ویژگی‌های مهندسی این سنگ‌ها شامل مقاومت کششی برزیلین، شاخص مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش چرخه‌های انجماد و ذوب، مقادیر این ویژگی‌ها کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این، نمونه‌هایی که تخلخل مؤثر بالاتر از ۱ درصد داشته‌اند کاهش بیشتری در مقاومت کششی برزیلین، شاخص مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P آنها رخ داده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد تخلخل مؤثر نقش مهمتری نسبت به ترکیب کانی‌شناسی و منشأ سنگ در تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها در آزمایش انجماد و ذوب آب داشته است. در پایان با توجه به نتایج به دست آمده مناسبترین سنگ‌ها برای استفاده در مناطقی که احتمال انجماد و ذوب آب وجود دارد پیشنهاد شده است.

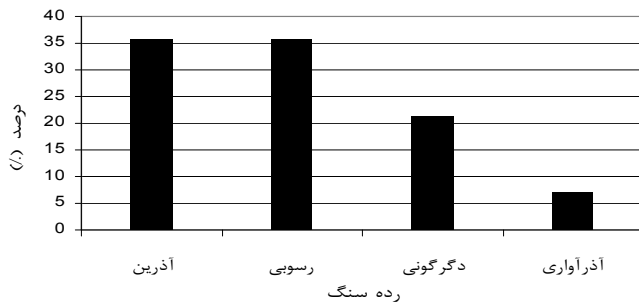
واژه‌های کلیدی: انجماد و ذوب آب، مقاومت کششی برزیلین، شاخص مقاومت بار نقطه‌ای، سرعت موج P، تخلخل مؤثر

مقدمه

(Winkler 1994). همچنین (Chen *et al.* 2004) بیان کردند که تخریب سنگ توسط عمل انجماد و ذوب آب به پارامترهای تخلخل، توزیع اندازه حفرات، درجه اشباع، نوع کانی‌ها، منشأ سنگ و دامنه تغییرات دمای محیط بستگی دارد. در مطالعات گذشته محققین جنبه‌های مختلف انجماد و ذوب آب روی ویژگی‌های سنگ‌ها را بررسی کرده‌اند (Topal & Doyuran 1998, Hale & Shakoor 2003, Chen *et al.* 2004, Yavuz *et al.* 2006, Ruedrich & Siegesmund 2007). نتایج تحقیقات (Hale & Shakoor 2003) روی نمونه‌هایی از ماسه سنگ‌ها در چرخه‌های انجماد و ذوب آب نشان داد نمونه‌هایی با مقدار تخلخل بین ۲ تا ۷ درصد، کاهش قابل توجهی در مقاومت فشاری تک محوری آنها به علت چرخه‌های انجماد و ذوب آب رخ داده است. (Chen *et al.* 2004) تأثیر درجه اشباع روی زوال پذیری توفها در چرخه‌های انجماد و ذوب آب را بررسی کردند. این محققین به این نتیجه رسیدند هنگامی که مقدار درجه اشباع نمونه‌ها به بیش از ۷۰ درصد می‌رسد، تغییرات قابل توجهی در مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج P نمونه‌ها رخ می‌دهد. (Yavuz *et al.* 2006) ویژگی‌های مهندسی نمونه‌هایی از سنگ‌های کربناته شامل مقاومت فشاری تک محوری، سرعت موج P و سختی چکش اشمیت در چرخه‌های انجماد

سنگی یکی از مصالح پر مصرف در ساختمان‌سازی و کارهای عمرانی هستند که از دیرباز به دلیل در دسترس بودن و فراوانی مورد استفاده بویژه قرار گرفته‌اند. سنگ‌هایی که در بیرون از ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند ضروری است در برابر شرایط اقلیمی متغیر و شدید از جمله تغییرات دمای محیط مقاوم باشند. یکی از مهمترین عوامل محیطی که باعث تغییرات در ویژگی‌های مهندسی، مقاومت و طول دوام سنگ‌ها می‌شود چرخه‌های انجماد و ذوب است. بنابراین ضروری است تأثیر این عامل روی سنگ‌های مختلف بررسی شود و مناسبترین سنگ از لحاظ مقاومت و دوام پیشنهاد شود. آبی که در داخل حفرات و ریزترک‌های سنگ وجود دارد بعد از انجماد حدود ۹ درصد افزایش حجم خواهد داشت که باعث اعمال فشار به حفرات و ریز ترک‌ها می‌شود (Bell 2000). افزایش چرخه‌های انجماد و ذوب آب باعث بزرگتر شدن و توسعه حفرات و ریز ترک‌ها می‌شود، در نتیجه سنگ ضعیف و سست تر خواهد شد و موجب کاهش طول دوام آن می‌شود. ترکیبی از فاکتورهایی مانند انبساط حجمی حاصل از تبدیل شدن آب به یخ، درجه اشباع، تخلخل مؤثر، توزیع اندازه حفرات و پیوستگی حفرات به همدیگر روی عمل انجماد و ذوب آب تأثیر دارند

به پارامترهای ذاتی سنگ از جمله ترکیب کانی‌شناسی بستگی دارد. سنگ‌ها به دلیل دارا بودن کانی‌های تشکیل دهنده متفاوت، دوام‌های متفاوتی در برابر این عامل از خود نشان می‌دهند. در این تحقیق با تهیه مقطع نازک از نمونه‌ها، ترکیب کانی‌شناسی آنها در زیر میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین در شکل ۱ نوع و نسبت سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه آورده شده است (جدول ۱ و شکل ۱).



شکل ۱- نوع و نسبت سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه در این تحقیق.

ویژگی‌های فیزیکی

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی شامل دانسیته، وزن مخصوص (GS)، تخلخل و جذب آب از روش استاندارد (ISRM 1981) استفاده شده است. نتایج میانگین مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها در جدول ۲ و شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. لازم به یادآوری است که بر روی هر کدام از نمونه‌ها ۵ آزمایش انجام شده و نتایج ارائه شده در این جدول میانگین مقادیر این آزمایشات هستند.

بر اساس طبقه بندی (Anon 1979) برای دانسیته و تخلخل، غالب نمونه‌ها در رده با دانسیته بالا (۲/۷۵-۲/۵۵) و متوسط (۲/۲-۲/۵۵) و

و ذوب آب را بررسی کردند. نتایج کار این محققین نشان داد مقادیر این ویژگی‌ها در چرخه‌های انجماد و ذوب آب با درجات مختلفی که به مقادیر اولیه هر یک از این ویژگی‌ها بستگی دارد، کاهش پیدا کرده اند. در این تحقیق با تهیه ۱۴ نمونه سنگ ساختمانی با منشاءهای مختلف، ابتدا ویژگی‌های سنگ‌شناسی، فیزیکی و مهندسی آنها مورد بررسی قرار گرفته شده است. سپس ویژگی‌های مهندسی شامل مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P در چرخه‌های انجماد و ذوب آب مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

برای انجام تحقیق حاضر، ۱۴ بلوک سنگ ساختمانی متفاوت به ابعاد تقریبی (۳۰×۳۰×۴۰ سانتیمتر) از کارخانه‌های سنگبری اطراف تهران تهیه شد و از آنها نمونه‌ها و مغزه‌های لازم با قطر NX برای انجام آزمایش‌های پیش‌بینی شده تهیه شد. در ادامه به بررسی‌های سنگ‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی شامل دانسیته، وزن مخصوص (GS)، تخلخل، جذب آب و ویژگی‌های مهندسی شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P آنها پرداخته شده است. به منظور بررسی تغییرات مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P نمونه‌ها در چرخه‌های انجماد و ذوب آب، آزمایش انجماد و ذوب آب تا ۳۰ چرخه انجام شد و بعد از هر ۵ چرخه مقادیر هر یک از این ویژگی‌ها بررسی شد.

