

اثر فرایند ذوب و انجماد بر روی شاخص دوام وارفنگی و مقاومت کششی برزیلی توف‌های سازند کرج

محمد حسین قبادی*^۱، علیرضا طالب بیدختی^۲، محمدرضا نیکودل^۳

دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۰۶ پذیرش مقاله: ۹۴/۰۹/۰۴

چکیده

توف‌ها سنگ‌های آذر آواری هستند که ضخامت قابل توجهی از سازند کرج را در منطقه البرز به خود اختصاص داده‌اند و به عنوان یکی از مصالح ساختمانی پرمصرف در سازه‌های تهران و استان‌های همجوار آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش با نمونه‌برداری از توف‌های سازند کرج در محدوده شمال تهران، البرز و قزوین، ویژگی‌های سنگ‌شناسی و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی اثر ذوب و انجماد بر روی مقاومت کششی، آزمون ذوب و انجماد در ۸۰ سیکل بر روی نمونه‌ها انجام شد و مقاومت کششی برزیلی در چرخه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین پس از انجام آزمون ذوب و انجماد بر روی نمونه‌های دوام در چرخه‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ اقدام به انجام آزمایش دوام وارفنگی در پنج سیکل گردید. با استفاده از نتایج بدست آمده، دوام‌پذیری دراز مدت توف‌ها توسط مدل تابع تخریب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پارامترهای مدل تابع تخریب (ثابت سرعت تخریب و نیمه‌عمر) بدست آمده از آزمون دوام وارفنگی و مقایسه آن با مشاهدات توصیفی در طول آزمایش نشان می‌دهد که پارامتر شاخص دوام وارفنگی نمی‌تواند برای ارزیابی ثابت سرعت تخریب و تعیین نیمه‌عمر نمونه‌های مورد مطالعه بکار رود. ثابت سرعت تخریب و نیمه‌عمر بدست آمده با استفاده از آزمون مقاومت کششی برزیلی در چرخه‌های مختلف ذوب و انجماد نشان می‌دهد که سرعت تخریب نمونه‌ها متفاوت بوده که می‌بایستی در کاربری نمونه‌ها در نظر گرفته شود.

کلید واژه‌ها: آزمون ذوب و انجماد، مقاومت کششی برزیلی، شاخص دوام وارفنگی، توف، سازند کرج، مدل تابع تخریب

۱. استاد دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم پایه، گروه زمین شناسی amirghobadi@yahoo.com

۲. استادیار دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده علوم پایه، گروه زمین شناسی

۳. دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، گروه زمین شناسی مهندسی

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

امروزه سنگ‌های ساختمانی به طور وسیعی در ساخت و ساز بناها به صورت‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل فرارگیری این سنگ‌ها در معرض فرایندهای جوی از قبیل باد، باران، رطوبت، ذوب و انجماد و تغییرات درجه حرارت منجر به تغییر رنگ طبیعی و کاهش مقاومت سنگ در درازمدت، می‌گردد. با این وجود سرعت تخریب پیشرونده سنگ‌ها با توجه به نوع سنگ متفاوت می‌باشد.

در حال حاضر در بسیاری از مناطق البرز جنوبی به دلیل فراوانی، سهولت استخراج و ظاهر زیبا از توف‌ها به عنوان سنگ نما، مالون و لاشه سنگ در پروژه‌های مختلف از قبیل ساخت دیواره‌های حائل، پل‌سازی، بلوک جداول معابر و در تهیه شن و ماسه کوهی استفاده می‌شود (قبادی و همکاران، ۱۳۹۱). یکی از معایب رفتاری این توف‌ها در کاربردهای مهندسی، هوازگی سریع و گسترده آن‌ها است. این هوازگی به دو صورت فیزیکی و شیمیایی بر روی سنگ عمل می‌کند و در نهایت منجر به تخریب سنگ می‌شود (Steindlberger, 2004). بررسی حساسیت سنگ‌ها به عوامل محیطی در زمان کاربری آنها یکی از فاکتورهای اساسی در ارزیابی ژئوتکتیکی مصالح و تعیین کاربری آنها می‌باشد.

مقاومت سنگ در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد به مجموعه پیچیده‌ای از ویژگی‌های سنگ شامل ترکیب کانی‌شناسی (Dunn and Hudec, 1966)، اندازه و توزیع حفرات موجود در سنگ (Everett and Haynes, 1965) و متعاقب آن ویژگی‌های هیدرولیکی سنگ (Prick, 1995) و نیز ویژگی‌های مکانیکی به خصوص مقاومت کششی سنگ بستگی دارد (Nakamura et al., 1977).

مکانیزمی که به موجب آن تبلور یخ منجر به ایجاد تنش‌های در فابریک سنگ می‌گردد هنوز مورد بحث است. برای یک مدت طولانی افزایش حجم ناشی از انجماد آب موجود در حفرات به عنوان علت اصلی ایجاد تنش در داخل فابریک سنگ در نظر گرفته می‌شد. این فرضیه بر پایه این اصل استوار بود که یک سانتی‌متر مکعب آب بعد از انجماد در حدود

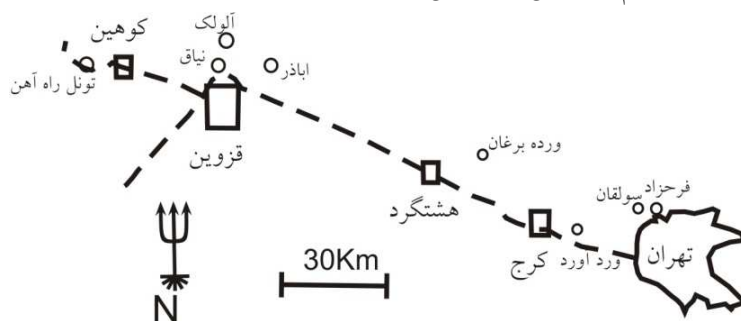
۱/۰۹ سانتی‌متر مکعب فضا را اشغال می‌نماید. با این وجود مشاهدات زیادی این فرضیه را رد کرده است (Walder and Hallet, 1985). بسیاری از محققین موافق با این نظریه هستند که اعمال فشار هیدرولیکی ناشی از تبلور نامتجانس یخ مسئول ایجاد تنش‌های القایی ناشی از انجماد می‌باشد. بدین صورت که فرایند انجماد ابتدا در سطح خارجی سنگ اتفاق می‌افتد و فشار ناشی از تبلور یخ به آب منتقل شده و منجر به حرکت آب از بخش‌های خارجی به سمت بخش‌های داخلی سنگ و افزایش فشار آب منفذی می‌گردد. جریان آب از میان منافذ موئینه و یا منافذ کوچک بدلیل مقاومتی که در برابر جریان سیال ایجاد می‌نمایند منجر به ایجاد تنش‌های القایی می‌شوند. از طرفی شرط اصلی برای توسعه ریزترک‌ها و تخریب ناشی از نیروهای کششی ناشی از انجماد این است که این تنش‌های القایی ایجاد شده توسط تبلور یخ از مقاومت کششی سنگ تجاوز نمایند (Chen et al., 2004).

در سال‌های اخیر اکثر محققین اثر چرخه‌های ذوب و انجماد را بر روی سنگ‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند. Binal et al. (1997) اثر چرخه‌های ذوب و انجماد را بر روی تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های آذرآواری ترکیه مورد بررسی قرار دادند. Binal and Kasapoglu (2002) با انجام ۳۰ چرخه ذوب و انجماد بر روی ایگنمبریت سلیم در ترکیه نتیجه‌گیری نمودند که با افزایش تعداد چرخه‌های ذوب و انجماد برخی از خواص فیزیکی سنگ افزایش و برخی از ویژگی‌های مکانیکی سنگ کاهش می‌یابد. Topal and Sozmen (2003) اثر چرخه‌های ذوب و انجماد را بر روی توف‌های میداس ترکیه با توجه به داده‌های آب و هوایی منطقه مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه‌گیری نمودند که با افزایش تعداد چرخه‌های ذوب و انجماد سرعت موج طولی و مقاومت تک‌محوری فشاری کاهش و تخلخل سنگ افزایش می‌یابد. چرخه‌های ذوب و انجماد منجر به کاهش یکپارچگی سنگ و تخریب سنگ می‌گردد و بر همین اساس Mutluturk et al. (2004) مدل تابع تخریب را برای تعیین نیمه عمر مقاومت مکانیکی سنگ‌ها پیشنهاد نمودند. Altindag et al.

