

## ارزیابی زوال پذیری نمونه‌هایی از تراورتن‌ها در مقابل تبلور نمک با استفاده از پارامترهای

### شاخص تجزیه و سرعت تجزیه

احمد ذلولی<sup>۱</sup>، ماشالله خامه‌چیان<sup>۲\*</sup>، محمدرضا نیکودل<sup>۳</sup>، امین جمشیدی<sup>۴</sup>

دریافت مقاله: ۹۱/۱۲/۲۱ پذیرش مقاله: ۹۲/۰۴/۰۸

#### چکیده

یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار روی دوام و زوال پذیری سنگ‌های ساختمانی تبلور نمک‌های محلول است. سولفات منیزیم از نمک‌های متداول و مخرب است که می‌تواند باعث زوال پذیری سنگ‌های ساختمانی شود. از این رو ضروری است قبل از انتخاب یک سنگ برای استفاده در نمای بیرونی ساختمان‌ها به این موضوع توجه ویژه‌ای شود. در تحقیق حاضر از پارامترهای شاخص تجزیه و سرعت تجزیه برای ارزیابی زوال پذیری نمونه‌هایی از تراورتن‌ها در مقابل تبلور نمک سولفات منیزیم استفاده شده است که می‌توان به عنوان یک معیار مقاومت نمونه‌ها در مقابل تبلور نمک از آن‌ها استفاده کرد. بدین منظور ۱۵ نمونه تراورتن از مناطق مختلف ایران تهیه شد و علاوه بر مطالعات سنگ‌شناسی، تعدادی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها شامل چگالی، تخلخل، جذب آب، مقاومت فشاری تک‌محوری و کششی برزیلین اندازه‌گیری شد. سپس آزمایش تبلور نمک در محلول سولفات منیزیم تا ۶۰ چرخه انجام شد و بر اساس افت وزنی و همچنین وضعیت ظاهری نمونه‌ها، پارامترهای شاخص تجزیه و سرعت تجزیه برای هر نمونه تعیین و ارتباط آن‌ها با تخلخل مؤثر، مقاومت کششی برزیلین و افت وزنی نمونه‌ها با انجام آنالیزهای رگرسون برقرار شد. نتایج نشان می‌دهد سرعت تجزیه همبستگی بالایی با تخلخل مؤثر، مقاومت کششی برزیلین و افت وزنی نمونه‌ها دارد در صورتی که برای شاخص تجزیه اینگونه نیست. همچنین نتایج نشان می‌دهد ویژگی‌های ساختاری نمونه‌ها، تخلخل مؤثر و مقاومت کششی برزیلین از عوامل مهم کنترل کننده دوام نمونه‌ها در مقابل تبلور نمک می‌باشند.

**کلید واژه‌ها:** زوال پذیری، تبلور نمک، شاخص تجزیه، سرعت تجزیه، تراورتن، تخلخل مؤثر، مقاومت کششی برزیلین

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. دانشیار زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران khamechm@modares.ac.ir

۳. استادیار زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

تراورتن سنگ آهکی است که در اثر فعالیت چشمه‌های آب گرم تشکیل می‌شود. بطور کلی در طی فرآیند تشکیل ذخایر تراورتن، آب‌های گرم از بین طبقات سنگ‌های کربناتی به ویژه سنگ آهک عبور می‌کنند و به دلیل اسیدی بودن، کربنات کلسیم موجود در این سنگ‌ها را حل کرده و به صورت محلول کربناتی و بی‌کربناتی با خود به سطح زمین منتقل می‌کنند. در سطح زمین به دلیل افت فشار، کاهش حرارت، آزاد شدن دی اکسید کربن و همچنین تبخیر، بلورهای کلسیت تشکیل شده و به صورت لایه‌های نازکی بر روی یکدیگر رسوب می‌کنند و تراورتن را تشکیل می‌دهند (Chafetz and Folk, 1984).

امروزه تراورتن‌ها به دلیل مقاومت قابل قبول، برش‌پذیری آسان، شرایط استخراج ساده، زیبایی ظاهری، وجود تخلخل برای چسبیدن کامل به ملات و قیمت مناسب امروزه دارای کاربرد فراوانی در نمای بیرونی ساختمان‌ها هستند.

با توجه به وجود نمک‌های متبلور فراوان، می‌توان گفت چرخه‌های تبلور نمک یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار روی دوام و در نتیجه زوال‌پذیری سنگ‌های استفاده شده در نمای بیرونی ساختمان‌ها هستند. در نتیجه ضروری است قبل از انتخاب یک سنگ برای استفاده در نمای بیرونی ساختمان‌ها توجه ویژه‌ای به این موضوع شود و سنگ‌هایی با مقاومت دوام مناسب پیشنهاد شوند.

تاکنون جنبه‌های مختلفی از چرخه‌های تبلور نمک روی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و همچنین دوام انواع سنگ‌ها صورت گرفته است (Scherer G. W., 1999; Benavente et al., 2004; Yavuz, 2006; Benavante et al., 2007a; Urosevic et al., 2010; Schneider et al., 2011; Cultrone et al., 2012 جمشیدی و همکاران، ۱۳۸۷: جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۱).

علاوه بر این تعدادی از محققین به بررسی الگوی تبلور، شرایط ترمودینامیکی تبلور نمک‌های مختلف و همچنین نحوه تبلور آن‌ها پرداخته‌اند (Benavente et al., 1999; Rodriguez-

Navarro et al., 2000; Tsui et al., 2003; Angeli et al., 2010).

تا به امروز روش‌های مختلفی برای ارزیابی زوال‌پذیری سنگ‌ها در مقابل تبلور نمک مانند اندازه‌گیری افت وزنی نمونه‌ها (Benavente et al., 2001; Benavente et al., 2004) یا ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی (Yavuz and Topal, 2007; Ulusoy, 2007) در چرخه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در این میان (Angeli et al., 2007) دو پارامتر شاخص تجزیه (Alteration index) سرعت تجزیه (Alteration velocity) را با انجام آزمایش تبلور نمک برای ارزیابی زوال‌پذیری نمونه‌هایی از ماسه‌سنگ‌ها پیشنهاد کردند. این پارامترها بر اساس اندازه‌گیری افت وزنی نمونه‌ها، چرخه‌ای که در آن تخریب نمونه شروع می‌شود و همچنین تعداد چرخه‌های آزمایش تبلور نمک تعیین می‌شوند.