بررسی‌های سنگ‌شناسی

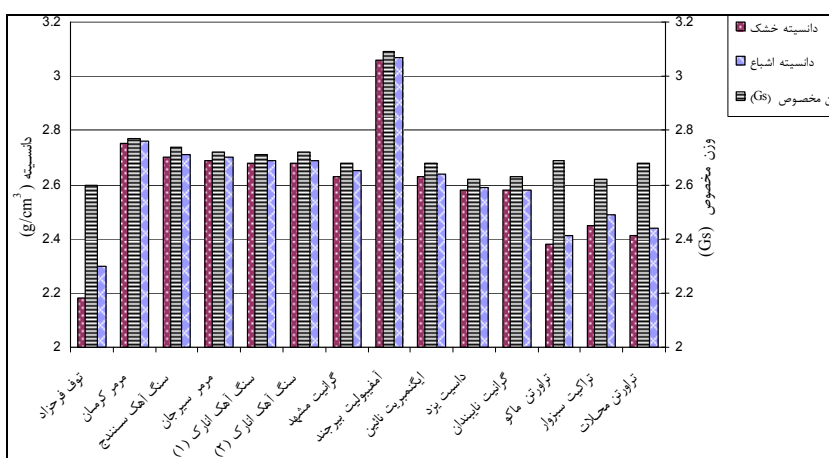
مطالعات پتروگرافی نه تنها اطلاعاتی در مورد ترکیب کانی‌شناسی و منشاء سنگ‌ها می‌دهند، بلکه در ارزیابی دوام سنگ‌ها در برابر عوامل فیزیکی مانند انجماد و ذوب آب نیز یک ابزار به شمار می‌آیند (Dreesen & Dusar 2004). دوام سنگ‌ها در برابر انجماد و ذوب آب

جدول ۱- نام زمین‌شناسی و ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌ها.

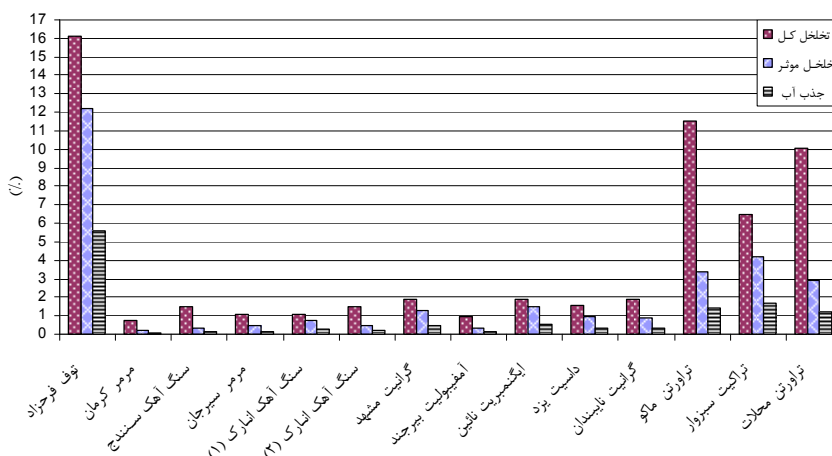
نام زمین‌شناسی	رده سنگ	ترکیب کانی‌شناسی
توف شیشه‌ای فرحزاد (تهران)	آذر آواری	شیشه آتشفشانی در حال تبلور مجدد به کوارتز (۶۵٪) - کوارتز (۲۵٪) - پلاژیوکلاز (۵٪) - فلدسپات پتاسیم (۵٪)
مرمر کرمان	دگرگونی	میکرو اسپاریت (۱۰۰٪)
سنگ آهک سنندج	رسوبی	زمینه میکرایت (۷۵٪) - رگه‌های کلسیت اسپاری همراه با کانی‌های اوپک (۲۵٪)
مرمر سرجان	دگرگونی	کلسیت اسپاری (۱۰۰٪)
سنگ آهک انارک (۱)	رسوبی	کلسیت اسپاری و فسیل اسپاریتی شده (۴۰٪) - زمینه میکرایت (۳۰٪) - دولومیت (۳۰٪)
سنگ آهک انارک (۲)	رسوبی	کلسیت اسپاری و فسیل اسپاریتی شده (۵۵٪) - زمینه میکرایت (۳۵٪) - دولومیت (۱۰٪)
آلكالی گرانیت مشهد	آذرین	کوارتز (۵۰٪) - فلدسپات آلكالین در حال تجزیه به سرسیت (۳۰٪) - بیوتیت (۱۰٪) - مسکویت (۱۰٪)
آمفیبولیت بیرجند	دگرگونی	آمفیبول در حال تجزیه به کلریت (۳۵٪) - پلاژیوکلاز آلبیتی و الیگوکلازی (۳۰٪) - گارنت (۲۰٪) - اسفن (۱۰٪) - اپیدوت (۵٪)
ایگنمبریت نائین	آذرین	شیشه آتشفشانی (۶۵٪) - خرده سنگ با ترکیب اندزیتی و تراکیتی (۲۰٪) - شیشه آتشفشانی در حال تبلور مجدد به کوارتز (۱۰٪) - فلدسپات پتاسیم (۵٪)
داسیت یزد	آذرین	زمینه شیشه آتشفشانی (۵۵٪) - فلدسپات آلكالین (۳۵٪) - کوارتز (۱۵٪) - بیوتیت (۵٪)
آلكالی گرانیت ناینندان	آذرین	کوارتز (۴۵٪) - فلدسپات آلكالین (۴۰٪) - پلاژیوکلاز (۱۰٪) - بیوتیت (۵٪)
تراورتن ماکو	رسوبی	زمینه میکرو اسپاریت (۵۵٪) - اکسیدهای آهن (۳۵٪) - کلسیت اسپاری (۱۰٪)
تراکیت سبزواری	آذرین	زمینه کوارتز و فلدسپات ریز بلور (۶۵٪) - فلدسپات (۱۵٪) - کوارتز (۱۰٪) - بیوتیت (۱۰٪)
تراورتن محلات	رسوبی	کلسیت اسپاری (۵۵٪) - زمینه میکرو اسپاریت (۴۵٪)

جدول ۲- نتایج آزمون تعیین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها.

