

ارزیابی دوام تراورتن در برابر هوازگی نمک: یک مطالعه آزمایشگاهی

امین جمشیدی^۱، محمدرضا نیکودل^{۲*}، ماشالله خامه‌چیان^۳ و رامین ساریخانی^۴

۱ و ۴- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

۲ و ۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

نویسنده مسئول: nikudelm@modares.ac.ir*

دریافت: ۹۷/۹/۲۴ پذیرش: ۹۸/۳/۲۶

چکیده

با توجه به شرایط اقلیمی متنوع ایران شامل مناطق گرم و خشک و همچنین ساحلی می‌توان گفت هوازگی ناشی از تبلور نمک یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار روی دوام سنگ‌های استفاده شده در نمای بیرونی ساختمان‌ها می‌باشد. در نتیجه ضروری است دوام سنگ‌ها ارزیابی شود و مناسب‌ترین و مقاوم‌ترین آن‌ها برای نمای بیرونی ساختمان‌ها انتخاب شود. در این پژوهش دوام ۶ نمونه تراورتن از مناطق آذرشهر و محلات در برابر هوازگی ناشی از تبلور نمک مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور آزمایش هوازگی نمک در سولفات سدیم تا ۶۰ چرخه انجام و بعد از هر ۵ چرخه تغییر در وضعیت ظاهری نمونه‌ها (تغییر رنگ، شوره‌زدگی و تخریب شیمیایی و فیزیکی)، ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی و سرعت موج P) و افت وزنی نمونه‌ها ($Dry Weight Loss$) ثبت و تعیین شده است. نتایج دلالت بر این دارد که تغییر در وضعیت ظاهری نمونه‌ها شامل تغییر رنگ، شوره‌زدگی و همچنین تخریب شیمیایی و فیزیکی به دلیل اینکه معیار اندازه‌گیری آن‌ها کیفی می‌باشد نمی‌توانند ارزیابی خیلی دقیقی از دوام نمونه‌ها در برابر هوازگی نمک فراهم کنند. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد در بین پارامترهایی که معیار اندازه‌گیری آن‌ها کمی می‌باشد مقاومت کششی برزیلی و سرعت موج P در مقایسه با مقاومت بار نقطه‌ای و افت وزنی ارزیابی دقیق‌تری از دوام نمونه‌ها می‌دهند. همچنین مشاهدات و ثبت ماکروسکوپی وضعیت ظاهری نمونه‌ها در آزمایش هوازگی نمک نشان می‌دهد که ویژگی‌های سنگ‌شناسی نقش مهمی در تخریب شیمیایی و فیزیکی و در نتیجه دوام دارند.

واژه‌های کلیدی: هوازگی نمک، تراورتن، وضعیت ظاهری، ویژگی‌های مکانیکی، افت وزنی

۱- پیشگفتار

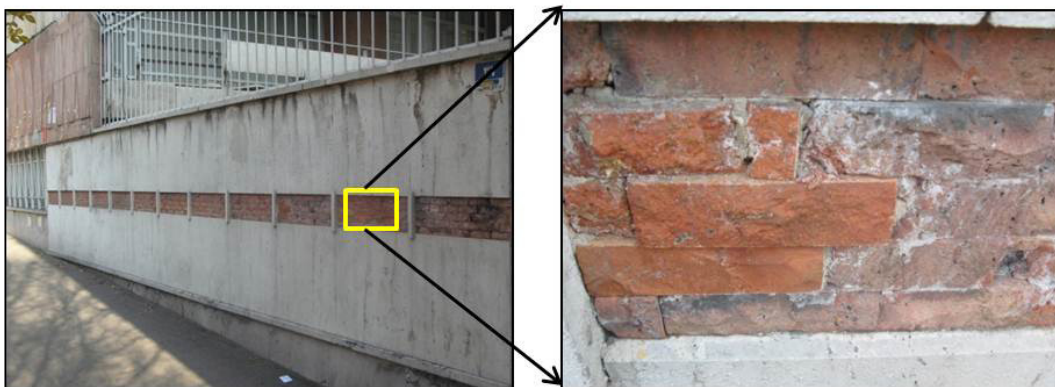
با توجه به شرایط اقلیمی منطقه، تراورتن‌هایی که در نمای بیرونی ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند ممکن است به طور مستقیم در معرض عوامل جوی مانند تبلور محلول‌های نمک، یخبندان، باران (به ویژه باران‌های اسیدی ناشی از آلودگی هوا)، اشعه آفتاب، باد، انبساط و انقباض ناشی از تغییرات حرارتی قرار بگیرند. لذا سنگ‌های مورد استفاده در این شرایط باید از دوام مناسبی در برابر عوامل مذکور برخوردار باشند. با توجه به شرایط اقلیمی متنوع ایران با دامنه گسترده‌ای از مناطق گرم و خشک و ساحلی با مقادیر نمک‌های محلول بالا مانند قم، یزد، سمنان، کرمان و شهرهای سواحل جنوبی و شمالی می‌توان گفت هوازگی ناشی از تبلور محلول‌های نمک یکی از مهم‌ترین عوامل در کاهش دوام و طول عمر مفید تراورتن‌های استفاده شده در این مناطق می‌باشند. به طور مثال شکل ۱ تاثیر هوازگی

نمک روی تراورتن قرمز آذرشهر در یکی از مناطق شهر تهران را نشان می‌دهد که باعث زوال‌پذیری، شوره‌زدگی، پوسته پوسته شدن و نتیجتاً کاهش دوام آن شده است. در تحقیقات گذشته محققین به بررسی جنبه‌های مختلف هوازگی نمک روی دامنه گسترده‌ای از ویژگی‌های سنگ‌ها شامل ویژگی‌های ظاهری، فیزیکی، مکانیکی و دوام پرداخته‌اند (توپال و دوباران، ۱۹۹۷؛ سوسا و همکاران، ۲۰۰۵؛ جمشیدی و همکاران، ۱۳۸۷؛ بناونته و همکاران ۲۰۰۷؛ آنجلی و همکاران، ۲۰۱۰؛ جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۳).

یاووز (۲۰۰۶) مقاومت سایشی نمونه‌هایی از توف را بعد از هوازگی نمک بررسی کرد. نتایج این محقق نشان داد میزان افت وزنی نمونه‌ها در اثر سایش بعد از هوازگی نمک به میزان ۶۰ درصد مقدار اولیه (قبل از هوازگی نمک) افزایش می‌یابد. اثر هوازگی نمک روی نمونه‌هایی از سنگ‌های آذرین توسط اولوسای (۲۰۰۷) بررسی شد.

افت وزنی، چگالی، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت ضربه‌ای اینگونه نیستند. کولترونه و همکاران (۲۰۱۲) به منظور ارزیابی کیفیت سنگ‌های رسوبی به عنوان مصالح ساختمانی مجموعه‌ای از آزمایش‌های پتروفیزیکی و هوازدگی نمک را انجام دادند. نتایج نشان داد آزمایش هوازدگی نمک باعث تغییر رنگ سنگ‌ها و همچنین افت وزنی آن‌ها شده است. این محققین دلیل اصلی افت وزنی را به تفاوت کانی‌شناسی بین ذرات تشکیل‌دهنده و ماتریکس و همچنین وجود ناهمسانگردی قوی به علت حضور سطوح لایه‌بندی در نمونه‌ها نسبت دادند. جمشیدی و همکاران (۲۰۱۳) دوام نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی را با اندازه‌گیری افت وزنی آن‌ها در برابر هوازدگی نمک سولفات سدیم بررسی کردند.

این محقق آزمایش هوازدگی نمک در سولفات سدیم را تا ۱۵ چرخه انجام و به منظور ارزیابی دوام نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری قبل و بعد از آزمایش و همچنین افت وزنی نمونه‌ها را اندازه‌گیری کرد. زدف و همکاران (۲۰۰۷) اثر هوازدگی نمک روی سنگ‌های داسیت، آندزیت و توف را بررسی کردند. نتایج این محققین نشان داد دوام سنگ‌ها در برابر هوازدگی نمک به ویژگی‌های شیمیایی، کانی‌شناسی و فیزیکی آن‌ها بستگی دارد. تأثیر هوازدگی نمک روی زوال ۶ نمونه مرمر توسط یاووز و توپال (۲۰۰۷) بررسی شد. نتایج این محققین نشان داد جذب آب، تخلخل موثر، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت سایشی و سرعت موج P پارامترهای مناسبی برای ارزیابی دوام و کیفیت مرمرها هستند در صورتی که



شکل ۱. شوره‌زدگی و زوال تراورتن قرمز آذرشهر به دلیل هوازدگی نمک (عکس از امین جمشیدی - تهران، میدان فاطمی، تقاطع خیابان جویبار و کوچه نوربخش)

سرعت موج P و افت وزنی نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف آزمایش ثبت و اندازه‌گیری شده است. سپس بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج، مناسب‌ترین پارامترها برای ارزیابی دوام نمونه‌ها معرفی شده‌اند.

