

## پیش بینی دوام طولانی مدت ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی در مقابل پدیده ذوب - انجماد

### و هوازدگی نمک با استفاده از مدل تابع تخریب

محمد حسین قبادی<sup>۱\*</sup>، رضابابازاده<sup>۲</sup>، موسی اسفندیاری<sup>۳</sup>

پذیرش مقاله: ۹۲/۹/۲۵

دریافت مقاله: ۹۲/۶/۶

#### چکیده

سنگ‌هایی که در معرض فرایندهای هوازدگی از قبیل ذوب - انجماد و تبلور نمک قرار می‌گیرند یکپارچگی خود را از دست داده و در طی زمان معینی تخریب می‌شوند. با افزایش تعداد و شدت چرخه‌های هوازدگی میزان این تخریب نیز بیشتر خواهد شد، هر چند که سرعت تخریب برای انواع مختلف سنگ‌ها متفاوت است. در این مطالعه دوام پذیری ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی (منطقه آوج، جنوب غرب استان قزوین) در مقابل عملکرد چرخه‌های ذوب - انجماد و تبلور نمک، با استفاده از مدل تابع تخریب مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور تعداد ۹ نمونه ماسه سنگ (مشخص شده با حروف A، B، C، CG، S، S<sub>1</sub>، Tr، Min و Sh) از بخش‌های مختلف سازند قرمز بالایی (در محدوده آوج - آبگرم) جمع‌آوری شده و پس از تعیین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و کانی‌شناسی، در معرض آزمایش‌های ذوب - انجماد و تبلور نمک قرار داده شدند. مدل تابع تخریب این امکان را به ما می‌دهد که بتوانیم پارامترهای معنی‌داری از قبیل ثابت تخریب و نیمه عمر را برای انواع مختلف سنگ‌ها محاسبه کرده و درباره تخریب آنها اظهار نظر کنیم. نتایج به دست آمده از این مدل نشان می‌دهند که پارامترهای نیمه عمر و ثابت تخریب می‌توانند در کارهای مهندسی و با صرف کمترین هزینه و زمان، جهت تعیین دوام سنگ‌ها به کار روند. همچنین این مدل نشان می‌دهد که سرعت تخریب انواع مختلف ماسه سنگ‌ها متفاوت می‌باشند.

کلید واژه‌ها: ماسه سنگ، سازند قرمز بالایی، مدل تابع تخریب، ثابت تخریب، نیمه عمر

۱. استاد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳. کارشناس ارشد، رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

ذوب - انجماد یکی از فرایندهای هوازدگی خیلی مهمی است که می‌تواند تغییراتی در خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها ایجاد کرده و باعث کاهش دوام پذیری آنها گردد. بنابراین تعیین میزان مقاومت نسبت به تخریب (دوام‌پذیری) سنگ‌های ساختمانی قبل از انتخاب آنها لازم و ضروری می‌باشد. محققین مختلفی دوام‌پذیری و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مختلف را طی چرخه‌های ذوب - انجماد

مورد بررسی قرار داده‌اند (Binal and Kasapoglu, 2002;

Altindag et al. 2004; Topal and Sozmen, 2000; Jamshidi et al. 2013; Mutluturk et al. 2004; Yavuz et Topal and Sozmen (2000) (al. 2006; Tan et al. 2011).

تغییرات روی داده در وزن واحد حجم خشک، تخلخل، مقاومت فشاری تک محوری و سرعت عبور موج توپها را پس از انجام چرخه‌های ذوب - انجماد مورد مطالعه قرار دادند. Binal and Kasapoglu (2002) اثر ذوب - انجماد را بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ایگنمبریت‌ها بررسی کردند. Chen et al. (2004) اثر درجه اشباع را بر میزان مقاومت توپهای جوش خورده در مقابل ذوب - انجماد مطالعه نموده و دریافتند زمانی که درجه اشباع اولیه کمتر از ۶۰٪ باشد، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تغییر چندانی نشان نمی‌دهند، اما زمانی که میزان آن بیشتر از ۷۰٪ باشد، نمونه‌های سنگی به طور قابل ملاحظه‌ای دچار تخریب می‌شوند

Cárdenes et al. (2012) اثر چرخه‌های ذوب - انجماد بر مقاومت خمشی اسلیت را بررسی کرده‌اند. برای این منظور ۳ نوع از اسلیتهای منطقه ای در اسپانیا که به عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌شود، انتخاب شده و تغییرات مقاومت خمشی در طی چرخه‌های ذوب - انجماد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مطالعه مذکور نشان داد که قرار گرفتن اسلیت‌ها در معرض ذوب - انجماد، باعث ایجاد تغییراتی در مقاومت خمشی و همچنین سایر خصوصیات اندازه‌گیری شده از قبیل جذب آب، سرعت موج P و توزیع اندازه حفرات می‌شود.

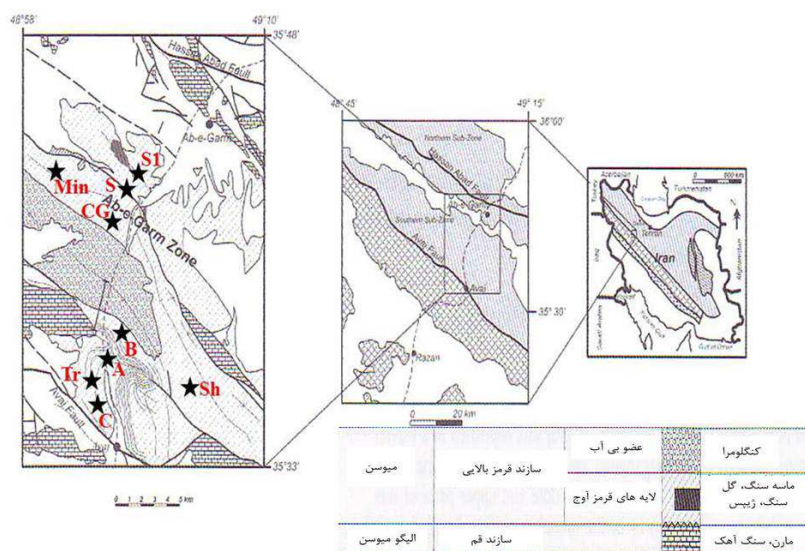
یکی دیگر از عوامل هوازدگی فیزیکی و تخریب سنگ‌ها تبلور نمکهای محلول در آب از قبیل کلریدها، سولفات‌ها و نیتراتها می‌باشد. محاسبات فشار تبلور نمکهای متداول (از قبیل کلریدها، سولفات‌ها و نیتراتها) نشان داده که تمامی آنها می‌توانند باعث تخریب قویترین مصالح شوند (Winkler and Singer, 1972). در حقیقت فشارهای تبلور محاسبه شده دارای مقادیری بزرگتر از مقاومت گسیختگی بیشتر مصالح ساختمانی می‌باشند. هر چند شواهد تجربی محکمی وجود دارد که نشان می‌دهد تحت شرایط آزمایشگاهی یکسان (شرایط محیطی و غلظت اولیه نمک) بعضی از نمکها از قبیل سولفات سدیم و سولفات منیزیم دارای اثرات تخریبی زیادی هستند، در حالی که نمکهای دیگری از قبیل کلرید سدیم دارای چنان اثر تخریبی نیستند (Goudie et al. 1997). پیدایش نمکهای سولفات منیزیم و سولفات سدیم در طبیعت کاملاً متداول بوده و توزیع آنها نیز در سراسر جهان گزارش شده است (Braitsch, 1971; Goudie and Cooke 1984). مثالهایی از اثرات تخریبی آنها بر روی مصالح زمین‌شناختی و مصالح مورد استفاده در ساخت سازه‌های مختلف متعدد می‌باشند (Goudie et al., 1997). هر دو نمک در آزمایشات مربوط به هوازدگی شتابدار سنگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا تبلور آنها دارای اثرات تخریبی زیادی می‌باشد (ASTM 1997, Mutluturk et al. 1999). (Rodriguez-Navarro and Doehne 2004) یک مدل تابع تخریب برای توصیف افت یکپارچگی (تخریب) سنگ‌های قرار گرفته در معرض چرخه‌های ذوب - انجماد پیشنهاد کردند. مهمترین عیب این مدل که برای پیش بینی و توصیف تخریب ۱۰ نوع سنگ مختلف بکار برده شده بود، در نظر گرفتن سختی شور (shore hardness) و نادیده گرفتن سایر خصوصیات مکانیکی بود. Altindag et al. (2004) مدل تابع تخریب را برای ارزیابی تخریب سنگ‌های ایگنمبریتی مورد استفاده قرار دادند. (Yavuz et al. 2006) مدلی را برای پیش‌بینی خصوصیات شاخص سنگ‌های کربناته تخریب شده طی ذوب - انجماد پیشنهاد کردند. Tan et al. (2011) پدیده تخریب و افت در خصوصیات مکانیکی