نام زمین‌شناسی	دانسیتة خشک (g/cm ³)	دانسیتة اشباع (g/cm ³)	وزن مخصوص (Gs)	تخلخل مؤثر (%)	تخلخل کل (%)	جذب آب (%)
توف فرحزاد	۲/۱۸	۲/۳۰	۲/۶۰	۱۲/۲۱	۱۶/۱۵	۵/۶۱
مرمر کرمان	۲/۷۵	۲/۷۶	۲/۷۷	-۰/۲۲	-۰/۷۲	-۰/۰۸
سنگ آهک سنندج	۲/۷۰	۲/۷۱	۲/۷۴	-۰/۳۷	۱/۴۶	-۰/۱۴
مرمر سیرجان	۲/۶۹	۲/۷۰	۲/۷۲	-۰/۴۴	۱/۱۰	-۰/۱۶
سنگ آهک انارک (۱)	۲/۶۸	۲/۶۹	۲/۷۱	-۰/۷۷	۱/۱۱	-۰/۲۹
سنگ آهک انارک (۲)	۲/۶۸	۲/۶۹	۲/۷۲	-۰/۴۶	۱/۴۷	-۰/۱۷
آلکالی گرانیت مشهد	۲/۶۳	۲/۶۵	۲/۶۸	۱/۲۶	۱/۸۷	-۰/۴۸
آمفیبولیت بیرجند	۳/۰۶	۳/۰۷	۳/۰۹	-۰/۳۵	-۰/۹۷	-۰/۱۲
ایگنمبریت نائین	۲/۶۳	۲/۶۴	۲/۶۸	۱/۴۸	۱/۸۷	-۰/۵۶
داسیت یزد	۲/۵۹	۲/۵۹	۲/۶۲	-۰/۹۶	۱/۵۳	-۰/۳۷
آلکالی گرانیت نایبندان	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۶۳	-۰/۹۱	۱/۹۰	-۰/۳۵
تراورتن ماکو	۲/۳۸	۲/۴۱	۲/۶۹	۳/۳۶	۱۱/۵۲	۱/۴۱
تراکیت سبزوار	۲/۴۵	۲/۴۹	۲/۶۲	۴/۱۵	۶/۴۹	۱/۶۹
تراورتن محلات	۲/۴۱	۲/۴۴	۲/۶۸	۲/۹۳	۱۰/۰۷	۱/۲۲



شکل ۲- نمودار ستونی دانسیته خشک، دانسیته اشباع و وزن مخصوص (Gs) نمونه‌ها.



شکل ۳- نمودار ستونی تخلخل مؤثر، تخلخل کل و جذب آب نمونه‌ها.

استاندارد ISRM (۱۹۸۱) استفاده شده است. نتایج آزمایشات فوق در جدول ۳ و شکل ۴ ارائه شده است. لازم به یادآوری است بر روی هر کدام از نمونه‌ها ۵ آزمایش در حالت اشباع انجام شده و نتایج ارائه شده در این جدول میانگین مقادیر این آزمایشات هستند. با توجه به طبقه بندی سنگ‌ها بر اساس مقاومت فشاری تک محوری و

تخلخل خیلی پایین (کمتر از ۱ درصد) و پایین (۵-۱ درصد) قرار گرفته‌اند. (Bell 2000) (جدول ۲ و شکل‌های ۲ و ۳).

ویژگی‌های مهندسی

برای تعیین ویژگی‌های مهندسی شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P از روش

از هر ۵ چرخه مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P تعیین شد. هر چرخه آزمایش از ۱۲ ساعت قرار دادن نمونه‌های اشباع در فریزر با دمای 1 ± 20 - درجه سانتیگراد و به مدت ۱۲ ساعت در وان آب با دمای 2 ± 20 تشکیل شده است. شکل ۵ یک چرخه انجماد و ذوب آب را نشان می‌دهد. (شکل ۵) قبل از شروع چرخه های انجماد و ذوب آب، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در وان آب برای اشباع شدن قرار داده شدند و در بازه های زمانی ۱۲ ساعت با تکان دادن وان آب به خروج حباب های هوا از نمونه‌ها کمک شد. برای انجام آزمایش انجماد و ذوب آب از هر نوع سنگ ۶۰ نمونه با نسبت طول به قطر تقریباً ۵/۰ برای آزمایش های مقاومت کششی برزیلین و مقاومت بار نقطه‌ای و ۵ نمونه با نسبت طول به قطر تقریباً ۲ برای

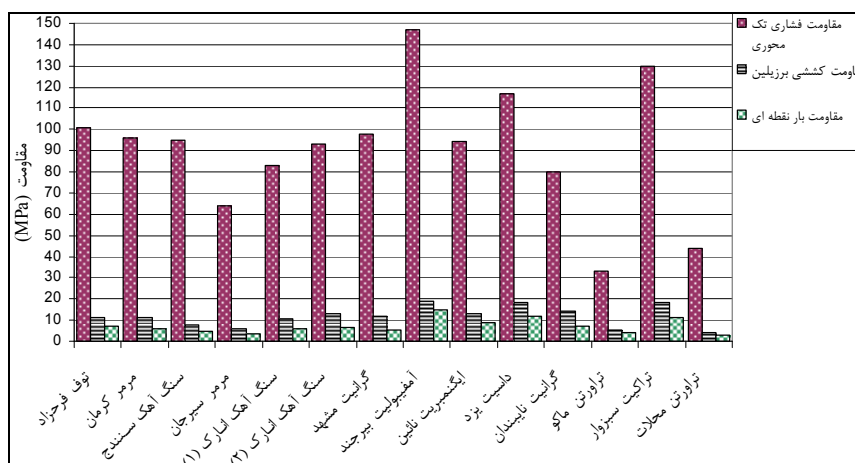
مقاومت بار نقطه‌ای توسط (1972) Franklin & Broch و (2000) Bel ، تمامی نمونه‌ها به جز تراورتن ماکو و تراورتن محلات در رده سنگ‌های با مقاومت خیلی بالا و شدیداً بالا قرار می‌گیرند. با توجه به طبقه بندی سنگ‌ها براساس سرعت موج P توسط (1979) Anon به (2000) Bell، توف فرحزاد در رده سنگ‌های با سرعت پایین (m/s 2500-3500)، تراورتن ماکو و تراورتن محلات در رده سنگ‌های با سرعت بالا (m/s 4000-5000) و سایر نمونه‌ها در رده سنگ‌های با سرعت خیلی بالا (بیش از m/s 5000) قرار می‌گیرند (جدول ۳ و شکل ۴).

انجماد و ذوب آب

در این تحقیق آزمایش انجماد و ذوب آب تا ۳۰ چرخه انجام شد و بعد

جدول ۳- نتایج آزمون تعیین ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها.