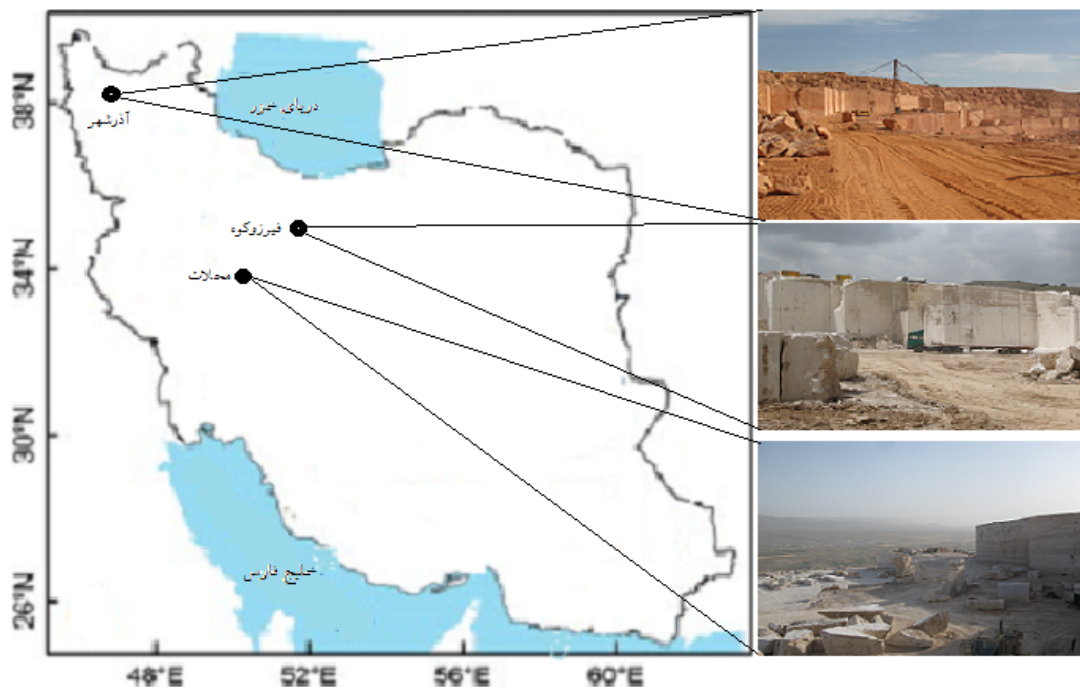
در تحقیق حاضر علاوه بر اعتبارسنجی پارامترهای پیشنهادی (Angeli et al., 2007) برای ارزیابی زوال‌پذیری سنگ‌ها در برابر تبلور نمک دو هدف دیگر دنبال می‌شود. (۱) طبقه‌بندی دوام نمونه‌ها در مقابل تبلور نمک سولفات منیزیم بر اساس شاخص تجزیه و سرعت تجزیه و (۲) ارتباط افت وزنی، شاخص تجزیه و سرعت تجزیه با تخلخل مؤثر و مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها.

## ۲. مواد و روش پژوهش

برای انجام تحقیق حاضر، طی بازدید از رخنمون‌های تراورتن شهرستان آذرشهر، محلات و فیروزکوه بلوک‌هایی با ابعاد مناسب تهیه و به آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس انتقال داده شد و از آن‌ها نمونه‌ها و مغزه‌های لازم با قطر NX برای انجام آزمایش‌های پیش‌بینی شده تهیه گردید. شکل (۱) به صورت شماتیک موقعیت جغرافیایی تراورتن‌های تهیه شده را نشان می‌دهد و در جدول (۱) نام تجاری، زمین‌شناسی، رده و موقعیت جغرافیایی آن‌ها ارائه شده است. در ادامه به بررسی ویژگی‌های فیزیکی شامل چگالی، تخلخل، جذب آب و ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری

فیزیکی، مکانیکی و پارامترهای شاخص تجزیه و سرعت تجزیه بدست آمده از انجام آزمایش‌های مختلف، نتایج تجزیه و تحلیل شده است.

تک‌محوری، کششی برزیلین نمونه‌های مورد مطالعه پرداخته شده است. سپس، آزمایش تبلور نمک تا ۶۰ چرخه در محلول سولفات منیزیم انجام و تغییرات وضعیت ظاهری و همچنین افت وزنی آنها تعیین شد. در ادامه با توجه به ویژگی‌های



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری (شهرستان آدرشهر، محلات و فیروزکوه)

جدول ۱. نام تجاری، زمین‌شناسی، رده و مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری‌ها

نام تجاری	نام زمین‌شناسی	رده	محل نمونه‌برداری	مختصات جغرافیایی نمونه‌برداری
تراورتن قرمز	تراورتن	رسوبی	آدرشهر	05 78 835-41 75 768
تراورتن گردویی	تراورتن	رسوبی	آدرشهر	05 82 940-41 77 150
تراورتن لیمویی	تراورتن	رسوبی	آدرشهر	05 79 962-41 78 232
تراورتن طوسی	تراورتن	رسوبی	آدرشهر	05 75 086-41 72 118
تراورتن انیکس قرمز	تراورتن انیکس	رسوبی	آدرشهر	05 79 419-41 77 952
تراورتن انیکس سبز	تراورتن انیکس	رسوبی	آدرشهر	05 79 714-41 78 401
تراورتن انیکس سفید	تراورتن انیکس	رسوبی	آدرشهر	05 78 893-41 75 830
تراورتن شکلاتی دماوند	تراورتن	رسوبی	فیروزکوه	06 36 414-39 49 491
تراورتن کرم دلیچای	تراورتن	رسوبی	فیروزکوه	06 34 361-39 49 023
تراورتن سفید آتشکوه	تراورتن	رسوبی	محلات	05 38 037-39 50 348
تراورتن پنیر کچه	تراورتن	رسوبی	محلات	04 57 520-37 45 511
تراورتن سفید عباس‌آباد	تراورتن	رسوبی	محلات	04 57 518-37 45 512
تراورتن کرم آبیار	تراورتن	رسوبی	محلات	04 58 520-37 45 541
کرم دره بخاری	تراورتن	رسوبی	محلات	05 39 037-39 50 842
تراورتن شهاب سنگ	تراورتن	رسوبی	محلات	04 63 828-37 48 441

### ۳. مطالعات سنگ شناسی

مطالعات سنگ شناسی نه تنها اطلاعاتی در مورد ترکیب کانی شناسی و منشاء سنگ می دهند، بلکه در ارزیابی پتانسیل انحلال پذیری و زوال پذیری سنگ ها در برابر عوامل هوازدگی شیمیایی و فیزیکی نیز یک ابزار مهم است (Dreesen and Dusar, 2004). در این تحقیق با تهیه مقاطع نازک از نمونه ها، ویژگی های سنگ شناسی شامل ترکیب کانی شناسی، ساخت و بافت با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان بررسی شد. در جدول (۲) نتایج مطالعات سنگ شناسی ارائه شده است. نتایج نشان می دهد کلسیت (اسپارایت و میکرو اسپارایت و میکرایت) کانی اصلی تشکیل دهنده تراورتن های مورد مطالعه است و در بعضی نمونه ها مانند تراورتن گردویی، تراورتن کرم دلیچای، تراورتن پنیر کچه، تراورتن سفید عباس آباد، کرم دره بخاری و تراورتن شهاب سنگ به همراه کلسیت، کانی کوارتز هم وجود دارد. در تراورتن انیکس قرمز و سفید وجود آراگونیت به وضوح مشاهده می شود که وزن مخصوص بالای آن ها نسبت به سایر نمونه ها ناشی از حضور این کانی است. نمونه ها مورد مطالعه بر اساس ساخت به دو گروه لایه ای مانند تراورتن قرمز، تراورتن گردویی و... و توده ای مانند تراورتن طوسی، تراورتن شکلاتی فیروزکوه و ... طبقه بندی می شوند.