۲- مواد و روش پژوهش

برای انجام پژوهش حاضر، طی بازدید از معادن آذرشهر در استان آذربایجان شرقی و محلات در استان مرکزی بلوک‌هایی با ابعاد تقریبی (۳۰×۴۰×۴۰ سانتی‌متر) از ۶ نمونه تراورتن تهیه شد و از آن‌ها مغزه‌های لازم برای انجام آزمایش‌های پیش‌بینی شده تهیه گردید. جدول ۱ نام و موقعیت جغرافیایی نمونه‌ها و شکل ۲ تعدادی از معادن و بلوک‌های تهیه شده را نشان می‌دهد. سپس ویژگی‌های سنگ‌شناسی با تهیه مقطع نازک و آنالیز

در تحقیقات گذشته بیش‌تر از افت وزنی، سرعت موج P و ویژگی‌های مکانیکی به عنوان معیاری برای ارزیابی دوام سنگ‌ها در برابر هوازدگی نمک استفاده شده است. از آنجایی که در این تحقیقات، بررسی‌های ناچیزی برای انتخاب پارامتر مناسب برای ارزیابی دوام سنگ‌ها صورت گرفته است و همچنین با توجه به پیچیدگی ساختار حفرات و غیر همگن بودن سنگ‌ها و تأثیر عوامل متعدد روی دوام سنگ‌ها، این تلاش‌ها همچنان ناکافی بوده و تحقیقات بیش‌تری را می‌طلبد.

در تحقیق حاضر، آزمایش هوازدگی نمک در محلول سولفات سدیم تا ۶۰ چرخه بر روی ۶ نمونه تراورتن انجام شده است و تغییر در وضعیت ظاهری (تغییر رنگ، شوره‌زدگی، تخریب شیمیایی و فیزیکی)، ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی و

ظاهری، ویژگی‌های مکانیکی و افت وزنی نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف آزمایش ثبت و اندازه‌گیری شده است. در پایان بر اساس داده‌های حاصل و تجزیه و تحلیل نتایج، دوام نمونه‌ها ارزیابی شده است.

تجزیه شیمیایی (XRD) و ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (۱۹۸۱) تعیین شده‌اند. در ادامه آزمایش هوازگی نمک در محلول سولفات سدیم انجام شد و تغییر در وضعیت

جدول ۱. نام تجاری، زمین‌شناسی، محل نمونه‌برداری و مختصات جغرافیایی نمونه‌های مورد مطالعه

نام تجاری	نام زمین‌شناسی	محل نمونه برداری	مختصات جغرافیایی نمونه‌برداری
تراورتن قرمز	تراورتن	آذرشهر	۴۱ ۷۵ ۷۶۸ - ۰۵ ۷۸ ۸۳۵
تراورتن گردویی	تراورتن	آذرشهر	۴۱ ۷۷ ۱۵۰ - ۰۵ ۸۲ ۹۴۰
تراورتن لیمویی	تراورتن	آذرشهر	۴۱ ۷۰ ۲۳۲ - ۰۵ ۷۹ ۹۶۲
سفید آتشکوه	تراورتن	محلالت	۳۹ ۵۰ ۳۴۸ - ۰۵ ۳۸ ۰۲۷
سفید عباس آباد	تراورتن	محلالت	۳۷ ۴۵ ۵۱۲ - ۰۴ ۵۷ ۵۱۸
کرم آتشکوه	تراورتن	محلالت	۳۷ ۴۸ ۴۴۱ - ۰۴ ۶۳ ۸۲۸



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی و تعدادی از معادن تهیه نمونه‌ها و بلوک‌های تهیه شده

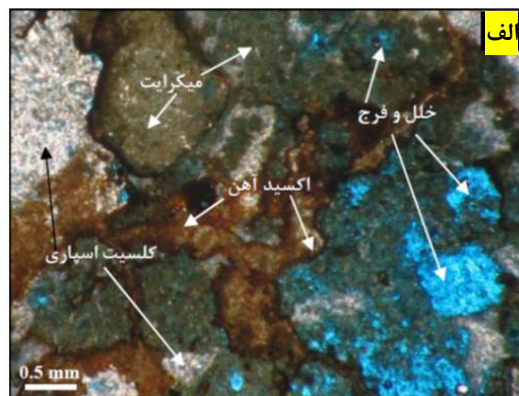
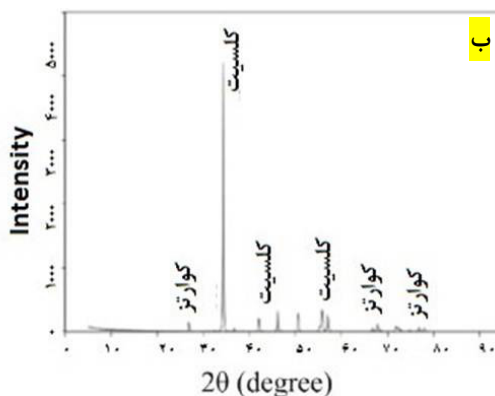
تجزیه شیمیایی به آسانی قابل شناسایی و تشخیص هستند. شکل ۳ تصویری از مقاطع نازک میکروسکوپی و آنالیز تجزیه شیمیایی برای تراورتن گردویی را نشان می‌دهد. نتایج ویژگی‌های سنگ‌شناسی نشان می‌دهد کلسیت (اسپارایت، میکرو اسپارایت و میکرایت) و کوارتز تنها کانی‌های تشکیل دهنده نمونه‌ها می‌باشند (جدول ۲). بر اساس ساخت، نمونه‌ها دارای ساخت لایه‌ای و توده‌ای هستند. تراورتن‌های قرمز، گردویی، لیمویی و سفید عباس‌آباد دارای ساخت لایه‌ای و

۳- ویژگی‌های سنگ‌شناسی

ویژگی‌های سنگ‌شناسی نمونه‌ها شامل ترکیب کانی‌شناسی، بافت و ساخت، با تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی و آنالیز تجزیه شیمیایی (XRD) بررسی شد. آنالیز تجزیه شیمیایی به عنوان مکملی برای مقاطع نازک میکروسکوپی به منظور بررسی دقیق‌تر ترکیب کانی-شناسی می‌باشد. علاوه بر این یکسری کانی‌های خاص مانند کانی‌های اوپک که به وسیله مقاطع نازک میکروسکوپی نمی‌توان آن‌ها را شناسایی کرد با آنالیز

سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که بافت نمونه‌ها در مجموع ادغامی از اسپارایت، میکرو اسپارایت و میکرایت می‌باشد.

تراورتن‌های سفید آتشکوه و کرم آتشکوه دارای ساخت توده‌ای هستند. علاوه بر این، نتایج ویژگی‌های



شکل ۳. الف) تصویر میکروسکوپی و ب) نتایج آنالیز تجزیه شیمیایی (XRD) تراورتن گردویی

جدول ۲. نتایج ویژگی‌های سنگ‌شناسی نمونه‌ها

نام تجاری	ترکیب کانی‌شناسی	ساخت	بافت
تراورتن قرمز	کلسیت	لایه‌ای	بافت آن عمدتاً اسپارایتی است که در بخش‌هایی دانه‌های اکسید آهن مشاهده می‌شود. علاوه بر این بافت استروماتولیتی (حالت جلبک نواری) در آن مشاهده می‌شود. در نمونه دستی تخلخل از نوع ماکرو و در مقاطع نازک به صورت میکرو و ماکرو مشاهده می‌شود.
تراورتن گردویی	کلسیت و کوارتز	لایه‌ای	بافت سنگ عمدتاً اسپارایتی است که در بخش‌هایی از آن خرده‌های اکستراکلاست و اکسیدهای آهن مشاهده می‌شود و همچنین در بخش‌هایی حالات حد واسط میکرایتی مشاهده می‌شود. به طور کلی بافت سنگ تناوبی از جلبک‌ها به فرم استروماتولیتی که در بین آن‌ها نوارهای اسپارایت دیاژنزی مشاهده می‌شود.
تراورتن لیمویی	کلسیت	لایه‌ای	بافت آن عمدتاً از میکرایت (گل‌آهکی)، میکرو اسپارایت و اسپارایت تشکیل شده است که به صورت مخلوط با هم دیده می‌شوند. بدین معنی که بخش‌های میکرایتی در حال تبلور مجدد و نئومورفیزم به میکرو اسپارایت، و میکرو اسپارایت‌ها در حال تبدیل شدن به اسپارایت می‌باشند. علاوه بر این در بخش‌هایی از نمونه بافت اسفرولیتی به صورت شعاعی مشاهده می‌شود.
سفید آتشکوه	کلسیت	توده‌ای	بافت سنگ ادغامی از میکرایت و اسپارایت است که به طور توأم با هم دیده می‌شوند و زمینه سنگ را تشکیل داده‌اند. در بین زمینه بافت دندان سگی (اسکالوندری) نیز قابل مشاهده است.
سفید عباس‌آباد	کلسیت و کوارتز	لایه‌ای	میکرو اسپارایت و اسپارایت زمینه سنگ را تشکیل داده‌اند که نتیجه‌ای از تبلور و نئومورفیزم میکرایت است. علاوه بر این در بخش‌هایی از نمونه بافت اسفرولیتی (بادبزی) مشاهده می‌شود.
کرم آتشکوه	کلسیت و کوارتز	توده‌ای	بافت سنگ در دو حالت بادبزی و نیز وجود اینتراکلاست و پلت‌ها که در یک زمینه اسپارایتی قرار گرفته‌اند تشکیل یافته است. علاوه بر این در بخش‌هایی از نمونه بافت به صورت جلبک‌های پیژوئیدی مشاهده می‌شود که از نوارهای متحدالمرکز (ندولی) تشکیل شده‌اند.