نام زمین‌شناسی	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	مقاومت کششی برزیلین (MPa)	مقاومت بار نقطه‌ای (MPa) I_{500}	سرعت موج P
توف فرحزاد	۱۰۱	۱۱/۲	۷/۲	۳۷۲۰
مرمر کرمان	۹۶	۱۱/۳	۵/۷	۵۵۱۳
سنگ آهک سنندج	۹۵	۷/۸	۵/۱	۵۹۲۱
مرمر سیرجان	۶۴	۵/۸	۳/۳	۵۲۱۰
سنگ آهک اتارک (۱)	۸۳	۱۰/۵	۵/۷	۶۱۲۰
سنگ آهک اتارک (۲)	۹۳	۱۲/۹	۶/۴	۶۰۶۰
آلکالی گرانیت مشهد	۹۸	۱۲/۱	۵/۱	۵۶۶۱
آمفیبولیت بیرجند	۱۴۷	۱۹/۲	۱۴/۹	۶۶۱۰
ایگنمیریت نائین	۹۴	۱۲/۹	۸/۹	۵۴۲۰
داسیت یزد	۱۱۷	۱۸/۴	۱۲	۵۷۲۱
آلکالی گرانیت نایبندان	۸۰	۱۴/۵	۷	۵۷۴۸
تراورتن ماکو	۳۳	۵/۲	۴/۳	۴۷۵۰
تراکیت سبزواری	۱۳۰	۱۸/۳	۱۱/۲	۵۳۹۰
تراورتن محلات	۴۴	۴/۱	۲/۷	۴۹۵۰

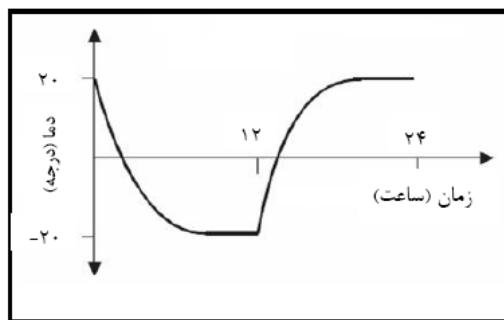


شکل ۴- نمودار ستونی ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها.

تغییرات ویژگی‌های مهندسی در چرخه های انجماد و ذوب آب در شکل های ۶ تا ۱۲ تغییرات مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P نمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه های انجماد و ذوب آب آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد چرخه ها مقادیر هر یک از این ویژگی‌ها کاهش پیدا کرده است.

آزمایش سرعت موج P تهیه شد و آزمایش ها مطابق استاندارد (۱۹۸۱) ISRM انجام شد. در جدول ۴ مقادیر مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P در چرخه صفر (حالت بکر)، چرخه ۳۰ و درصد کاهش هر یک از این ویژگی‌ها در چرخه ۳۰ نسبت به چرخه صفر (حالت بکر) ارائه شده است (جدول ۴).

دهد که باعث ایجاد فشار در داخل حفرات و ریز ترک های نمونه‌ها می‌شود، در نتیجه موجب بزرگتر شدن اندازه حفرات و ریز ترک ها و توسعه بیشتر آنها و تخریب بافت سنگ می‌شود. با بزرگتر شدن اندازه حفرات و ریز ترک ها، نمونه‌ها ضعیف تر و سست تر می‌شوند و باعث کاهش هر یک از این ویژگی‌ها می‌شوند. نتایج به دست آمده از سرعت موج P به دلیل غیر مخرب بودن و یکنواخت بودن اعمال انرژی در طی انجام آزمایش تعیین سرعت موج P، ارزیابی دقیق تر و بهتری از تغییرات ویژگی‌های نمونه‌ها، نسبت به مقاومت کششی برزیلین و مقاومت بار نقطه‌ای می‌دهد. از این رو می‌توان با توجه به تغییرات

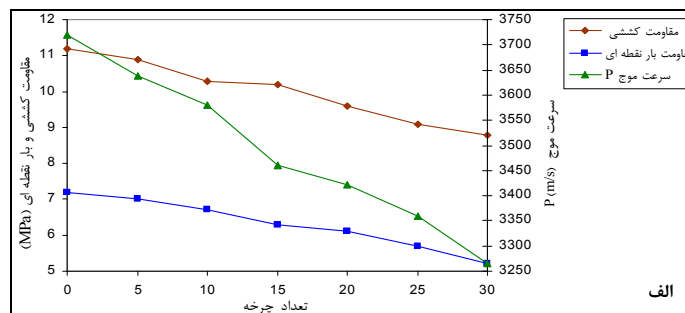
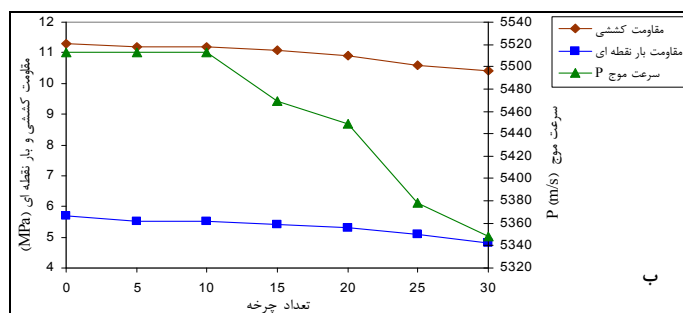


شکل ۵- یک چرخه انجماد و ذوب آب (Mutlutar et al. 2004)

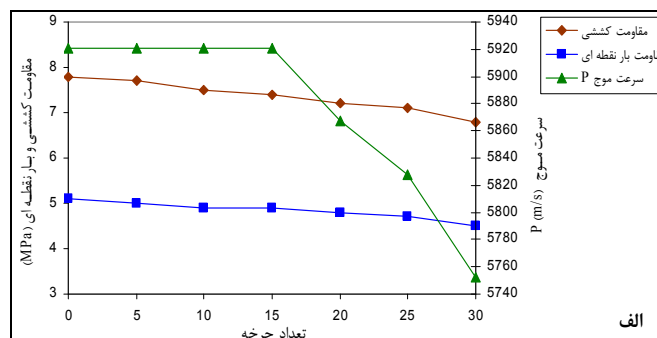
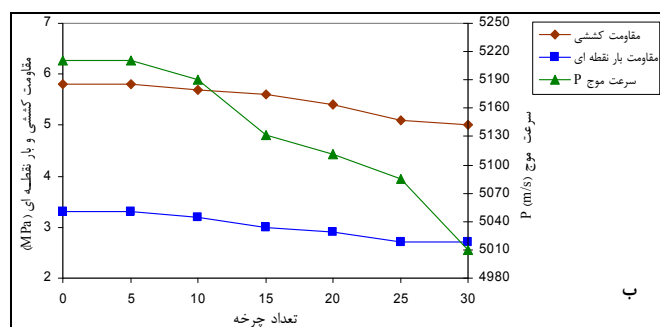
در واقع با تبدیل شدن آب به یخ حدود ۹ درصد افزایش حجم رخ می‌دهد.

جدول ۴- ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها در چرخه صفر (بکر)، چرخه ۳۰ و درصد کاهش در چرخه صفر (بکر) در آزمایش انجماد و ذوب آب.

