ارزیابی اثر هوازدگی نمک و ذوب- انجماد بر مقاومت و دوام پذیری ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی

محمد حسین قبادی*، رضابابازاده؛ دانشگاه بوعلی سینا

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۸/۱ پذیرش ۹۳/٤/۷

چکیده

مقاومت و دوام‌پذیری ماسه‌سنگ‌ها و میزان تأثیرپذیری آن‌ها از شرایط طبیعی مهم‌ترین عواملی هستند که هنگام استفاده به‌عنوان سنگ‌های ساختمانی باید به آن توجه شود. در این پژوهش، اثر پدیدهٔ ذوب-انجماد و فرایند تبلور نمک بر مقاومت و دوام‌پذیری ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی در جنوب استان قزوین (محدودهٔ آوج-آبگرم) بررسی شد. تعداد ۹ نمونه ماسه سنگ (مشخص شده با حروف A، B، C، CG، S، S1، Tr، Min و Sh) از بخش‌های مختلف منطقهٔ مذکور جمع‌آوری شده و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها بررسی شد. به‌منظور ارزیابی اثر پدیدهٔ ذوب- انجماد بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگی، آزمایش ذوب- انجماد طی ٦۰ دور انجام شده است. هم‌چنین برای بررسی اثر پدیدهٔ تبلور نمک بر مقاومت ماسه سنگ‌ها، آزمایش تبلور سولفات سدیم (محلول اشباع ۱۰۰٪ وزنی Na_2SO_4) نیز طی ۲۰ دور انجام گرفته است. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌های بررسی شده از قبیل افت وزنی، شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی و سرعت عبور موج (V_p) در دورهای مختلف تعیین شد. به‌منظور ارزیابی اثر فرایندهای ذوب- انجماد و تبلور سولفات‌سدیم بر دوام‌پذیری، آزمایش دوام‌پذیری بعد از فرایندهای مذکور روی نمونه‌های ماسه سنگی انجام شده و تغییرات شاخص دوام شکفتگی در ۱۵ دور بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل از این بررسی‌ها مشخص شد که تبلور نمک در مقایسه با ذوب- انجماد، به‌طور چشم‌گیری می‌تواند میزان مقاومت و دوام‌پذیری ماسه سنگ‌ها را کاهش داده و آن‌ها را تخریب

*نویسندهٔ مسئول amirghobadi@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

کند. هم‌چنین مشخص شد که می‌توان رفتار ماسه سنگ‌ها را طی چرخه‌های ذوب- انجماد و تبلور نمک براساس نتایج حاصل از آزمایش‌های شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی، تعیین سرعت عبور موج و افت وزنی پیش‌بینی کرد.

واژه‌های کلیدی: ماسه سنگ، سازند قرمز بالایی، ذوب- انجماد، هوازدگی نمک، دوام‌پذیری.

مقدمه

مهم‌ترین ویژگی سنگ ساختمانی برای استفاده به‌عنوان نما و کف ساختمان و سنگ‌فرش حفظ خصوصیات مقاومتی و ظاهری با توجه به شرایط محیطی است [۳٦]. خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و پتروگرافیکی مهم‌ترین عواملی هستند که هنگام انتخاب سنگ‌های ساختمانی برای موارد مذکور باید به آن توجه شود. تخریب سنگ تحت دورهای ذوب- انجماد مشکلی عمده در بسیاری از پروژه‌های مهندسی از قبیل جاده‌ها، راه‌آهن، مسیر لوله‌ها و مصالح ساختمانی در مناطق سردسیر است [۱۳]، [۳۹]. بعضی از خصوصیات مهندسی سنگ‌ها از قبیل مقاومت، تغییر شکل‌پذیری و نفوذپذیری به‌طور شدیدی تحت تأثیر این پدیده قرار می‌گیرند [٤]، [۷]، [۲۰]، [۲۵]، [۳۱]. مقاومت مکانیکی (مقاومت فشاری تک‌محوری) سنگ‌ها یکی از عوامل مهمی است که قابلیت استفادهٔ آن‌ها را در مناطق سرد تحت تأثیر قرار می‌دهد.

سنگ‌های ساختمانی استفاده شده در مناطق سردسیر در هر سال، حداقل در معرض یک دور ذوب- انجماد قرار می‌گیرند. طی دورهٔ انجماد، سنگ یخ‌زده و آب موجود در حفرات ریزسنگ در حدود ۹٪ حجم اولیه خود انبساط پیدا می‌کند. چنین افزایش حجمی می‌تواند تنش‌های کششی را ایجاد کند و در نهایت منجر به تخریب سنگ شود. زمانی که سنگ در معرض فرایند ذوب یخ قرار گیرد، آب از طریق ریزترک‌های ایجاد شده و حفرات ریز جریان می‌یابد که این فرایند نیز آسیب‌پذیری سنگ را افزایش می‌دهد. میزان تخریب سنگ در مناطق سردسیر، نتیجه‌ای از تعداد سیکل‌های ذوب- انجماد، دما، نوع سنگ، تنش وارده و میزان رطوبت است [۸] ، [۲۹].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

محققان زیادی اثر ذوب- انجماد را بر مصالح مختلف و با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی بررسی کردند. بیش‌تر این بررسی‌ها به تعیین اثر پدیدهٔ ذوب- انجماد بر خصوصیات سنگ‌های ساختمانی از قبیل مقاومت، تراکم‌پذیری، تخلخل، توزیع اندازهٔ حفرات، نفوذپذیری و محتوای کانی‌شناسی پرداخته‌اند. چن و همکاران (۲۰۰٤) اثر درجهٔ اشباع آب بر توف‌های جوش‌خورده طی ذوب- انجماد را بررسی کردند و دریافتند که میزان تخریب سنگ زمانی که درجهٔ اشباع اولیهٔ سنگ بیش‌تر از ۷۰٪ باشد، به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. موتلوترک و همکاران (۲۰۰٤) مدلی ریاضی ارائه دادند که فرایند تخریب سنگ، زمانی که در معرض سیکل‌های ذوب- انجماد قرار می‌گیرد را توصیف می‌کند و این مدل چندین پارامتر معنی‌دار برای تخریب سنگ یا دوام‌پذیری ارائه می‌دهد.

یاووز و همکاران (۲۰۰٦)، نیز مدلی را توسعه دادند که خصوصیات شاخص سنگ را با استفاده از تحلیل‌های رگرسیونی پیش‌بینی کرده است. کاراکا و همکاران (۲۰۱۰) به‌طور تجربی مقادیر سایش[1] را قبل و پس از آزمایش ذوب- انجماد بررسی کردند. افراد مذکور، مدل‌های آماری برای مقادیر سایش قبل و بعد از ذوب- انجماد ارائه دادند. تان و همکاران (۲۰۱۱) افت خصوصیات مکانیکی گرانیت‌ها را به‌عنوان تابعی از سیکل‌های ذوب- انجماد با آزمایش‌های تک‌محوری و سه‌محوری بررسی کردند. علاوه بر پدیدهٔ ذوب- انجماد، تبلور نمک‌های محلول در داخل مصالح متخلخل نیز یکی دیگر از دلایل تخریب سنگ‌های ساختمانی در طبیعت است. هوازدگی نمک پدیده‌ای است که مقاومت و دوام انواع سنگ‌ها و مصالح ساخت بشر (آجر، ملات و بتن) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پدیده در تمام نقاط جهان از صحراهای سرد در قطب جنوب تا صحراهای گرم در آفریقا، مناطق ساحلی و محیط‌های شهری اتفاق می‌افتد [۱۲]، [۲٤]، [۳۸].

زمانی که آب از طریق شبکه‌ای از حفره‌ها به داخل یک سنگ راه پیدا می‌کند، ممکن است با خود مقادیری نمک به‌صورت محلول داشته باشد. مکانیسم‌های متعددی می‌توانند باعث رشد بلور در داخل سنگ شوند. برای مثال، سرد شدن طی شب می‌تواند باعث تبلور نمک‌هایی شود که با افزایش دما انحلال‌پذیری زیادتری نشان می‌دهند [۳۲]. در حالت بسیار

1. Bohme and wide-wheel

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

معمول، تبخیر ممکن است باعث تبلور نمک شود [۹]. زمانی که چنین پدیده‌ای روی می‌دهد، محلول‌های نمکی فوق‌اشباع ممکن است با حجم زیادی رسوب کنند [۱٤]. مکانیسم‌های متعددی برای توضیح چگونگی اثرگذاری نمک‌های قابل حل بر مصالح متخلخل پیشنهاد شده است. این مکانیسم‌ها شامل فشار تبلور، فشار هیدراسیون، انبساط گرمایی، فشار اسمزی و هوازدگی شیمیایی است [۲٤]. از میان عوامل ذکر شده، فشار تبلور مهم‌ترین عامل است و نقش مؤثری در تخریب سنگ دارد [۹]، [۲٤]، [۲٦] و [۲۷].