۴- آزمایش هوازدگی نمک

قبل از انجام آزمایش هوازدگی نمک، نمونه‌های لازم برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی، سرعت موج P و همچنین افت وزنی ۶ تراورتن مورد مطالعه تهیه و آماده‌سازی شدند. در ادامه آزمایش هوازدگی نمک در یک محلول ۱۴ درصد وزنی سولفات سدیم (Na_2SO_4) بر اساس استاندارد $EN 12370 (1999)$ تا ۶۰ چرخه روی نمونه‌های تهیه

شده انجام شد. سپس بعد از هر ۵ چرخه ویژگی‌های مکانیکی تراورتن‌ها مطابق با استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (۱۹۸۱) تعیین شدند. در جدول ۳ تعداد، شکل و ابعاد نمونه‌ها و همچنین استاندارد مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های مختلف و در جدول‌های ۴ تا ۷ نتایج تعیین ویژگی‌های مکانیکی و افت وزنی نمونه‌ها در شرایط بکر و چرخه‌های مختلف هوازدگی نمک ارائه شده است.

جدول ۳. نوع آزمایش‌ها، تعداد و شکل نمونه و استاندارد مورد استفاده برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی تراورتن‌ها در آزمایش هوازگی نمک

استاندارد	ابعاد نمونه (سانتی‌متر)	شکل هندسی نمونه	تعداد نمونه‌ها		آزمایش
			* تعیین ویژگی در آزمایش هوازگی نمک	تعیین ویژگی در شرایط بکر	
ISRM (1981)	۲×۳/۸	استوانه‌ای	۳۶	۵	مقاومت بار نقطه‌ای
ISRM (1981)	۲×۳/۸	استوانه‌ای	۳۶	۵	مقاومت کششی برزیلی
ISRM (1981)	۸×۳/۸	استوانه‌ای	۵	۵	سرعت موج P
EN 12370 (1999)	۱۶×۵/۴×۵/۴ تا ۱۶	استوانه‌ای	۵	۵	افت وزنی نمونه‌ها (DWL)

* آزمایش هوازگی نمک تا ۶۰ چرخه انجام شد و بعد از هر ۵ چرخه آزمایش، ۳ نمونه برای تعیین هر ویژگی مکانیکی استفاده شده است (در مجموع ۳۶ نمونه)

جدول ۴. مقادیر مقاومت بار نقطه‌ای (مگاپاسکال) نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف آزمایش هوازگی نمک

نام تجاری	تعداد چرخه												
	*	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰
تراورتن قرمز	۳/۵۹	۳/۳۹	۳/۱۶	۳/۰۲	۲/۸۸	۲/۶۵	۲/۶۸	۲/۴۰	۲/۲۱	۲/۲۵	۲/۱۴	۱/۹۳	۱/۸۴
تراورتن گردویی	۴/۷۲	۴/۵۰	۴/۳۸	۴/۲۰	۳/۸۵	۴/۰۰	۳/۵۵	۳/۳۸	۳/۲۵	۲/۹۰	۲/۹۸	۲/۷۴	۲/۶۳
تراورتن لیمویی	۳/۶۲	۳/۵۰	۳/۳۱	۳/۱۱	۳/۱۴	۲/۹۰	۲/۸۱	۲/۷۵	۲/۵۰	۲/۶۰	۲/۲۷	۲/۰۴	۱/۹۱
سفید آتشکوه	۴/۲۰	۴/۰۶	۳/۸۶	۳/۶۹	۳/۵۹	۳/۴۰	۳/۲۳	۳/۱۵	۳/۰۸	۲/۸۶	۲/۷۰	۲/۵۱	۲/۴۲
سفید عباس آباد	۴/۱۷	۳/۹۶	۳/۷۱	۳/۷۷	۳/۶۴	۳/۵۲	۳/۴۶	۳/۲۷	۳/۳۲	۳/۱۶	۳/۱۰	۲/۹۲	۲/۸۴
کرم آتشکوه	۴/۰۰	۳/۸۸	۳/۶۵	۳/۵۳	۳/۴۴	۳/۳۶	۳/۳۱	۳/۱۶	۳/۱۰	۳/۰۰	۲/۸۸	۲/۹۵	۲/۸۴

*شرایط بکر نمونه‌ها

جدول ۵. مقادیر مقاومت کششی برزیلین (مگاپاسکال) نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف آزمایش هوازگی نمک

نام تجاری	تعداد چرخه												
	*	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰
تراورتن قرمز	۳/۸۹	۳/۶۹	۳/۶۰	۳/۴۲	۳/۰۹	۳/۰۰	۲/۹۴	۲/۸۴	۲/۶۰	۲/۵۵	۲/۵۱	۲/۴۲	۲/۳۵
تراورتن گردویی	۵/۸۷	۵/۶۱	۵/۲۰	۵/۱۲	۵/۰۰	۴/۹۱	۴/۸۶	۴/۷۶	۴/۵۴	۴/۳۹	۴/۲۵	۴/۱۴	۴/۰۷
تراورتن لیمویی	۴/۴۷	۴/۳۹	۴/۰۰	۳/۹۱	۳/۸۲	۳/۷۷	۳/۶۱	۳/۵۹	۳/۴۷	۳/۴۲	۳/۳۲	۳/۲۹	۳/۲۸
سفید آتشکوه	۴/۸۸	۴/۷۱	۴/۵۱	۴/۴۰	۴/۲۲	۴/۱۳	۴/۰۷	۳/۹۰	۳/۸۰	۳/۶۱	۳/۵۳	۳/۳۶	۳/۲۶
سفید عباس آباد	۴/۳۹	۴/۲۷	۴/۰۶	۳/۹۶	۳/۷۷	۳/۶۴	۳/۵۸	۳/۴۷	۳/۳۱	۳/۲۷	۳/۱۴	۳/۱۰	۳/۰۵
کرم آتشکوه	۴/۶۹	۴/۵۰	۴/۴۲	۴/۳۴	۴/۱۴	۴/۱۰	۴/۰۶	۴/۰۱	۳/۸۵	۳/۸۲	۳/۸۰	۳/۷۳	۳/۷۰

*شرایط بکر نمونه‌ها

جدول ۶. مقادیر سرعت موج P (متر بر ثانیه) نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف آزمایش هوازگی نمک

نام تجاری	تعداد چرخه												
	*	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰
تراورتن قرمز	۳۹۵۰	۴۰۷۵	۴۱۱۲	۴۱۹۵	۳۸۹۵	۳۶۷۷	۳۳۲۸	۳۰۶۲	۲۷۵۰	۲۵۵۱	۲۲۸۰	۲۰۷۵	۱۸۶۰
تراورتن گردویی	۴۹۰۱	۴۹۵۴	۴۹۷۱	۴۷۷۱	۴۵۳۱	۴۴۰۱	۴۲۷۱	۴۱۲۵	۳۹۲۱	۳۸۰۰	۳۶۹۱	۳۵۰۰	۳۴۳۱
تراورتن لیمویی	۴۲۹۰	۴۳۹۸	۴۴۴۰	۴۱۷۳	۳۹۱۶	۳۷۶۹	۳۴۸۲	۳۲۰۵	۲۹۲۸	۲۷۸۱	۲۶۸۰	۲۴۷۹	۲۲۸۰
سفید آتشکوه	۴۶۰۰	۴۷۳۴	۴۸۰۲	۴۵۱۷	۴۲۴۲	۳۹۸۲	۳۷۳۲	۳۴۴۵	۳۲۶۵	۳۰۴۵	۲۸۷۵	۲۶۹۵	۲۶۶۸
سفید عباس آباد	۴۴۱۰	۴۵۶۷	۴۵۹۳	۴۳۰۳	۴۰۸۵	۳۷۲۵	۳۵۷۵	۳۲۷۴	۳۰۰۹	۲۸۸۴	۲۶۴۴	۲۴۱۴	۲۲۹۳
کرم آتشکوه	۴۵۱۰	۴۵۶۰	۴۶۸۵	۴۴۶۰	۴۲۶۰	۴۰۶۵	۳۸۷۵	۳۶۹۵	۳۵۲۵	۳۳۷۰	۳۲۴۰	۳۱۲۰	۳۰۲۲

*شرایط بکر نمونه‌ها

جدول ۷. مقادیر افت وزنی (درصد) نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف آزمایش هوازگی نمک