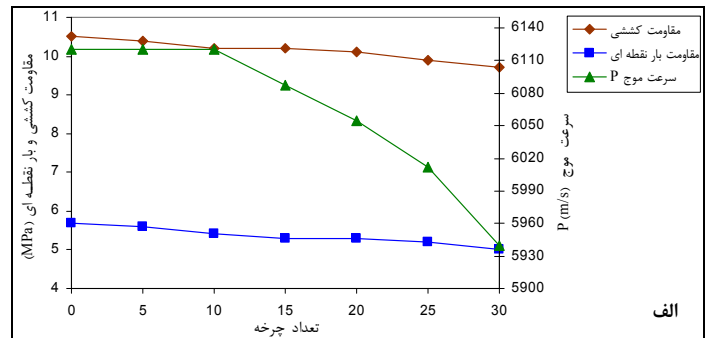
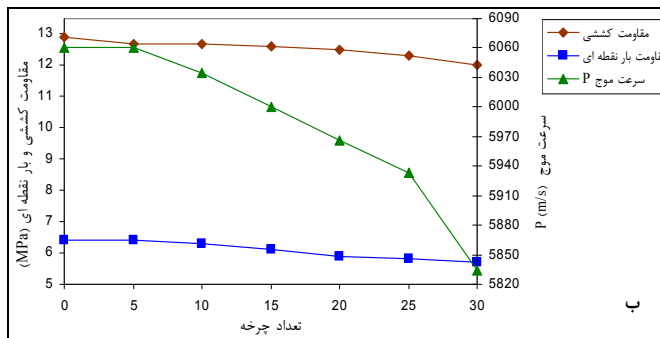
سرعت موج P (m/s)		مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)			مقاومت کششی برزیلین (MPa)			ویژگی مهندسی	
درصد کاهش	چرخه ۳۰	چرخه صفر	چرخه ۳۰	چرخه صفر	درصد کاهش	چرخه ۳۰	چرخه صفر		
۱۲/۲	۳۲۶۵	۳۷۲۰	۲۷/۸	۵/۲	۲۱/۴	۸/۸	۱۱/۲	توف فرحزاد	
۳	۵۳۴۸	۵۵۱۳	۱۵/۸	۴/۸	۵/۷	۸	۱۰/۴	۱۱/۳	مرمر کرمان
۲/۹	۵۷۵۲	۵۹۲۱	۱۱/۸	۴/۵	۵/۱	۱۲/۸	۶/۸	۷/۸	سنگ آهک سندنج
۳/۸	۵۰۱۰	۵۲۱۰	۱۸/۲	۲/۷	۳/۳	۱۳/۸	۵	۵/۸	مرمر سیرجان
۳	۵۹۳۹	۶۱۲۰	۱۲/۳	۵	۵/۷	۷/۶	۹/۷	۱۰/۵	سنگ آهک انارک (۱)
۳/۷	۵۸۳۴	۶۰۶۰	۱۰/۹	۵/۷	۶/۴	۷	۱۲	۱۲/۹	سنگ آهک انارک (۲)
۹/۱	۵۱۴۶	۵۶۶۱	۲۱/۶	۴	۵/۱	۱۶/۵	۱۰/۱	۱۲/۱	آلکالی گرانتیت نایبند
۴/۳	۶۲۳۹	۶۶۱۰	۵/۴	۱۴/۱	۱۴/۹	۴/۲	۱۸/۴	۱۹/۲	امفیبولیت بیرجند
۶/۵	۵۰۶۸	۵۲۳۰	۱۹/۱	۷/۲	۸/۹	۱۵/۵	۱۰/۹	۱۲/۹	ایگنمبریت نائین
۲/۹	۵۵۵۶	۵۷۲۱	۵/۸	۱۱/۳	۱۲	۲/۳	۱۷/۸	۱۸/۴	داسیت یزد
۳/۱	۵۵۷۱	۵۷۴۸	۸/۶	۶/۴	۷	۴/۱	۱۳/۹	۱۴/۵	آلکالی گرانتیت نایبندان
۱۰/۶	۴۲۴۵	۴۷۵۰	۴۶/۵	۲/۳	۴/۳	۵۱/۹	۲/۵	۵/۲	تراورتن ماکو
۷/۳	۴۹۹۴	۵۳۹۰	۱۹/۶	۹	۱۱/۲	۱۶/۴	۱۵/۳	۱۸/۳	تراکیت سیزوار
۱۱/۱	۴۴۰۰	۴۹۵۰	۴۴/۴	۱/۵	۲/۷	۳۶/۶	۲/۶	۴/۱	تراورتن محلات



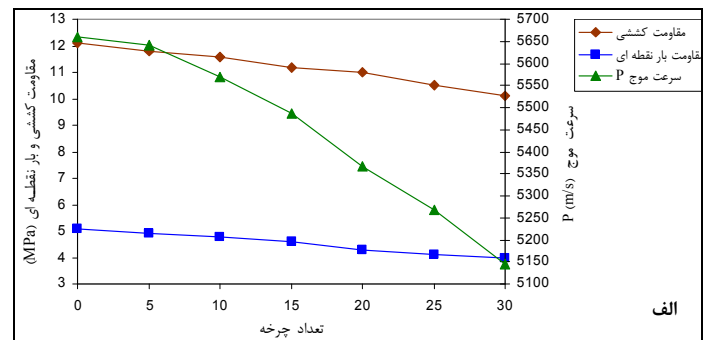
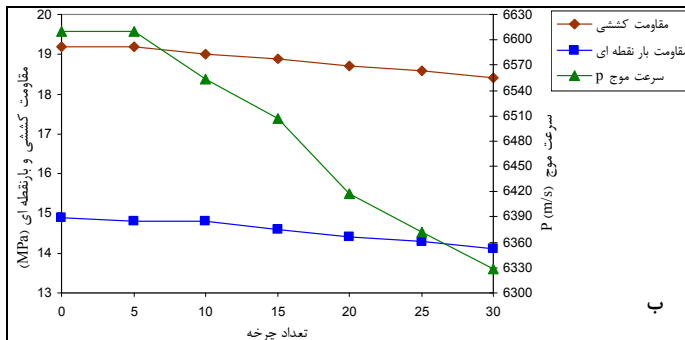
شکل ۶- تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه های انجماد و ذوب آب الف توف فرحزاد ب مرمر کرمان.



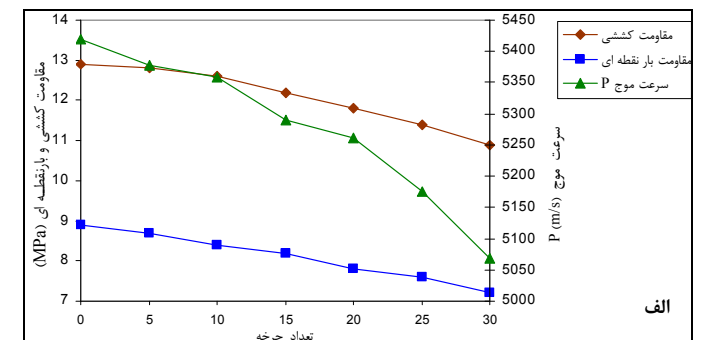
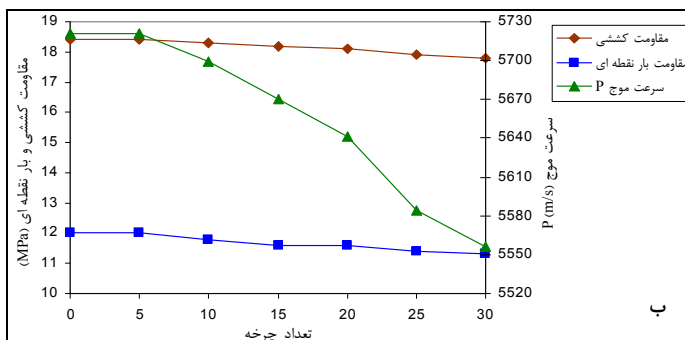
شکل ۷- تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد و ذوب آب الف- سنگ آهک سندنج ب- مرمر سیرجان.