رشد بلور در فضایی محدود (حفره) فشاری را ایجاد می‌کند که از مقاومت بسیاری از مصالح مانند سنگ‌های ساختمانی، آجر و... فراتر رفته و باعث تخریب آن‌ها شود [۱۹]، [۳۸]. در حالت کلی چنین پذیرفته شده است که آسیب وارده به سنگ‌های متخلخل از چرخه‌های متناوب تبلور و انحلال نمک‌های قابل حل موجود در حفرات آن‌ها ناشی می‌شود [۹]. این فرایندها می‌توانند هم تخلخل و هم توزیع اندازهٔ حفره‌های سنگ‌ها را تغییر داده و به‌تبع آن خصوصیات مکانیکی آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهند [۱۰]. هدف اصلی این مقاله بررسی اثر چرخه‌های ذوب- انجماد و تبلور سولفات‌سدیم بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و هم‌چنین دوام‌پذیری ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی است. برای این منظور تعداد ۹ نمونهٔ ماسه سنگ (مشخص شده با حروف A، B، C، CG، S، S1، Tr، Min و Sh) از بخش‌های مختلف سازند قرمز بالایی در منطقهٔ واقع در محدودهٔ آوج- آبگرم انتخاب شده و آزمایش‌های ذوب- انجماد در ٦۰ سیکل، تبلور سولفات سدیم در ۲۰ سیکل و آزمایش دوام‌پذیری در ۱۵ سیکل انجام شد. به‌منظور ارزیابی اثر سیکل‌های آزمایش‌های مذکور، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها از قبیل افت وزنی، شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی، سرعت عبور موج و تعیین شود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور انجام این پژوهش، تعداد ۹ نوع ماسه سنگ از بخش‌های مختلف سازند قرمز بالایی در محدودهٔ آوج-آبگرم (جنوب غرب استان قزوین) برداشت شده و به آزمایشگاه منتقل شده است. نمونه‌برداری براساس تغییر لیتولوژی انجام گرفته شد و در حین نمونه‌برداری سعی شد تا از انتخاب نمونه‌های هوازده و خرد شده پرهیز شود. ترکیب کانی‌شناسی و خصوصیات

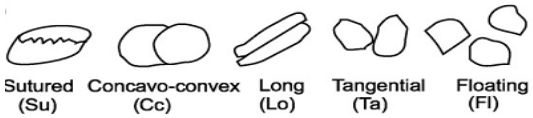
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

بافتی با استفاده از میکروسکوپ نوری تعیین شد. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها از قبیل وزن واحد حجم خشک، اشباع، تخلخل مؤثر، جذب آب، سرعت عبور موج در حالت خشک و اشباع، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای و هم‌چنین شاخص دوام‌پذیری طی ۱۵ سیکل در حالت‌های استاندارد، ذوب- انجماد و تبلور سولفات سدیم تعیین شد.

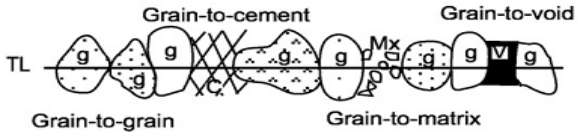
بررسی‌های سنگ‌شناسی

تعیین خصوصیات سنگ‌شناسی نه‌تنها می‌تواند به کسب اطلاعاتی در رابطه با ترکیب کانی‌شناسی و منشأ سنگ کمک کند، بلکه می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی دوام‌پذیری و مقاومت سنگ در مقابل عوامل هوازدگی استفاده می‌شود [۱۷]. به‌منظور تعیین خصوصیات کانی‌شناسی و بافتی نمونه‌های ماسه‌سنگی، مقاطع نازک از هر کدام از نمونه‌ها تهیه شده و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان بررسی شد. پس از تعیین ترکیب کانی‌شناسی دانه‌ها، مرزهای دانه‌ها مشخص شده و پارامترهای بافتی از قبیل نوع تماس دانه‌ها[1] و طبیعت تماس‌ها[2] تعیین شد (شکل ۱ و ۲). با تعیین خصوصیات بافتی مذکور، پارامترهایی از قبیل نسبت تماس‌های قوی به ضعیف[3] (SOWC) و فاکتور تحکیم (Pcc) مطابق با روابط ۱ و ۲ محاسبه شد. نتایج حاصل از بررسی‌های پتروگرافیکی در جدول ۱ آورده شده است.

(الف)



(ب)



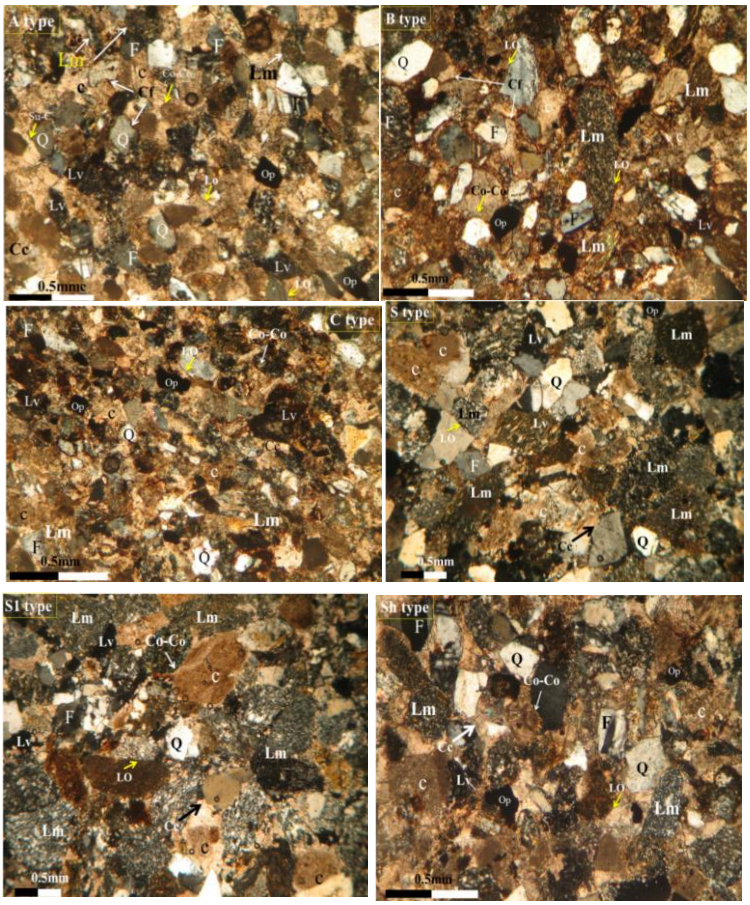
شکل ۱. شکل شماتیک نشان‌دهندهٔ تماس دانه‌ها در ماسه سنگ‌ها: الف) انواع تماس دانه‌ها (Su: تماس مضرس، Cc: تماس محدب- مقعر، Lo: تماس خطی، Ta: تماس مماسی، Fl: تماس شناور) (Taylor, 1950)، ب) طبیعت تماس‌ها: g- دانه، C: سیمان، Mx- ماتریکس، V- فضای خالی (G-C: تماس دانه با سیمان، G-V: تماس دانه با فضای خالی، G-G: تماس دانه با دانه، G-M: تماس دانه با ماتریکس)

1. Contact types 2. Contact nature 3. Strong contacts over weak contacts

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

$$SOWC = \frac{[Su + (G - C)]}{[Ta + Lo + (G - V) + (G - M)]} \quad (۱)$$

$$Pcc = \frac{(5.\%Su + 4.\%Cc + 3.\%Lo + 2.\%Ta + \%Fl)}{500}.100(\%) \quad (۲)$$



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی از مقاطع نازک ماسه سنگ‌های بررسی شده: (Q:کوارتز، F: فلدسپار، Cf: سیمان آهنی، Cc: سیمان کلسیتی، C: دانه‌های کلسیتی، Lm: خرده سنگ دگرگونی، Lv: خرده سنگ آتش‌فشانی، Op: کانی‌های کدر، Lo: تماس دانه‌ای از نوع خطی، Co-Co: تماس دانه‌ای از نوع محدب- مقعر، Su-c: تماس دانه‌ای از نوع مضرس)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

جدول ۱. خصوصیات کانی‌شناسی و بافتی ماسه سنگ‌ها

طبقه‌بندی ماسه سنگ‌ها فولک (۱۹۸۶)			(%) ترکیب نسبی									نمونه ماسه سنگ
			سیمان		قطعات خرده سنگی					فلدسپار	کوارتز	
	Pcc %	SOWC	اکسید آهن	کربناته	چرت	آذرین	آتش فشانی	دگرگونی	دانه های کلسیتی			
کالک لیتارنایت	۷۱/۴۴	۰/۴۵	-	۵	-	-	۱۲/۶	۵/۴	۵۳/۲	۴/۶	19.2	A
کالک لیتارنایت	۸۲/۶۵	۱/۸۴	۲	۱	-	-	۲۷/۵	۶/۴	۴۵/۱	۴/۲	۱۳/۸	B
کالک لیتارنایت	۸۱/۵۳	۱/۴۰	۱	۵/۵	-	-	۸/۵	۱۵/۵	۳۲	۸/۵	۲۹	C
کالک لیتارنایت	۷۱/۲۵	۰/۳۰	-	۳	۴	-	۱۱	۱۱	۶۰	۶	۵	CG
فیلارنایت	۵۸/۴۵	۰/۲۹	-	۱	-	۷	۸/۵	۵۳	۱۰	۵	۱۵/۵	S
فیلارنایت	۶۴/۶۱	۰/۱۳	-	۴/۵	۸	۲۴	۸/۵	۲۳/۵	۶	۶	۱۹/۵	S1
کالک لیتارنایت	۷۸/۷۵	۱/۰۰	-	۴/۵	-	-	۶/۵	۱۲	۵۵/۵	۴	۱۷/۵	Sh
کالک لیتارنایت	۶۳/۰۷	۰/۳۱	-	۱	-	-	۶/۵	۱۹/۵	۴۴/۵	۶/۵	۲۲	Tr
کالک لیتارنایت	۸۱/۴۳	۱/۶۰	-	۴/۵	-	-	۳/۵	۱۳	۶۱/۵	۳	۱۴/۵	Min