آزمایش‌های دوام شکستگی (شاخص دوام شکستگی)، شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی می‌باشد.

## ۲. مواد و روش‌ها

به منظور انجام این مطالعه، تعداد ۹ نوع ماسه سنگ از بخش‌های مختلف سازند قرمز بالایی در محدوده آوج - آبگرم (جنوب غرب استان قزوین) برداشت و به آزمایشگاه زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک دانشگاه بوعلی سینا منتقل گردیده است. نمونه برداری بر اساس تغییر سنگ شناسی انجام گرفته شد و در حین نمونه برداری از انتخاب نمونه‌های هوازده و خرد شده پرهیز شد (شکل ۱). ترکیب کانی شناسی و خصوصیات بافتی با استفاده از میکروسکوپ نوری تعیین شد. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها از قبیل وزن واحد حجم خشک، اشباع، تخلخل موثر، جذب آب، سرعت عبور موج در حالت خشک و اشباع، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای تعیین شد. در نهایت دوام‌پذیری نمونه‌های ماسه سنگی در مقابل عملکرد پدیده ذوب - انجماد و تبلور نمک با استفاده از مدل تابع تخریب (Decay function model) ارزیابی شد.

گرانیت‌ها را به عنوان تابعی از چرخه‌های ذوب - انجماد و با استفاده از آزمایش‌های تک محوری و سه محوری مورد بررسی قرار دادند. Jamshidi et al. (2013) با استفاده از مدل تابع تخریب و آزمایش‌های بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی، رفتار دوام‌پذیری ۱۴ نوع سنگ ساختمانی قرار گرفته در معرض چرخه‌های ذوب - انجماد را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که سرعت تخریب برای انواع مختلف سنگ‌ها متفاوت می‌باشد. اگر چه در اکثر مطالعات پیشین، پدیده ذوب - انجماد و اثر آن بر خصوصیات مختلف سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است، ولی روش‌های عددی موجود برای پیش‌بینی دوام‌پذیری سنگ‌ها در مقابل این پدیده ناکافی می‌باشند. علاوه بر این، مدل‌های پیشنهادی بیشتر بر روی نتایج حاصل از آزمایش ذوب - انجماد و تغییرات حاصله در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها متمرکز شده‌اند و مدل‌های تخریب که بر اساس نتایج آزمایش‌های تبلور نمک قرار داشته باشند، محدود بوده و یا گزارش نشده است. هدف اصلی این مقاله پیش‌بینی دوام طولانی مدت ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی در مقابل پدیده ذوب - انجماد و تبلور نمک (سولفات سدیم) بر اساس مدل تابع تخریب پیشنهادی توسط Mutluturk et al. (2004) و با استفاده از نتایج



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد مطالعه به همراه نقاط نمونه برداری

۲-۱. مطالعات سنگ شناسی

تعیین خصوصیات سنگ شناسی نه تنها می تواند به کسب اطلاعاتی در رابطه با ترکیب کانی شناسی و منشاء سنگ کمک کند، بلکه می تواند به عنوان ابزاری برای ارزیابی دوام پذیری و مقاومت سنگ در مقابل عوامل هوازدگی مورد استفاده قرار گیرد. به منظور تعیین خصوصیات کانی شناسی و بافتی

نمونه های ماسه سنگی، مقاطع نازک از هر کدام از نمونه ها تهیه شده و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزه مورد مطالعه قرار گرفتند (شکل ۲). همانطور که در جدول ۱ نیز نشان داده شده است بیشتر ماسه سنگ های مورد مطالعه به لحاظ کانی شناسی از نوع کالک لیتارنایت با سیمان کلسیتی می باشند.