تعداد چرخه نام تجاری	*	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰
تراورتن قرمز	۰	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۷۳	۰/۶۴	-۰/۱۶	-۱/۰۰	-۱/۸۲	-۲/۹۰	-۴/۳۲	-۶/۱۱	-۵/۸۳	-۷/۲۱
تراورتن گردویی	۰	۰/۶۵	۱/۰۰	۰/۴۵	-۰/۱۰	-۱/۵۳	-۲/۶۷	-۲/۲۲	-۳/۴۵	-۴/۵۸	-۴/۲۴	-۴/۹۰	-۵/۲۰
تراورتن لیمویی	۰	۰/۲۳	۰	-۰/۸۷	-۱/۵۶	-۱/۱۱	-۲/۳۴	-۳/۳۱	-۳/۰۰	-۴/۲۳	-۴/۴۴	-۵/۱۶	-۵/۶۵
سفید آتشکوه	۰	۰/۴۵	۰/۲۱	-۰/۹۸	-۱/۶۷	-۱/۳۸	-۱/۸۷	-۲/۵۶	-۲/۷۶	-۳/۴۵	-۳/۱۲	-۳/۶۷	-۴/۰۲
سفید عباس‌آباد	۰	۰/۳۱	۱/۱۰	-۰/۳۹	-۱/۰۰	-۱/۷۶	-۲/۳۲	-۲/۸۹	-۲/۵۰	-۳/۱۱	-۳/۸۷	-۴/۰۰	-۴/۶۷
کرم آتشکوه	۰	۰/۶۶	۰/۲۱	-۰/۸۹	-۱/۹۸	-۲/۴۸	-۳/۱۲	-۳/۰۰	-۳/۸۷	-۴/۱۲	-۵/۰۸	-۵/۰۰	-۵/۴۳

* شرایط بکر نمونه‌ها

** علامت مثبت نشان‌دهنده افزایش وزن و علامت منفی نشان‌دهنده کاهش وزن نمونه‌ها می‌باشد.

۵- تجزیه و تحلیل نتایج

۵-۱- تغییرات وضعیت ظاهری نمونه‌ها

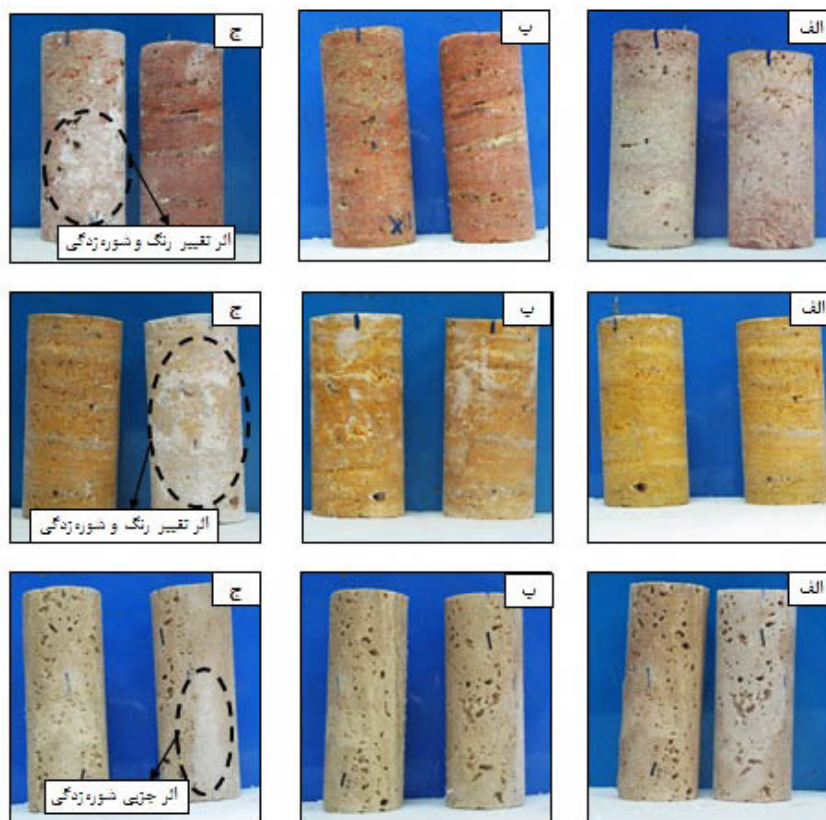
در طی انجام آزمایش هوازگی نمک تغییر در وضعیت ظاهری نمونه‌ها شامل تغییر رنگ، شوره‌زدگی، تخریب شیمیایی و فیزیکی در چرخه‌های مختلف آزمایش با مشاهدات ماکروسکوپی ثبت شد.

- تغییر رنگ و شوره‌زدگی: مشاهده ماکروسکوپی وضعیت ظاهری نمونه‌ها نشان می‌دهد تغییر رنگ و شوره‌زدگی در نمونه‌های رنگی تراورتن قرمز، لیمویی و گردویی در آزمایش هوازگی نمک به وضوح قابل مشاهده است. در صورتی که این وضعیت در نمونه‌های مانند سفید آتشکوه، سفید آبیار و کرم به دلیل رنگ روشن آن‌ها به سختی قابل مشاهده است. علت این موضوع را می‌توان به دلیل تباین رنگی بین رنگ سفید شوره‌زدگی و رنگ نمونه‌ها نسبت داد. از این می‌توان نتیجه گرفت نمونه‌های با رنگ روشن در مقایسه با نمونه‌های رنگی از دیدگاه تغییر رنگ و شوره‌زدگی در برابر چرخه‌های هوازگی نمک با دوام‌تر هستند. در شکل ۴ تغییر رنگ و شوره‌زدگی در تراورتن قرمز و تراورتن لیمویی به عنوان دو نمونه رنگی و کرم آتشکوه به عنوان یک نمونه با رنگ روشن در برابر چرخه‌های هوازگی نمک نشان داده شده است. علاوه بر این در شکل ۱ تغییر رنگ و شوره‌زدگی تراورتن قرمز استفاده شده در نمای بیرونی یکی از ساختمان‌های شهر تهران نشان داده شده است.

مشاهدات ماکروسکوپی نشان می‌دهد شدت تغییر رنگ و شوره‌زدگی با افزایش چرخه‌های هوازگی نمک بیش‌تر می‌شود. این موضوع به دلیل تاثیر محلول نمک سولفات سدیم روی نمونه‌ها می‌باشد که باعث کهنگی رنگ و

کاهش زیبایی آن‌ها با افزایش چرخه‌های هوازگی نمک شده است. از واژه شوره‌زدگی برای توصیف حضور بلورهای نمک‌های مختلف مانند سولفات سدیم، سولفات منیزیم، کلرید سدیم و ... در سطح و هم‌چنین خلل و فرج سنگ‌ها استفاده می‌شود. لکه‌ها و حاشیه‌های سفید رنگ روی سطح سنگ به علت شوره‌زدگی باعث ایجا یک نمای نامناسب در ساختمان‌ها می‌شود که این پدیده بیش‌تر در مناطق گرم و خشک، ساحلی و شهرهای با اتمسفرهای آلوده اتفاق می‌افتد (وینکلر، ۱۹۹۴). اگر دوام نمونه‌ها از دیدگاه تغییر رنگ و شوره‌زدگی مورد توجه قرار گیرد، می‌توان نتیجه گرفت در مناطق گرم و خشک و ساحلی و یا هر محیط دیگری با احتمال وجود نمک‌های متبلور مانند سولفات سدیم، بهتر است از سنگ‌های با رنگ روشن در نمای ساختمان‌ها استفاده کرد.

- تخریب شیمیایی و فیزیکی: مشاهدات ماکروسکوپی و شکل ظاهری تخریب نمونه‌ها در چرخه‌های هوازگی نمک نشان داد که در بعضی از قسمت‌های نمونه‌ها، نوع تخریب شیمیایی است. این پدیده بیش‌تر در گوشه نمونه‌ها و هم‌چنین در تعدادی از نمونه‌های دارای لایه‌بندی به ویژه آن‌هایی که ترکیب شیمیایی لایه‌های آن‌ها با هم متفاوت بود قابل مشاهده بود. برای مثال در شکل ۵ تخریب شیمیایی در گوشه نمونه تراورتن قرمز نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که شدت تخریب شیمیایی در تراورتن قرمز نسبت به سایر نمونه‌ها شدیدتر است. این موضوع می‌تواند به دلیل ناخالصی‌های اکسید آهن موجود در ترکیب این نمونه باشد که باعث تسریع واکنش محلول سولفات سدیم با آن شده است.



شکل ۴. تغییر رنگ و شوره زردگی تراورتن قرمز، تراورتن لیمویی و کرم آتشکوه در چرخه‌های هوازدگی نمک (الف) شرایط بکر (ب) چرخه ۳۰ (ج) چرخه ۶۰



شکل ۵. تخریب شیمیایی گوشه نمونه تراورتن قرمز در آزمایش هوازدگی نمک (الف) چرخه ۴۰ (ب) چرخه ۵۰ (ج) چرخه ۶۰

مرز لایه‌ها و نتیجتاً زوال‌پذیری تفریقی در سفید عباس آباد نشان داده شده است.