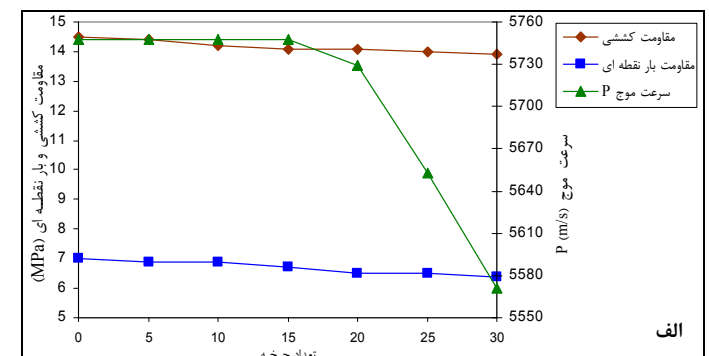
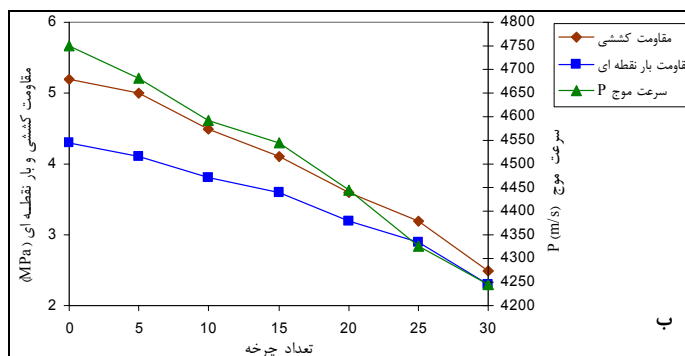
شکل ۸- تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه های انجماد و ذوب آب الف- سنگ آهک انارک (۱) - ب- سنگ آهک انارک (۲).



شکل ۹- تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه های انجماد و ذوب آب الف- آلکالی گرانیث مشهد ب- آمفیبولیت بیرجند.



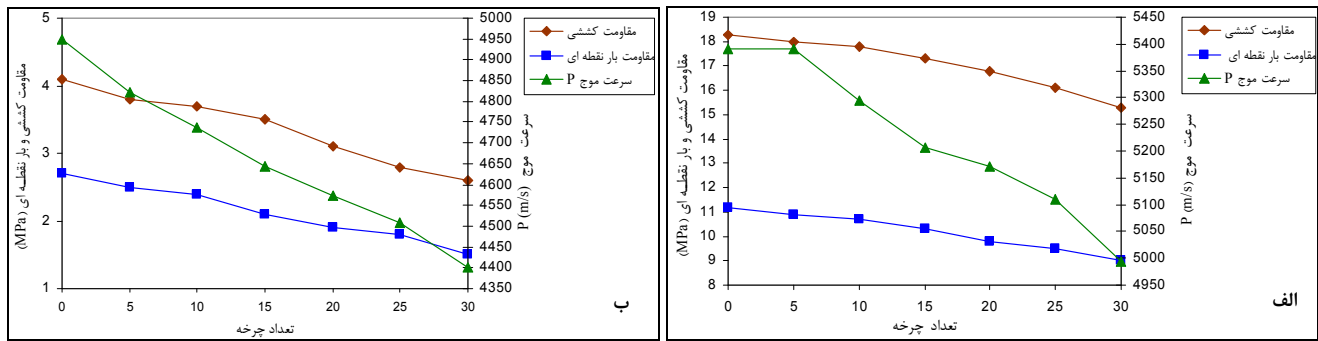
شکل ۱۰- تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه های انجماد و ذوب آب الف- ایگنریت نائین ب- داسپت بزد.



شکل ۱۱- تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه های انجماد و ذوب آب الف- آلکالی گرانیث نایبندان ب- تراورتن ماکو.

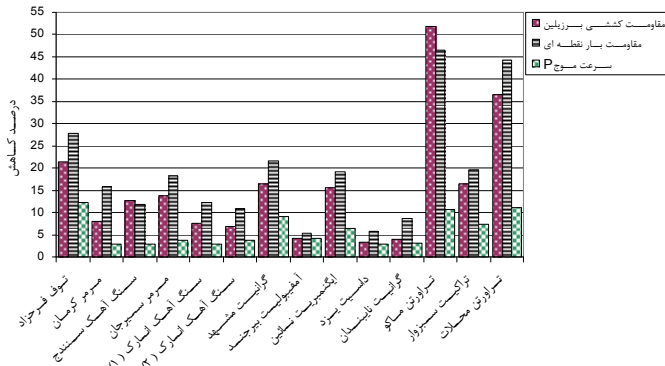
در آزمایش انجماد و ذوب آب استفاده کرد (شکل‌ای ۶ تا ۱۲). Yavuz *et al.* (2006) ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های کربناته شامل

سرعت موج P به عنوان پارامتری برای تغییرات سایر ویژگی‌های هندسی نمونه‌ها مانند مقاومت کششی برزیلین و مقاومت بار نقطه‌ای



شکل ۱۲- تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها با افزایش تعداد چرخه های انجماد و ذوب آب الف- تراکیت سبزوار ب- تراورتن محلات.

داسیت یزد به ترتیب با ۵/۴ و ۵/۸ درصد است. با توجه به شکل ۱۳ و جدول ۴ کاهش سرعت موج P نمونه‌ها از ۲/۹ تا ۱۲/۲ درصد تغییر می‌کند. بیشترین کاهش سرعت موج P مربوط به توف فرحزاد با ۱۲/۲ درصد و کمترین مربوط به داسیت یزد و آمفیبولیت بیرجند به ترتیب با ۲/۹ و ۳/۱ درصد است. بر اساس درصد کاهش ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها در چرخه های انجماد و ذوب آب، داسیت یزد، آمفیبولیت بیرجند و آلکالی گرانی نایبندان مناسبترین سنگ‌ها برای استفاده در مناطقی با احتمال یخبندان بالا مانند تبریز، اردبیل، همدان، مشهد و همچنین سایر مناطقی از ایران که احتمال یخبندان وجود دارد هستند.



شکل ۱۳- نمودار ستونی درصد کاهش ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها در چرخه ۳۰ نسبت به چرخه صفر.