جدول ۱. خصوصیات کانی شناسی ماسه سنگ های مورد مطالعه

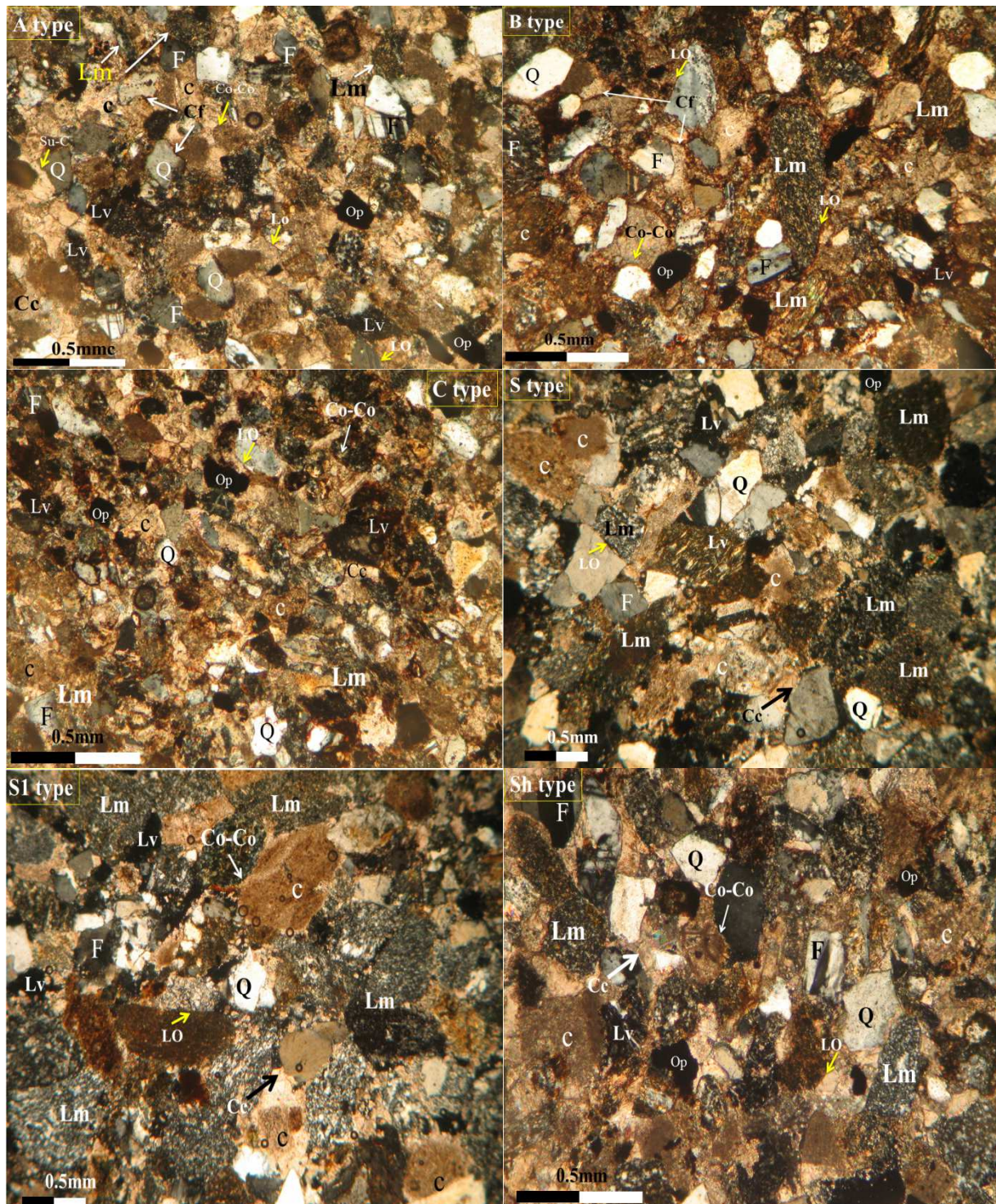
ماسه سنگ	ترکیب نسبی (%)								نامگذاری ماسه سنگ ها (فولک ۱۹۸۶)	
	فلدسپار	کوارتز	قطعات خرده سنگی					سیمان		
			کربناته	دگرگونی	آتش فشانی	آذرین	چرت	کربناته		اکسید آهن
A	۴/۶	۱۹/۲	۵۳/۲	۵/۴	۱۲/۶	-	-	۵	-	کالک لیتارنایت
B	۴/۲	۱۳/۸	۴۵/۱	۶/۴	۲۷/۵	-	-	۵	۵	کالک لیتارنایت
C	۸/۵	۲۹	۳۲	۱۵/۵	۹/۵	-	-	۵/۵	-	کالک لیتارنایت
CG	۶	۵	۶۰	۱۱	۱۱	-	۴	۳	-	کالک لیتارنایت
S	۵	۱۵/۵	۱۰	۵۳	۸/۵	۷	-	۱	-	فیلارنایت
S1	۶	۱۹/۵	۶	۲۳/۵	۸/۵	۲۴	۸	۴/۵	-	فیلارنایت
Sh	۴	۱۷/۵	۵۵/۵	۱۲	۶/۵	-	-	۴/۵	-	کالک لیتارنایت
Tr	۶/۵	۲۲	۴۴/۵	۱۹/۵	۶/۵	-	-	۱	-	کالک لیتارنایت
Min	۳	۱۴/۵	۶۱/۵	۱۳	۳/۵	-	-	۴/۵	-	کالک لیتارنایت

۲-۲. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ ها

در این بخش از مطالعه، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ ها با استفاده از استانداردهای ASTM و ISRM تعیین شد. خصوصیات فیزیکی نمونه ها شامل وزن واحد حجم خشک و اشباع، اندازه گیری سرعت عبور موج در حالت خشک و اشباع، تخلخل موثر و جذب آب (که میزان جذب آب نمونه ها پارامتر مهمی در ارزیابی دوام پذیری سنگ ها به

عنوان مصالح ساختمانی مطرح می باشد Shakoort and Bonelli, 1991) تعیین شد. به منظور تعیین ویژگی های مذکور از نمونه های استوانه ای شکل (به قطر ۵۴ میلی متر) استفاده شد. همچنین خصوصیات مکانیکی شامل شاخص بار نقطه ای و مقاومت کششی برزیلی می باشند. در جدول ۲ مقادیر مربوط به پارامترهای مذکور آورده شده است.



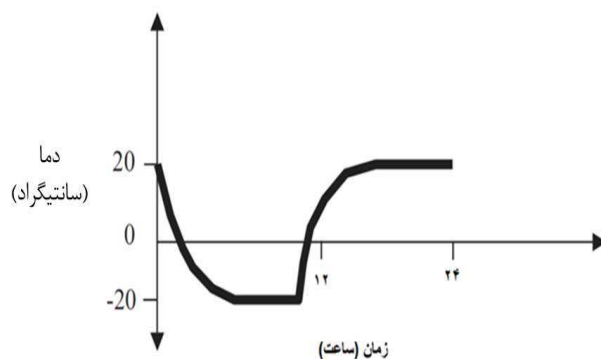


شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی از مقاطع نازک ماسه سنگ‌های مورد مطالعه (Q=کوارتز، FeI- فلدسپار، Lm: خرده سنگ‌های دگرگونی، Lv: خرده سنگ‌های آتش فشانی، Op: کانی‌های تیره رنگ، C: دانه‌های کلسیت، Cf: سیمان آهنی، CC: سیمان کلسیتی، Su-c: تماس دانه‌ای از نوع مضرس، Lo: تماس دانه‌ای از نوع خطی، Co-Co: تماس دانه‌ای از نوع محدب - مقعر)



**جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌های مورد مطالعه**

آزمایش	استاندارد مورد استفاده	نمونه‌های ماسه سنگ								
		A	B	C	CG	S	S <sub>1</sub>	Sh	Min	Tr
وزن واحد حجم خشک میانگین (KN/m <sup>3</sup> )	ISRM (1981)	۲۳/۹۴	۲۵/۴۱	۲۵/۰۲	۲۳/۵۴	۲۰/۲۱	۲۰/۴۰	۲۴/۹۲	۲۵/۳۱	۲۲/۹۶
وزن واحد حجم اشباع میانگین (KN/m <sup>3</sup> )	ISRM (1981)	۲۴/۶۲	۲۵/۵۱	۲۵/۳۱	۲۴/۳۳	۲۱/۳۹	۲۱/۴۸	۲۵/۱۱	۲۵/۶۰	۲۳/۷۴
تخلخل موثر (%)	ISRM (1981)	۶/۶۵	۱/۰۶	۲/۵۴	۷/۲۳	۱۱/۵۶	۱۱/۱۳	۲/۸۹	۳/۰۴	۸/۲۸
میانگین شاخص جذب آب (%)	ISRM (1981)	۲/۷۳	۰/۴۱	۱	۳/۰۱	۵/۶۲	۵/۳۵	۱/۱۴	۱/۱۸	۳/۵۴
میانگین سرعت عبور موج در حالت خشک (m/s)	ISRM (1981)	۳۴۴۴/۱۹	۴۶۲۱/۶	۳۶۵۴/۰۳	۲۹۲۶/۰۵	۱۳۴۲/۱۹	۱۷۲۶/۵	۳۴۳۹/۷۱	۳۵۰۴/۶۴	۲۴۸۴/۸
میانگین سرعت عبور موج در حالت اشباع (m/s)	ISRM (1981)	۳۴۹۰/۴۵	۴۷۸۱/۸۶	۴۰۸۰/۰۱	۳۱۷۳/۸۴	۱۰۸۸/۶۶	۱۴۲۹/۵۵	۳۹۰۱/۸۰	۳۹۶۵/۶۱	۲۷۲۴/۸۶
میانگین شاخص بار نقطه ای تصحیح شده در حالت خشک (MPa)	ISRM (1985)	۴/۱۵	۹/۳۴	۷/۹	۶/۲	۱/۲۳	۰/۹	۷/۷	۸/۷۲	۳/۸۸
میانگین مقاومت کششی برزیلی در حالت خشک (MPa)	ISRM (1981)	۶/۴۴	۱۸/۲۵	۱۳/۳۳	۸	۱/۹	۱/۲۱	۱۳/۵۴	۱۶/۰۲	۶/۳