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌ها

در این بخش از بررسی‌ها، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌ها با استفاده از استانداردهای ASTM, C830 و ISRM, 2007 تعیین شد. خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها شامل وزن واحد حجم خشک و اشباع، اندازه‌گیری سرعت عبور موج در حالت خشک و اشباع، تخلخل مؤثر و جذب آب [۲۸] با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و مطابق با استاندارد ASTM (ASTM, 2000) تعیین شد. به‌منظور تعیین ویژگی‌های مذکور از نمونه‌های استوانه‌ای شکل استفاده شد. هم‌چنین خصوصیات مکانیکی شامل شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی بر روی نمونه‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۱–۰/۳ (برای آزمایش بار نقطه‌ای در حالت محوری) و نسبت طول به قطر ۰/۷۵–۰/۵ (برای آزمایش برزیلی) انجام شد. نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

آزمایش ذوب- انجماد

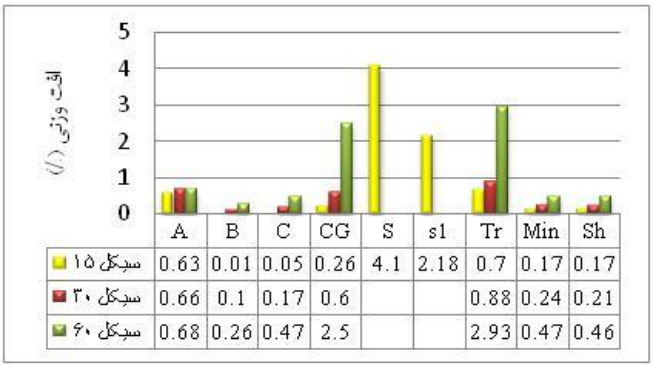
هدف اصلی از انجام آزمایش ذوب- انجماد، شبیه‌سازی شرایط طبیعی و ایجاد تنش‌هایی است که ممکن است در داخل سنگ و در اثر تبدیل آب به یخ ایجاد شوند. این اثرات معمولاً همراه با تغییرات دمایی در محدودهٔ زیر صفر و بالای صفر و در نمونه‌های حاوی مقدار مشخصی آب روی می‌دهند [۲۲]. به‌منظور انجام آزمایش ذوب- انجماد در این پژوهش، ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

ماسه سنگ برای اشباع شدن، به‌مدت ٢٤ ساعت در داخل آب غوطه ور شدند. پس از اشباع کامل، نمونه‌ها به‌مدت ۱۲ ساعت داخل فریزری با دمای ۲۰- قرار داده شده و پس از انجماد کامل، به مدت ٦ ساعت به نمونه‌ها اجازه داده شد تا در دمای ۲۰ درجه ذوب شوند. یک چرخهٔ ذوب-انجماد در این بررسی ۱۸ ساعت به‌طول انجامید و در نهایت ٦۰ دور از آزمایش مذکور روی نمونه‌های ماسه سنگی انجام گرفت. به‌منظور بررسی اثر ذوب- انجماد بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌های بررسی شده پارامترهایی از قبیل درصد افت وزنی (وزن اولیهٔ نمونه‌ها- وزن نمونه‌ها پس از سیکل معینی از آزمایش/ وزن اولیهٔ نمونه‌ها ۱۰۰×)، درصد افت سرعت عبور موج و هم‌چنین مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای در انتهای دورهای ۱۵، ۳۰ و ٦۰ تعیین شدند. در شکل ۳ تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی با چرخه‌های آزمایش ذوب-انجماد نشان داده شده است.

جدول ۲: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌های بررسی شده

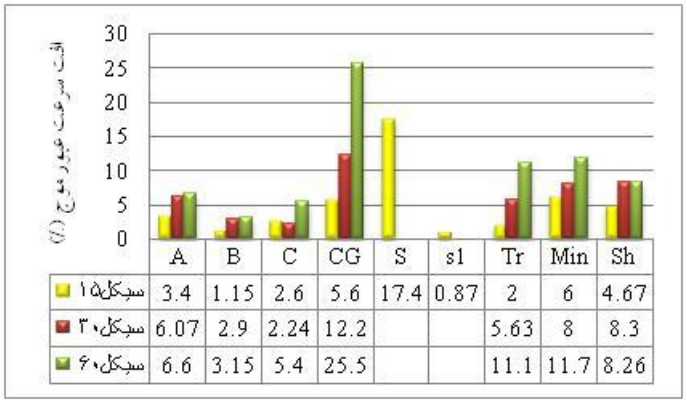
نام ماسه سنگ	تخلخل مؤثر (٪)	وزن واحد حجم خشک میانگین (gr/cm^3)	وزن واحد حجم اشباع میانگین (gr/cm^3)	میانگین سرعت عبور موج در حالت خشک (m/sec)	میانگین سرعت عبور موج در حالت اشباع (m/sec)	میانگین شاخص جذب آب (%)	میانگین شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده در حالت خشک (MPa)	میانگین مقاومت کششی برزیلی در حالت خشک (MPa)
A	٦/٦٥	٢/٤٤	٢/٥١	٣٤٤٤/١٩	٣٤٩٠/٤٥	٢/٧٣	٤/١٥	٦/٤٤
B	١/٠٦	٢/٥٩	٢/٦٠	٤٦٢١/٥٩	٤٧٨١/٨٦	٠/٤١	٩/٣٤	١٨/٢٥
C	٢/٥٤	٢/٥٥	٢/٥٨	٣٦٥٤/٠٣	٤٠٨٠/٠١	١	٧/٩	١٣/٣٣
CG	٧/٢٣	٢/٤٠	٢/٤٨	٢٩٢٦/٠٥	٣١٧٣/٨٤	٣/٠١	٦/٢	٧/٩٨
S	١١/٥٦	٢/٠٦	٢/١٨	١٣٤٢/١٩	١٠٨٨/٦٦	٥/٥٢	١/٢٣	١/٨٩
S1	١١/١٣	٢/٠٨	٢/١٩	١٧٢٦/٤٩	١٤٢٩/٥٥	٥/٣٥	٠/٩	١/٢١
Min	٣/٠٤	٢/٥٨	٢/٦١	٣٥٠٤/٦٤	٣٩٦٥/٦١	١/١٨	٨/٧٢	١٦/٠٢
Tr	٨/٢٨	٢/٣٤	٢/٤٢	٢٤٨٤/٨٠	٢٧٢٤/٨٦	٣/٥٤	٨٨/٣	٦/٣
Sh	٢/٨٩	٢/٥٤	٢/٥٦	٣٤٣٩/٧١	٣٩٠١/٨٠	١/١٤	٧/٧	١٣/٥٤



الف

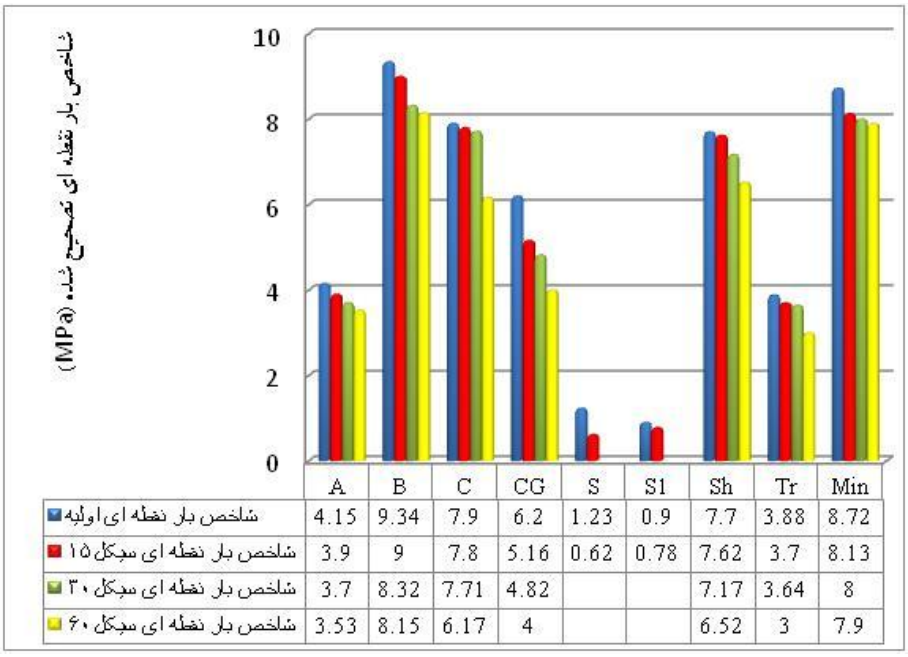
شکل ۳. تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌های بررسی شده با سیکل‌های پدیدهٔ ذوب- انجماد: الف) درصد افت وزنی،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]