دلیل اصلی تخریب شیمیایی نمونه‌ها را باید به واکنش کانی کلسیت با یون سولفید موجود در محلول نمک سولفات سدیم نسبت داد. بررسی‌های سنگ‌شناسی نشان داد کلسیت کانی اصلی تشکیل‌دهنده نمونه‌های مورد مطالعه است. در طی آزمایش هوازدگی نمک در محلول سولفات سدیم، کلسیت با یون‌های سولفیدی که از نمک سولفات سدیم آزاد می‌شوند طبق معادله (۱) واکنش می‌دهد (روس و همکاران، ۱۹۸۹):

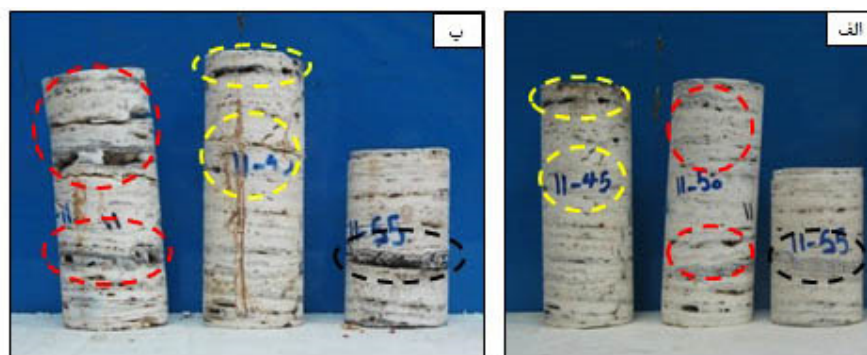


همچنین در نمونه‌های با ساخت لایه‌ای به ویژه تراورتن گردویی و سفید عباس‌آباد تخریب شیمیایی به صورت زوال‌پذیری تفریقی در سطح تماس لایه‌ها به وضوح قابل مشاهده بود. زوال‌پذیری تفریقی به این صورت قابل توجیه است که مرز لایه‌ها به عنوان یک سطح ضعف عمل می‌کند که باعث افزایش نفوذ محلول نمک و در نتیجه خوردگی بیش‌تر نمونه در این نقاط می‌شود. علاوه بر این متفاوت بودن جنس لایه‌ها، بافت، اندازه کانی‌های تشکیل‌دهنده و در نتیجه متفاوت بودن دوام آن‌ها در برابر هوازدگی نمک نیز می‌تواند دلیل دیگری برای توجیه زوال‌پذیری تفریقی باشد. در شکل ۶ تخریب شیمیایی در

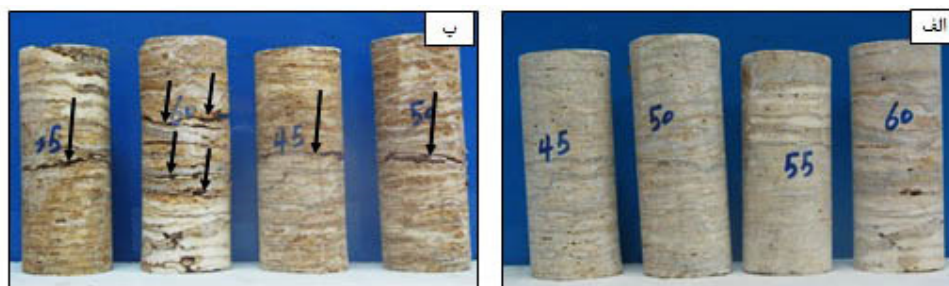
سولفات سدیم به آسانی در سطح تماس لایه‌ها نفوذ می‌کند و نمونه‌ها را بیش‌تر تحت تاثیر قرار می‌دهد. در آزمایش هوازدگی نمک هنگامی که نمک سولفات سدیم متبلور می‌شود یک افزایش حجم تقریباً ۳۱۴ درصدی رخ می‌دهد (تسوی و همکاران، ۲۰۰۳)، که این باعث ایجاد فشار تبلور در سطح تماس لایه‌ها می‌شود. فشار تبلور ایجاد شده به گونه‌ای است که به راحتی می‌تواند بر مقاومت کششی نمونه غلبه و باعث جدایش لایه‌ها از همدیگر شود. این پدیده در شکل ۷ برای تراورتن گردویی نشان داده شده است.

همانطور که در معادله (۱) مشاهده می‌شود در اثر واکنش کلسیت با یون SO_3 کانی ژپس تشکیل می‌شود. این کانی با تبلور در سطح داخلی خلل و فرج نمونه‌ها و ایجاد فشار تبلور می‌تواند در افزایش زوال‌پذیری نمونه‌های مورد مطالعه به همراه فشار تبلور ناشی از نمک سولفات سدیم نقش مهمی داشته باشد.

علاوه بر تخریب شیمیایی که در نمونه‌ها رخ داد تخریب فیزیکی به سه شکل زوال‌پذیری در امتداد لایه‌بندی، گوشه نمونه‌ها و جدایش ذرات از سطح نمونه‌ها قابل مشاهده بود. برای تراورتن‌های قرمز، گردویی، لیمویی و سفید عباس‌آباد که ساخت لایه‌ای دارند، محلول نمک



شکل ۶. تخریب شیمیایی در مرز لایه‌ها و در نتیجه زوال‌پذیری تفریقی تراورتن سفید عباس‌آباد در آزمایش هوازدگی نمک (الف) شرایط بکر (ب) چرخه ۶۰



شکل ۷. تخریب فیزیکی در سطح تماس لایه‌های تراورتن گردویی در آزمایش هوازدگی نمک (الف) شرایط بکر (ب) چرخه ۶۰

در چرخه‌های هوازدگی نمک با درجات مختلفی کاهش پیدا کرده است. کمترین کاهش مقاومت بار نقطه‌ای مربوط به کرم آتشکوه با ۱/۱۶ مگاپاسکال و بیش‌ترین کاهش برای تراورتن گردویی با ۲/۰۹ مگاپاسکال در چرخه ۶۰ نسبت به شرایط بکر می‌باشد. برای مقاومت کششی برزیلین کمترین و بیش‌ترین کاهش برای کرم آتشکوه و تراورتن گردویی به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۱/۸۰ مگاپاسکال می‌باشد. کاهش مقاومت بار نقطه‌ای و کششی برزیلین نمونه‌ها به دلیل فشار تبلور و آبگیری نمک

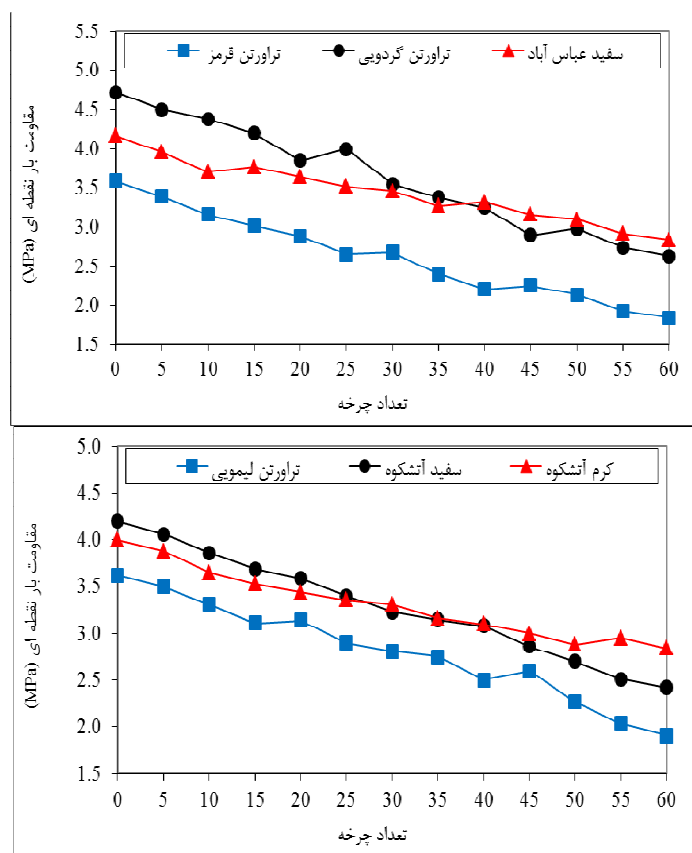
۵-۲- تغییرات ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها

علاوه بر تغییر وضعیت ظاهری نمونه‌ها، از تغییرات ویژگی‌های مکانیکی نیز می‌توان به عنوان یک معیار برای ارزیابی دوام نمونه‌ها استفاده کرد. در شکل‌های ۸ تا ۱۰ تغییر در ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف هوازدگی نمک نشان داده شده است.

از شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود با افزایش چرخه‌های هوازدگی نمک مقادیر مقاومت بار نقطه‌ای و کششی برزیلی نمونه‌ها کاهش پیدا کرده‌اند. مقادیر این ویژگی‌ها

تبدیل می‌شود که با یک افزایش حجم ۳۱۴ درصدی همراه است. در ادامه با افزایش آبیگری تناریدیت نتیجه یک محلول فوق اشباع از میرابلیت تشکیل می‌شود که باعث ته‌نشینی آن و ایجاد فشار تبلور می‌شود. این تغییرات در طی آزمایش هوازنگی نمک باعث کاهش مقاومت بار نقطه‌ای و کششی برزیلین نمونه‌ها با درجات مختلفی شده است.