**شکل ۳. منحنی تغییرات دما در طی یک چرخه آزمایش**

ذوب - انجماد

### ۳-۲. آزمایش ذوب - انجماد

به منظور انجام آزمایش ذوب - انجماد، ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای از ماسه سنگ جهت اشباع شدن، به مدت ۲۴ ساعت در داخل آب غوطه‌ور شدند. پس از اشباع کامل، نمونه‌ها داخل فریزری با دمای ۲۰- به مدت ۱۲ ساعت قرار داده شده و پس از انجماد کامل، به مدت ۶ ساعت به نمونه‌ها اجازه داده شد تا در دمای ۲۰ درجه ذوب شوند. به عبارتی یک چرخه ذوب - انجماد در این مطالعه ۱۸ ساعت به طول انجامید و در نهایت ۶۰ چرخه از آزمایش مذکور بر روی نمونه‌های ماسه‌سنگی انجام گرفت. به منظور بررسی دوام‌پذیری طولانی مدت ماسه سنگ‌ها در مقابل این پدیده مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه ای طی چرخه‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ تعیین شدند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، تغییر دما از روند یکسانی در هر چرخه تبعیت می‌کند (شکل ۳). به عبارتی این روند در چرخه‌های بعدی نیز تکرار می‌شود تا فرایند ذوب - انجماد کامل گردد.

### ۴-۲. آزمایش تبلور نمک (سولفات سدیم)

حضور نمک‌ها و بویژه سولفات سدیم به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب سنگ‌های متخلخل، بتن و آجر مطرح می‌باشند. بنابر این، مطالعه آنها به منظور درک کامل فرایند تبلور در شبکه‌های حفره‌دار و در آینده یافتن راهی جهت جلوگیری یا محدود کردن اثرات مخرب آنها در محیط‌های متخلخل لازم و ضروری می‌باشد (Angeli et al. 2007). در این مطالعه و به منظور شبیه سازی هوازدگی شتابدار نمک،

مدت ۱۰ دقیقه در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن قرار گرفتند. پس از اتمام آزمایش دوام‌پذیری و به منظور پرهیز از خطاهایی که ممکن است به هنگام 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) بوجود آید، نمونه‌ها به مدت 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 گردید. با داشتن شاخص دوام‌پذیری برای هر کدام از حالات ذکر شده، با استفاده از مدل ذکر شده در این مطالعه شاخص دوام شکستگی طولانی مدت مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۲-۶. مدل سازی ریاضی

پس از انجام آزمایش ذوب - انجماد و تبلور نمک، دوام‌پذیری طولانی مدت نمونه‌ها با استفاده از مدل تابع تخریب ارزیابی شد. همانطور که ذکر شد، علیرغم استفاده وسیع و گسترده از آزمایش‌های هوازگی شتابدار در ارزیابی دوام‌پذیری، روش‌های عددی موجود برای ارزیابی نتایج حاصله از این آزمایش‌ها ناکافی می‌باشد (Akin and Ozsan, 2011; Altindag et al. 2004; Benavente et al. 2004; Mutluturk et al. 2004). پس از انجام آزمایش‌های ذوب - انجماد و سرد و گرم بر روی سنگ آهک، تراورتن و دیاباز (Mutluturk et al. 2004) مدل تابع تخریب را پیشنهاد نمودند که از پارامترهای ثابت تخریب ( $\lambda$ ) و نیمه عمر ( $N_{1/2}$ ) جهت ارزیابی سرعت تخریب سنگ‌ها استفاده می‌کند. در این مدل فرض می‌شود که سرعت تخریب بواسطه عملکرد عوامل مختلف هوازگی متناسب با یکپارچگی سنگ در شروع هر چرخه (در طی آزمایش هوازگی شتابدار) می‌باشد:

$$-(dI/dN) = \lambda I$$

رابطه (۱)

ابتدا نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت داخل محلول ۱۰۰٪ وزنی سولفات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) قرار گرفته و پس از آن ۱۲ ساعت داخل گرمخانه‌ای با درجه حرارت  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  قرار گرفتند. آزمایش مذکور طی ۲۰ چرخه انجام شده و مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای در چرخه‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ تعیین شدند. لازم به ذکر است که به جز نمونه‌های B و C بقیه نمونه‌ها یکپارچگی خود را در چرخه ۱۰ از دست داده و امکان انجام چرخه‌های بیشتر بر روی آنها میسر نبود.

#### ۲-۵. آزمایش دوام شکستگی

در این مطالعه علاوه بر بررسی چرخه‌های ذوب - انجماد و تبلور نمک (شرایط محیطی) بر دوام‌پذیری ماسه‌سنگ‌ها، از نتایج آزمایش دوام شکستگی نیز استفاده شد. برای این منظور علاوه بر انجام آزمایش مرسوم دوام‌پذیری در ۱۵ چرخه و تعیین شاخص دوام‌پذیری برای هر چرخه (مطابق با استاندارد ASTM D4644 1998، که از این بعد حالت مرطوب نام‌گذاری شده است)، نمونه‌های آماده شده از هر کدام از انواع ماسه سنگ‌ها ابتدا در معرض چرخه‌های ذوب - انجماد (از این بعد با حالت ذوب - انجماد مشخص شده است) و تبلور نمک (از این بعد با حالت تبلور نمک مشخص شده است) قرار گرفته و پس از آن آزمایش دوام‌پذیری طی ۱۵ چرخه بر روی آنها انجام گرفت. نمونه‌های آماده شده برای آزمایش دوام‌پذیری ابتدا به مدت ۱۲ ساعت داخل سردخانه (دمای  $-20^\circ\text{C}$ ) قرار گرفته و پس از آن به مدت ۶ ساعت در دمای آزمایشگاه ( $20^\circ\text{C}$  درجه) قرار داده شدند تا آب منجمد شده ذوب گردد. با اتمام چرخه ذوب - انجماد، بر روی نمونه‌ها آزمایش دوام‌پذیری انجام گرفته و شاخص دوام‌پذیری برای هر مرحله محاسبه شد. همچنین به منظور بررسی اثر تبلور سولفات سدیم بر دوام‌پذیری، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت داخل گرمخانه  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  بوده و پس از آن به مدت ۱۲ ساعت داخل محلول ۱۰۰٪ وزنی سولفات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) قرار داده شدند. پس از این مرحله نمونه‌ها داخل استوانه دستگاه آزمایش دوام‌پذیری قرار گرفته و به