### ۴. ویژگی های فیزیکی و مکانیکی

در این تحقیق تعدادی از ویژگی های فیزیکی و مکانیکی شامل چگالی خشک و اشباع، تخلخل مؤثر، جذب آب، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین بر اساس استاندارد (ISRM, 1981) تعیین شدند. لازم به ذکر است برای هر ویژگی ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و مقادیر میانگین هر یک از این ویژگی ها در جدول (۳) ارائه شده اند. با توجه طبقه بندی (IAEG (1979) بر اساس چگالی خشک و تخلخل، تراورتن های انیکس های قرمز، سبز و سفید در رده سنگ های با چگالی بالا ( $2/55-2/75 \text{ g/cm}^3$ ) و سایر نمونه ها در رده سنگ های با چگالی متوسط ( $2/2-2/55 \text{ g/cm}^3$ ) قرار می گیرند. بر اساس تخلخل، تراورتن انیکس سبز در رده سنگ های با تخلخل خیلی پایین ( $> 1/1$ ) و سایر نمونه ها در رده

سنگ های با تخلخل پایین ( $0.1-0.5$ ) و متوسط ( $0.5-1.5$ ) قرار می گیرند.

از جدول (۳) مشاهده می شود میانگین مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین نمونه ها به ترتیب بین  $33/6$  تا  $65/7$  و  $3/89$  تا  $6/42$  مگاپاسکال تغییر می کند. با توجه به طبقه بندی (ISRM (2007) بر اساس مقاومت فشاری تک محوری تراورتن قرمز، تراورتن لیمویی، تراورتن سفید آتشکوه، تراورتن پنیر کچه، تراورتن سفید عباس آباد و تراورتن کرم دره بخاری در رده سنگ های با مقاومت پایین ( $25-50 \text{ MPa}$ ) و سایر نمونه ها در رده سنگ های با مقاومت متوسط ( $\text{MPa}$ )  $50-100$  قرار می گیرند.

### ۵. آزمایش چرخه های تبلور نمک

برای آزمایش چرخه های تبلور نمک محلول ۱۴ درصد وزنی سولفات منیزیم تهیه شد. این آزمایش مطابق استاندارد RILEM (1980) انجام شد با یک تفاوت جزئی در ابعاد نمونه و مدت زمان غوطه ورسازی نمونه ها در استاندارد مذکور نمونه های مورد استفاده به صورت مکعبی شکل با ابعاد  $5 \times 5 \times 5$  سانتی متر پیشنهاد شده است ولی در تحقیق حاضر از نمونه های استوانه ای با ابعاد  $10 \times 4$  سانتی متر استفاده شده است.

برای هر چرخه آزمایش تبلور نمک، ابتدا نمونه ها به مدت ۱۲ ساعت در استخر محلول ۱۴ درصد وزنی سولفات منیزیم قرار گرفتند (مرحله غوطه ورسازی)، سپس نمونه ها به مدت ۶ ساعت در گرمخانه با دمای  $5 \pm 10$  درجه سانتیگراد قرار داده شدند (مرحله خشک شدن). بعد از این مرحله، نمونه ها به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند تا به طور کامل سرد شوند (مرحله سرد شدن).

آزمایش تبلور نمک تا ۶۰ چرخه انجام و تغییرات وزن خشک نمونه ها در پایان چرخه های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ... ۶۰ با دقت  $0.1$  گرم تعیین شد. لازم به ذکر است برای انجام این آزمایش، ۵ نمونه استوانه ای از هر تراورتن با ابعاد  $10 \times 4$  سانتی متر تهیه شد. در جدول (۴) نتایج افت وزنی خشک نمونه ها در چرخه های تبلور نمک ارائه شده است. همچنین در شکل (۲) تعدادی از نمونه ها بعد آزمایش نشان داده شده اند.

## جدول ۲. نتایج مطالعات سنگ‌شناسی نمونه‌ها

نام تجاری	کانی‌های تشکیل دهنده	ساخت	بافت
تراورتن قرمز	کلسیت	لایه‌ای	بافت آن عمدتاً اسپارایتی است که در بخش‌هایی دانه‌های اکسید آهن مشاهده می‌شود.
تراورتن گردویی	کلسیت و کوارتز	لایه‌ای	به طور کلی بافت سنگ تناوبی از جلبک‌ها به فرم استروماتولیتی که در بین آن‌ها نوارهای اسپارایت دیازنزی مشاهده می‌شود.
تراورتن لیمویی	کلسیت	لایه‌ای	بافت آن عمدتاً از میکرایت (گل آهکی، میکرواسپارایت و اسپارایت تشکیل شده است که به صورت مخلوط با هم دیده می‌شوند.
تراورتن طوسی	کلسیت	توده‌ای	بافت سنگ دارای حالت بادبزنی (Fan share) می‌باشد که در بین آن زمینه اسپارایتی مشاهده می‌شود.
تراورتن اینکس قرمز	کلسیت و آراگونیت	لایه‌ای	بافت بادبزنی مشاهده می‌شود که عمدتاً از بلورهای آراگونیت و یا کلسیت شعاعی می‌باشند. در این سنگ تخلخل میکروسکوپی به میزان خیلی کم مشاهده می‌شود.
تراورتن اینکس سبز	کلسیت	لایه‌ای	بافت آن حالت بادبزنی است که به طور کامل متبلور است و در آن میزان کمی اکسیدهای آهن مشاهده می‌شود.
تراورتن اینکس سفید	کلسیت و آراگونیت	لایه‌ای	بافت سنگ کاملاً متبلور متشکل از تناوبی از لایه‌ها که عمود بر آن‌ها بلورهای آراگونیت قرار گرفته‌اند تشکیل شده است.
تراورتن شکلاتی دماوند	کلسیت	توده‌ای	بافت نمونه از خرده‌های ایتتراکلاست (میکرایت) و پلت تشکیل شده است که در یک زمینه اسپارایتی قرار گرفته‌اند.
تراورتن کرم دلیچای	کلسیت و کوارتز	توده‌ای	بافت نمونه به صورت حلقه‌های متحدالمرکز عمدتاً پیرونییدی و به مقدار کمتر جلبکی است که این قطعات در یک زمینه اسپارایتی قرار گرفته‌اند.
تراورتن 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.
تراورتن پنیر کچه	کلسیت و کوارتز	توده‌ای	بافت عمدتاً از میکرایت تشکیل شده است که در بخش‌هایی از آن به صورت سیمان اسپارایتی پر شده است.
تراورتن سفید عباس‌آباد	کلسیت و کوارتز	لایه‌ای	نمونه دارای ساختار لایه‌ای که تخلخل در امتداد این سطوح و همچنین به صورت پراکنده مشاهده می‌شوند. در بخش‌هایی از نمونه بافت اسفرولیتی (بادبزنی) مشاهده می‌شود.
تراورتن کرم آبیار	کلسیت	توده‌ای	بافت آن اجتماعی از میکرایت و اسپارایت می‌باشد که بخش میکرایتی به صورت خرده‌های ایتتراکلاست و پلت مشاهده می‌شود.
کرم دره بخاری	کلسیت و کوارتز	لایه‌ای	زمینه سنگ از میکرایت و اسپارایت تشکیل شده است که در آن بافت بادبزنی و موزائیکی مشاهده می‌شود.
تراورتن شهاب سنگ	کلسیت و کوارتز	توده‌ای	بافت سنگ در دو حالت بادبزنی و نیز وجود ایتتراکلاست و پلت‌ها که در یک زمینه اسپارایتی قرار گرفته‌اند تشکیل یافته است.

**جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه**

نام تجاری	$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	$\gamma_{sat}(\text{g/cm}^3)$	$(\%)n'$	$(\%)W_a$	$UCS(\text{MPa})$	$BST(\text{MPa})$
تراورتن قرمز	۲/۴۸	۲/۵۵	۷/۴۱	۲/۹۹	۳۳/۶	۳/۸۹
تراورتن گردویی	۲/۵۵	۲/۵۸	۳/۱۰	۱/۲۱	۶۰/۷	۵/۸۷
تراورتن لیمویی	۲/۵۱	۲/۵۵	۴/۶۵	۱/۸۵	۴۲/۵	۴/۴۷
تراورتن طوسی	۲/۴۶	۲/۴۹	۳/۱۷	۱/۴۳	۵۵/۵	۵/۷۱
تراورتن انیکس قرمز	۲/۶۶	۲/۶۷	۱/۷۷	۰/۶۷	۶۵/۷	۶/۱۷
تراورتن انیکس سبز	۲/۶۹	۲/۷۰	۰/۵۴	۰/۲۰	۶۴/۵	۵/۹۵
تراورتن انیکس سفید	۲/۷۲	۲/۷۳	۱/۳۹	۰/۵۰	۶۲/۴	۶/۴۲
تراورتن شکلاتی دماوند	۲/۳۸	۲/۴۱	۳	۱/۲۷	۵۹/۹	۵/۹۰
تراورتن کرم دلیچای	۲/۳۴	۲/۴۰	۴/۱۰	۱/۷۰	۵۰/۷	۵/۲۱
تراورتن سفید آتشکوه	۲/۴۷	۲/۵۲	۴/۲۰	۱/۷۰	۴۹/۳	۴/۸۸
تراورتن پنی کچه	۲/۴۳	۲/۴۸	۴/۸۶	۲	۴۱/۳	۴/۳۲
تراورتن سفید عباس‌آباد	۲/۴۲	۲/۴۶	۴/۵۳	۱/۸۷	۴۳/۷	۴/۳۹
تراورتن کرم آبیار	۲/۴۱	۲/۴۵	۳/۵۸	۱/۴۷	۵۱/۴	۵/۳۳
تراورتن کرم دره بخاری	۲/۳۸	۲/۴۴	۶/۴۰	۲/۶۹	۳۷/۴	۳/۷۱
تراورتن شهاب سنگ	۲/۴۶	۲/۵۰	۴/۲۰	۱/۷۲	۴۵/۷	۴/۶۹

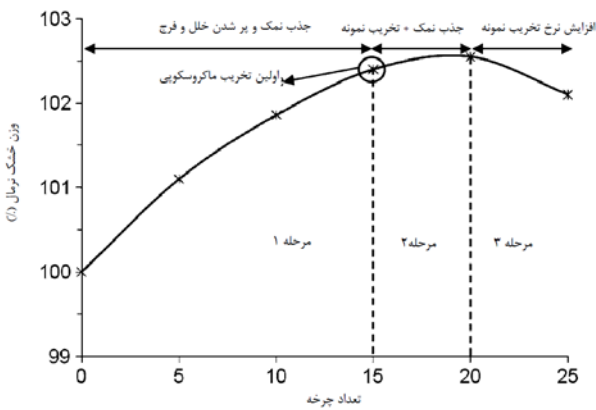
**جدول ۴. افت وزنی نمونه‌ها در چرخه‌های تبلور نمک**

چرخه	*	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰
نام تجاری														
تراورتن قرمز	۰	۱/۸۸**	۲/۷۲	۲/۸۷	۲/۴۵	۲/۰۴	۱/۱۶	۰/۷۹	۰/۰۹***	-۱/۱۷	-۲/۹۶	-۴/۶۳	-۶/۲۹	
تراورتن گردویی	۰	۰/۷۹	۱/۲۰	۱/۵۴	۱/۲۹	۱/۲۰	۱/۰۰	۰/۷۹	۰/۵۰	۰	-۱/۳۰	-۲/۰۹	-۳/۳۴	
تراورتن لیمویی	۰	۱/۴۵	۱/۹۹	۲/۴۵	۲/۱۲	۱/۹۵	۱/۶۲	۱/۲۰	۱/۰۰	-۰/۴۶	-۰/۸۸	-۳/۳۴	-۵/۱۳	
تراورتن طوسی	۰	۰/۷۹	۱/۱۲	۱/۳۷	۱/۵۴	۱/۲۰	۱/۰۴	۰/۷۹	۰/۳۷	۰/۰۴	-۰/۰۵	-۰/۴۶	-۱/۳۴	
تراورتن انیکس قرمز	۰	۰/۴۱	۰/۵۴	۰/۷۰	۰/۷۹	۰/۷۵	۰/۴۷	۰/۲۰	۰/۰۸	-۰/۴۶	-۰/۶۳	-۰/۸۸	-۰/۹۶	
تراورتن انیکس سبز	۰	۰/۳۷	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۸۳	۰/۷۰	۰/۵۲	۰/۲۵	۰/۱۲	-۰/۴۶	-۰/۵۵	-۰/۶۷	-۰/۸۸	
تراورتن انیکس سفید	۰	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۶۲	۰/۷۹	۰/۷۵	۰/۴۷	۰/۲۰	۰/۰۸	-۰/۰۵	-۰/۲۵	-۰/۳۴	-۰/۵۰	
تراورتن شکلاتی دماوند	۰	۰/۷۹	۱/۱۲	۱/۳۷	۱/۵۴	۱/۲۰	۱/۰۴	۰/۷۹	۰/۳۷	۰/۰۴	-۰/۴۶	-۰/۷۵	-۱/۵۰	
تراورتن کرم دلیچای	۰	۰/۹۱	۱/۴۱	۱/۷۰	۱/۶۲	۱/۴۵	۱/۲۰	۰/۹۱	۰/۳۸	۰/۰۴	-۲/۱۳	-۲/۹۶	-۳/۴۲	
تراورتن سفید آتشکوه	۰	۱/۱۶	۱/۹۱	۲/۱۲	۲/۰۴	۱/۹۷	۱/۹۱	۱/۵۷	۰/۷۵	-۰/۳۴	-۰/۸۴	-۱/۷۵	-۴/۲۱	
تراورتن پنی کچه	۰	۰/۷۹	۱/۲۰	۱/۵۸	۱/۲۹	۱/۲۰	۰/۸۷	-۰/۰۵	-۰/۶۳	-۰/۸۸	-۱/۶۳	-۲/۴۶	-۴/۷۱	
تراورتن سفید عباس‌آباد	۰	۰/۷۹	۱/۲۰	۱/۳۳	۱/۲۹	۱/۲۰	۰/۸۷	۰/۷۰	-۰/۶۳	-۱/۰۵	-۲/۰۰	-۲/۹۶	-۵/۲۱	
تراورتن کرم آبیار	۰	۰/۷۹	۱/۰۴	۱/۴۵	۱/۶۲	۱/۲۹	۰/۸۳	۰/۷۵	-۰/۰۵	-۰/۸۸	-۱/۲۱	-۱/۵۰	-۲/۱۳	
تراورتن کرم دره بخاری	۰	۱/۴۵	۲/۱۶	۲/۷۰	۲/۴۵	۲/۲۱	۱/۶۲	۱/۲۰	-۰/۴۶	-۱/۴۲	-۲/۴۶	-۴/۲۱	-۵/۸۸	
تراورتن شهاب سنگ	۰	۱/۰۴	۱/۲۵	۱/۴۱	۱/۳۷	۱/۲۰	۱/۳۵	۱/۱۲	۰/۶۲	-۰/۰۵	-۰/۷۱	-۱/۷۱	-۲/۴۲	