	A	B	C	CG	S	s1	Tr	Min	Sh
سیکل۱۵	3.4	1.15	2.6	5.6	17.4	0.87	2	6	4.67
سیکل۳۰	6.07	2.9	2.24	12.2			5.63	8	8.3
سیکل۶۰	6.6	3.15	5.4	25.5			11.1	11.7	8.26

ب

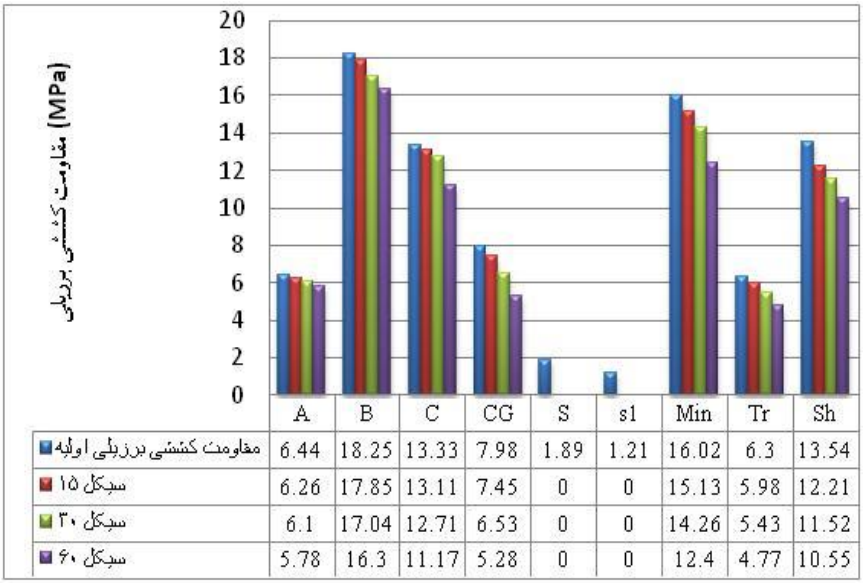


	A	B	C	CG	S	S1	Sh	Tr	Min
شاخص بار نقطه ای اولیه	4.15	9.34	7.9	6.2	1.23	0.9	7.7	3.88	8.72
شاخص بار نقطه ای سیکل۱۵	3.9	9	7.8	5.16	0.62	0.78	7.62	3.7	8.13
شاخص بار نقطه ای سیکل ۳۰	3.7	8.32	7.71	4.82			7.17	3.64	8
شاخص بار نقطه ای سیکل ۶۰	3.53	8.15	6.17	4			6.52	3	7.9

ج

شکل ۳. تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌های بررسی شده با سیکل‌های پدیدهٔ ذوب- انجماد: ب) درصد افت سرعت عبور موج، ج) شاخص بار نقطه ای تصحیح شده،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]



	A	B	C	CG	S	s1	Min	Tr	Sh
مقاومت کششی برزیلی اولیه	6.44	18.25	13.33	7.98	1.89	1.21	16.02	6.3	13.54
سیکل ۱۵	6.26	17.85	13.11	7.45	0	0	15.13	5.98	12.21
سیکل ۳۰	6.1	17.04	12.71	6.53	0	0	14.26	5.43	11.52
سیکل ۶۰	5.78	16.3	11.17	5.28	0	0	12.4	4.77	10.55

د

شکل ۳. تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌های بررسی شده با سیکل‌های پدیدهٔ ذوب- انجماد: د) مقاومت کششی برزیلی

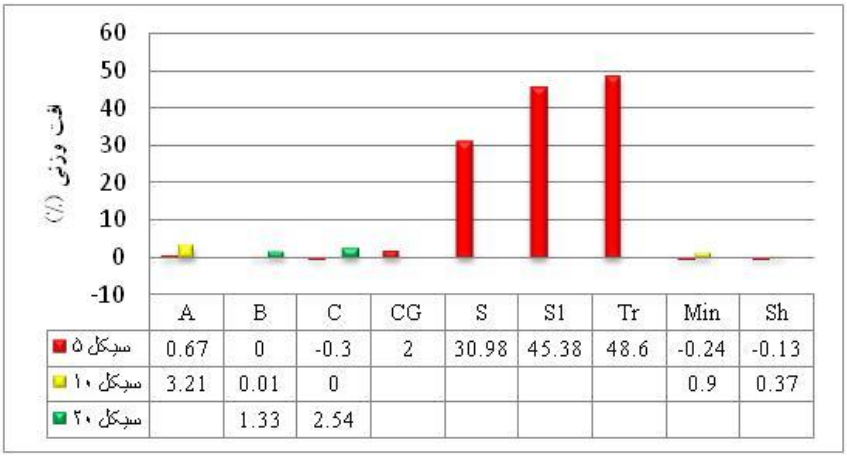
لازم به ذکر است که در این آزمایش، نمونه‌های S و S1 به‌علت تخریب گسترده و افت وزنی قابل توجه در پایان سیکل ۱۵ از چرخهٔ آزمایش خارج شده‌اند.

آزمایش تبلور نمک (سولفات سدیم)

انتقال نمک‌های حاوی سولفات درون حفرات سنگ با عوامل جوی (از قبیل باران) فشار چشم‌گیری به دیوارهٔ حفرات در طی تبلور دوباره نمک وارد می‌کند. فشار تبلور دوباره معمولاً در حفره‌های بزرگ زیاد است، در حالی که در حفره‌های کوچک و در صورت شرایط کاملاً اشباع از آب، فشارهای تبلور بالا قابل پیش‌بینی است [۳]. در این بررسی و به‌منظور شبیه‌سازی هوازدگی شتاب‌دار نمک، ابتدا نمونه‌ها به‌مدت ۱۲ ساعت داخل محلول ۱۰۰٪ وزنی سولفات سدیم (Na_2SO_4) قرار گرفته و پس از آن ۱۲ ساعت داخل گرم‌خانه با درجه حرارت $105\pm3^{\circ}C$ قرار گرفتند. آزمایش مذکور طی ۲۰ سیکل انجام شده و خصوصیات فیزیکی و

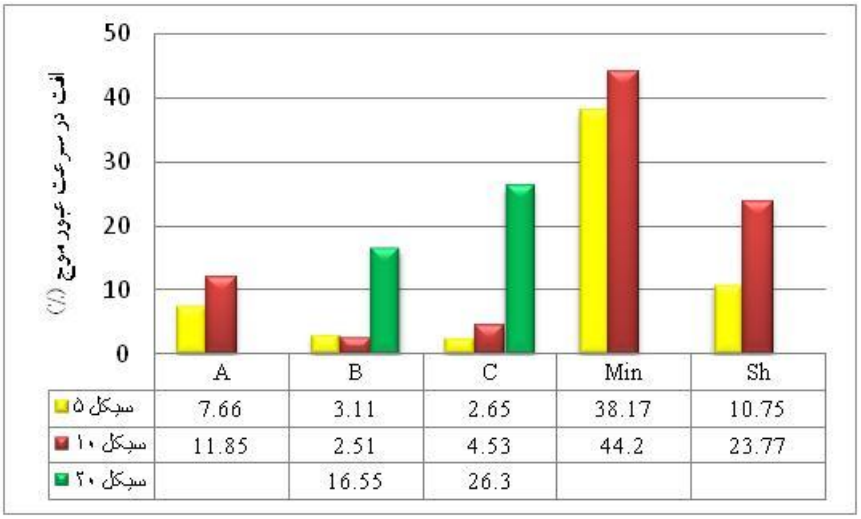
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

مکانیکی ماسه سنگ‌ها شامل درصد افت وزنی، سرعت عبور موج، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای در سیکل‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ تعیین شدند. لازم به ذکر است که به جز نمونه‌های B و C بقیه نمونه‌ها یک‌پارچگی خود را در سیکل ۱۰ از دست داده و امکان انجام سیکل‌های آزمایش بیش‌تر بر آن‌ها میسر نبود. در شکل ٤ تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی با چرخه‌های تبلور نمک نشان داده شده است.