صورتی معتبر است که به لحاظ آماری معنی دار بوده و دارای همبستگی بالایی با داده های تجربی باشد). این پارامترها (یعنی ثابت تخریب، فاکتور تخریب و نیمه عمر) می توانند اطلاعات مفیدی از رفتار سنگها تحت چنین پدیده هایی در دسترس قرار دهند و می توانند در تصمیم گیری برای بسیاری از کاربردها مفید باشند. مفهوم یکپارچگی سنگ (Integrity) شامل سختی و تمامیت (wholeness) ساختاری سنگ است. در نتیجه، پارامترهای متعددی می توانند به عنوان نماینده ای در نتیجه، پارامترهای متعددی می توانند به عنوان نماینده ای (proxy) از یکپارچگی سنگ مورد استفاده قرار گیرند. برای مثال می توان از مقاومت کششی برزیلی، شاخص بار نقطه ای، سرعت عبور موج، سختی شور (shore hardness) و برای این منظور استفاده کرد (Mutluturk et al. 2004). در این مطالعه از پارامترهای مقاومت کششی برزیلی، شاخص بار نقطه ای و شاخص دوام شکستگی به عنوان یکپارچگی سنگ استفاده شده و با استفاده از تغییرات آنها، رفتار سنگ مدلسازی شده است. ثابت تخریب می تواند با استفاده از تحلیل های رگرسیونی ساده به دست آید. افت خصوصیات فیزیکی یا مکانیکی (P) به صورت نمایی در شکل ۳ نشان داده شده است (Akin and Ozsan, 2011). همانطور که در این شکل نشان داده شده است، ثابت تخریب دارای رابطه معکوسی با الگوی یکپارچگی می باشد. کاهش ناگهانی در مقدار یک پارامتر نشان دهنده مقادیر ثابت تخریب بالا و سرعت تخریب بالا (سرعت بیشتر در افت دوام پذیری سنگ) می باشد. میزان اعتبار مدل می تواند با در نظر گرفتن این که تا چه اندازه مدل فرضی با داده های تجربی مطابقت دارد ارزیابی شود. درجه برازش به یک منحنی غیر خطی می تواند با مقدار ضریب تعیین ( $r^2$ ) اندازه گیری شود، که نشان می دهد چه نسبتی از تغییر در متغیر وابسته می تواند با تغییر متغیر مستقل توضیح داده شود.

### ۳. بحث

دوام طولانی مدت هر کدام از سنگها در مقابل عملکرد پدیده های ذوب - انجماد و تبلور نمک با استفاده از

در این رابطه ( $dI/dN$ ) عبارتست از سرعت (نرخ) تخریب،  $\lambda$  ثابت تخریب،  $I$  یکپارچگی سنگ و  $N$  تعداد چرخه می باشد. علامت منفی در این رابطه نشان دهنده افت یکپارچگی سنگ (تخریب سنگ) است. اگر یکپارچگی اولیه سنگ  $I_0$  و یکپارچگی پس از  $N$  چرخه  $I_N$  باشد، با استفاده از انتگرال گیری از رابطه ۱، بین یکپارچگی اولیه سنگ ( $I_0$ ) و یکپارچگی پس از  $N$  چرخه ( $I_N$ ) رابطه (۲) به شکل لگاریتمی به دست می آید:

$$\int_{I_0}^{I_N} (dI/dN) = \lambda I \rightarrow \ln(I_0/I_N) = \lambda N \quad \text{رابطه (۲)}$$

شکل نمایی رابطه ۲ به صورت زیر می تواند نوشته شود :

$$I_N = I_0 \cdot e^{-\lambda N} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)  $e^{-\lambda N}$  فاکتور تخریب (decay factor) نامیده می شود که نشان دهنده مقدار یکپارچگی باقیمانده پس از  $N$  چرخه است. همچنین ثابت تخریب، بیانگر تخریب نسبی متوسط با عملکرد هر چرخه مجزا می باشد (Mutluturk et al. 2004). علاوه بر این، پارامتری تحت عنوان نیمه عمر سنگ ( $N_{1/2}$ ) به عنوان مقیاسی از دوام پذیری سنگ، تعریف می شود که عبارتست از تعداد چرخه های لازم که خصوصیات فیزیکی یا مکانیکی سنگ ( $I_0$ ) را به نصف مقدار اولیه آنها کاهش می دهد ( $I_0/2$ ). سنگهایی که دارای مقاومت بالایی در مقابل تخریب می باشند دارای نیمه عمر بالایی هستند. نیمه عمر ارتباط معکوسی با فاکتور تخریب دارد. به عبارتی با جایگزین کردن ( $I_0/2$ ) با  $I_N$  در معادله (۲)، نیمه عمر توسط رابطه (۴) محاسبه می گردد:

رابطه ۴

$$\left. \begin{aligned} \ln(I_0 / I_N) &= \lambda N \\ I_N &= I_0 / 2 \end{aligned} \right\} \ln(2I_0 / I_0) = \lambda N_{1/2}$$

$$\rightarrow \ln 2 / \lambda = N_{1/2} \rightarrow N_{1/2} \approx 0.693 / \lambda$$

زمانی که این مدل برای تخریب سنگ تحت چرخه های ذوب - انجماد یا تبلور نمک در یک سنگ معین معتبر باشد (در



پارامترهای ثابت تخریب و نیمه عمر به دست آمده از مدل تابع تخریب مورد ارزیابی قرار گرفت.

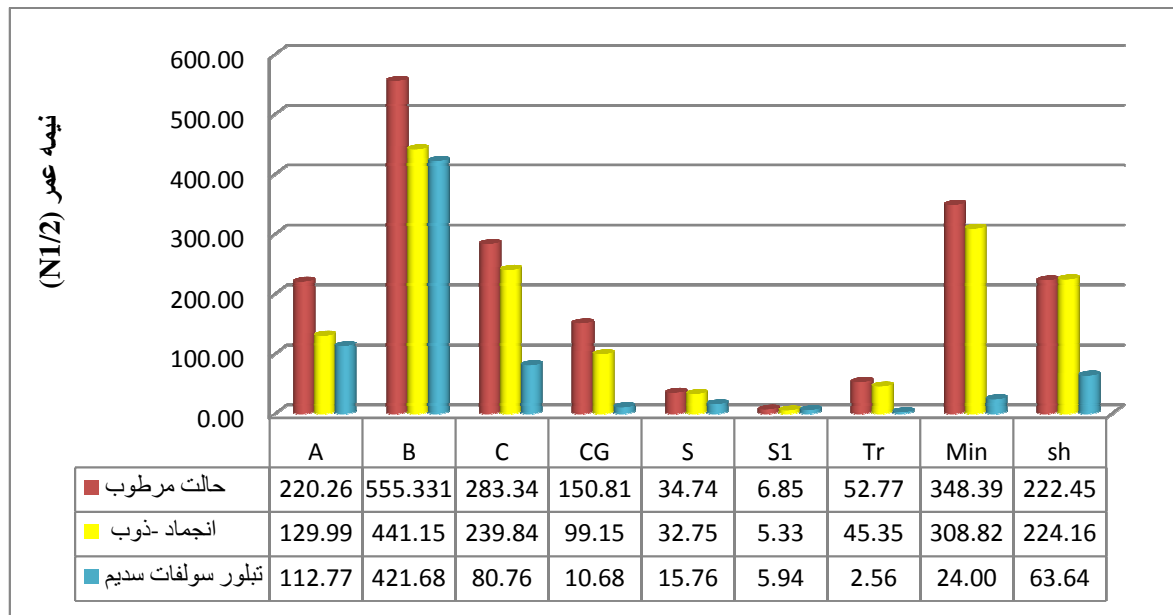
### ۳-۱. ثابت تخریب

در این بخش از مطالعه و به منظور ارزیابی دوام طولانی مدت ماسه سنگ‌های مورد مطالعه، مقادیر ثابت تخریب برای هر کدام از آنها محاسبه گردید. این شاخص برای پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه (شاخص بار نقطه ای، مقاومت کششی برزیلی و شاخص دوام شکستگی) و در طی آزمایشهای ذوب-انجماد و تبلور نمک (سولفات سدیم) ارزیابی شد. همانطور که در مطالعات پیشین نیز ذکر شده بود نوع سنگ به تنهایی نمی‌تواند اطلاعات مفیدی از دوام پذیری سنگ‌ها در مقابل فرایندهای هوازگی به دست بدهد و سنگ‌هایی با نام یکسان ممکن است مقاومت‌های متفاوتی در مقابل هوازگی داشته باشند. از طرفی سنگ‌هایی با ترکیب متفاوت نیز ممکن است مقاومت‌های یکسانی در برابر عوامل تخریب کننده نشان دهند.