\* شرایط بکر نمونه‌ها

\*\* علامت مثبت نشان دهنده افزایش وزن نمونه‌ها می‌باشد.

\*\*\* علامت منفی نشان دهنده کاهش وزن نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۳. مراحل تغییرات وزنی نمونه در چرخه‌های تبلور نمک (اصلاح شده از Angeli et al., 2007)



شکل ۲. تراورتن انیکس سبز در چرخه ۵۵ تبلور نمک (سمت راست) و تراورتن لیمویی در چرخه ۴۵ آزمایش تبلور نمک (سمت چپ)

۶. شاخص تجزیه و سرعت تجزیه

Angeli et al. (2007) بر اساس مطالعات آزمایشگاهی یک الگوی سه مرحله‌ای برای تغییرات وزن نمونه‌ها در چرخه‌های تبلور نمک ارائه دادند (شکل ۳). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرات وزن نمونه در چرخه‌های تبلور نمک دارای سه مرحله می‌باشد، در مرحله اول نمک خلل و فرج را پر کرده و باعث افزایش وزن نمونه می‌شود. در مرحله دوم وزن نمونه با نرخ کمتری نسبت به مرحله اول افزایش پیدا می‌کند، این موضوع اینگونه می‌تواند قابل توجیه باشد که در ابتدای مرحله دوم فشار تبلور نمک به حدی رسیده که می‌تواند باعث جدا شدن قطعاتی از نمونه شود، البته همچنان پر شدن خلل و فرج ادامه دارد ولی نرخ آن بیشتر از تخریب نمونه می‌باشد. در شروع مرحله سوم تمامی خلل و فرج نمونه با نمک پر شده‌اند و فقط تخریب نمونه صورت می‌گیرد.

Angeli et al. (2007) بر اساس نمودار شکل (۳) دو پارامتر شاخص تجزیه و سرعت تجزیه را برای ارزیابی میزان زوال‌پذیری سنگ‌ها در چرخه‌های تبلور نمک پیشنهاد دادند. این پارامترها بر اساس اندازه‌گیری افت وزنی نمونه، چرخه‌ای که در آن تخریب نمونه شروع می‌شود و همچنین تعداد چرخه‌های آزمایش تبلور نمک تعیین می‌شوند.

بر طبق تعریف (Angeli et al., 2007)، شاخص تجزیه بیانگر شماره چرخه‌ای است که در آن تخریب نمونه قابل مشاهده می‌شود (شماره چرخه معادل با شروع مرحله سوم)، این شاخص زوال‌پذیری کوتاه مدت سنگ‌ها را نشان می‌دهد. برای مثال در شکل (۳) شاخص تجزیه ۲۰ چرخه می‌باشد.

علاوه بر این سرعت تجزیه از رابطه (۱) بدست می‌آید و پارامتری می‌باشد که بر خلاف شاخص تجزیه، زوال‌پذیری طولانی مدت سنگ‌ها را نشان می‌دهد.

(۱)

$$\text{سرعت تجزیه} = \frac{(\text{وزن نرمال شده در چرخه معادل با شروع مرحله سوم}) - (\text{وزن خشک نرمال شده در چرخه آخر})}{(\text{شماره چرخه معادل با شروع مرحله سوم}) - (\text{تعداد کل چرخه ها})}$$

چون شماره چرخه معادل با شروع مرحله سوم را به عنوان شاخص تجزیه در نظر می‌گیرند بنابراین رابطه (۱) را می‌توان به صورت رابطه (۲) بازنویسی کرد:

(۲)

$$\text{سرعت تجزیه} = \frac{(\text{وزن نرمال شده در چرخه معادل با شروع مرحله سوم}) - (\text{وزن خشک نرمال شده در چرخه آخر})}{(\text{شاخص تجزیه}) - (\text{تعداد کل چرخه ها})}$$

به عنوان یک نتیجه می توان گفت مقادیر بالای شاخص تجزیه بیانگر این مطلب است که سنگ دیرتر دچار تخریب شده است ولی مقادیر بالای سرعت تجزیه نشان دهنده تخریب بیشتر سنگ می باشد.

بر اساس تعاریف شاخص تجزیه و سرعت تجزیه توسط (Angeli et al. (2007)، این محققین سنگها را بر اساس هر کدام از این دو شاخص به ۳ رده طبقه بندی کردند (جدول ۵).