رابطه تخلخل مؤثر با تغییرات ویژگی‌های مهندسی در چرخه های انجماد و ذوب آب

از آنجایی که تخلخل مؤثر نقش مهمی در عمل انجماد و ذوب آب دارد در این بخش از تحقیق به بررسی رابطه بین تخلخل مؤثر با تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها پرداخته شده است. برای به دست آوردن تخلخل مؤثر (ne)، ابتدا جرم خشک نمونه‌ها (md) اندازه‌گیری شد. در ادامه جرم اشباع نمونه‌ها (msat) بعد از ۷۲ ساعت اشباع شدن در آب و سپس جرم غوطه ور نمونه‌ها (msub) با استفاده از قانون ارشمیدوس اندازه‌گیری شد. در پایان با استفاده از رابطه $ne = (msub - md) / (msat - md)$

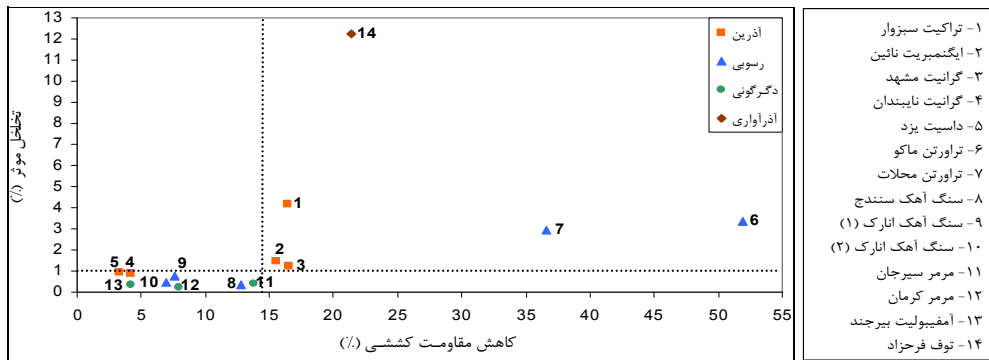
سرعت موج P، مقاومت فشاری تک محوری و سختی چکش اشمیت را تا ۲۰ چرخه انجماد و ذوب آب مورد بررسی قرار دادند. نتایج این محققین نیز نشان داد که با افزایش چرخه های انجماد و ذوب آب مقادیر هر یک از این ویژگی‌ها کاهش پیدا می‌کند. نتایج تحقیقات (Ruedrich & Siegesmund 2007) روی ماسه سنگ‌ها نیز نشان داد که با افزایش تعداد چرخه های انجماد و ذوب آب تا ۱۰۵ چرخه، سرعت موج P کاهش پیدا می‌کند. بررسی ویژگی‌های مهندسی نمونه‌هایی از توف شامل سرعت موج P و S و مقاومت فشاری تک محوری تا ۵۲ چرخه انجماد و ذوب آب توسط Topal & Doyuran (1998) نشان داد که مقادیر هر یک از این ویژگی‌ها، با افزایش چرخه های آزمایش کاهش پیدا می‌کند. نتایج بررسی مقاومت فشاری تک محوری سنگ آهک تا ۲۵ چرخه انجماد و ذوب آب توسط Turgut et al. (2008) نیز نشان داد که با افزایش چرخه ها مقدار این ویژگی کاهش پیدا می‌کند.

شکل ۱۳ مقادیر درصد کاهش مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P نمونه‌ها در چرخه ۳۰ نسبت به چرخه صفر (حالت بکر) را نشان می‌دهند. همان طور که از این شکل مشاهده می‌شود مقدار کاهش این ویژگی‌ها برای هر نمونه با نمونه دیگر متفاوت است. این موضوع به دلیل متفاوت بودن منشاء سنگ، ترکیب کانی‌شناسی، انبساط و انقباض کانی‌ها در برابر تغییرات دما، تخلخل، اندازه و شکل حفرات، پیوستگی حفرات با همدیگر و توزیع اندازه حفرات نمونه‌ها با همدیگر است. با توجه به شکل ۱۳ و جدول ۴ کاهش مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها از ۳/۳ تا ۵۱/۹ درصد تغییر می‌کند. بیشترین کاهش مقاومت کششی مربوط به تراورتن ماکو و تراورتن محلات به ترتیب با ۵۱/۹ و ۳۶/۶ درصد و کمترین مربوط به داسیت یزد به ترتیب با ۳/۳ درصد است (شکل ۱۳).

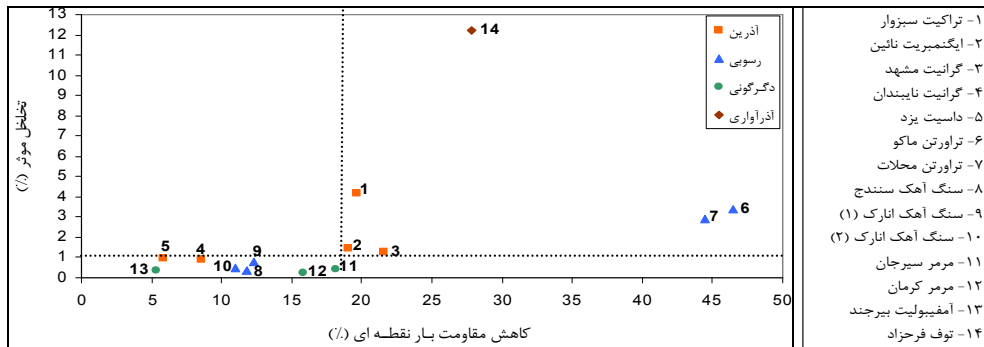
همانطور که از شکل ۱۳ و جدول ۴ مشاهده می‌شود کاهش مقاومت بار نقطه‌ای نمونه‌ها از ۵/۴ تا ۴۶/۵ درصد تغییر می‌کند. بیشترین کاهش مقاومت بار نقطه‌ای مربوط به تراورتن ماکو و تراورتن محلات به ترتیب با ۴۶/۵ و ۴۴/۴ درصد و کمترین مربوط به آمفیبولیت بیرجند و

برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P بوده اند دارای ترکیب کانی‌شناسی و منشاء‌های متفاوتی هستند. این موضوع نشان می‌دهد تخلخل مؤثر نقش مهمتری نسبت به ترکیب کانی‌شناسی و منشاء سنگ در تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها در اثر عمل انجماد و ذوب آب دارد. در بین نمونه‌های رسوبی بیشترین کاهش در ویژگی‌های مهندسی در تراورتن محلات و تراورتن ماکو رخ داده است. با توجه به ترکیب کانی‌شناسی و منشاء مشابه نمونه‌های رسوبی مورد مطالعه، بیشتر بودن کاهش در ویژگی‌های مهندسی تراورتن محلات و تراورتن ماکو به دلیل بیشتر بودن تخلخل مؤثر آنها و در نتیجه تسهیل کردن نفوذ آب به درون سنگ و نهایتاً باعث اعمال تنش بیشتر به حفرات و ریز ترک های سنگ است. (شکل‌های ۱۴ تا ۱۶).