	A	B	C	CG	S	S1	Tr	Min	Sh
سیکل ۵	0.67	0	-0.3	2	30.98	45.38	48.6	-0.24	-0.13
سیکل ۱۰	3.21	0.01	0					0.9	0.37
سیکل ۲۰		1.33	2.54						

الف

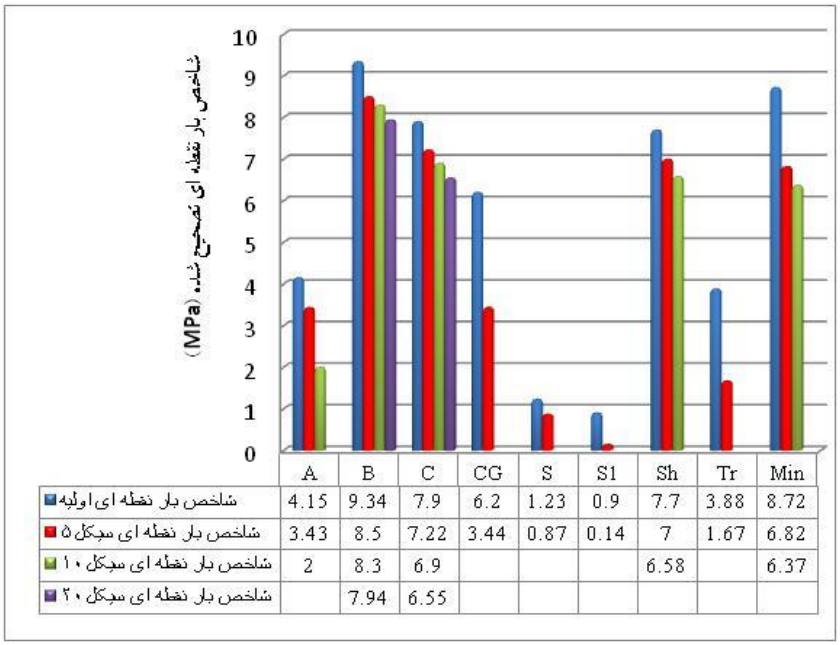


	A	B	C	Min	Sh
سیکل ۵	7.66	3.11	2.65	38.17	10.75
سیکل ۱۰	11.85	2.51	4.53	44.2	23.77
سیکل ۲۰		16.55	26.3		

ب

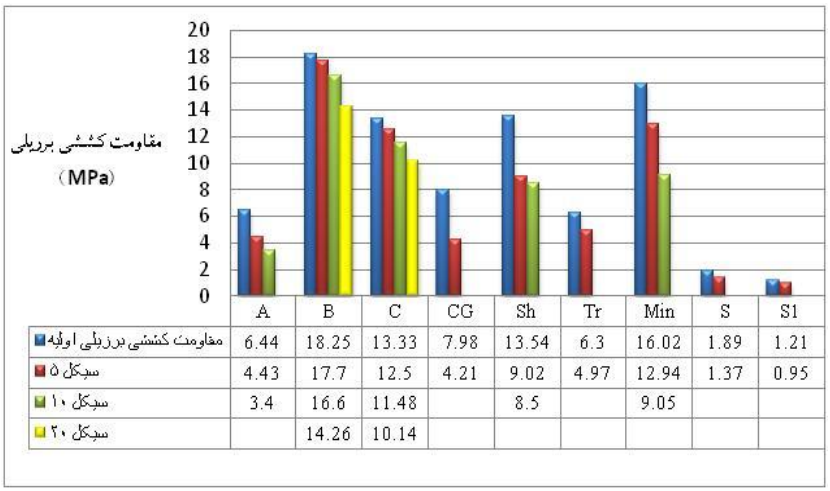
شکل ٤. تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌های بررسی شده با سیکل‌های تبلور نمک: الف) درصد افت وزنی، ب) درصد افت سرعت عبور موج،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]



	A	B	C	CG	S	S1	Sh	Tr	Min
شاخص بار نقطه ای اولیه	4.15	9.34	7.9	6.2	1.23	0.9	7.7	3.88	8.72
شاخص بار نقطه ای سیکل ۵	3.43	8.5	7.22	3.44	0.87	0.14	7	1.67	6.82
شاخص بار نقطه ای سیکل ۱۰	2	8.3	6.9				6.58		6.37
شاخص بار نقطه ای سیکل ۲۰		7.94	6.55						

ج



	A	B	C	CG	Sh	Tr	Min	S	S1
مقاومت کششی برزیلی اولیه	6.44	18.25	13.33	7.98	13.54	6.3	16.02	1.89	1.21
سیکل ۵	4.43	17.7	12.5	4.21	9.02	4.97	12.94	1.37	0.95
سیکل ۱۰	3.4	16.6	11.48		8.5		9.05		
سیکل ۲۰		14.26	10.14						

د

شکل ٤. تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌های بررسی شده با سیکل‌های تبلور نمک: ج) شاخص بار نقطه‌ای تصحیح شده، د) مقاومت کششی برزیلی

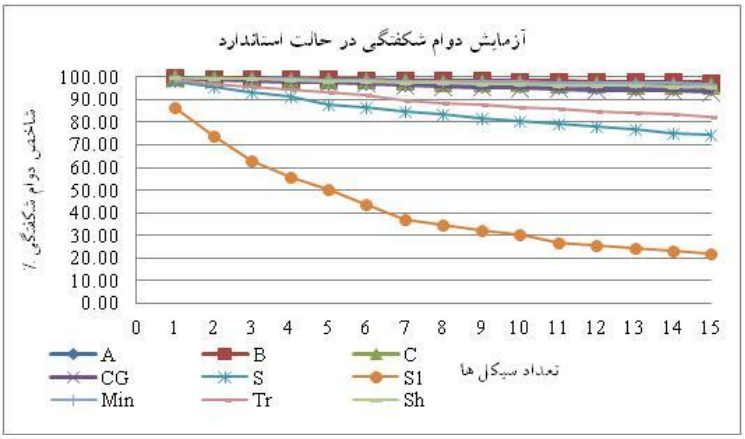
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

آزمایش دوام‌پذیری

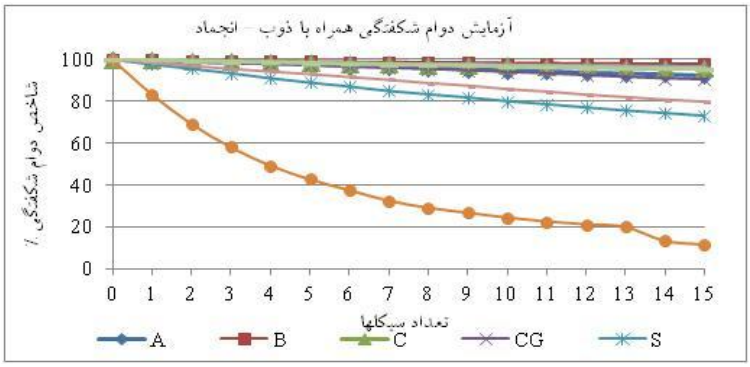
در این بررسی و به منظور بررسی سیکل‌های ذوب- انجماد و تبلور نمک (شرایط محیطی) بر دوام‌پذیری ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی علاوه بر انجام آزمایش مرسوم دوام‌پذیری (مطابق با استاندارد ASTM D4644 1998) در ۱۵ دور و تعیین شاخص دوام‌پذیری برای هر دور، نمونه‌های آماده شده از هر کدام از انواع ماسه سنگ‌ها ابتدا در معرض سیکل‌های ذوب- انجماد و تبلور نمک قرار گرفته و پس از آن آزمایش دوام‌پذیری طی ۱۵ سیکل روی آن‌ها انجام گرفت. نمونه‌های آماده شده برای آزمایش دوام‌پذیری ابتدا به‌مدت ۱۲ ساعت داخل سردخانه (دمای ۲۰-) قرار گرفته و پس از آن ٦ ساعت در دمای آزمایشگاه (۲۰ درجه) قرار داده شدند تا آب منجمد شده ذوب شود. با اتمام سیکل ذوب- انجماد، روی نمونه‌ها آزمایش دوام‌پذیری انجام گرفته و شاخص دوام‌پذیری برای هر مرحله محاسبه شد. هم‌چنین به‌منظور بررسی اثر تبلور سولفات سدیم بر دوام‌پذیری، ابتدا نمونه‌ها ۱۲ ساعت داخل گرم‌خانه $105\pm3^{\circ}C$ بوده و پس از آن به مدت ۱۲ ساعت داخل محلول ۱۰۰٪ وزنی سولفات سدیم (Na_2SO_4) قرار گرفتند.

پس از این مرحله نمونه‌ها داخل استوانه دستگاه آزمایش دوام‌پذیری قرارگرفته و ۱۰ دقیقه در معرض سیکل‌های تر و خشک شدن قرار گرفتند. پس از اتمام آزمایش دوام‌پذیری و به‌منظور پرهیز از خطاهایی که ممکن است به‌هنگام اندازه‌گیری افت وزنی (در اثر نفوذ محلول سولفات سدیم به داخل نمونه‌ها و تبلور آن‌ها در داخل حفرات سنگ و هم‌چنین شوره‌زنی در سطح نمونه‌ها، افت وزنی ممکن است به اشتباه مقدار کم‌تری ثبت شود) به‌وجود آید، نمونه‌ها ۱۲ ساعت داخل ظرف آب قرار داده شدند (تا نمک‌های داخل حفرات سنگ وارد آب شده و تأثیری در مقادیر افت وزنی ناشی از آزمایش دوام‌پذیری نداشته باشند) و پس از آن با قرار گرفتن مجدد در داخل گرم‌خانه به مدت ۱۲ ساعت، وزن خشک آن‌ها محاسبه شده و شاخص دوام‌پذیری مربوط به هر مرحله تعیین شد. در شکل ۵ تغییرات شاخص دوام‌پذیری برای حالت‌های مرطوب (حالت استاندارد) ، ذوب- انجماد و تبلور نمک نشان داده شده است.