گزارش نشده است. با توجه به اقلیم منطقه البرز، ارزیابی رفتار مهندسی توف‌ها در چرخه‌های ذوب و انجماد یکی از ضروریات اساسی در استفاده از این سنگ‌ها در کاربری‌های مختلف می‌باشد. هدف اصلی این مقاله پیش‌بینی دوام طولانی مدت توف‌های سازند کرج بر اساس مدل تابع تخریب و با استفاده از نتایج مقاومت کششی برزیلی و آزمایش‌های دوام و ارتفتگی می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

به منظور انجام این پژوهش نمونه‌برداری از توف‌های سازند کرج در ۱۳ محل در محدوده شمال تهران تا شمال قزوین انجام شد. عمدتاً نمونه‌برداری در محل ترانسه معادن موجود در محدوده مورد مطالعه انجام شد و در حین نمونه‌برداری سعی شد تا انتخاب نمونه‌های هوازده و خرد شده پرهیز شود. شکل ۱ موقعیت محل‌های نمونه برداری را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت محل‌های نمونه‌برداری

نمونه گردید و اثر چرخه‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ ذوب و انجماد بر روی میزان شاخص دوام و ارتفتگی مورد ارزیابی قرار گرفت. در تهیه نمونه‌ها سعی شد که نمونه‌ها کروی و فاقد گوشه‌های زاویه‌دار باشد. آزمایش دوام‌پذیری بر اساس آزمون استاندارد پیشنهاد شده توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1979) در پنج سیکل انجام گرفت.

همچنین اثر ذوب و انجماد بر مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت

(2003) کاهش در مقاومت مکانیکی آندزیت اسپارتا را در پایان ۵۰ چرخه ذوب و انجماد مشاهده نموده و نیمه عمر خصوصیات مکانیکی آن را با استفاده از مدل تابع تخریب پیش‌بینی نمودند. همچنین این محققین اثر ۵۵ چرخه ذوب و انجماد را بر روی ایگنمبریت‌های در بیغازی ترکیه مورد مطالعه قرار داده و نیمه عمر خصوصیات مکانیکی را برای این سنگ برآورد نمودند (Altindag et al., 2004). جمشیدی و همکاران با استفاده از مدل تابع تخریب و انجام آزمایش‌های بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی، رفتار دوام‌پذیری ۱۴ نوع سنگ ساختمانی قرار گرفته در معرض سیکل‌های ذوب - انجماد را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که سرعت تخریب برای انواع مختلف سنگها متفاوت می‌باشد (Jamshidi et al., 2013). اکثر مطالعات پیشین متمرکز بر اثر ذوب و انجماد بر روی رفتار فیزیکی و مکانیکی سنگ شامل تخلخل، سرعت موج، شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی و مقاومت تراکمی تک‌محوری می‌باشد و در خصوص اثر ذوب و انجماد بر روی شاخص دوام و ارتفتگی، مطالعاتی

ترکیب کانی‌شناسی و خصوصیات بافتی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزاسیون تعیین گردید. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها از قبیل میزان تخلخل، وزن واحد حجم خشک و اشباع، درصد جذب آب و سرعت عبور موج در حالت خشک و اشباع و مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای تعیین گردید. به منظور بررسی اثر ذوب و انجماد بر روی میزان شاخص دوام پذیری سنگ اقدام به آماده سازی نمونه‌های دوام به تعداد ۴۰ قطعه ۴۰ تا ۶۰ گرمی برای هر

این عوامل از خود نشان می دهند. به منظور تعیین خصوصیات کانی شناسی و بافتی نمونه های توف مورد مطالعه، اقدام به تهیه مقاطع نازک و مطالعه آن با میکروسکوپ پلاریزاسیون گردید که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۱ ملاحظه می شود نمونه های مورد مطالعه به سه دسته توف های شیشه ای، توف های بلورین و توف های سنگی تقسیم بندی می شوند.

دوام پذیری طولانی مدت نمونه ها در مقابل عملکرد پدیده ذوب و انجماد با استفاده از مدل تابع تخریب ارزیابی گردید.

۱-۲. مطالعات سنگ شناسی

دوام سنگ در برابر عوامل هوازدگی شیمیایی و فیزیکی به مقدار زیادی به پارامترهای ذاتی سنگ از جمله تعیین خصوصیات کانی شناسی بستگی دارد. سنگ ها به دلیل دارا بودن کانی های تشکیل دهنده متفاوت، دوام متفاوتی را در برابر

جدول ۱. خصوصیات کانی شناسی توف های مورد مطالعه

نام سنگ	کانی ثانویه و درصد آن	جنس زمینه	درصد زمینه	درصد کانی های اصلی					ایستگاه مورد مطالعه
				Bio.	Op.	Q.	F.	Li.	
کریستال ویتریک توف	کمی کلسیت و سیلیس در خمیره شیشه ای	شیشه، کوارتز و فلدسپات	۷۵-۷۰			۱۹	۷		F-1-2
کریستال ویتریک توف	سیلیس ریز بلور و کلریت	شیشه	۶۵-۷۰			۲۰	۱۵		F-3-A
کریستال توف	کلریت	کوارتز و شیشه	۴۰			۴۰-۳۵	۲۰		ED
کریستال ویتریک توف	کلریت و سیلیس ریز بلور (۵٪)	شیشه	۶۰			۳۰-۲۵	۵	۵	VAR-M
لیتیک کریستال توف	کلریت (۲۰٪) و کلسیت (۲۵-۳۰٪)	شیشه و کوارتز	۶۰			۵	۱۵	۲۰-۲۵	V.B-1
لیتیک کریستال توف	کلریت - سرسیت - کلسیت	شیشه و کوارتز	۲۵-۳۰		-	-	۲۵-۳۰	۴۰	V.B-2
ویتریک توف	کلریت، کانی های رسی	شیشه	۱۰۰						V.B-3
کریستال توف	کلریت، کانی رسی	شیشه	۶۰		-	۱۵	۱۵	۱۰	V.B-4
ایگنمبریت (توف جوش خورده)	به مقدار کمی کانی رسی	شیشه و ریز قطعات کانی های موجود	۵۰-۶۰	۷	۲	۲۰	۲۰	-	ABZ
ویتریک توف	کلریت، سرسیت	شیشه	۸۵-۹۰		۳	۵	۱۵		Haj-F
لیتیک کریستال توف	کانی رسی، کلریت و کلسیت	به شدت آتره شده، متشکل از کانی رسی، کلریت و کلسیت	۲۵			۳۵-۳۰	۴۵-۴۰	۷-۵	N-3
کریستال توف	کمی کلریت، کلسیت و سیلیس ثانویه	شیشه	۲۵		۴	۳۵	۳۵-۳۰		ALO
کریستال توف	کلریت - کانی رسی - کلسیت	شیشه ای به شدت هوازده رسی - کربناته - اکسید آهن	۵۰		۱۰	۱۵	۲۰	۵	T.Q.R

مکانیکی شد. خصوصیات فیزیکی نمونه ها شامل وزن واحد حجم خشک و اشباع، اندازه گیری سرعت موج در حالت خشک و اشباع، تخلخل موثر و درصد جذب آب بر اساس

۲-۲. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی توف ها

پس از حمل نمونه های بلوکی به آزمایشگاه و تهیه مغزه های لازم، اقدام به انجام آزمایش های تعیین خصوصیات فیزیکی و

گرفت. در جدول ۲ نتایج مربوط به آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی و محل‌های نمونه برداری آورده شده است.

استاندارد آزمایشگاهی موجود (ISRM, 1979) مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین خصوصیات مکانیکی شامل شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی نیز مورد ارزیابی قرار

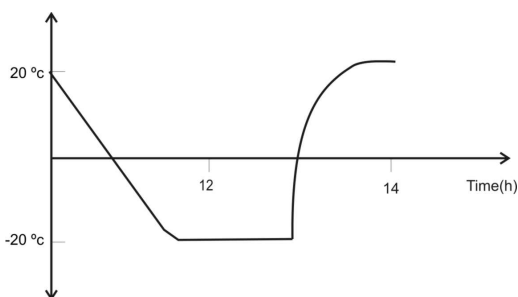
جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی توف‌های مورد مطالعه