سولفات سدیم می‌باشد. سولفات سدیم دارای دو فاز اصلی آبدار میرابلیت ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) و بدون آب تناریدیت (Na_2SO_4) است که در اثر تبدیل آن‌ها به یکدیگر، فشار تبلور و آبیگری در خلل و فرج مصالح ساختمانی متخلخل ایجاد می‌شود و باعث زوال‌پذیری آن‌ها می‌شوند (تسوی و همکاران، ۲۰۰۳). وقتی تناریدیت در معرض آب قرار می‌گیرد به فاز آبدار یعنی میرابلیت

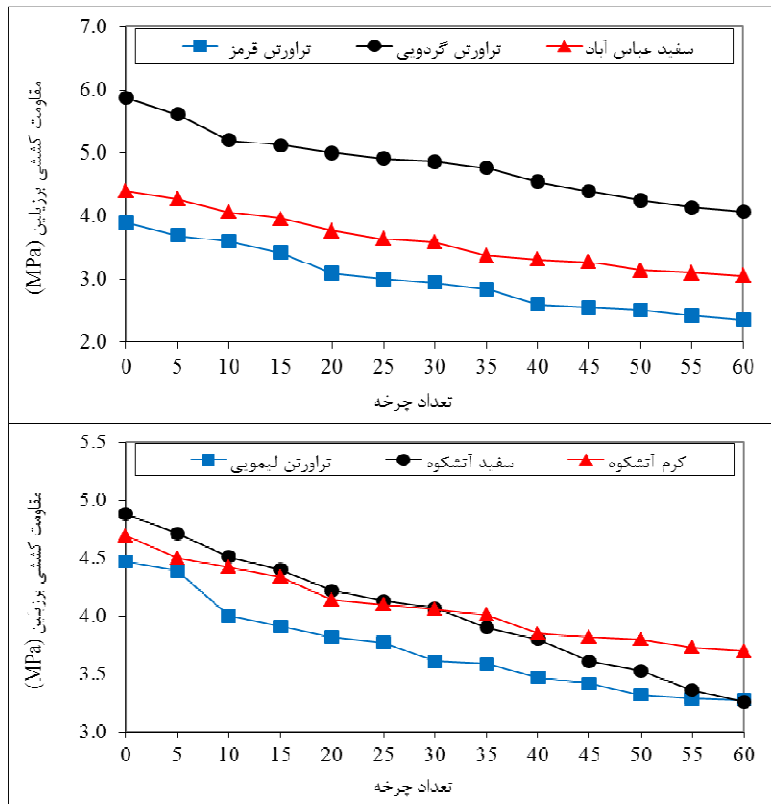


شکل ۸. تغییرات مقاومت بار نقطه‌ای نمونه‌ها در چرخه‌های هوازنگی نمک

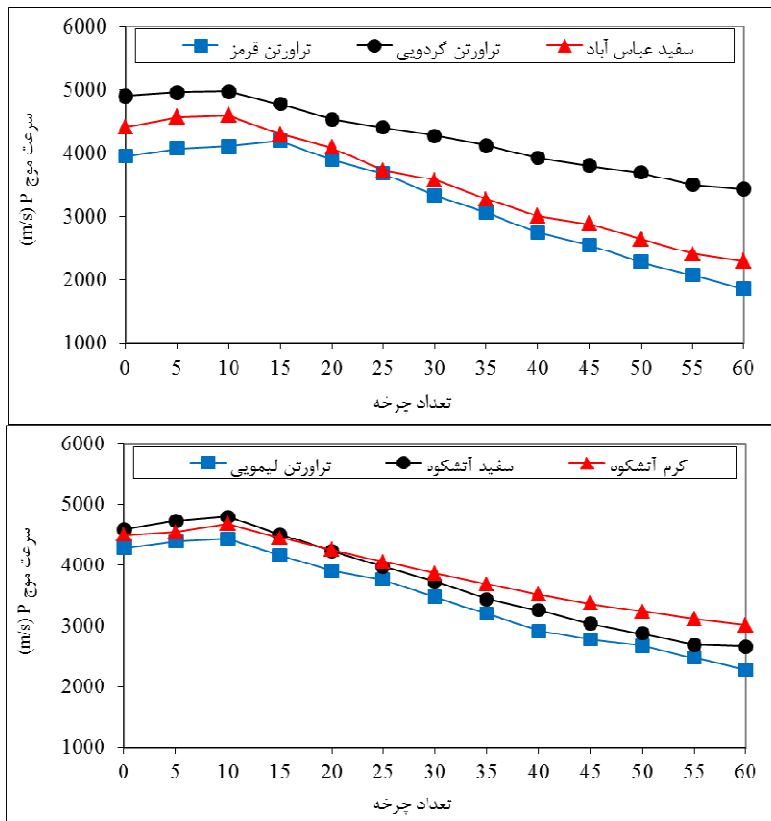
برزیلین، افزایش از خود نشان می‌دهد. با توجه به اینکه آزمایش در محلول سولفات سدیم انجام شده است نفوذ محلول به درون خلل و فرج نمونه‌ها باعث تجمع و پر شدن آن‌ها می‌شود. از آنجایی که سرعت انتقال موج P در خلل و فرج پر شده از نمک بیش‌تر از حالتی است که این فضاها از نمک خالی باشند، نتیجتاً این موضوع باعث افزایش سرعت انتشار امواج P در نمونه‌ها می‌شود. برای مثال افزایش سرعت موج P در تراورتن گردویی در چرخه ۱۰ نسبت به شرایط بکر 70 m/s می‌باشد و برای نمونه دیگری مانند تراورتن قرمز در چرخه ۱۵ نسبت به شرایط بکر این مقدار برابر با 245 m/s بوده است.

در شکل ۱۰ تغییرات سرعت موج P نمونه‌ها در آزمایش هوازنگی نمک ارائه شده است. مشاهده می‌شود یک روند کاهشی برای این ویژگی با افزایش چرخه‌های آزمایش در تمامی نمونه‌ها رخ داده است. البته میزان کاهش سرعت موج P برای هر نمونه متفاوت می‌باشد که این موضوع برای مقاومت بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلین نیز قابل مشاهده بود.

نکته‌ای که در مورد تغییرات سرعت موج P با افزایش چرخه‌های آزمایش هوازنگی نمک باید به آن توجه کرد این است که در چرخه‌های ابتدایی آزمایش مقدار این ویژگی بر خلاف مقاومت بار نقطه‌ای و مقاومت کششی



شکل ۹. تغییرات مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها در چرخه‌های هوازدگی نمک



شکل ۱۰. تغییرات سرعت موج P نمونه‌ها در چرخه‌های هوازدگی نمک

فرآیندی که باعث افزایش یا کاهش وزن نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف می‌گردد اینگونه قابل توضیح می‌باشد که در مرحله غوطه‌ورسازی نمونه‌ها، محلول نمک به درون خلل و فرج نفوذ می‌کند. در ادامه اگر ساختار خلل و فرج و مقاومت سنگ به گونه‌ای باشد که فشار تبلور نمک نتواند بر مقاومت سنگ غلبه کند و باعث تخریب سنگ شود تجمع نمک موجود در خلل و فرج باعث افزایش وزن نمونه‌ها خواهند شد. در صورتی که فشار تبلور نمک بتواند بر مقاومت سنگ غلبه کند تخریب و جدایش ذرات نمونه‌ها رخ می‌دهد که نتیجتاً افت وزنی نمونه‌ها در طی آزمایش را در پی خواهد داشت. به هر حال اندرکنش تجمع نمک در خلل و فرج و تخریب شیمیایی و فیزیکی در اثر تبلور نمک تعیین کننده مقدار افت وزنی نمونه‌ها در طی چرخه‌های مختلف هوازگی نمک می‌باشد.

تعدادی از محققین از جمله توپال و دویارن (۱۹۹۸)، بناونته و همکاران (۲۰۰۱ و ۲۰۰۷)، و اولسای (۲۰۰۷) با تعیین افت وزنی نمونه‌هایی از سنگ‌ها با منشاهای متفاوت در آزمایش هوازگی نمک به ارزیابی دوام آن‌ها پرداخته‌اند. به طور کلی نتایج همه تحقیقات دارای یک شباهت مشترک است و نشان می‌دهد هوازگی نمک باعث افت وزنی نمونه‌ها با مقادیر متفاوتی می‌شود. به هر حال تفاوت در مقدار افت وزنی تحقیقات سایر محققین و تحقیق حاضر می‌تواند به دلیل تفاوت در ویژگی‌های سنگ‌شناسی، ساختار خلل و فرج، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها از یک طرف و تعداد چرخه‌های آزمایش هوازگی نمک، مدت زمان مرحله غوطه‌وری و خشک شدن نمونه‌ها در هر چرخه آزمایش و شرایط ترمودینامیکی انجام آزمایش از طرف دیگر باشد.