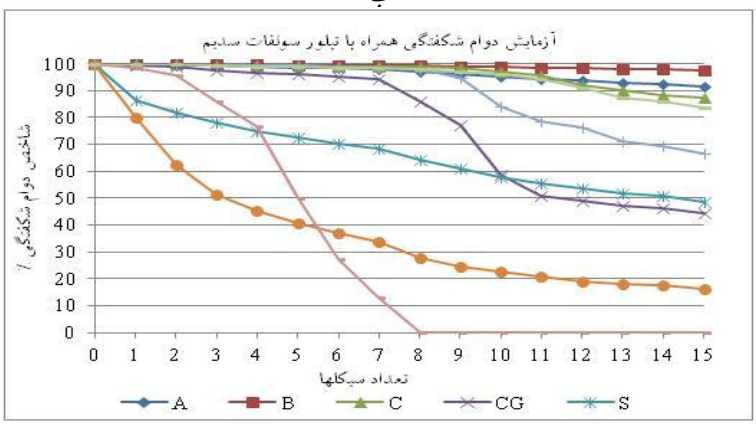
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]



الف



ب



ج

شکل ۵. تغییر شاخص دوام شکفتگی ماسه سنگ‌ها با تعداد سیکل‌ها: الف) حالت استاندارد (مرطوب)، ب) دوام شکفتگی همراه با پدیدهٔ ذوب- انجماد، ج) دوام شکفتگی همراه با تبلور سولفات سدیم

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

بحث

در بحث دوام‌پذیری سنگ‌های ساختمانی در برابر فرایندهای تبلور یخ و نمک، تودهٔ جامد و فضاهایی خالی حفرات دارای اهمیت خاصی است. تودهٔ جامد با ساخت و درهم قفل شدگی بلورها تعیین می‌شود. این عوامل، کنترل کنندهٔ میزان مقاومت در مقابل گسترش تنش در فضاهای خالی مصالح است. فضاهای خالی حفره‌ها نیز با شکل، اندازه و میزان ارتباطشان با هم، مقدار و توزیع رطوبت در داخل توده سنگ را کنترل کرده و بنابراین امکان تبلور یخ و نمک از محلول را نیز فراهم می‌کنند [۲۱]. از آن‌جاکه تخلخل یکی از مهم‌ترین عوامل فیزیکی کنترل کنندهٔ تخریب سنگ است، نمونه‌ها به دو دسته تقسیم شدند تا اثر تخلخل بر تخریب آن‌ها مشخص شود. ماسه سنگ‌های B، C، Min و Sh در ردهٔ ماسه سنگ‌های با تخلخل کم (کم‌تر از ۵٪) و نمونه‌های A، CG، S، S1 و Tr در رده سنگ‌های با تخلخل زیاد (بیش‌تر از ۵٪) قرار دارند.

طی آزمایش ذوب- انجماد، ماسه سنگ‌های قرار گرفته در رده نمونه‌های با تخلخل کم (B، C، Min و Sh) افت وزنی بسیار جزئی از خود نشان دادند، در حالی که ماسه سنگ‌های قرار گرفته در ردهٔ نمونه‌های با تخلخل زیاد (A، CG، S، S1 و Tr) افت وزنی چشم‌گیری دارد. این روند در مورد کاهش شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی نیز صادق است به‌طوری‌که شاخص بار نقطه‌ای نمونهٔ B از مقدار 9.34MPa به 8.15 MPa کاهش یافته و کاهش این شاخص برای نمونهٔ سست S از 1.23 MPa به صفر است. این روند کاهشی برای درصد افت سرعت عبور موج تا حدودی متفاوت با سایر عوامل ذکر شده است به‌طوری‌که نمونه‌های Min و A علیرغم داشتن درصد افت وزنی کم‌تر، دارای مقادیر بزرگ‌تری از افت سرعت عبور موج در پایان سیکل ۶۰ ذوب- انجماد است. یکی از دلایل چنین افزایشی در مقادیر افت سرعت عبور موج، می‌تواند ناشی از توسعه و گسترش ترک‌های موئی و ریز موجود در داخل نمونه‌های ماسه سنگ‌ها باشد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

اثر تخریبی ذوب- انجماد

انواع مختلفی از تخریب نمونه‌های ماسه سنگی در اثر آزمایش ذوب-انجماد ایجاد شده که می‌توان به این موارد اشاره کرد:

الف) اولین نوع از این تخریب‌ها، شکستگی در طول سطوح ضعف و لامینه‌های از پیش موجود است. این نوع از تخریب‌ها علیرغم نداشتن تأثیر زیاد بر افت وزنی، باعث کاهش زیادی در مقادیر سرعت عبور موج نمونه‌ها شده است. این نوع تخریب در نمونه‌های CG, A و Min قابل مشاهده است (شکل ٦).



شکل ٦. تخریب نوع اول: تخریب نمونه‌های ماسه سنگی در امتداد سطوح ضعف از پیش موجود و لامینه‌ها (قطر نمونه‌ها ٥/٤ سانتی‌متر و طول آن‌ها ١٤ سانتی‌متر است)

ب) نوع دوم تخریب‌ها، تخریب پوست پیازی (جدا شدن سطوح نازک بیرونی از نمونه‌های سنگی) است که عمدتاً در نمونه‌های ماسه سنگی سست از قبیل S، S1 و Tr مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که ماسه سنگ‌های B و C هیچ نوع تخریب سطحی از خود نشان نداده و به‌نظر می‌رسد برای ظاهر شدن علائم تخریب سطحی، باید تعداد بیش‌تری از دورهای آزمایش ذوب- انجماد روی آن‌ها انجام گیرد (شکل ۷).

نمونه‌های S، S1 و Tr حساس‌ترین نمونه نسبت به ذوب- انجماد است. این سنگ‌ها دارای تخلخل و جذب زیاد آب و مقاومت کششی کم هستند. از آن‌جاکه هجوم نمک شدیدتر از سایر فرایندهای هوازدگی فیزیکی است و به‌عنوان اندازه‌ای از دوام‌پذیری سنگ‌های ساختمانی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]



شکل ۷. تخریب نوع دوم (الف، ب، ج): تخریب پوست پیازی (جدا شدن سطوح نازک بیرونی از نمونه‌های سنگی)، د) عدم تخریب نوع B در انتهای سیکل ٦۰ آزمایش ذوب- انجماد. (قطر نمونه‌ها ٥/٤ سانتی‌متر و طول آن‌ها ١٤ سانتی‌متر است)

متخلخل مطرح است (Luquer, ۱۹۸۵). بنابراین به‌منظور انتخاب سنگ‌های مناسب برای تعمیر آثار تاریخی و هم‌چنین استفاده در کارهای ساختمان‌سازی جدید، انواع مختلفی از آزمایش‌های هوازدگی نمک انجام می‌شود. آزمایش‌های دوام‌پذیری معمولاً زمان بر است و تلاش‌ها بیش‌تر بر آن است تا دوام‌پذیری سنگ‌های ساختمانی متخلخل در زمان کوتاهی تخمین زده شود [۳۷].

ارتباط تخلخل با تخریب مصالح حفره‌دار در اثر تبلور نمک، از سال‌ها قبل تعیین شده است. این پارامتر حرکت سیالات درون مصالح را از طریق جریان یافتن، موئینگی و تبخیر تحت تأثیر قرار می‌دهد. ظرفیت جذب آب نیز به‌عنوان مقیاسی غیرمستقیم از تخلخل متصل بهم، در بعضی از پژوهش‌ها به‌عنوان پارامتری برای ارزیابی دوام‌پذیری استفاده شده است [١٤]. در این بررسی آزمایش تبلور نمک (محلول ۱۰۰٪ وزنی سولفات سدیم) طی ۲۰ دور انجام شده و تأثیر آن بر شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی، درصد افت وزنی و درصد افت سرعت عبور موج بررسی شد.

لازم به ذکر است که همهٔ نمونه‌های ماسه سنگی بررسی شده به‌غیر از B و C تا دور ۱۰ تخریب شده و از رده خارج شدند. چنان‌که در شکل ۳ الف، نشان داده شده است ماسه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

سنگ‌های S1،S و Tr به‌علت داشتن میزان تخلخل زیاد و مقاومت کششی کم، افت وزنی بسیار زیادی از خود نشان داده‌اند که در مقایسه با پدیدهٔ ذوب- انجماد بسیار زیادتر است (شکل ۹). در رابطه با نمونه‌هایی که مقادیر منفی درصد افت وزنی برای آن‌ها ذکر شده است (نمونه‌های C، Min و Sh)، می‌توان گفت که تبلور سولفات سدیم در شبکه حفرات سنگ‌های ریزدانه و نسبتاً مقاوم در سیکل‌های اولیهٔ آزمایش باعث افزایش وزن نمونه نسبت به حالت اولیهٔ خود شده و باعث منفی شدن، درصد افت وزنی در سیکل ۵ برای این پژوهش شده است. با افزایش سیکل‌ها و در سیکل‌های ۱۰ و ۱۵ به‌علت پیشی گرفتن فرایند تخریب سنگ از افزایش وزن ناشی از تبلور نمک، مقادیر درصد افت وزنی افزایش یافته است (شکل ۲ الف).