شماره نمونه	محل نمونه برداری	تخلخل %	وزن واحد حجم) (gr/cm ³)		میانگین سرعت موج طولی (m/sec)		درصد جذب آب	میانگین شاخص بار نقطه ای (Mpa)		میانگین مقاومت کششی برزیلی خشک (Mpa)
			خشک	اشباع	خشک	اشباع		خشک	اشباع	
F.1.2	شمال فرحزاد- تهران	۶/۰۱	۲/۲۵	۲/۳۱	۴۳۷۲	۴۳۸۷	۰/۶۴	۹/۰۰	۶/۳۳	۲۱/۷۶
F.3.A	شمال فرحزاد- تهران	۷/۱۴	۲/۴۰	۲/۴۷	۴۳۲۲	۴۳۲۳	۱/۳۸	۱۲/۷۴	۹/۱۶	۲۵/۶۷
ED	بعد از سولقان - پل ششم آزادراه تهران- شمال	۷/۳۵	۲/۴۴	۲/۵۱	۴۱۰۱	۴۱۳۹	۰/۷۸	۱۰/۷۸	۵/۳۳	۱۹/۲۷
VAR.M	ورد آورد	۹/۲۱	۲/۳۵	۲/۴۴	۴۳۳۵	۴۳۴۸	۰/۸۸	۱۲/۶۶	۸/۸۴	۲۴/۶۷
V.B.1	ورده برغان-البرز	۷/۱۸	۲/۴۶	۲/۵۳	۴۳۰۶	۴۳۳۵	۰/۷۶	۹/۳۸	۴/۸۵	۱۸/۱۵
V.B.2	ورده برغان-البرز	۷/۵۰	۲/۴۴	۲/۵۲	۴۰۴۳	۴۱۴۵	۰/۸۴	۹/۰۰	۴/۶۷	۱۲/۷۲
V.B.3	ورده برغان-البرز	۹/۳۲	۲/۳۹	۲/۴۸	۳۹۶۵	۴۰۲۳	۱/۱۰	۸/۶۸	۵/۱۴	۲۰/۴۹
V.B.4	ورده برغان-البرز	۷/۳۲	۲/۴۶	۲/۵۳	۳۱۳۷	۳۴۵۵	۰/۸۵	۶/۶۸	۲/۳۳	۲۴/۶۷
ABZ	اباذر- شمال شرق قزوین	۲۵/۳۱	۱/۷۲	۱/۹۸	۲۵۶۸	۲۱۱۲	۱۳/۴۸	۳/۰۷	۱/۶۹	۶/۴۸
H.A.J.F	معدن حاج فتحعلی- شمال قزوین	۹/۴۳	۲/۳۳	۲/۴۲	۳۲۷۸	۳۳۶۸	۱/۶۷	۹/۵۷	۵/۲۴	۱۵/۶۷
N-3	نیاق- شمال قزوین	۱۲/۶۳	۲/۳۷	۲/۴۹	۱۸۰۴	۱۰۱۱	۴/۲۹	۲/۵۸	۰/۴۳	۳/۱۵
ALO	آلولک- شمال قزوین	۹/۳۶	۲/۴۳	۲/۳۴	۳۵۴۸	۳۶۶۲	۱/۴۱	۵/۳۴	۲/۴۱	۱۰/۹۲
T.Q.R	تونل شماره ۲ راه آهن قزوین- رشت	۱۰/۰۴	۲/۰۰	۲/۲۰	۲۶۶۸	۲۰۵۰	۲/۴۵	۳/۴۷	۰/۲۶	۱۰/۱۱

۳-۲. آزمایش ذوب و انجماد

۱- انجام آزمایش دوام در پنج سیکل بر روی نمونه‌های بکر که در ادامه با سیکل صفر نشان داده می‌شود.
 ۲- انجام آزمایش دوام در پنج سیکل بر روی نمونه‌ها بعد از ۱۵ چرخه آزمایش ذوب و انجماد
 ۳- انجام آزمایش دوام در پنج سیکل بر روی نمونه‌ها بعد از ۳۰ چرخه آزمایش ذوب و انجماد
 ۴- انجام آزمایش دوام در پنج سیکل بر روی نمونه‌ها بعد از ۶۰ چرخه آزمایش ذوب و انجماد
 هر چرخه ذوب و انجماد از قرار دادن ۱۸ ساعت نمونه‌های اشباع در فریزر در دمای 20 ± 1 درجه سانتی گراد و قرار دادن نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در وان آب با دمای 20 ± 4 درجه

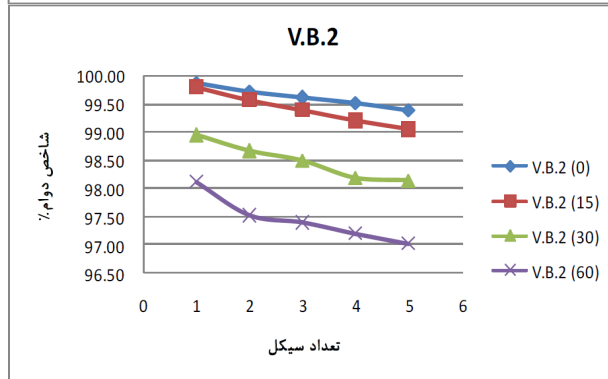
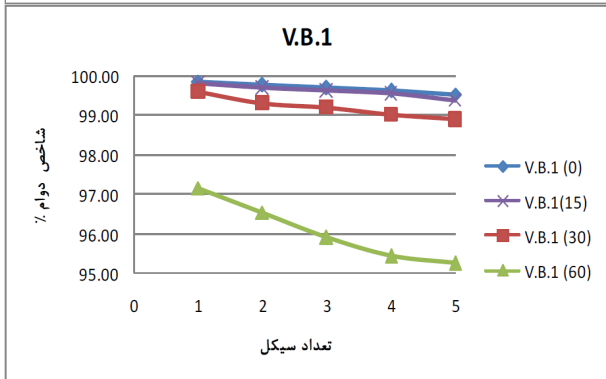
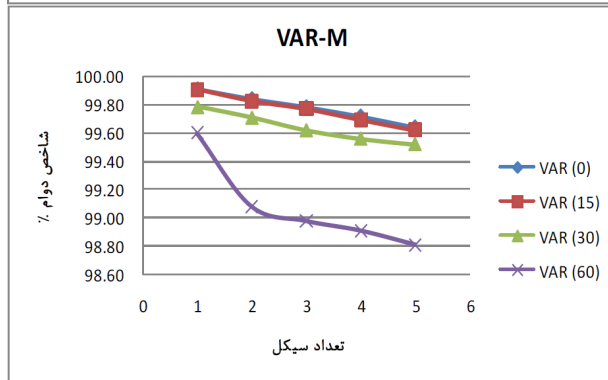
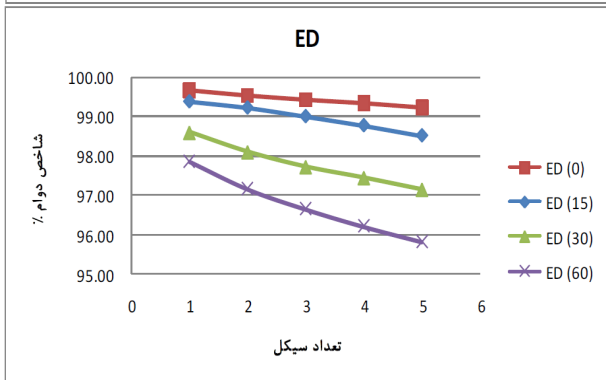
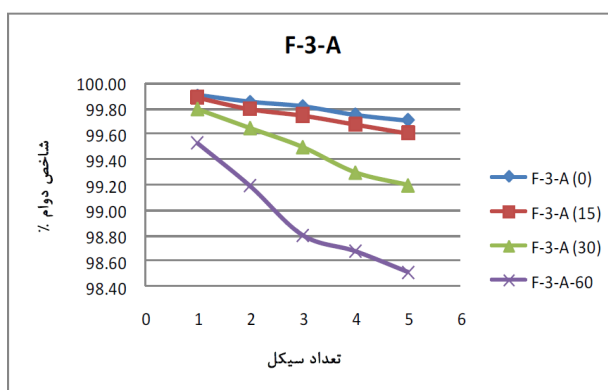
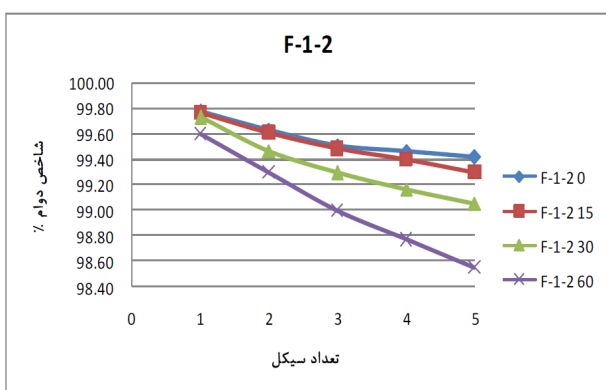
تخریب سنگ توسط عمل انجماد و ذوب آب به پارامترهای تخلخل، توزیع اندازه حفرات، درجه اشباع، نوع کانی‌ها، منشاء سنگ و دامنه تغییرات محیط بستگی دارد (Chen et al., 2004). در تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر ذوب و انجماد بر روی شاخص دوام و ارفتنگی، اقدام به آماده سازی نمونه‌های دوام بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1979) گردید. بدین منظور برای هر نوع سنگ، چهل نمونه دوام تهیه گردید که در چهار مرحله به شرح زیر مورد آزمایش قرار گرفت.