۶- بحث

طبق تعریف، دوام معیار توانایی سنگ برای حفظ ویژگی‌های شاخص مانند استحکام، میزان مقاومت در برابر عوامل محیطی و همچنین حفظ نمای ظاهری آن می‌باشد. یا به عبارت دیگر دوام بر اساس مدت زمانی تعریف می‌شود که در آن مدت، سنگ در طول مدت استفاده، ویژگی‌های شاخص خود را حفظ می‌کند (بل، ۱۹۹۳). با توجه به تغییر در وضعیت ظاهری نمونه‌ها شامل تغییر رنگ، ایجاد شورزدگی و تخریب شیمیایی و

روند افزایش سرعت موج نمونه‌ها تا چرخه ۱۵ برای تراورتن قرمز و چرخه ۱۰ برای سایر نمونه‌ها ادامه پیدا کرده است و از چرخه ۱۰ (برای تراورتن قرمز از چرخه ۱۵) تا چرخه انتهایی آزمایش سرعت موج نمونه‌ها کاهش نشان می‌دهد. در طی چرخه‌های آزمایش اندرکنش بین تغییر در ساختار خلل و فرج به دلیل فشار تبلور نمک و تجمع بلورهای نمک در داخل خلل و فرج نمونه‌ها تعیین کننده کاهش یا افزایش سرعت موج P می‌باشد. به هر حال در چرخه‌های ابتدایی آزمایش میزان افزایش سرعت موج P به دلیل تجمع نمک در خلل و فرج نمونه‌ها نسبت به توسعه ریزترک‌ها و افزایش خلل و فرج نمونه‌ها برتری دارد که این باعث افزایش سرعت موج P نمونه‌ها تا چرخه ۱۰ (برای تراورتن قرمز تا چرخه ۱۵) آزمایش شده است. با افزایش چرخه‌های آزمایش این موضوع عکس می‌شود که نتیجه آن در کاهش سرعت موج P قابل مشاهده است.

۵-۳- تغییرات افت وزنی نمونه‌ها

نتایج افت وزنی نمونه‌ها در آزمایش هوازگی نمک در شکل ۱۱ ارائه شده است. افت وزنی نمونه‌ها از رابطه زیر محاسبه گردید:

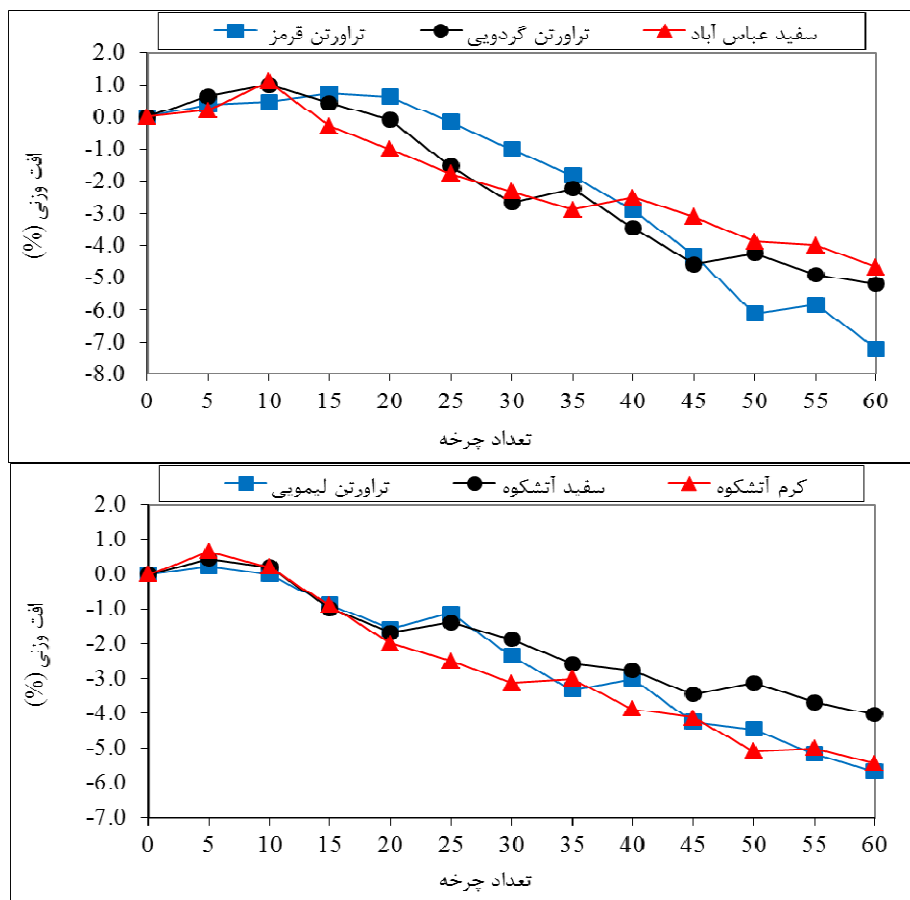
$$DWL (\%) = ((W_0 - W_n) / W_0) \times 100$$

که در آن DWL افت وزنی نمونه در n مین چرخه آزمایش تبلور نمک (بر حسب درصد)، W_0 و W_n به ترتیب وزن نمونه در شرایط بکر و n مین چرخه آزمایش تبلور نمک (بر حسب گرم) هستند.

همانطور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود افت وزنی نمونه‌ها از ۴/۰۲ درصد برای سفید آتشکوه تا ۷/۲۱ درصد برای تراورتن قرمز در چرخه ۶۰ متغیر است. از شکل ۱۱ می‌توان به این نکته پی برد که در بعضی چرخه‌های آزمایش به ویژه در چرخه‌های اولیه، نمونه‌ها دچار افزایش وزن شده‌اند و در ادامه افزایش یا کاهش وزنی نمونه‌ها از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند به طوری که ممکن است در چرخه بالاتر نسبت به چرخه پایین‌تر آن افزایش وزن رخ دهد. برای مثال این موضوع برای سفید عباس‌آباد در چرخه ۳۵ و ۴۰ قابل مشاهده است. به هر حال در مجموع می‌توان گفت تمامی نمونه‌ها یک روند کاهش وزن با افزایش چرخه‌های هوازگی نمک از خود نشان می‌دهند.

بود. نمونه‌هایی که در ترکیب خود دارای اکسید آهن بودند انحلال شیمیایی با شدت بیشتری در آن‌ها رخ داده بود. علاوه بر این واکنش کلسیت که کانی اصلی تشکیل‌دهنده نمونه‌ها بود با یون سولفید حاصل از محلول نمک سولفات سدیم در تسریع انحلال شیمیایی موثر بود. در نمونه‌هایی که دارای لایه‌بندی بودند، سطوح لایه‌بندی به صورت سطوح ضعف عمل می‌کنند و عوامل مخرب مانند محلول نمک راحت‌تر می‌توانند به درون نمونه نفوذ کنند و نتیجتاً آن را بیش‌تر تحت تاثیر قرار می‌دهند و باعث کاهش دوام می‌شود.

فیزیکی، کاهش ویژگی‌های مکانیکی و هم‌چنین نتایج افت وزنی نمونه‌ها باید گفت چرخه‌های هوازگی نمک باعث زوال‌پذیری نمونه‌ها و در نتیجه کاهش دوام آن‌ها شده است. این نتایج نشان می‌دهد برای استفاده از تراورتن‌های مورد مطالعه در مناطق با احتمال وجود نمک‌های متبلور مانند مناطق گرم و خشک و سواحل شمالی و جنوبی باید احتیاط لازم را در نظر گرفت. نتایج نشان‌دهنده نقش مهم ترکیب کانی‌شناسی و هم‌چنین لایه‌بندی در انحلال شیمیایی، تخریب فیزیکی و نتیجتاً کاهش دوام نمونه‌ها در آزمایش هوازگی نمک



شکل ۱۱. تغییرات افت وزنی نمونه‌ها در چرخه‌های هوازگی نمک

به دلیل اینکه پارامتر مناسب‌تری در ارتباط با تنش کششی ناشی از تبلور نمک سولفات سدیم می‌باشد و سرعت موج P به دلیل غیر مخرب بودن و اینکه تا چرخه انتهایی آزمایش هوازگی نمک، تمامی اندازه‌گیری‌ها روی یک سری نمونه انجام می‌شود در مقایسه با مقاومت بار نقطه‌ای ارزیابی دقیق‌تری از دوام نمونه‌ها می‌دهند.

مشاهدات ماکروسکوپی تغییر در وضعیت ظاهری نمونه‌ها شامل تغییر رنگ، ایجاد شوره‌زدگی، تخریب شیمیایی و فیزیکی به دلیل اینکه معیار اندازه‌گیری آن‌ها کیفی می‌باشد نشان دادند که نمی‌توانند ارزیابی خیلی دقیقی از دوام نمونه‌ها در برابر چرخه‌های هوازگی نمک فراهم کنند. نتایج نشان می‌دهد در بین پارامترهای که معیار اندازه‌گیری آن‌ها کمی می‌باشد مقاومت کششی برزلی

و مناسب‌تری از دوام نمونه‌ها در برابر هوازدگی نمک می‌دهند.