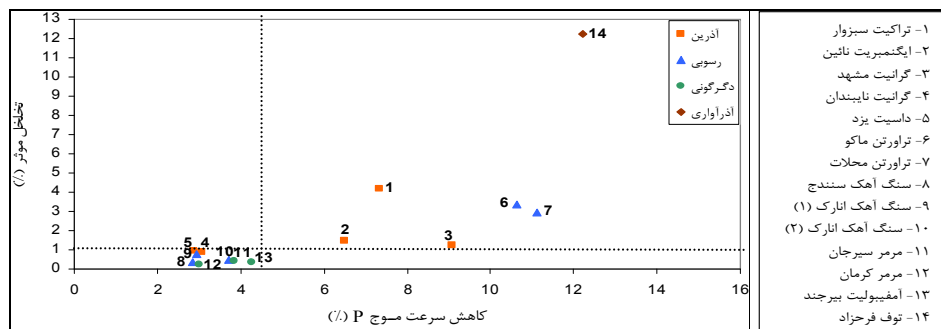
(msat)، مقدار تخلخل مؤثر برای هر نمونه اندازه گیری شد. در شکل های ۱۴ تا ۱۶ نمودار تخلخل مؤثر در مقابل کاهش ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها در چرخه ۳۰ نسبت به چرخه صفر (حالت بکر) آورده شده است. همان طور که از این شکل ها مشاهده می شود نمونه‌های با تخلخل مؤثر بالاتر از ۱ درصد، کاهش بیشتری در مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P آنها رخ داده است. با توجه به این که رابطه مستقیمی بین تخلخل مؤثر و جذب آب وجود دارد، در اثر انجماد و ذوب آب نمونه‌هایی که جذب آب بیشتری دارند فشار بیشتری به حفرات و ریز ترک های آنها اعمال می شود در نتیجه مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P کاهش بیشتری خواهند داشت. همچنین مشاهده می‌شود نمونه‌هایی که دارای بیشترین کاهش در مقاومت کششی



شکل ۱۴- نمودار درصد کاهش مقاومت کششی نمونه‌ها در چرخه ۳۰ نسبت به چرخه صفر در مقابل تخلخل مؤثر.



شکل ۱۵- نمودار درصد کاهش مقاومت بار نقطه‌ای نمونه‌ها در چرخه ۳۰ نسبت به چرخه صفر در مقابل تخلخل مؤثر



شکل ۱۶- نمودار درصد کاهش سرعت موج P نمونه‌ها در چرخه ۳۰ نسبت به چرخه صفر در مقابل تخلخل مؤثر.

نتیجه گیری

۳- با توجه به نتایج به دست آمده از چرخه های انجماد و ذوب آب و تخلخل مؤثر نمونه‌ها، نمونه‌هایی که تخلخل مؤثر بالاتر از ۱ درصد داشته اند، کاهش بیشتری در مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P آنها رخ داده است. با توجه به این که رابطه مستقیمی بین تخلخل مؤثر و جذب آب وجود دارد. در اثر انجماد و ذوب آب نمونه‌هایی که جذب آب بیشتری دارند فشار بیشتری به حفرات و ریزترک های آنها اعمال می شود در نتیجه مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P کاهش بیشتری خواهند داشت.

۴- نمونه‌هایی که دارای بیشترین کاهش در مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P بوده اند دارای ترکیب کانی‌شناسی و منشاءهای متفاوتی هستند. این موضوع نشان می دهد تخلخل مؤثر نقش مهمتری نسبت به ترکیب کانی‌شناسی و منشاء سنگ در تغییرات ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها در اثر عمل انجماد و ذوب آب دارد.

۵- با توجه به کاهش مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P نمونه‌ها در آزمایش انجماد و ذوب آب، داسیت یزد، آمفیبولیت بیرجند و آلکالی گرانیات نایبندان مناسبترین سنگ‌ها برای استفاده در مناطقی مانند تبریز، اردبیل، همدان، مشهد و سایر مناطقی که احتمال یخبندان وجود دارد، هستند.

تشکر و قدردانی

در پایان از مسئولین آزمایشگاه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به خاطر همکاری در طول انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌کنیم.

در تحقیق حاضر به بررسی ویژگی های مهندسی (مقاومت کششی برزیلین، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج P) نمونه سنگ ساختمانی مختلف در چرخه های انجماد و ذوب آب پرداخته شد. نتایج نشان داد با افزایش چرخه های انجماد و ذوب آب مقادیر هر یک از این ویژگی ها کاهش پیدا کرده است. همچنین نتایج نشان داد تخلخل مؤثر نقش مهمی در تغییرات ویژگی های مهندسی نمونه‌ها در چرخه های انجماد و ذوب آب دارد. در تحقیق حاضر، نتایج زیر حاصل شد:

۱- با توجه به نتایج آزمایش انجماد و ذوب آب، کاهش مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها بین $\frac{3}{3}$ تا $\frac{51}{9}$ درصد، مقاومت بار نقطه‌ای بین $\frac{5}{4}$ تا $\frac{46}{5}$ درصد و سرعت موج P بین $\frac{2}{9}$ تا $\frac{12}{2}$ درصد در چرخه ۳۰ نسبت به چرخه صفر (حالت بکر) تغییر می کند. این موضوع به دلیل متفاوت بودن منشاء سنگ، ترکیب کانی‌شناسی، انبساط و انقباض کانی‌ها در برابر تغییرات دما، تخلخل، اندازه و شکل حفرات، پیوستگی حفرات با همدیگر و توزیع اندازه حفرات نمونه‌ها با همدیگر است.

۲- نتایج به دست آمده از سرعت موج P به دلیل غیر مخرب بودن و یکنواخت بودن اعمال انرژی در طی انجام آزمایش تعیین سرعت موج P، ارزیابی دقیق تر و بهتری از تغییرات ویژگی‌های نمونه‌ها، نسبت به مقاومت کششی برزیلین و مقاومت بار نقطه‌ای می دهد. از این رو می توان با توجه به تغییرات سرعت موج P به عنوان پارامتری برای تغییرات سایر ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها مانند مقاومت کششی برزیلین و مقاومت بار نقطه‌ای در آزمایش انجماد و ذوب آب استفاده کرد.

منابع:

- Bell F.G. 2000: Engineering Properties of Soils and Rocks. Blackwell Science. 482 p.
 Bell F.G. 2004: Engineering Geology and Construction. Spon Press. 797 p.
 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 Sci Technol.* **38**: 127-136.
 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.* **53**: 273-287.
 I.S.R.M. Rock characterization, Testing and Monitoring 1981: In: Brown ET. editor. ISRM suggested methods. Oxford: Pergamon Press; 211p.
 Hale P.A., Shakoar 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. *Environ Eng Geosci.* **9**: 117-130.
 Mutluturk M., Altıdag R., Turk G. 2004: A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling. *Int J Rock Mech & Min Sci.* **41**: 237-244.
 Ruedrich J., Siegesmund S. 2007: Salt and ice crystallization in porous sandstones. *Environ Geol.* **52**: 225-249.
 Topal T., Doyuran V. 1998: Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey. *Environ Geol.* **34(1)**: 5-20 .
 Turgut P., Yesilnacar M., Bulut H. 2008: Physico-thermal and mechanical properties of Sanliurfa limestone, Turkey. *Bull Eng Geol Environ.* **67**: 485-490.
 Winkler E. M. 1994: Stone in architecture, properties, durability. Springer-Verlag. 313p.
 Yavuz H., Altıdag R., Sarac S., Ugur I., Sengun N. 2006: Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to

freeze-thaw and thermal shock weathering. *Int J Rock Mech & Min Sci.* **43**: 767-775.