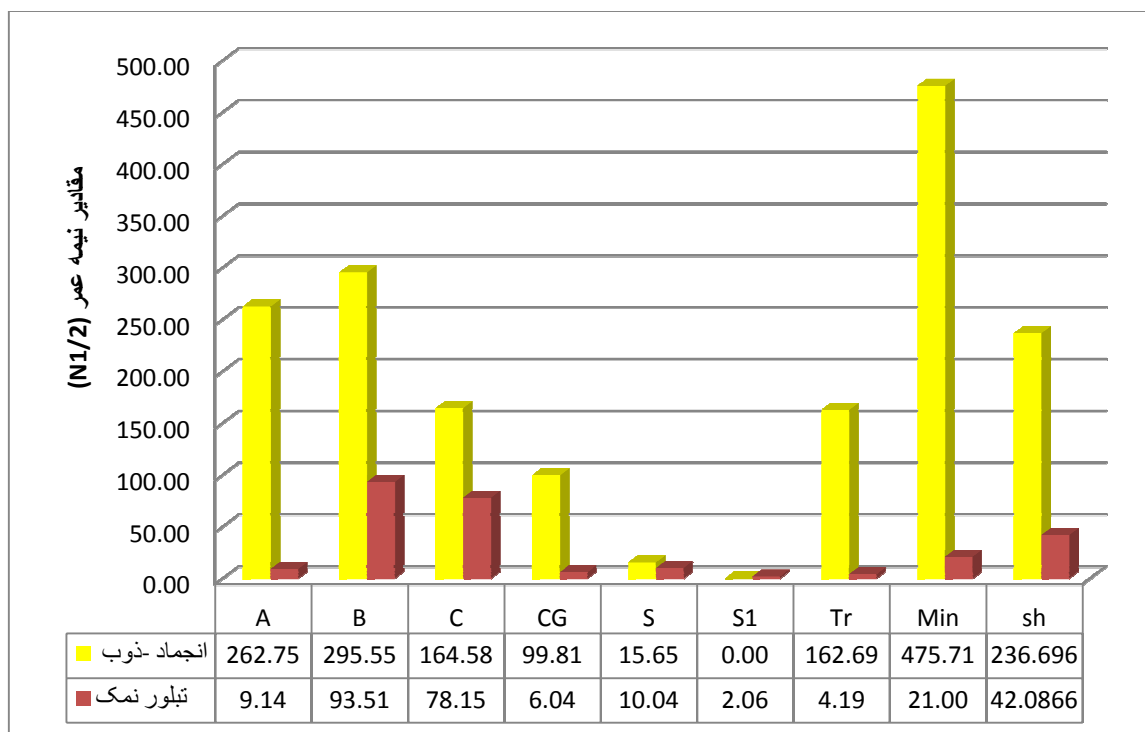
### ۳-۲. نیمه عمر

به هنگام بررسی ضعیف شدگی (weakening) یک سنگ تحت عملکردهای چرخشی، ثابت تخریب آن ممکن است به عنوان سرعت تخریب در نظر گرفته شود. هر چند در رابطه با مفهوم دوام پذیری سنگ، نیمه عمر (که دارای رابطه معکوسی با ثابت تخریب می‌باشد) دارای اهمیت بیشتری می‌باشد. علاوه بر این، پارامتر مذکور این امکان را به سادگی فراهم می‌کند که بتوان پیش بینی کرد که چند چرخه لازم است تا خصوصیات مکانیکی نمونه به یک کسر مشخصی از مقاومت برسد. پس از سپری شدن  $k$  نیمه عمر، تنها  $(1/2^k)$  از مقاومت اولیه باقی می‌ماند. برای مثال، پس از ۴ نیمه عمر، مقاومت باقیمانده سنگ  $1/16$  (6.25%) مقاومت اولیه خواهد بود. مقادیر ثابت تخریب و نیمه عمر محاسبه شده برای ماسه سنگ‌های مورد مطالعه دارای محدوده گسترده‌ای هستند. کوتاهترین نیمه عمر (بزرگترین ثابت تخریب) در آزمایش