شکل ۸ تخریب نوع اول: تخریب دانه‌ای (granular disintegration) و تخریب پوست پیازی (جدا شدن سطوح نازک بیرونی از نمونه‌های سنگی)

اثر تخریبی تبلور سولفات سدیم

انواع تخریب‌های روی داده در نمونه‌های ماسه سنگی در اثر پدیدهٔ تبلور سولفات سدیم نیز بدین‌شرح مشاهده شده است:

الف) تخریب نوع اول: این نوع تخریب‌ها از نوع تخریب دانه‌ای[1] و ترکیبی از تخریب دانه‌ای و پوست‌پیازی است. این نوع تخریب در ماسه سنگ‌های نوع A (بدون لامینه)، S، S1 و Tr قابل مشاهده است و در آن سطوح بیرونی سنگ به‌صورت نامنظمی تخریب می‌شود (شکل ۸).

1. granular disintegration

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

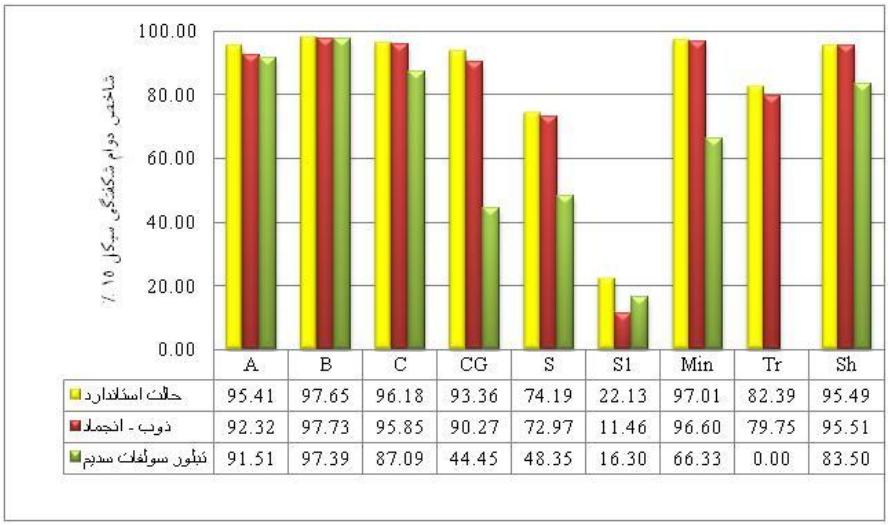
ب) تخریب نوع دوم: در این نوع از این تخریب‌ها، همانند پدیدهٔ ذوب- انجماد، شکستگی در طول سطوح ضعف و لامینه‌های از پیش موجود اتفاق می‌افتد. چنان‌که در شکل ۹ نشان داده شده است، این نوع تخریب دارای شدت و گسترش زیادی در مقایسه با تخریب مشاهده شده در ذوب- انجماد است.



شکل ۹. تخریب نوع دوم: تخریب اتفاق افتاده در نمونه‌های ماسه سنگی در امتداد سطوح ضعف از پیش موجود و لامینه‌ها، الف) نمونه CG، ب و ج) نمونه Min و د) نمونه C. (قطر نمونه‌ها ۵/٤ سانتی‌متر و طول آن‌ها ١٤ سانتی‌متر است)

در شکل ۱۰، شاخص دوام شکفتگی سیکل ۱۵ در سه حالت استاندارد و همراه با پدیدهٔ ذوب-انجماد و تبلور سولفات سدیم آورده شده است. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود، میزان تأثیرپذیری شاخص ذیری نمونه‌های ماسه سنگی از پدیده‌های ذوب-انجماد و تبلور سولفات سدیم متفاوت است. نمونه‌های CG، S، S1 و Tr دارای حساسیت بیش‌تری به پدیدهٔ هوازدگی نمک است و شاخص دوام شکفتگی مربوط به این پدیده به‌طور چشم‌گیری کم‌تر از حالت استاندارد و ذوب-انجماد است، به‌گونه‌ای که شاخص دوام شکفتگی نمونه Tr در پایان دور ۸ به صفر رسیده و کاملاً تخریب شد. هم‌چنین در تعدادی از نمونه‌ها از قبیل B، C، Min و Sh شاخص دوام شکفتگی حالت استاندارد اختلاف چندانی با مقدار این پارامتر در حالت ذوب- انجماد نداشته، در حالی که به‌جز نمونهٔ B، در ۳ نمونهٔ دیگر ذکر شده، شاخص دوام شکفتگی دور ۱۵ مربوط به تبلور سولفات در مقایسه با دو حالت دیگر کاهش یافته است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]



	A	B	C	CG	S	S1	Min	Tr	Sh
حالت استاندارد	95.41	97.65	96.18	93.36	74.19	22.13	97.01	82.39	95.49
ذوب - انجماد	92.32	97.73	95.85	90.27	72.97	11.46	96.60	79.75	95.51
تبلور سولفات سدیم	91.51	97.39	87.09	44.45	48.35	16.30	66.33	0.00	83.50

شکل ۱۰. شاخص دوام شکفتگی دور ۱۵ برای ۳ حالت آزمایش دوام‌پذیری استاندارد، همراه با ذوب- انجماد و تبلور سولفات سدیم

اثر خصوصیات پتروگرافی بر مقاومت و دوام‌پذیری ماسه سنگ‌های بررسی شده

در این بخش از پژوهش اثر خصوصیات پتروگرافی و فیزیکی بر افت مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای (مقادیر اولیهٔ مقاومت- مقادیر مقاومت اندازه‌گیری شده پس از دور معینی از آزمایش/ مقادیر اولیهٔ مقاومت ×۱۰۰) ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی طی فرایندهای ذوب-انجماد و هوازدگی نمک، بررسی شده است. پارامترهای بررسی شده عبارتند از : الف) ترکیب کانی‌شناسی دانه‌ها (درصد کوارتز، درصد دانه‌های کربناته)، ب) خصوصیات تماسی دانه‌ها (نسبت تماس قوی به ضعیف و فاکتور تحکیم که بیانگر درجه در هم قفل‌شدگی ماسه سنگ‌ها است)، ج) خصوصیات فیزیکی ماسه سنگ‌ها (درصد تخلخل مؤثر و میزان جذب آب نمونه‌های ماسه سنگی). بررسی‌های زیادی در رابطه با تأثیر خصوصیات کانی‌شناسی بر مقاومت ماسه سنگ‌ها انجام شده است. برای مثال در یک بررسی که روی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

نمونه‌های ماسه سنگی آفریقای جنوبی انجام شد، مشخص شد که افزایش میزان کوارتز تا حدودی می‌تواند مقاومت بعضی از ماسه سنگ‌ها را افزایش دهد [۵].

هر چند تعدادی از بررسی‌ها نیز نشان داده‌اند که افزایش میزان کوارتز تأثیری بر مقاومت ماسه سنگ‌ها ندارد [٦] و [۱۱]. با این وجود تعدادی از محققان نشان داده‌اند که در رفتار مکانیکی ماسه سنگ‌ها خصوصیات بافتی اهمیت بیش‌تری نسبت به ترکیب کانی شناختی دارد [۳٤]. از آن‌جایی که مقاومت و دوام‌پذیری ماسه سنگ‌ها طی فرایندهای هوازدگی می‌توانند به‌وسیلهٔ پارامترهای پتروگرافیکی و فیزیکی متعددی تحت تأثیر قرار گیرند، اثر هر کدام از این پارامترها باید بررسی دقیق شود تا پارامترهای کلیدی تعیین شود. در پژوهش حاضر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مذکور، به‌صورت جداگانه برای برقراری ارتباط با درصد افت مقاومت بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی در طی آزمایش‌های ذوب- انجماد و هوازدگی نمک استفاده شدند. هم‌بستگی غیرخطی (نمایی) که در مقایسه با نوع خطی، ضریب هم‌بستگی بیش‌تری از خود نشان می‌داد، استفاده شد (جدول ۳).

جدول ۳. هم‌بستگی غیرخطی (نمایی) بین افت مقاومت کششی برزیلی و افت شاخص بار نقطه‌ای در آزمایش‌های ذوب- انجماد و سولفات سدیم با شاخص‌های فیزیکی و پتروگرافیکی (مقادیر ارائه شده در جدول ضریب هم‌بستگی r است)

متغیر	تخلخل %	جذب آب %	درصد دانه‌های کربناته	درصد کوارتز	نسبت تماس قوی به ضعیف (SOWC)	فاکتور تحکیم % (Pcc)
افت مقاومت کششی برزیلی ٪ (آزمایش ذوب- انجماد)	0.52	0.51	-0.42	-0.62	-0.50	-0.39
افت مقاومت کششی برزیلی ٪ (آزمایش تبلور سولفات)	0.58	0.57	-0.32	-0.63	-0.52	-0.37
افت شاخص بار نقطه‌ای ٪ (آزمایش ذوب- انجماد)	0.56	0.57	-0.36	-0.57	-0.63	-0.49
افت شاخص بار نقطه ای ٪ (آزمایش تبلور سولفات)	0.72	0.73	-0.59	-0.39	-0.88	-0.67
مقادیر میانگین	0.59	0.6	-0.42	-0.55	-0.63	-0.48

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

چنان‌که در این جدول نشان داده شده است، پارامترهای بررسی شده دارای ارتباط نسبتاً ضعیفی با افت مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای در حین ذوب-انجماد و تبلور سولفات سدیم است. هر چند از میان این پارامترها نیز نسبت تماس قوی به ضعیف (SOWC)، تخلخل و درصد جذب آب دارای ارتباط نسبتاً خوبی با افت خصوصیات مکانیکی است. با افزایش درهم قفل‌شدگی و گیرش دانه‌ها و کاهش فضاهای خالی، میزان افت شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان دریافت که افت خصوصیات مکانیکی ماسه سنگ‌ها عمدتاً با توزیع اندازهٔ دانه ها کنترل شده و تأثیرپذیری آن از خصوصیات فیزیکی و پتروگرافیکی نسبتاً کم است.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از این بررسی می‌توان گفت که:

۱. عمده تخریب‌های انجام شده در پدیدهٔ ذوب- انجماد و پدیدهٔ هوازدگی نمک، از نوع تخریب دانه‌ای، تخریب پوست‌پیازی و تخریب در امتداد لامینه‌ها و سطوح ضعف از پیش موجود است.