مشاهدات تخریب شیمیایی و فیزیکی نمونه‌ها نشان دهنده نقش مهم ویژگی‌های سنگ‌شناسی روی دوام آن‌ها در برابر هوازدگی نمک بود. وجود کلسیت که کانی اصلی تشکیل‌دهنده نمونه‌ها بود به دلیل واکنش با یون سولفید باعث افزایش تخریب شیمیایی و فیزیکی نمونه‌ها در برابر چرخه‌های هوازدگی نمک شد. علاوه بر این، ساخت نمونه‌ها به ویژه لایه‌بندی به دلیل اینکه به عنوان سطوح ضعف عمل می‌کنند باعث می‌شوند نمونه بیش‌تر تحت تاثیر تبلور نمک قرار گیرد که نتیجتاً افزایش زوال‌پذیری و کاهش دوام نمونه را در پی خواهد داشت.

منابع

- جمشیدی، ا. نیکودل، م. ر. و حافظی‌مقدس، ن (۱۳۸۷) مقایسه اثر تخریبی محلول‌های سولفات سدیم و سولفات منیزیم روی نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی. مجموعه مقالات دوازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، اهواز.
- Angeli, M., Heber, R., Menendez, B., David, C., Bigas, J-P (2010) Influence of temperature and salt concentration on the salt weathering of a sedimentary stone with sodium sulphate. *Engineering Geology*, 115: 193-199.
- Bell, F. G (1993) Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. *Environmental Geology*, 21: 187-200.
- Benavente, D., Garcia del Cura, M.A., Bernabeu, A., Ordonez, S (2001) Quantification of salt weathering in porous stones using experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology*, 59: 313-25.
- Benavente, D., Martinez, J., Cueto, N., Cura, M. A (2007) Salt weathering in dual-porosity building dolostones", *Engineering Geology*, 94: 215-226.
- Cultrone, G., Sebastian, E., Huertas, M. O (2007) Durability of masonry systems: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 21: 40-51.
- EN 12370 (1999) Natural stone test methods - Determination of resistance to salt crystallization. *European Committee for Standardization*.
- ISRM (1981) Rock characterization testing and monitoring. *ISRM suggested methods*. In: Brown ET (ed.), Pergamon Press, Oxford, 211 p.
- Jamshidi, A., Nikudel, M. R., Khamsehchiyan, M (2013) Estimating the durability of building

اندازه‌گیری افت وزنی نمونه‌ها نشان‌دهنده عدم تغییرات محسوس و دامنه محدود تغییرات می‌باشد. هم‌چنین مقادیر اندازه‌گیری شده افت وزنی نشان می‌دهد که مقادیر تقریباً مشابه‌ای در چرخه ۶۰ آزمایش هوازدگی نمک برای نمونه‌ها حاصل شده است (جدول ۷ مشاهده شود). برای مثال سفید آتشکوه، سفید عباس‌آباد، تراورتن گردویی و کرم آتشکوه بعد از ۶۰ چرخه، مقادیر افت وزنی به ترتیب برابر ۴/۰۲، ۴/۶۷، ۵/۲۰ و ۵/۴۳ درصد را نشان داده‌اند. با توجه به دامنه محدود و تفاوت جزئی مقادیر افت وزنی، این موضوع را روشن می‌کند که افت وزنی به تنهایی نمی‌تواند معیار کمی مناسبی و خیلی دقیقی برای ارزیابی دوام نمونه‌ها باشد و بهتر است به همراه سایر پارامترها تجزیه و تحلیل شود.

۷- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر ۶ نمونه تراورتن از مناطق معادن آذرشهر و محلات تهیه و دوام آن‌ها در برابر هوازدگی نمک مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این هدف از تغییر وضعیت ظاهری نمونه‌ها (تغییر رنگ، شوره‌زدگی، تخریب شیمیایی و فیزیکی)، ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی و سرعت موج P) و افت وزنی نمونه‌ها استفاده شد.

مشاهدات نشان داد دوام نمونه‌ها به شدت متأثر از تعداد چرخه‌های هوازدگی نمک است به طوری که با افزایش تعداد چرخه‌ها شدت تغییر رنگ، شوره‌زدگی، تخریب شیمیایی و فیزیکی نمونه‌ها نیز افزایش یافت. علاوه بر این نتایج تغییرات ویژگی‌های مکانیکی دلالت بر این داشت که هر چند در تعدادی از چرخه‌های آزمایش هوازدگی نمک، مقاومت بار نقطه‌ای و افت وزنی پراکندگی از خود نشان دادند ولی در مجموع یک روند کاهشی برای مقاومت بار نقطه‌ای، افت وزنی و هم‌چنین مقاومت کششی برزیلی و سرعت موج P مشاهده شد.

به هر حال تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد مقاومت کششی برزیلی (به دلیل در ارتباط بودن تنش کششی حاصل از تبلور نمک و مقاومت کششی نمونه‌ها) و سرعت موج P (به دلیل غیر مخرب بودن و اینکه تا چرخه ۶۰ آزمایش هوازدگی نمک، تمامی اندازه‌گیری‌ها روی یک سری نمونه انجام می‌شود) در مقایسه با وضعیت ظاهری نمونه‌ها، مقاومت بار نقطه‌ای و افت وزنی ارزیابی دقیق‌تر

- stones against Salt crystallization: considering the physical properties and strength characteristics. Journal of Geopersia, 3(2): 35-48.*
- Ross, K. D., Hart, D., Butlin, R. N (1989) *Durability tests for natural building stone. Building Research Establishment (BRE), Garston, UK.*
- Sousa, M. O., Suarez del Rio, M., Calleja, L., Argandona, V., Rodriguez, A (2005) *Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. Engineering Geology, 77: 153-168.*
- Topal, T., Doyuran, V (1997) *Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff. Engineering Geology, 47: 175-187.*
- Topal, T., and Doyuran, V (1998) *Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey. Environmental Geology, 34: 5-20.*
- Tsui, N., Flatt, R., Scherer, G (2003) *Crystallization damage by sodium sulfate. Journal of Cultural Heritage, 4: 109-115.*
- Ulusoy, M (2007) *Different igneous masonry blocks and salt crystal weathering rates in the architecture of historical city of Konya. Building and Environment, 42: 3014-3024.*
- Winkler, E. M (1994) *Stone in Architecture, properties, durability. Third Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Printed in Germany.*
- Yavuz, A. B (2006) *Deterioration of the volcanic kerb and pavement stones in a humid environment in the city centre of Izmir, Turkey. Environmental Geology, 51: 211-227.*
- Yavuz, A. B (2012) *Durability assessment of the Alacati tuff (Izmir) in western Turkey. Environmental Earth Sciences, 67: 1909-1925.*
- Yavuz, A. B. and Topal, T (2007) *Thermal and salt crystallization effects on marble deterioration: Examples from Western Anatolia, Turkey. Engineering Geology, 90: 30-40.*
- Zedef, V. Kocak, K. Doyen, A. Ozsen, H. and Kecec, B., 2007. *Effect of salt crystallization on stones of historical buildings and monuments, Konya, Central Turkey. Building and Environment, 42: 1453-1457.*

Durability assessment of travertenes against salt weathering: an experimental study***A. Jamshidi¹, M. R. Nikudel^{*2}, M. Khamehchiyan³ and R. Sarikhani⁴****1, 4- Dept., of Geology, Faculty of sciences, Lorestan University, Khoramabad
2, 3- Dept., of Geology, Faculty of sciences, Tarbiat Modares University, Tehran*** nikudelm@modares.ac.ir****Recieved: 2018/12/15 Accepted: 2019/6/16******Abstract***

Considering the diverse climatic conditions of Iran with a varying from hot and dry and also coastal areas it can be seen that salt weathering is one of the most important agents affecting on the durability of stones used as wall cladding of the building. As a result it is necessary that durability of stones be assessed and the most resistance and appropriate those be selected for use as wall cladding of the buildings. In this research, durability of six samples of travertines from Azarshahr and Mahallat areas against salt weathering were investigated. For this purpose, salt weathering test at sulfate sodium (Na_2SO_4) up to 60 cycles was carried out and, after every 5 cycles, changes in the samples appearance (color, efflorescence, chemical and physical decay), mechanical properties (point load strength, Brazilian tensile strength and P-wave velocity) and Dry Weight Loss of samples were monitoring and measured. The results indicated that changes in samples appearance including the color, efflorescence, chemical and physical decay due to criteria of measure those is qualitative, can not to be appropriate for assessment of samples durability against salt weathering. Moreover, results show in among parameters that criteria of measure those is quantitative, Brazilian tensile strength and P-wave velocity are more reliable in compare with point load strength and Dry Weight Loss for assessment of samples durability. Also, macroscopic monitoring of samples appearance against salt weathering show those petrological properties has major role in chemical and physical decay and therefore their durability.

Keywords: salt weathering, travertine, appearance conditions, mechanical properties, Weight Loss