جدول ۵. طبقه بندی سنگها بر اساس شاخص تجزیه و

سرعت تجزیه (Angeli et al., 2007)

شاخص تجزیه	توصیف	سرعت تجزیه	توصیف
بزرگتر یا مساوی ۱۹	شاخص تجزیه بالا	کمتر یا مساوی ۱	سرعت تجزیه پایین
۱۰ - ۱۸	شاخص تجزیه متوسط	۱ - ۵	سرعت تجزیه متوسط
کمتر یا مساوی ۱۰	شاخص تجزیه پایین	بزرگتر یا مساوی ۵	سرعت تجزیه بالا

## ۷. نتایج و بحث

۱-۷. افت وزنی، شاخص تجزیه و سرعت تجزیه نمونه ها

داده های جدول (۴) برای نمایش بهتر و همچنین محاسبه شاخص تجزیه و سرعت تجزیه در شکل (۴) نشان داده شده اند. در این شکلها محور قائم نمودارها وزن نرمال شده خشک نمونه می باشد که به صورت درصد با استفاده از رابطه زیر تعیین می شود:

(۳)

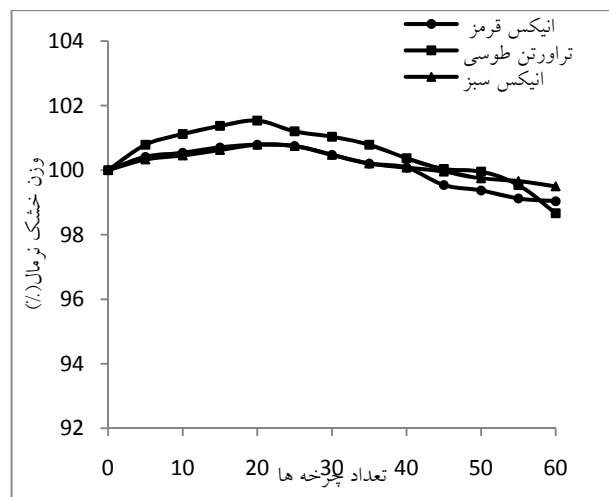
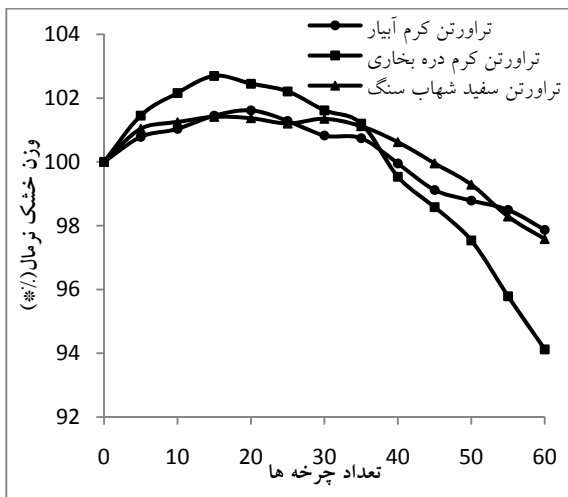
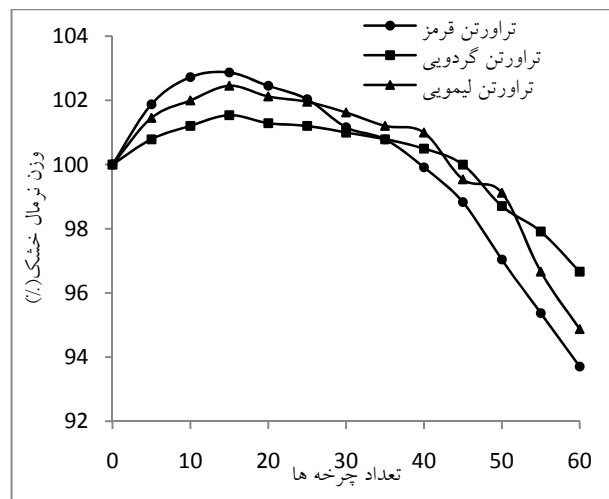
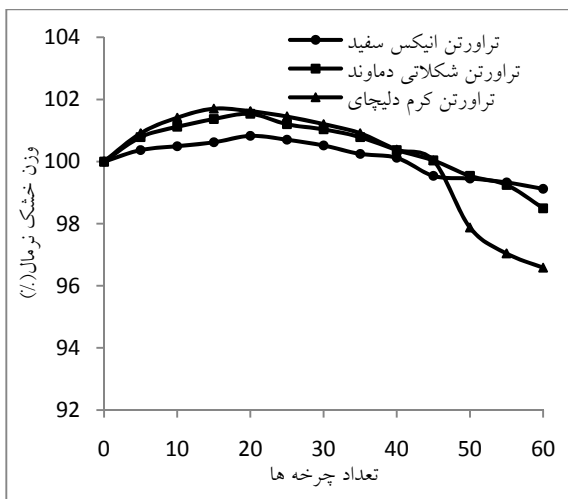
$$100 \times \frac{\text{وزن خشک محاسبه شده در انتهای هر چرخه}}{\text{وزن خشک اولیه}} = \text{وزن خشک نرمال شده}$$

آتشکوه تا چرخه ۴۰ افزایش وزن نمونه ها مشاهده می شود. در تعدادی از نمونه ها مانند تراورتن طوسی، تراورتن شکلاتی دماوند و تراورتن کرم دلیچای این پدیده تا چرخه ۴۵ تبلور نمک نیز مشاهده می شود. بعد از این تعداد چرخه، نمونه ها با نرخ های متفاوتی دچار افت وزنی شده اند. فرآیندی که باعث افزایش یا کاهش وزن نمونه ها در چرخه های مختلف می گردد، اینگونه قابل توضیح می باشد که در مرحله غوطه ور سازی نمونه ها، محلول نمک به درون خلل و فرج نفوذ می کند. در ادامه اگر ساختار حفرات و مقاومت سنگ به گونه ای 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 نمونه ها خواهد شد. حال اگر فشار تبلور نمک بتواند بر مقاومت سنگ غلبه کند تخریب و جدایش ذرات نمونه ها رخ می دهد که در نتیجه کاهش وزنی نمونه ها در طی آزمایش را در پی خواهد داشت.

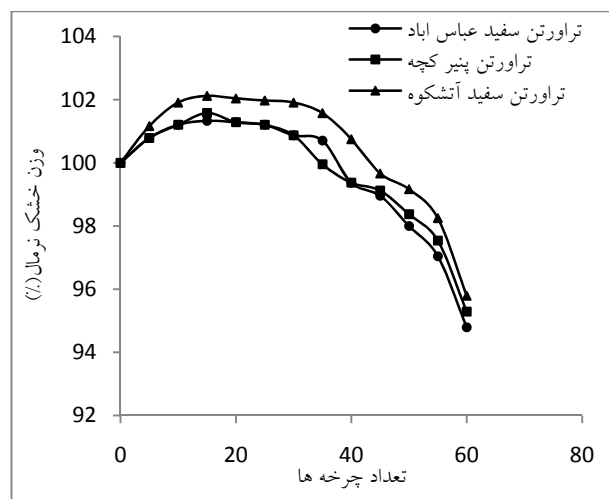
بیشترین افت وزنی در در انتهای چرخه ۶۰ تبلور نمک مربوط به تراورتن قرمز آذرشهر با ۶/۲۹ درصد و کمترین آن مربوط به تراورتن انیکس سبز با افت وزنی ۰/۵ درصد می باشد (جدول ۴). علت این موضوع را می توان به تخلخل مؤثر و ویژگی های مقاومتی نمونه ها مانند مقاومت کششی برزیلین نسبت داد. همانطور که از جدول (۳) مشاهده می شود تراورتن انیکس سبز تخلخل مؤثر کمتر و مقاومت کششی برزیلین بیشتری (که نشان دهنده مقاومت سنگ در برابر فشار ناشی از تبلور نمک در حفرات می باشد) نسبت به تراورتن قرمز آذرشهر دارد. این موضوع باعث کمتر بودن افت وزنی تراورتن انیکس سبز در مقایسه با تراورتن قرمز آذرشهر شده است. نتایج این بخش از تحقیق با نتایج تحقیقات Benavente et al. (2004), Sousa et al. (2005), Ruedrich and Siegesmund (2007) مطابقت دارد.