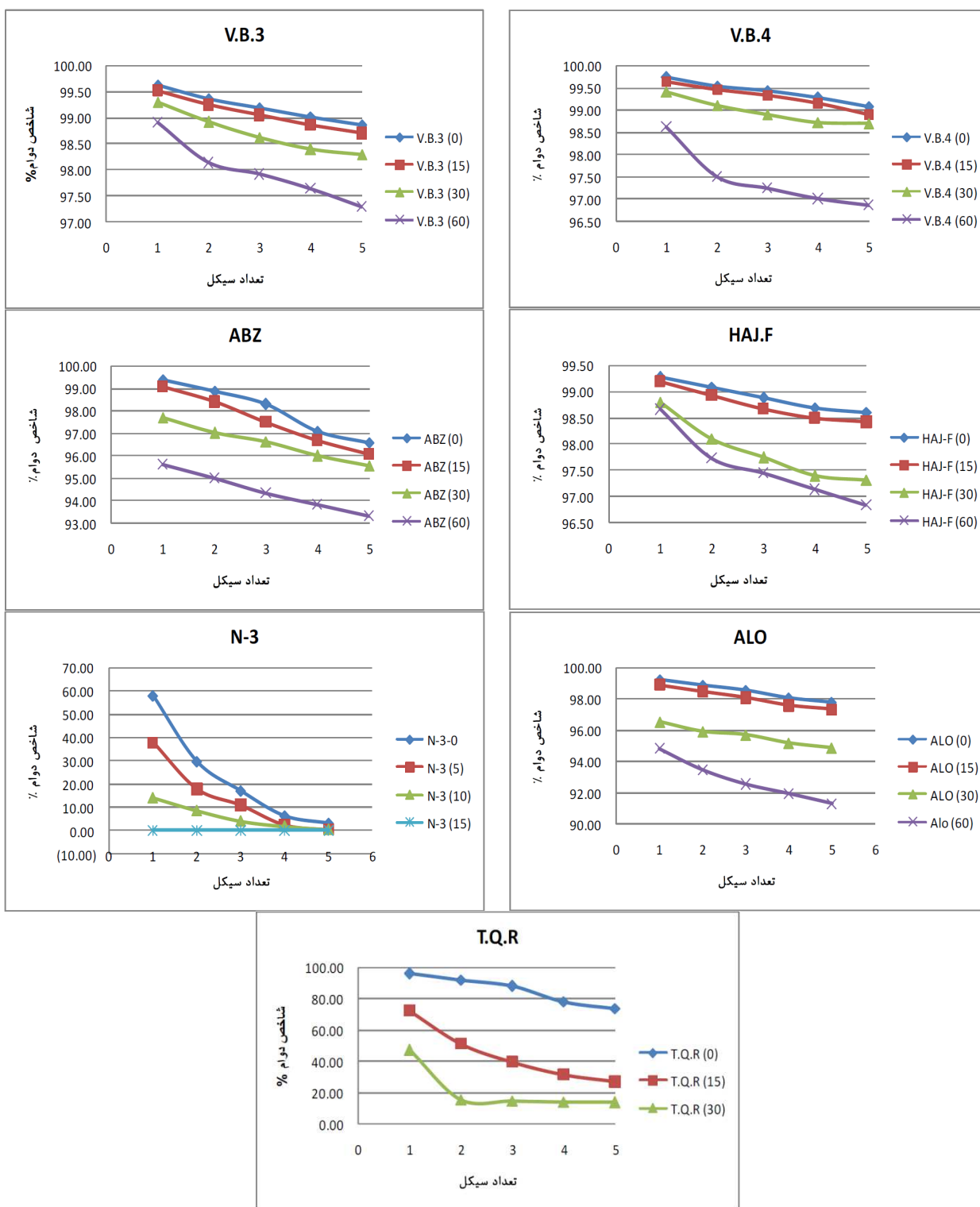


شکل ۲. نمودار تغییرات دما در طی یک سیکل از آزمون ذوب و انجماد

سانتی گراد تشکیل شده است. شکل ۲ یک چرخه ذوب و انجماد را نشان می دهد.

شکل ۳ تغییرات شاخص دوام و ارتنگی نمونه های مورد مطالعه در چرخه های مختلف ذوب و انجماد را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود با افزایش چرخه های ذوب و انجماد، مقادیر شاخص دوام و ارتنگی با نسبت های مختلفی برای نمونه های مختلف کاهش پیدا کرده است.





شکل ۳. تغییرات مقادیر شاخص دوام و ارتفتگی نمونه‌ها مورد مطالعه در چرخه‌های مختلف ذوب و انجماد (نام هر نمونه در بالای هر نمودار قید شده است، عدد (۰) بیانگر انجام آزمایش دوام بر روی سنگ بکر و اعداد (۱۵)، (۳۰) و (۶۰) نشان دهنده چرخه‌های ذوب و انجماد است)

مشاهدات چشمی بر روی نمونه‌های دوام در پایان چرخه‌های ذوب و انجماد بر روی نمونه‌های دوام حاکی از آن است به جزء دو نمونه N.3 و T.Q.R که در چرخه‌هایی ابتدایی متحمل تخریب شدید شده‌اند کلیه نمونه‌ها در پایان چرخه ۱۵ ذوب و انجماد تغییرات در شکل نمونه‌ها و افت وزنی آنها مشاهده نگردید. روند تغییرات شکلی برخی از نمونه‌ها در پایان چرخه ۳۰ و ۶۰ در شکل ۴ نشان داده شده است.

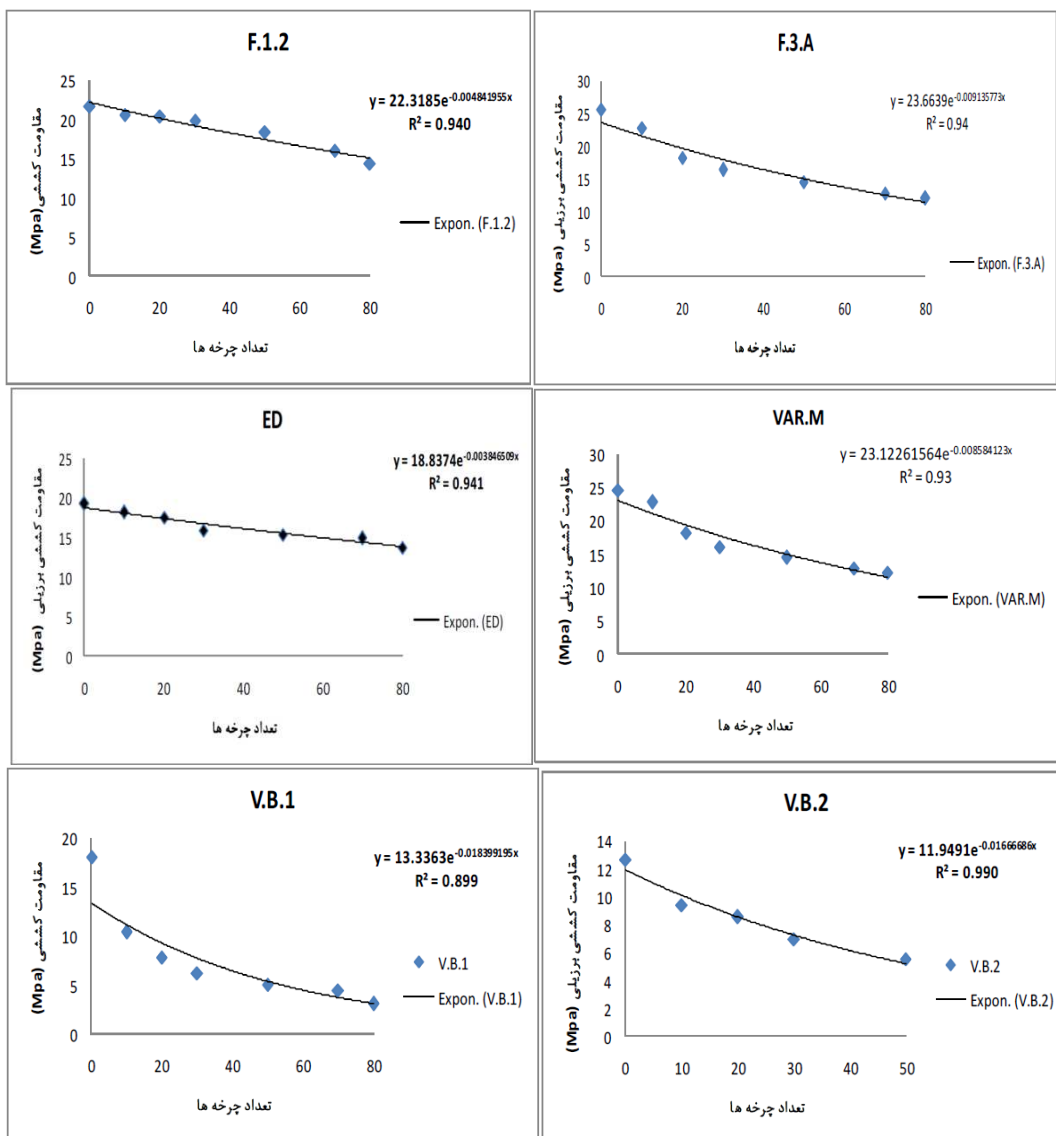
همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود روند افت وزنی در اکثر نمونه‌ها با افزایش چرخه‌های ذوب و انجماد از حالت خطی به حالت منحنی با تعقر به سمت بالا میل می‌نماید. این موضوع به این دلیل است که بدلیل اعمال چرخه‌های ذوب و انجماد بر روی نمونه‌ها در چرخه‌های بالا سنگ متحمل تخریب ناشی از این فرایند گردیده که شدت تخریب در سطح نمونه بیشتر است و سنگ دچار عدم یکپارچگی می‌گردد به همین دلیل در سیکل‌های ابتدایی آزمایش دوام نرخ کاهش افت وزنی شدیدتر از سیکل‌های بعدی می‌شود.