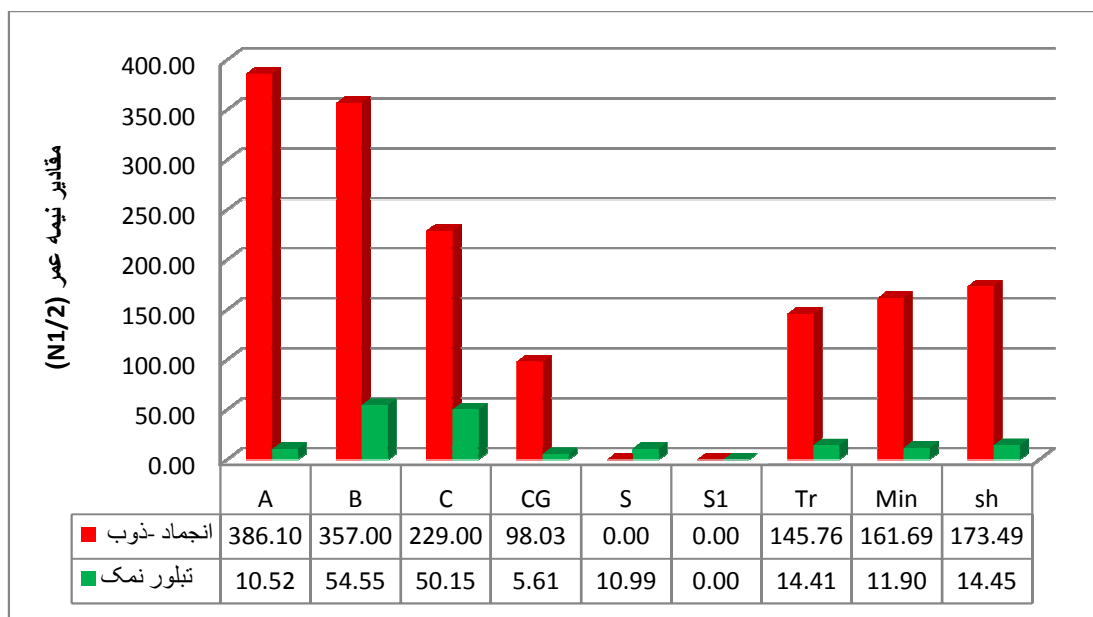
دوام شکستگی مربوط به ماسه سنگ Tr با ۲/۵ چرخه (حالت ذوب - انجماد) و بیشترین آن (کمترین ثابت تخریب) مربوط به ماسه سنگ B با ۵۵۵/۳۳ چرخه (حالت مرطوب) می‌باشد. کمترین و بیشترین مقادیر نیمه عمر شاخص بار نقطه ای به ترتیب مربوط به ماسه سنگ‌های S1 (با مقدار ۲ چرخه در آزمایش درآمایش تبلور نمک) و Min (با ۴۷۵/۷ چرخه در آزمایش ذوب - انجماد) می‌باشد. همچنین در رابطه با مقادیر نیمه عمر مربوط به مقاومت کششی برزیلی، کمترین و بیشترین آن به ترتیب در نمونه‌های CG (با ۵/۶۱ چرخه در آزمایش تبلور نمک) و B (با ۳۵۷ چرخه در آزمایش ذوب - انجماد) می‌باشد. مقادیر ثابت تخریب و نیمه عمر دارای ارتباط معکوسی با یکدیگر می‌باشند و تفسیر آنها بایستی نتایج یکسانی به دست دهد. به منظور ارزیابی اثر فرایندهای ذوب - انجماد و تبلور نمک بر نیمه عمر ماسه سنگ‌های مورد مطالعه، نیمه عمرهای پارامترهای شاخص دوام شکستگی، بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی طی دو فرایند مذکور با هم مقایسه شدند (شکل‌های ۴، ۵ و ۶). همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، نیمه عمر شاخص دوام شکستگی در حالت مرطوب (استاندارد) برای همه ماسه سنگ‌های مورد مطالعه دارای بیشترین مقدار بوده و در حالت تبلور نمک این پارامتر دارای کمترین مقدار می‌باشد. اختلاف بین مقادیر نیمه عمر شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی در آزمایشهای ذوب-انجماد و تبلور نمک در اکثر نمونه‌ها قابل توجه می‌باشد که چنین اختلافی برای شاخص دوام شکستگی اکثر نمونه‌ها مشاهده نشده است. علت چنین اختلافی را می‌توان به شرح زیر بیان کرد: در آزمایش بار نقطه‌ای و برزیلی که بر روی مغزه‌های استوانه‌ای قرار گرفته در معرض ذوب - انجماد و تبلور نمک انجام شده است، می‌توان گفت که حجم بیشتری از نمونه در معرض این فرایندها قرار گرفته و اثرات تبلور نمک در نمونه‌های دارای لامیناسیون و ناپیوستگی‌های زیاد شدیدتر و گسترده‌تر بوده که در آزمایش دوام شکستگی میزان این ناپیوستگی‌ها حداقل می‌باشد.



شکل ۴. مقادیر نیمه عمر مربوط به شاخص دوام شکستگی در ۳ حالت مرطوب، ذوب - انجماد و تبلور سولفات سدیم



شکل ۵. مقادیر نیمه عمر مربوط به شاخص بار نقطه‌ای در آزمایش ذوب - انجماد و تبلور سولفات سدیم



شکل ۶. مقادیر نیمه عمر مربوط به مقاومت کششی برزیلی در آزمایش ذوب - انجماد و تبلور سولفات سدیم

شتابدار (Accelerated) و مدل تابع تخریب مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی اثر پدیده ذوب - انجماد و تبلور نمک بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگی، آزمایش ذوب - انجماد طی ۶۰ چرخه و آزمایش تبلور نمک نیز طی ۲۰ چرخه انجام شد. همچنین به منظور ارزیابی میزان تأثیرپذیری شاخص دوام شکستگی از فرایندهای هوازگی، نمونه‌های آماده شده برای آزمایش دوام شکستگی در معرض فرایندهای ذوب - انجماد و تبلور نمک قرار گرفته و پس از آن آزمایش دوام شکستگی طی ۱۵ چرخه بر روی آنها انجام شده و شاخص دوام شکستگی محاسبه شد. نتایج حاصل از این مطالعه را به شرح زیر می‌توان نوشت:

۱- مدل تابع تخریب می‌تواند فرایند تخریب سنگ‌ها را به عنوان فرایند مرتبه اول مدل‌سازی کند و پارامترهایی از قبیل ثابت تخریب و نیمه عمر جهت ارزیابی دوام‌پذیری طولانی مدت سنگ‌ها را به دست می‌دهد.

۲- نتایج حاصل از این مطالعه نشان دادند که پارامتر شاخص دوام شکستگی نیز می‌تواند به صورت مفیدی و با استفاده از مدل ذکر شده جهت ارزیابی دوام‌پذیری طولانی مدت سنگ‌ها استفاده شود.

همانطور که در بخش‌های پیشین نیز ذکر گردید، تعدادی از محققین با استفاده از مدل تابع تخریب، دوام‌پذیری سنگ‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. این سنگ‌ها عمدتاً شامل سنگ آهک، تراورتن، مرمر، ایگنمبریت، ریولیت، گرانیت، داسیت و توف بوده که با استفاده از آزمایش ذوب - انجماد به ارزیابی دوام‌پذیری آنها با استفاده از آزمون‌های شاخص بار نقطه‌ای و برزیلی پرداخته شده است. در این بخش نتایج حاصل از مطالعه حاضر و پارامترهای ثابت تخریب و نیمه عمر ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی، با نتایج مطالعات پیشین بر روی سنگ‌های مذکور مورد مقایسه قرار گرفته است. هر چند نوع سنگ‌های مورد مطالعه با مطالعات پیشین متفاوت می‌باشد، اما می‌توان با مقایسه نیمه عمر و دوام‌پذیری آنها با یکدیگر درباره خصوصیات مهندسی آنها و تأثیرپذیری اشان از اثرات محیطی اظهار نظر نمود (جدول ۳).

#### ۴. نتیجه گیری

در این مطالعه، دوام‌پذیری طولانی مدت ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی (مشخص شده با حروف A, B, C, CG, S, S1, Tr, Min و Sh) با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی

۳- بر اساس نتایج به دست آمده از مدل تابع تخریب مشخص گردید که نیمه عمر پارامترهای مورد استفاده (بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی و شاخص دوام شکستگی) در آزمایش‌های ذوب - انجماد و تبلور نمک با هم متفاوت بوده و در آزمایش تبلور نمک کمتر از ذوب - انجماد می‌باشند.

جدول ۳. نتایج مطالعات انجام شده بر روی انواع مختلف سنگ‌ها با استفاده از مدل تابع تخریب