همانطور که از این نمودارها مشاهده می شود در تعدادی از نمونه ها مانند تراورتن قرمز و تراورتن دره بخاری تا چرخه ۳۵ و در دیگر نمونه ها مانند تراورتن لیمویی و تراورتن سفید





شکل ۴. تغییرات وزن خشک نرمال نمونه‌ها در مقابل چرخه‌های تبلور نمک



در حالت کلی نمونه‌هایی که که تخلخل مؤثر بالایی دارند مقدار بیشتری نمک درون منافذ انباشته می‌شود برای مثال در تراورتن‌هایی با تخلخل بالای ۵ درصد بیشتر از ۲/۵ درصد وزنی نمک درون منافذ در شروع مرحله سوم انباشته شده است در حالیکه در نمونه‌های تراورتن با تخلخل پایینتر از ۲ درصد کمتر از ۰/۸ درصد وزنی انباشت نمک در شروع مرحله سوم مشاهده می‌شود.

در تعدادی از نمونه‌ها که تخلخل مؤثر بالایی دارند نسبت به بعضی دیگر که تخلخل مؤثر پایین‌تری دارند افت وزنی

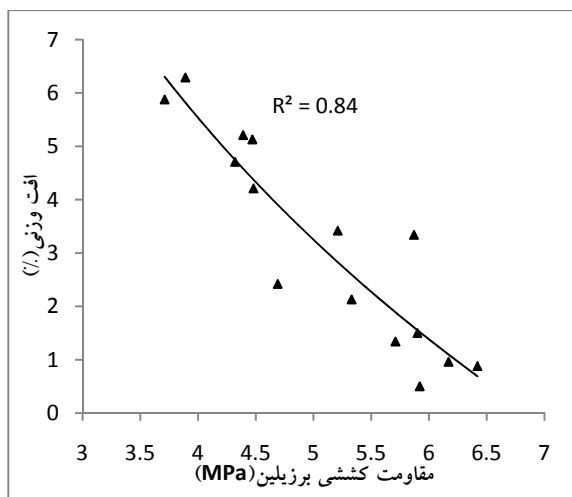
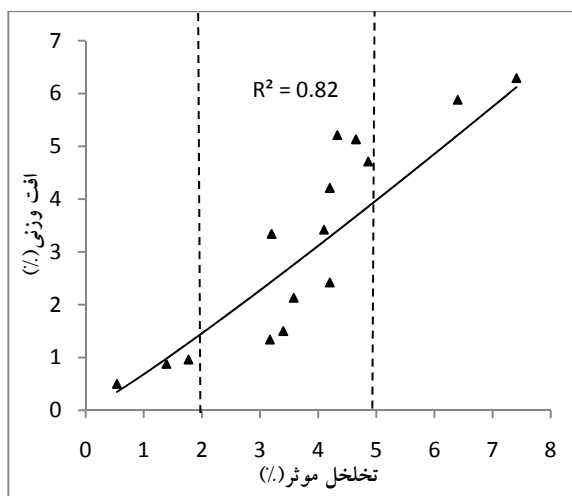
همانطوریکه از نمودارهای شکل (۴) مشاهده می‌شود تغییرات وزن نمونه‌ها در آزمون‌های تبلور نمک با الگوی (Angeli et al. (2007) همخوانی قابل قبولی دارد (شکل ۳). از اینرو با توجه داده‌های جدول (۴) و همچنین نمودارهای تغییرات وزن نمونه‌ها در شکل (۴)، پارامترهای لازم برای تعیین شاخص تجزیه و سرعت تجزیه نمونه‌ها استخراج شد. نتایج به دست آمده در جدول (۶) ارائه شده‌اند. بر اساس طبقه‌بندی (Angeli et al. (2007) (جدول ۵)، تراورتن‌های با تخلخل مؤثر پایینتر از ۲ و بعضی نمونه‌هایی با تخلخل پایین‌تر از ۴ درصد و با ساخت توده‌ای در رده نمونه‌های با شاخص تجزیه بالا قرار می‌گیرند و بنابراین در کوتاه مدت زوال‌پذیری کمتری از خود نشان می‌دهند. این در صورتی است که نمونه‌های با تخلخل بیشتر و ساخت لایه‌ای بیشتر در رده شاخص تجزیه متوسط قرار دارند. بر اساس سرعت تجزیه، همه نمونه‌ها در رده سرعت تجزیه پایین قرار دارند و این نشان می‌دهد که در دراز مدت زوال‌پذیری کمتری از خود نشان می‌دهند.

کمتری را از خود نشان می‌دهند، برای مثال تراورتن گردویی و تراورتن کرم دلچای به ترتیب با تخلخل ۳/۲ درصد و ۴/۱ درصد، افت وزنی بیشتری (به ترتیب افت وزنی ۳/۳۴ و ۳/۴۲) نسبت به تراورتن شهاب‌سنگ با تخلخل مؤثر ۴/۲ درصد (افت وزنی ۲/۴۲ درصد) در انتهای چرخه ۶۰ دارند. علت این موضوع می‌تواند به دلیل متفاوت بودن ساخت نمونه‌ها باشد به طوری که ساخت تراورتن شهاب‌سنگ توده-ای و ساخت تراورتن گردویی لایه‌ای می‌باشد. در واقع سطوح لایه‌بندی به صورت سطح ضعف عمل می‌کنند و نمک از طریق این سطوح به آسانی می‌تواند نفوذ کند و سنگ را بیشتر تحت تأثیر قرار دهد.

همچنین تراورتن کرم دلچای با دارا بودن ساخت توده‌ای به دلیل بافت پیزوئیدی نسبت به تراورتن شهاب‌سنگ افت وزنی بیشتری نشان می‌دهد، بنابراین ساخت نمونه‌ها در کنار تخلخل مؤثر و مقاومت کششی برزیلین نقش مهمی در کنترل افت وزنی نمونه‌ها را دارد.