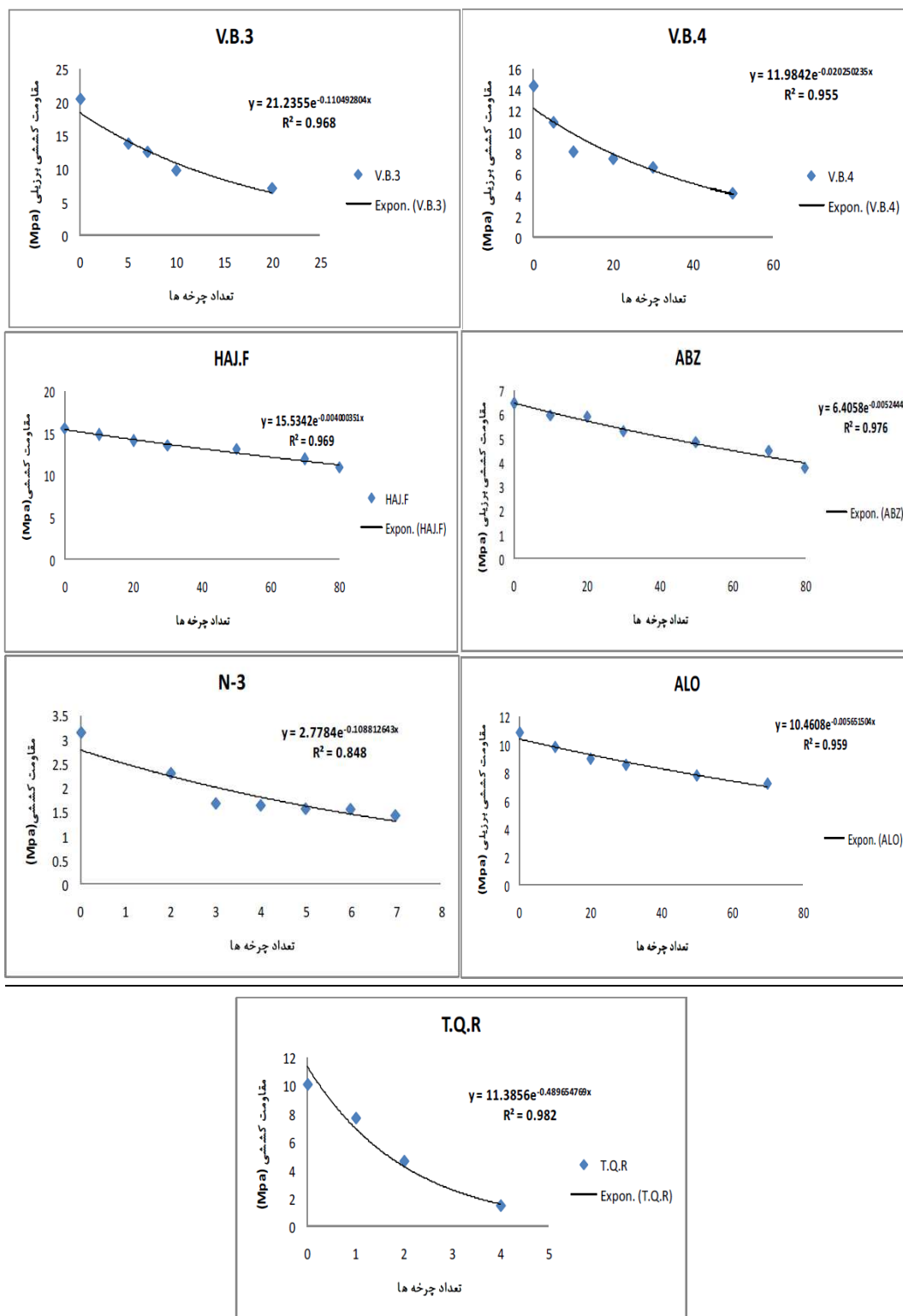


شکل ۴. تغییرات در شکل و اندازه نمونه‌های دوام بعد از ۵ سیکل از انجام آزمون دوام در چرخه‌های ۳۰ و ۶۰ آزمون ذوب و انجماد (کلیه عکس‌های سمت چپ مربوط به چرخه ۳۰ ذوب و انجماد و عکس‌های سمت راست مربوط به چرخه ۶۰ ذوب و انجماد می‌شوند).

آزمایش مقاومت کششی برزیلی بر اساس استاندارد ISRM, 1978 شد. آزمون ذوب و انجماد بر روی نمونه های برزیلی در ۸۰ چرخه انجام شد. در شکل ۵ تغییرات مقاومت کششی برزیلی برای نمونه های مختلف در طی چرخه های ذوب و انجماد نشان داده شده است.

مشاهدات نشان می دهد که نمونه های F.1.2 ، ED و ABZ تخریب بسیار کمتری را نسبت به نمونه های دیگر در پایان ۶۰ چرخه ذوب و انجماد نشان می دهند. نمونه N.3 در چرخه پنجم آزمون ذوب و انجماد به طور کامل تخریب گردید. همچنین به منظور بررسی اثر ذوب و انجماد بر روی مقاومت کششی برزیلی اقدام به تهیه نمونه های برزیلی و انجام





شکل ۵. روند تغییرات مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها در طی چرخه‌های مختلف ذوب و انجماد

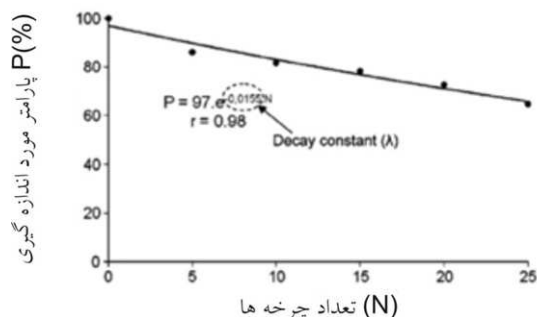
۳. مدل تابع تخریب (DFM)

فرایند تخریب سنگ را به عنوان فرایند مرتبه اول مدل‌سازی کند. در این مدل سرعت تخریب بواسطه عملکرد عوامل مختلف هوازدگی متناسب با یکپارچگی سنگ در شروع هر

مدل تابع تخریب (Decay Function Model) که برای اولین بار توسط Mutluturk et al. (2004) ارائه گردید می‌تواند

بر اساس شاخص‌های دوام بدست آمده در سیکل پنجم در نمونه بکر و نمونه‌هایی که متحمل چرخه‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ ذوب و انجماد شده اند، اقدام به تعیین ثابت سرعت تخریب و نیمه عمر گردید (شکل ۷).

ثابت تخریب نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس تحلیل رگسیون بدست می‌آید. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط Akin and Ozsan (2011) رابطه افت خصوصیات فیزیکی یا مکانیکی با تعداد چرخه‌های ذوب و انجماد به صورت نمایی است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود ثابت تخریب دارای رابطه معکوسی با الگوی یکپارچگی سنگ می‌باشد.



شکل ۶. تعیین پارامتر ثابت تخریب با استفاده از آزمایشهای شتابدار (Akin and Ozsan, 2011)

میزان اعتبار مدل می‌تواند با در نظر گرفتن این که تا چه اندازه مدل فرضی با داده‌های تجربی مطابقت دارد ارزیابی شود. که این امر توسط ضریب تعیین (R^2) اندازه گیری می‌شود.

۴. ارزیابی نتایج

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمون دوام و ارتفتگی نمونه‌ها و مقاومت کششی برزیلی اقدام به ارزیابی دوام پذیری نمونه‌ها بر اساس مدل تابع تخریب شد. شاخص دوام سیکل پنجم به عنوان پارامتر متغیر در چرخه‌های مختلف ذوب و انجماد در آزمون دوام و ارتفتگی در نظر گرفته شد. بر اساس تابع نمایی برازش شده بر داده‌ها ثابت تخریب و ضریب تعیین نمونه‌ها تعیین شد (شکل ۵ و ۷).

سیکل (در طی آزمایش هوازدگی شتابدار) می‌باشد. این موضوع می‌تواند به صورت رابطه (۱) ارائه شود.

$$-\left\{ \frac{dI}{dN} \right\} = \lambda I \quad (1)$$

در این رابطه $\left\{ \frac{dI}{dN} \right\}$ عبارتست از سرعت تخریب، λ ثابت تخریب، I یکپارچگی سنگ و N تعداد سیکل می‌باشد. علامت منفی در این رابطه نشان دهنده افت یکپارچگی سنگ (تخریب سنگ) است. اگر یکپارچگی اولیه سنگ I_0 و یکپارچگی پس از N سیکل I_N باشد، با استفاده از انتگرال گیری از رابطه ۱، بین یکپارچگی اولیه سنگ (I_0) و یکپارچگی پس از N سیکل (I_N) رابطه (۲) به شکل لگاریتمی به دست می‌آید:

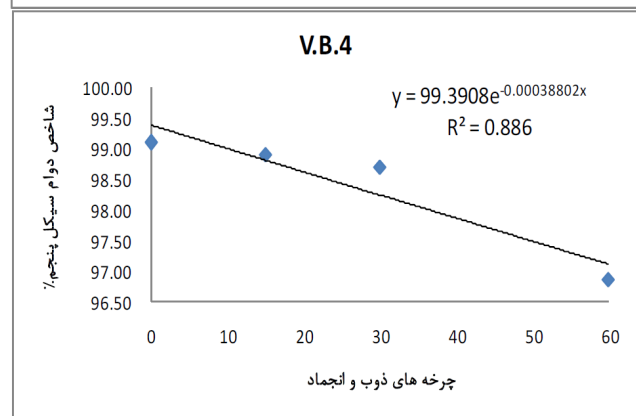
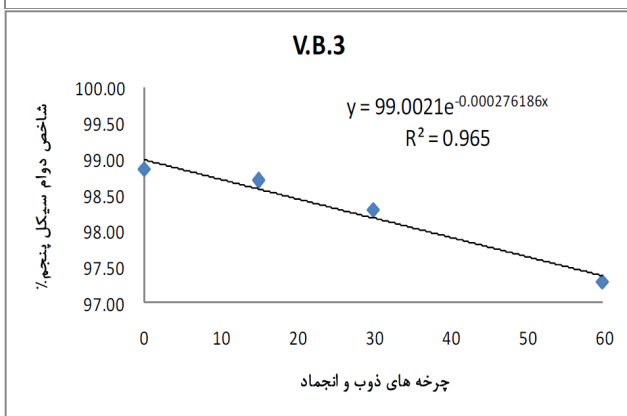
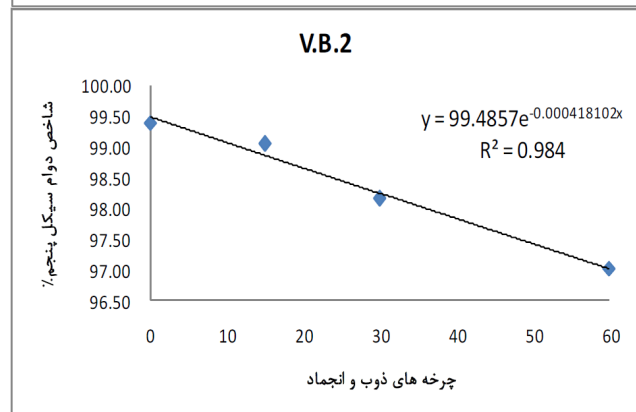
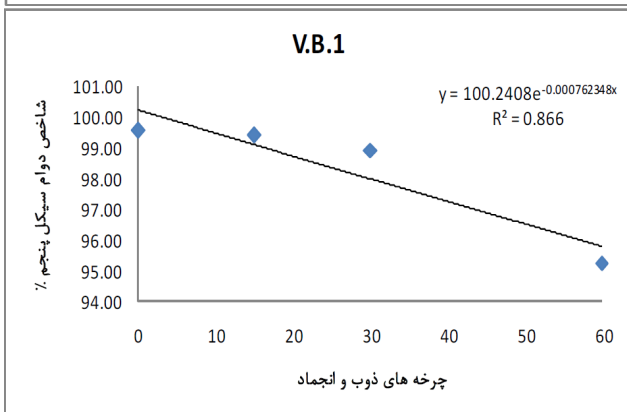
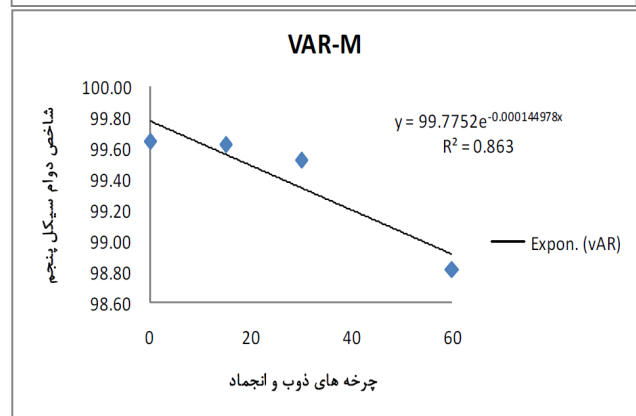
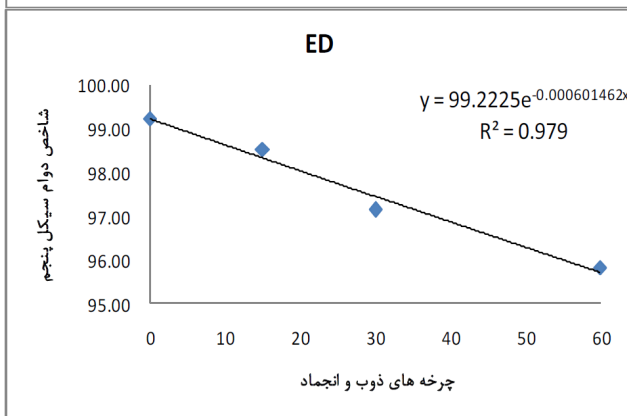
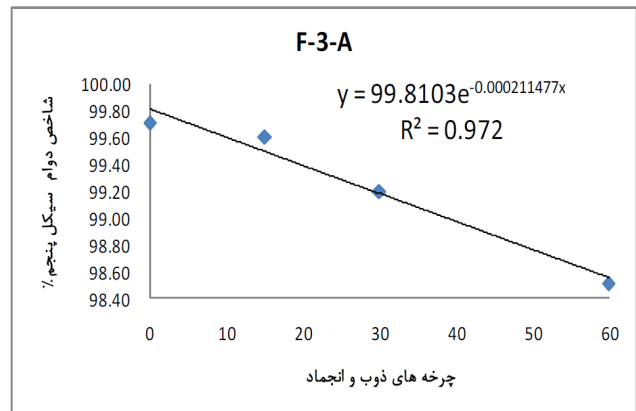
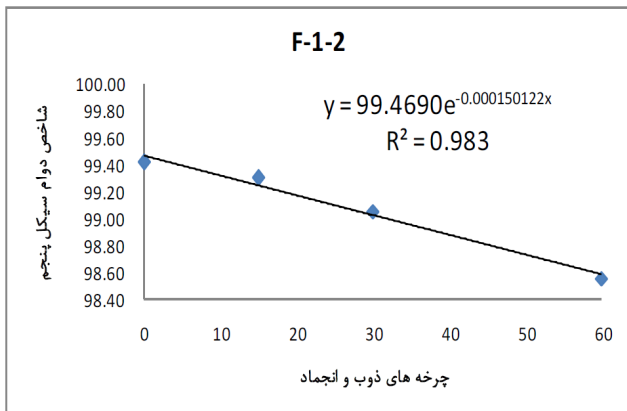
$$\int_{I_0}^{I_N} \left\{ \frac{dI}{dN} \right\} = \lambda I \rightarrow \ln \left\{ \frac{I_0}{I_N} \right\} = \lambda N \quad (2)$$

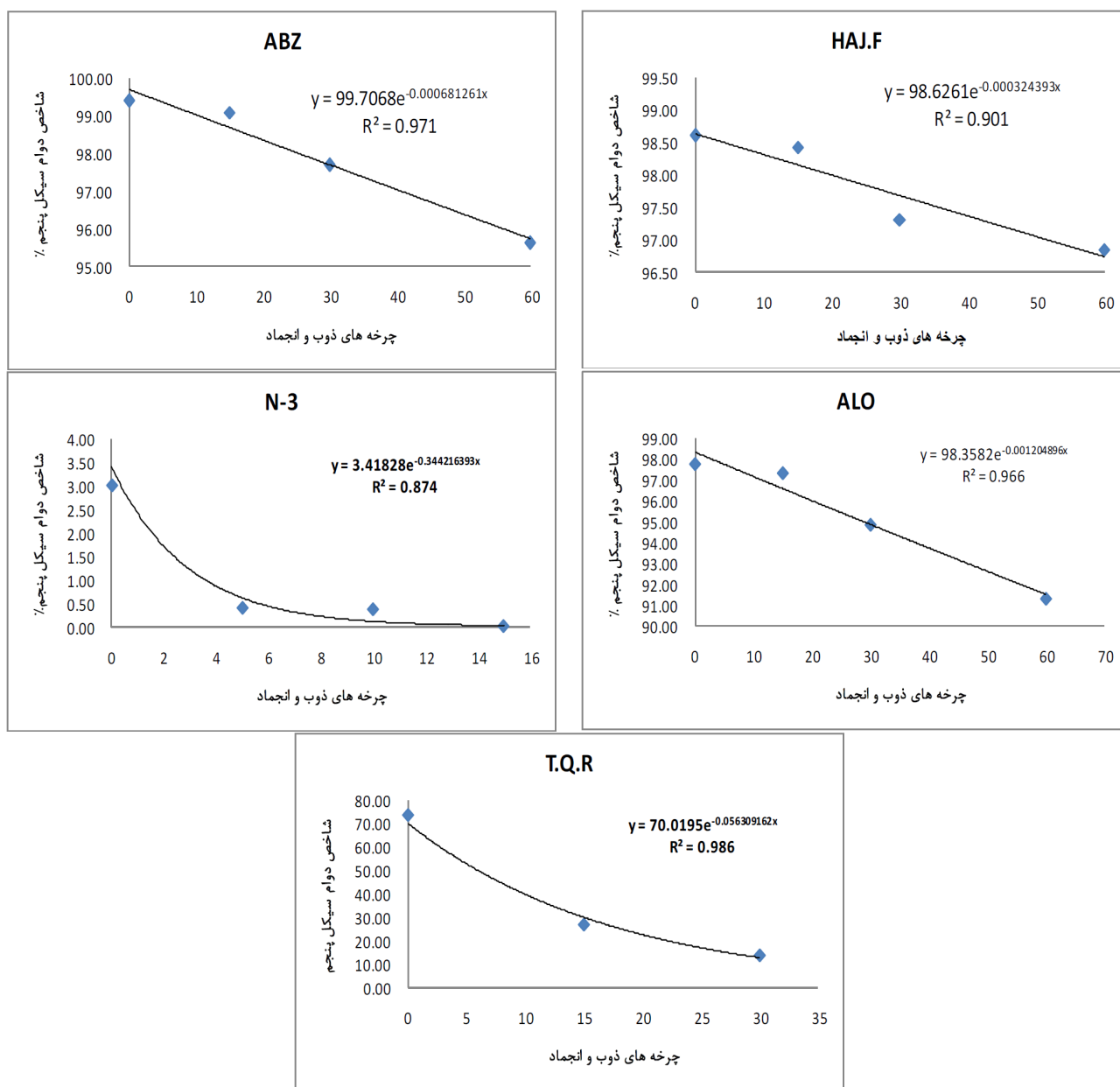
شکل نمایی رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) می‌تواند نوشته شود:

$$I_N = I_0 \cdot e^{-\lambda N} \quad (3)$$

در رابطه (۳) $e^{-\lambda N}$ فاکتور تخریب (decay factor) نامیده می‌شود که نشان دهنده مقدار یکپارچگی باقیمانده پس از N سیکل است. همچنین ثابت تخریب (λ)، بیانگر تخریب نسبی متوسط با عملکرد هر سیکل مجزا می‌باشد. علاوه بر این، پارامتری تحت عنوان نیمه عمر سنگ ($N_{1/2}$) به عنوان مقیاسی از دوام پذیری سنگ، تعریف می‌شود که عبارتست از تعداد سیکلهای لازم که خصوصیات فیزیکی یا مکانیکی سنگ (I_0) را به نصف مقدار اولیه آنها کاهش می‌دهد ($I_0/2$). سنگ‌هایی که دارای مقاومت بالایی در مقابل تخریب می‌باشند 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 می‌گردد:

$$\left. \begin{aligned} \ln(I_0 / I_N) &= \lambda N \\ I_N &= I_0 / 2 \end{aligned} \right\} \ln(2I_0 / I_0) = \lambda N_{1/2} \rightarrow \ln 2 / \lambda = N_{1/2} \rightarrow N_{1/2} \approx 0.693 / \lambda \quad (4)$$





شکل ۷. تعیین ضریب ثابت تخریب بر اساس نتایج سیکل پنجم آزمون دوام و ارتفتگی سنگ در چرخه های مختلف ذوب و انجماد

این آسیب به صورت های مختلفی از قبیل پوسته پوسته شدن، جدا شدن قطعات ریز و دو نیمه شدن و خرد شدن کامل مشاهده گردید (شکل ۴). به دلیل اینکه اندازه قطعات جدا شده از نمونه های دوام بزرگتر از ۲ میلی متر می باشد، قطعات جدا شده از استوانه مشبک دستگاه (الک شماره ۱۰) دوام خارج نشده در نتیجه اثر تخریب نمونه ها بر روی شاخص دوام مشهود نیست. به عنوان مثال نمونه V.B.3 در پایان ۳۰ چرخه ذوب و انجماد، نمونه ها متحمل تخریب شدید شده اند و به غیر از دو قطعه بقیه قطعات (هشت قطعه) دچار خرد

نتایج مربوط به ثابت تخریب و نیمه عمر نمونه ها بر اساس نتایج سیکل پنجم آزمون دوام و ارتفتگی سنگ در چرخه های مختلف ذوب و انجماد در جدول ۳ آورده شده است. مقایسه نتایج حاصل از جدول ۳ با مشاهدات عینی در طول روند آزمایش نشان دهنده این مسئله است که به دلیل ذیل نتایج بدست آمده از این تحلیل منطبق با مشاهدات عینی نمی باشد. مشاهدات عینی در طی روند انجام آزمایش گویای این واقعیت است که اکثر نمونه ها در پایان چرخه ۶۰ ذوب و انجماد متحمل آسیب دیدگی کم تا به شدت زیاد شده اند. که

بکر و نمونه‌های که در معرض چرخه‌های متوالی ذوب و انجماد قرار گرفته اند، مقادیر سرعت تخریب و نیمه عمر نمونه‌های مورد آزمایش بدست آمد که نتایج آن در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

شدگی شدید شده‌اند در حالی که شاخص دوام و ارتفتگی سیکل پنجم این نمونه در پایان ۳۰ چرخه ذوب و انجماد ۹۸/۳۰ محاسبه شده است و نیمه عمر آن ۲۵۰۹ برآورد شده است. بر اساس آنالیز صورت گرفته بر روی مقادیر بدست آمده از آزمایش مقاومت کششی برزیلی بر روی نمونه‌های

جدول ۳. مقادیر ثابت سرعت تخریب و نیمه عمر توف‌های سازند کرج در چرخه‌های ذوب و انجماد بر اساس شاخص دوام و ارتفتگی

نیمه عمر	ثابت تخریب	ضریب تعیین (R ²)	معادله تخریب آزمایش دوام	شماره نمونه
۴۷۸۰	-۰/۰۰۰۱۴۴۹۷۸	۰/۸۶	$y = 99.7752e^{-0.000144978x}$	VAR.M
۴۶۱۶	-۰/۰۰۰۱۵۰۱۲۲	۰/۹۸	$y = 99.4690e^{-0.000150122x}$	F-1-2
۳۲۷۶	-۰/۰۰۰۲۱۱۴۷۷	۰/۹۷	$y = 99.8103e^{-0.000211477x}$	F.3.A
۲۵۰۹	-۰/۰۰۰۲۷۶۱۸۶	۰/۹۶	$y = 99.0021e^{-0.000276186x}$	V.B.3
۲۱۳۶	-۰/۰۰۰۳۲۴۳۹۳	۰/۹۰	$y = 98.6261e^{-0.000324393x}$	HAJ.F
۱۷۸۵	-۰/۰۰۰۳۸۸۰۲	۰/۸۷	$y = 99.3908e^{-0.00038802x}$	V.B.4
۱۶۵۷	-۰/۰۰۰۴۱۸۱۰۲	۰/۹۸	$y = 99.4857e^{-0.000418102x}$	V.B.2
۱۱۵۲	-۰/۰۰۰۶۰۱۴۶۲	۰/۹۸	$y = 99.2225e^{-0.000601462x}$	ED
۱۰۱۷	-۰/۰۰۰۶۸۱۲۶۱	۰/۹۷	$y = 99.7068e^{-0.000681261x}$	ABZ
۹۰۹	-۰/۰۰۰۷۶۲۳۴۸	۰/۸۷	$y = 100.2408e^{-0.000762348x}$	V.B.1
۵۷۵	-۰/۰۰۱۲۰۴۸۹۶	۰/۹۷	$y = 98.3582e^{-0.001204896x}$	ALO
۱۲	-۰/۰۰۵۶۳۰۹۱۶۲	۰/۹۹	$y = 70.0195e^{-0.056309162x}$	T.Q.R
۲	-۰/۳۴۴۲۱۶۳۹۳	۰/۸۷	$y = 3.41828e^{-0.344216393x}$	N-3

جدول ۴. ثابت تخریب و نیمه عمر نمونه‌ها بر اساس مقاومت کششی برزیلی در چرخه‌های مختلف ذوب و انجماد

نیمه عمر	ثابت تخریب	ضریب تعیین (R ²)	معادله تخریب آزمایش برزیلی	شماره نمونه
۱۸۰	-۰/۰۰۳۸۴۶۵۰۹	۰/۹۴	$y = 18.8374e^{-0.003846509x}$	ED
۱۷۳	-۰/۰۰۴۰۰۰۳۵۱	۰/۹۷	$y = 15.5342e^{-0.004000351x}$	HAJ.F
۱۴۳	-۰/۰۰۴۸۴۱۹۵۵	۰/۹۴	$y = 22.3185e^{-0.004841955x}$	F-1-2
۱۳۲	-۰/۰۰۵۲۴۴۲۵	۰/۹۸	$y = 6.4058e^{-0.005244425x}$	ABZ
۱۲۲	-۰/۰۰۵۶۵۱۵۰۴	۰/۹۶	$y = 10.4608e^{-0.005651504x}$	ALO
۸۰	-۰/۰۰۸۵۴۱۲۳	۰/۹۳	$y = 23.1226e^{-0.008584123x}$	VAR.M
۷۵	-۰/۰۰۹۱۳۵۷۷۳	۰/۹۴	$y = 23.6639e^{-0.009135773x}$	F.3.A
۴۱	-۰/۰۱۶۶۶۸۶	۰/۹۹	$y = 11.9491e^{-0.01666686x}$	V.B.2
۳۷	-۰/۰۱۸۳۹۹۱۹۵	۰/۹۰	$y = 13.3363e^{-0.018399195x}$	V.B.1
۳۴	-۰/۰۲۰۲۵۰۲۳۵	۰/۹۶	$y = 11.9842e^{-0.020250235x}$	V.B.4
۶	۰/۱۰۸۱۲۶۴۳	۰/۸۵	$y = 2.7784e^{-0.108812643x}$	N-3
۶	-۰/۱۱۰۴۹۲۸۰۴	۰/۹۷	$y = 21.2355e^{-0.110492804x}$	V.B.3
۱	-۰/۴۸۹۶۵۴۷۶۹	۰/۹۸	$y = 11.3856e^{-0.489654769x}$	T.Q.R