۲. طی آزمایش ذوب- انجماد، ماسه سنگ‌های قرار گرفته در ردهٔ نمونه‌های با تخلخل کم (B، C، Min و Sh) افت وزنی بسیار جزئی از خود نشان دادند، در حالی که ماسه سنگ‌های قرار گرفته در ردهٔ نمونه‌های با تخلخل زیاد (CG، S، S1 و Tr) دارای افت وزنی چشم‌گیری است.

۳. میزان افت وزنی در تعدادی از نمونه‌های قرار گرفته در معرض ذوب- انجماد ناچیز است (A، Min) در حالی که مقادیر درصد افت سرعت عبور موج قابل توجه است که یکی از دلایل چنین افزایشی، می‌تواند ناشی از توسعه و گسترش ترک‌های مویی و ریز موجود در داخل نمونه‌های ماسه سنگ‌ها باشد.

٤. بر اساس مقایسه بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های قرار گرفته در معرض ذوب- انجماد و پدیدهٔ تبلور نمک می‌توان گفت که هوازدگی نمک در مقایسه با ذوب-

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

انجماد به‌صورت شدیدتری می‌تواند باعث تخریب سنگ شود. نتایج به‌دست آمده از این بخش با پژوهش‌های سایر محققان [۲۸] هم‌خوانی دارد.

۵. شاخص دوام‌پذیری نمونه‌های قرار گرفته در معرض هوازدگی نمک نیز برای انواع مختلف ماسه سنگ‌ها، متفاوت است و این شاخص در مقایسه با مقادیر به‌دست آمده از آزمایش استاندارد و ذوب- انجماد کم‌تر است که نشان‌دهندهٔ تأثیر بیش‌تر هوازدگی نمک بر کاهش دوام‌پذیری ماسه سنگ‌های بررسی شده است.

٦. تخلخل نقش بسیار مهمی در میزان مقاومت ماسه سنگ‌های بررسی شده در مقابل عوامل هوازدگی داشته و نمونه‌هایی با تخلخل ناچیز (B و C) تخریب زیادی از خود نشان ندادند.

۷. نتایج تحلیل‌های آماری نشان دادند که پارامترهای فیزیکی و پتروگرافیکی ماسه سنگ‌های بررسی شده دارای ارتباط نسبتاً ضعیفی با افت خصوصیات مکانیکی (افت مقاومت کششی برزیلی و افت شاخص بار نقطه‌ای) است. بنابراین به‌نظر می‌رسد افت این پارامترها متأثر از توزیع اندازهٔ حفرات است.

منابع

1. ASTM D4644., "Standard test method for slake durability of shale and similar weak rocks: annual book of ASTM Standards", vol 04.08. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1998).
2. ASTM., C830., "Standard test methods for apparent porosity, liquid absorption, apparent specific gravity, and bulk density of refractory shapes by vacuum pressure", ASTM Stand (2000).
3. Benavente D., García M.A., Fort R., Ordóñez S., "Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength", Engineering Geology 74 (2004) 113-127.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

4. Bellanger M., Homand F., Remy J.M., "Water behaviour in limestones as a function of pores structure: application to frost resistance of some Lorraine limestones", Engineering Geology 36 (1) (1993) 99-108.

5. Bell F.G., Lindsay P., "The petrographic and geomechanical properties of some sandstones from the Newspaper Member of the Natal Group near Durban", South Africa. Engineering Geology 53 (1999) 57-81.

6. Bell F.G., "The physical and mechanical properties of the Fell Sandstones", Northumberland, England. Engineering Geology 12 (1978) 11-29.

7. Beier N.A., Sego D.C., "Cyclic freeze–thaw to enhance the stability of coal tailings", Cold Regions Science and Technology 55 (2009) 278-285.

8. Chen C.H., Yeung M.R., Mori N., "Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action", Cold Regions Science and Technology 38 (2004) 127-136.

9. Coussy O., "Deformation and stress from in-pore drying-induced crystallization of salt", J Mech Phys Solids 54 (2006) 1517-1547.

10. Dei L.M., Mauro M., Baglioni P., Del Fa C.M., Fratini F., "Growth of crystal phases in porous media", Langmuir 15 (1999) 8915-8922.

11. Dobereiner L., De Freitas M.H., "Geotechnical properties of weak sandstone", Geotechnique 36 (1986) 79-94.

12. Evans I.S., "Salt crystallization and rock weathering: A review", Revue Ge ´omorphologie Dynamique 19 (1970) 153-177.

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

14. Goudie A.S., Viles H.A., "Salt weathering hazard. Wiley, London 15. ISRM, 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring. In: Brown, E.T. (Ed.), ISRM suggested methods. Pergamon Press, Oxford (1997).

16. ISRM, "The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, R., Hudson, J.A. (Eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods. ISRM, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan ofset, Ankara (2007).

17. Jamshidi A., Nikudel M.R., Khamehchiyan M., "Predicting the long-term durability of building stones against freeze-thaw using a decay function model", Cold Regions Science and Technology 92 (2013) 29-36.

18. Karaca Z., Deliormanli A.H., Elci H., Pamukcu C., "Effect of freeze-thaw process on the abrasion loss value of stones", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 47 (2010) 1207-1211.

19. La Iglesia A., Gonza ´ lez V., Lo ´pez-Acevedo V., Viedma C., "Salt crystallization in porous construction materials", I. Estimation of crystallization pressure. J Cryst Growth 177 (1997) 111-11.

19. Mutlutűk M., Altindag R., TűrK G., "A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating–cooling", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 41 (2) (2004) 237-244.

20. Proskin S., Sego D., Alostaz M., "Freeze–thaw and consolidation tests on Suncor mature fine tailings (MFT)", Cold Regions Science and Technology 63 (2010) 110-120.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

21. Ruedrich J., Kirchner D., Siegesmund S., "Physical weathering of building stones induced by freeze-thaw action: a laboratory long-term study", Environ Earth Sci 63 (2011) 1573-1586.
22. Rossi-Doria, "Laboratory Tests on Artistic Stonework. Studies and documents on the cultural heritage", No. 16. UNESCO (1985) 235-242.
23. Rodriguez-Navarro C., Doehne E., Sebastian E., "How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials", Cem Concr Res 30 (2000) 1527-1534.
24. Rodriguez-Navarro C., Doehne E., "Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern", Earth Surf Processes Landf 24 (1999) 191-20.
25. Saad A., Guedon S., Martineau F., "Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze-thaw cycles: experimental study of state and transfer parameters", Comptes Rendus Geoscience 342 (2010) 197-203.
26. Scherer G.W., "Crystallization in pores. Cem Concr Res 29 (1999) 1347-1358.
27. Scherer G.W., "Stress from crystallization of salt", Cem Concr Res 34 (2004) 1613-1624.
28. Shakoor A., Bonelli R.E., "Relationship between petrophysical characteristics", engineering index properties and mechanical properties of selected sandstones. Bulletin Engineering Geology Environmental 28 (1991) 55-71.
29. Tan X., Chen W., Tian H., Cao J., "Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze–thaw cycles", Cold Regions Scienceand Technology 68 (2011)130-138.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

30. Tan X., Chen W., Tian H., Cao J., "Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles",Cold Regions Science and Technology 68 (2011) 130-138.

31. Takarli M., Prince W., Siddique R., "Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze-thaw condition", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 45 (2008) 1164-117.

32. Thaulow N., Sahu S., "Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization", Mater Charact 53 (2004) 123-127.

33. Taylor J.M., "Pore space reduction in sandstone. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 34 (1950) 701-716.

34.Ulusay R., Tureli K., Ider M.H., "Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariable statistical techniques", Engineering Geology 37 (1994) 135-157.

35. Yavuz H., Ugur I., Demirdag S., "Abrasion resistance of carbonate rocks used in dimension stone industry and correlations between abrasion and rock properties", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 45 (2008) 260-267.

36. Yavuz H., Altindag R., Sarac S., Ugur I., Sengun N., "Estimating the index proper-ties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 43 (2006) 767-775.

37. Yu S., Oguchi C.T., "Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones", Eng Geol 115 (2010) 226-236.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]

38. Winkler E.M., Singer P.C., "Crystallization pressure of salt in stone and concrete", Geol SocAm Bull 83 (1972) 3509-3513.

39. Zhang S.J., Lai Y.M., Zhang X.F., Pu Y.B., Yu W.B., "Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze-thaw cycle condition", Tunnelling and Underground Space Technology 19 (2004) 295-302.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.7.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3351]