نام محقق	نوع سنگ	پارامتر مورد استفاده (Integrity parameter)	ثابت تخریب	نیمه عمر	
Mutluturk et al. (2004)	سنگ آهک		-۰/۰۰۷۴ تا -۰/۰۰۲۸	۲۴۴/۵ تا ۸۴/۸	
	تراورتن	سختی شور (SH)	-۰/۰۰۶۵ تا -۰/۰۰۳۹	۱۶۸/۲ تا ۱۰۱/۱	
	مرمر		-۰/۰۰۶۸ تا -۰/۰۰۵۷	۱۲۲/۳ تا ۹۹/۳	
Altindag et al. (2004)	ایگنمبریت	BTS	-۰/۰۱۱۵	۵۸/۲	
		I <sub>s(50)</sub>	-۰/۰۱۸	۳۸/۵	
Jamshidi et al. (2013)	ریولیت	BTS	-۰/۰۰۶	۱۱۵/۵	
		I <sub>s(50)</sub>	-۰/۰۰۷	۹۹	
	گرانیت	BTS	-۰/۰۰۱ تا -۰/۰۰۶	۶۹۳ تا ۱۱۵/۵	
		I <sub>s(50)</sub>	-۰/۰۰۳ تا -۰/۰۰۹	۲۳۱ تا ۷۷	
	داسیت	BTS	-۰/۰۰۱	۶۹۳	
		I <sub>s(50)</sub>	-۰/۰۰۲	۳۴۶/۵	
	تراورتن	BTS	-۰/۰۲۴ تا -۰/۰۱۵	۴۶/۲ تا ۲۸/۹	
		I <sub>s(50)</sub>	-۰/۰۰۲ تا -۰/۰۱۹	۳۶/۵ تا ۳۴/۷	
	سنگ آهک	BTS	-۰/۰۰۴ تا -۰/۰۰۲	۳۴۶/۵ تا ۱۷۳/۳	
		I <sub>s(50)</sub>	-۰/۰۰۴	۱۷۳/۳	
آمفیبولیت		BTS	-۰/۰۰۱	۶۹۳	
	I <sub>s(50)</sub>	-۰/۰۰۲	۳۴۶/۵		
Akin and Ozsan (2011) مطالعه حاضر	تراورتن	UCS	-۰/۰۰۴۷ تا -۰/۰۰۲۴	۲۸۸/۸ تا ۱۴۷/۵	
		BTS	-۰/۰۰۴۷۵ تا -۰/۰۰۱۷۹	۳۸۶/۱ تا ۹۸	
		I <sub>s(50)</sub>	-۰/۰۰۶۹۴ تا -۰/۰۰۲۳۴	۴۷۵/۷ تا ۱۵/۶۵	
	۹ نوع ماسه سنگ	SDI	-۰/۱۳۰۰۹ تا -۰/۰۰۱۵۷	۴۴۱/۱۵ تا ۵/۳۳	
		تبلور نمک	BTS	-۰/۱۲۳۵۱ تا -۰/۰۱۲۷۰۴	۵۴/۵ تا ۵/۶
			I <sub>s(50)</sub>	-۰/۳۳۶۵۹ تا -۰/۰۰۷۴	۹۳/۵ تا ۲
		SDI	-۰/۲۷۱۰۸ تا -۰/۰۰۱۶۴	۴۲۱/۶۸ تا ۲/۵	

BTS = مقاومت کششی برزیلی، I<sub>s(50)</sub> = شاخص بار نقطه ای تصحیح شده، SDI = شاخص دوام شکستگی

نمک) و Min (با ۴۷۵/۷ چرخه در آزمایش ذوب - انجماد) می‌باشد. همچنین در رابطه با مقادیر نیمه عمر مربوط به مقاومت کششی برزیلی، کمترین و بیشترین آن به ترتیب در نمونه‌های CG (با ۵/۶۱ چرخه در آزمایش تبلور نمک) و B (با ۳۵۷ چرخه در آزمایش ذوب - انجماد) می‌باشد.

۴- کوتاه‌ترین نیمه عمر (بزرگترین ثابت تخریب) در آزمایش دوام شکستگی مربوط به ماسه سنگ Tr با ۲/۵ چرخه (حالت ذوب - انجماد) و بیشترین آن (کمترین ثابت تخریب) مربوط به ماسه سنگ B با ۵۵۵/۳۳ چرخه (حالت مرطوب) می‌باشد. ۵- کمترین و بیشترین مقادیر نیمه عمر شاخص بار نقطه ای به ترتیب مربوط به ماسه سنگ‌های S1 (با ۲ در آزمایش تبلور

۷- مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با کارهای انجام شده توسط سایر محققین نشان داد که پارامترهای دوام‌پذیری به دست آمده برای ماسه سنگ‌ها در محدوده قابل قبولی هستند.

۸- استفاده از این روش ارزیابی دوام‌پذیری طولانی مدت نه تنها می‌تواند یک تخمین مناسب، سریع و دقیقی از رفتار سنگ در اختیار قرار دهد بلکه می‌تواند با صرفه‌جویی در زمان انجام آزمایش‌های هوازگی، مهندسين زمین‌شناس را به هنگام انجام کارهای عملی یاری دهد.

۶- با افزایش درهم قفل شدگی و گیرش دانه‌ها و کاهش فضاهاى خالی، میزان افت شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان کوارتز و دانه‌های کربناته و کاهش خرده سنگ‌های ناپایدار، مقاومت ماسه سنگ‌ها افزایش یافته و عملکرد بهتری در مقابل عوامل هوازگی از خود نشان می‌دهند.

### منابع

- Akin, M., Ozsan, A., 2011. Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests. *Bulletin Engineering Geology Environmental*, 70: 101–114.
- Altindag, R., Alyildiz, I.S., Onargan, T., 2004. Mechanical properties degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze–thaw cycles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41: 1023–1028.
- Angeli, M., Bigas, J.P., Benavente, D., Menendez, B., Hebert, R., David, C., 2007. Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage. *Environmental Geology*, 52:187–19.
- ASTM D4644., 1998. 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
- ASTM., C830., 2000. Standard test methods for apparent porosity, liquid absorption, apparent specific gravity, and bulk density of refractory shapes by vacuum pressure. *ASTM Stand*
- ASTM, C 88–90., 1997. Standard test method for soundness of aggregate by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. *Annual Book of ASTM Standard* 4.2:37–42
- Binal, A., Kasapoglu, K.E., 2002. Effects of freezing and thawing process on physical and mechanical properties of Selime ignimbrite outcrops in Aksaray–Ihlara valley [in Turkish] *Proceeding of 6th Regional. Rock Mechanic Symposium. Konya-Turkey*, pp. 189–196.
- Braitsch, O., 1971. *Salt Deposits: Their Origin and Composition*. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Benavente, D., García, M.A., Fort, R., Ordóñez, S., 2004. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74:113–127.
- Cárdenes, V., Monterroso, C., Rubio, A., Mateos, F.J., Calleja, L., 2012. Effect of freeze–thaw cycles on the bending strength of roofing slate tiles. *Engineering Geology*, 129-130: 91–97
- 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.
- Goudie, A.S., Cooke, R.U., 1984. Salt efflorescences and saline lakes: a distributional analysis. *Geoforum* 15:563–582
- Goudie, A.S., Viles, H.A., Parker, A.G., 1997. Monitoring of rapid salt weathering in the central Namib Desert using limestone blocks. *Journal of Arid Environment*, 37:581–598
- ISRM, 1981. *Rock Characterization, Testing and Monitoring*. In: Brown, E.T. (Ed.), *ISRM suggested methods*. Pergamon Press, Oxford (211 pp.)
- Jamshidi, A., Nikudel, M.R., Khamehchiyan, M., 2013. Predicting the long-term durability of building stones against freeze–thaw using a decay function model, *Cold Regions Science and Technology* 92:29–36
- Mutluturk, M., Altindag, 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. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41: 237–244
- Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E., 1999. Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24:191–209



- 
- Shakoor, A., Bonelli, R.E., 1991. Relationship between petrophysical characteristics, engineering index properties and mechanical properties of selected sandstones. *Bulletin of Engineering Geology and the Environmen*, 28: 55–71
- 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
- Tan, X., Chen, W., Tian, H., Cao, J., 2011. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 68: 130–138.
- Winkler, E.M., Singer, P.C., 1972. Crystallization pressure of salt in stone and concrete. *Geological Society America Bulletin*, 83:3509–3513
- 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.