سازند کرج با نتایج مطالعات سایر محققین بر روی سایر سنگها در جدول ۵ مقایسه شده است. هر چند نوع سنگهای مورد مطالعه با مطالعات پیشین متفاوت می باشد، اما می توان با مقایسه نیمه عمر و دوام پذیری آنها با یکدیگر درباره خصوصیات مهندسی آنها و تاثیر پذیری اشان از اثرات محیطی اظهار نظر نمود. همانطور که نتایج جدول ۵ نشان می دهد نیمه عمر نمونه توف های مورد مطالعه در چرخه های ذوب و انجماد دارای دامنه تغییرات نسبتا گسترده ای می باشد که این تغییرات تحت تاثیر میزان هوازدگی و ترکیب کانی شناسی توف ها می باشد. بنابراین می بایستی در زمان استفاده از این نمونه سنگها در کاربری های مختلف ساختمانی دوام پذیری آنها در چرخه های ذوب و انجماد مد نظر قرار گیرد.

همانطور که ملاحظه می شود مقادیر نیمه عمر نمونه های مورد مطالعه بین ۱ تا ۱۸۰ متغیر می باشد.

همانطور که در بخش های پیشین ذکر شد تعدادی از محققین با استفاده از مدل تابع تخریب، دوام پذیری طولانی مدت سنگها را بر اساس پارامتر مقاومت کششی برزیلی در چرخه های ذوب و انجماد مورد بررسی قرار داده اند (Altindag et al, 2004, Altindag et al, 2006, Jamshidi et al, 2013). این سنگها عمدتا شامل تراورتن، سنگ آهک، مرمر، ایگنمبریت، ریولیت، گرانیت، دولومیت، آمفیبولیت و ویتریک توف می باشند. نتایج حاصل از مطالعه حاضر و پارامترهای ثابت تخریب و نیمه عمر بدست آمده در آزمون ذوب و انجماد بر اساس مقاومت کششی برزیلی توف های

جدول ۵. مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج مطالعات انجام شده بر روی انواع مختلف سنگها با استفاده از مدل تابع تخریب

نیمه عمر	ثابت تخریب	پارامتر مورد استفاده	نوع سنگ	نام محقق
۵۸/۲	-۰/۰۱۱۵	BTS	ایگنمبریت	Altindag et al. (2004)
۹۸ تا ۵۸	-۰/۰۰۷۱ تا -۰/۰۱۱۹	BTS	سنگ آهک	Altindag et al. (2006)
۸۶ تا ۷۵	-۰/۰۰۸۱ تا -۰/۰۰۹۲	BTS	تراورتن	
۱۱۵/۵	-۰/۰۰۶	BTS	ریولیت	Jamshidi et al. (2013)
۱۱۵/۵ تا ۶۹۳	-۰/۰۰۶ تا -۰/۰۰۱	BTS	گرانیت	
۶۹۳	-۰/۰۰۱	BTS	داسیت	
۴۸/۹ تا ۴۶/۲	-۰/۰۱۵ تا -۰/۰۲۴	BTS	تراورتن	
۱۷۳/۳ تا ۳۴/۵	-۰/۰۰۲ تا -۰/۰۰۴	BTS	سنگ آهک	
۶۹۳	-۰/۰۰۱	BTS	آمفیبولیت	
۸۶/۶	-۰/۰۰۸	BTS	توف شیشه ای	
۱۱۵/۵	-۰/۰۰۶	BTS	ایگنمبریت	
۱ تا ۱۸۰	-۰/۰۰۳ تا -۰/۰۸۹۶	BTS	۱۳ نمونه توف	مطالعه حاضر

BTS: مقاومت کششی برزیلی

۵. نتیجه گیری

۱- نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک و نتایج بدست آمده از آزمون های فیزیکی، مکانیکی و آزمون ذوب و انجماد حاکی از تنوع زیاد در خصوصیات سنگ شناسی، فیزیکی و مکانیکی توف ها است. لذا این تنوع می تواند کاربری این سنگها را متمایز و محدودیت هایی ایجاد نماید.

۲- نتایج حاصل از اثر ذوب و انجماد بر روی شاخص دوام و ارتفگی بر اساس مدل تابع تخریب نشان می دهد که پارامتر شاخص دوام و ارتفگی تمی تواند برای ارزیابی ثابت سرعت تخریب و تعیین نیمه عمر آنها بکار رود. پیشنهاد می شود که از آزمون دوام و ارتفگی اصلاح شده با قطر منافذ بزرگتر از ۲ میلی متر استوانه مشبک برای این منظور استفاده شود.

۳- کوتاه ترین نیمه عمر (بزرگترین ثابت تخریب) در آزمایش مقاومت کششی برزیلی مربوط به نمونه T.Q.R مربوط به تونل شماره ۲ راه آهن قزوین - رشت و بزرگترین نیمه عمر

(کوچکترین ثابت تخریب) مربوط به نمونه E.D از محل پل ششم آزادراه تهران-شمال می باشد.
 ۴- سنگ شناسی و میزان هوازدگی توفها تاثیر بیشتری را بر روی میزان افت مقاومت کششی در طی چرخه های ذوب و انجماد نسبت به عوامل دیگر دارند به صورتی که با افزایش هوازدگی و افزایش قطعات سنگی (لیتیک) در سنگ ثابت سرعت تخریب سنگ بر اساس مقاومت کششی افزایش می یابد.

منابع

- قبادی، م.ح.، طالب بیدختی، ع.، آسیابانها، ع.، ۱۳۹۱. تاثیر اسیدپته آب و خصوصیات کانی شناسی بر روی شاخص دوام وارفتگی توفهای شمال قزوین، نشریه زمین شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی، دوره ۶، شماره ۱، ص ۱۴۲۸-۱۴۰۹.
- 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., Alyıldız, İ.S., Onargan, T., 2004. Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze-thaw cycles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 41: 1023-1028
- Altindag, R., Mutlutürk, M., Karaguzel, R., 2003. The effects of freezing-thawing cycles on the useability of Isparta andesite as a building stone. *Proceeding of Intetnational Symposium of Industrial Minerals and Building Stone*, İstanbul, Turkey, pp. 289-292.
- Altindag, R., Sengum, N., Guney, A., Mutlutürk, M., Karagüzel, R., Onargan, T., 2006. The integrity loss of physico- mechanical properties of building stones when subjected recurrent cycles of freeze-thaw (F-T) process, in: Kourkoulis, S.K. (Ed.), *Fracture and Failure of Natural Building Stones*, Springer, pp. 363-373.
- Binal, A., Kasapoglu, K.E., 2002. Effects of freezing and thawing process on physical and mechanical properties of selime ignimbrite outcops in Aksaray-Ihlara Valley. (In Turkish). *Proceedings of Vith Regional Rock Mechanics Symposium*. (sensögüt. C., Özkan. I. Eds.). Konya, Turkey, pp.189-196.
- Binal, A.; Kasapoglu, K. E.; Goekceoglu, C., 1997. The surficial physical deterioration behaviour of neogene volcanosedimentary rocks of Eskisehir-Yazilikaya, NW-Turkey, in: Marions, P.G., Tsiambaos, G.C., Stournaras, G.C.(Eds), *Engineering Geology and the Environment*, Greece, pp.3065-3069.
- 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.
- Dunn, J. R., Hudec, P. P., 1966. Water, clay, and rock soundness. *Ohio Journal of Science*, 66:153-68.
- Everett, D.H., Haynes, J.M., 1965. Capillary properties of some model pore systems with special reference to damage. *RILEM Bull*, 27:31-38.
- ISRM, 1978. Commission on standardization of laboratory and field test, suggested methods for determining tensile strength of rock materials, *int. j. rock Mech. M. Sci. & Geomech. Abstr.*, 15: 99-103
- ISRM, 1979. Commission on Standardization of Laboratory and Field tests, suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties. *International journal rock mechanic mining science*, 16: 48-156.
- 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., Altidag, 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.
- Nakamura, M., Togaya, T., Okuda, S., 1997. Effect of dimensional distribution of pores in porous ceramics on frost resistance under one dimensional cooling. *Yogyo - Kyokai - Shi*, 85(987): 549-554.
- Prick, A., 1995. Dilatometrical behaviour of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles. *Catena*, 25:7-20.
- Steindlberger, E., 2004. Volcanic tuffs from Hesse (Germany) and their weathering behavior. *Enviromental Geology*, 46: 378-390.
- Topal, T., Sozmen, B., 2003. Deterioration mechanisms of tuffs in Midas monument. *Engineering Geology*, 68(3-4): 201-223
- Walder, J., Hallet, B., 1985. A theoretical model of the fracture of rock during freezing. *Geol Soc Am Bull*, 96:336-346.