جدول ۶. شاخص تجزیه و سرعت تجزیه نمونه‌ها در آزمایش تبلور نمک

نمونه	وزن نرمال در چرخه ۶۰	وزن نرمال در شروع مرحله ۳	شاخص تجزیه	شاخص تجزیه
تراورتن قرمز	۹۳/۷۱	۱۰۲/۸۷	۱۵	۰/۲۰
تراورتن گردویی	۹۴/۸۷	۱۰۲/۴۵	۱۵	۰/۱۷
تراورتن لیمویی	۹۶/۶۶	۱۰۱/۵۲	۱۵	۰/۱۱
تراورتن طوسی	۹۸/۶۵	۱۰۱/۵۴	۲۰	۰/۰۷
تراورتن انیکس قرمز	۹۹/۰۳	۱۰۰/۷۸	۲۰	۰/۰۴
تراورتن انیکس سبز	۹۹/۱۲	۱۰۰/۸۲	۲۰	۰/۰۴
تراورتن انیکس سفید	۹۹/۴۹	۱۰۰/۷۸	۲۰	۰/۰۳
تراورتن شکلاتی دماوند	۹۸/۵	۱۰۱/۵۳	۲۰	۰/۰۸
تراورتن کرم دلچای	۹۶/۵۸	۱۰۱/۷	۱۵	۰/۱۱
تراورتن سفید آتشکوه	۹۵/۷۸	۱۰۲/۱۲	۱۵	۰/۱۴
تراورتن پنیر کچه	۹۵/۲۸	۱۰۱/۵۷	۱۵	۰/۱۴
تراورتن سفید عباس‌آباد	۹۸/۷۵	۱۰۱/۳۲	۱۵	۰/۱۵
تراورتن کرم آبیار	۹۷/۸۷	۱۰۱/۶۲	۲۰	۰/۰۹
تراورتن کرم دره بخاری	۹۴/۱۲	۱۰۲/۶۹	۱۵	۰/۱۹
تراورتن شهاب سنگ	۹۷/۵۸	۱۰۱/۴۱	۱۵	۰/۰۹



شکل ۵. رابطه افت وزنی نمونه‌ها با تخلخل مؤثر و مقاومت کششی برزیلین

۲-۷. رابطه افت وزنی نمونه‌ها با تخلخل مؤثر و مقاومت

کششی برزیلین

تحقیقات گذشته نشان داده که افت وزنی سنگ‌ها به علت تبلور نمک به پارامترهای مختلفی مانند تخلخل مؤثر و ویژگی‌های مقاومتی بستگی دارد (Benavente et al., 2004; Sousa et al., 2005; Ruedrich and Siegesmund, 2007).

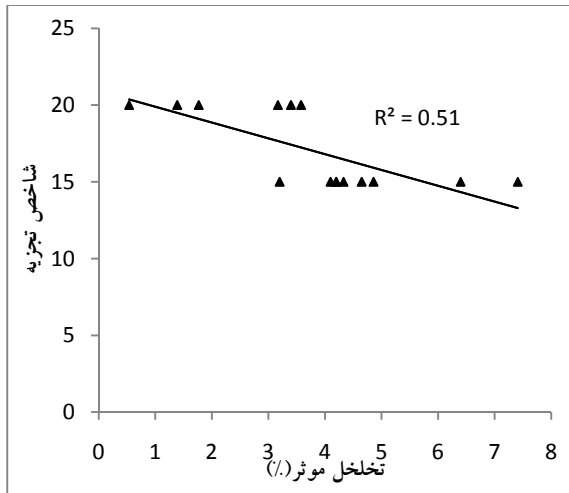
در شکل (۵) رابطه بین افت وزنی نمونه‌ها با تخلخل مؤثر و مقاومت کششی برزیلین نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود یک رابطه توانی با ضریب تعیین  $0/82$  بین افت وزنی با تخلخل مؤثر و یک رابطه لگاریتمی بین افت وزنی و مقاومت کششی برزیلین با ضریب تعیین  $0/84$  وجود دارد.

از این نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش تخلخل مؤثر و کاهش مقاومت کششی برزیلین، افت وزنی نمونه‌ها در مقابل تبلور نمک افزایش پیدا کرده است. در واقع با افزایش تخلخل مؤثر میزان نفوذ محلول سولفات منیزیم به درون خلل و فرج افزایش می‌یابد که این خود باعث بیشتر متاثر شدن نمونه‌ها از فشار تبلور نمک می‌شود. همچنین از آنجایی که تبلور نمک باعث اعمال فشار به دیواره خلل و فرج نمونه‌ها می‌شود از این رو مقاومت سنگ به ویژه مقاومت کششی برزیلین نقش مهمی در میزان افت وزنی نمونه‌ها خواهد داشت بدین صورت که هر چه مقاومت کششی بیشتر باشد دوام نمونه در مقابل فشار تبلور نمک بیشتر و در نتیجه افت وزنی کمتری در پی خواهد داشت.

جدول ۷. طبقه‌بندی نمونه‌ها بر اساس تخلخل مؤثر با توجه به افت وزنی آن‌ها در مقابل تبلور نمک

رد	۱	۲	۳
تخلخل مؤثر (%)	کمتر از ۲	۲-۵	بیشتر از ۵
افت وزنی نمونه‌ها (%)	کمتر از $0/96$	بین $0/96$ تا $0/88$	بیشتر از $0/88$
نام تجاری	تراورتن انیکس	تراورتن گردویی، لیمویی، توسی، سفید اشکوه،	تراورتن قرمز آذرشهر و
	(قرمز، سبز، سفید)	کرم آبیاری، پنیرکچه، سفیدعباس‌آباد، شهاب سنگ،	کرم دره بخاری
		تراورتن کرم دلچای و شکلاتی دماوند	

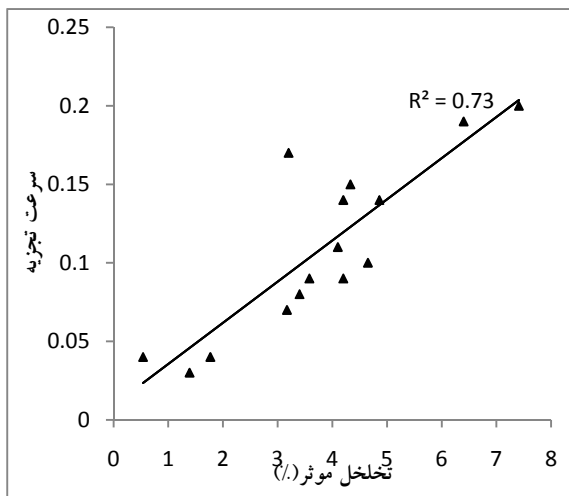
می‌شود با افزایش میزان تخلخل مؤثر نمونه‌ها سرعت تجزیه بیشتر شده است. در واقع توزیع و نحوه پراکندگی داده‌ها دلیل دیگری بر تأیید اینکه سرعت تجزیه پارامتر مناسبتری برای ارزیابی زوال‌پذیری نمونه‌ها در مقابل چرخه‌های تبلور نمک است.



با توجه به رابطه افت وزنی نمونه‌ها با تخلخل مؤثر در شکل (۵)، تخلخل مؤثر نمونه‌ها را می‌توان بر اساس تغییرات افت وزنی به سه رده نمونه‌های با تخلخل مؤثر کمتر از ۲ درصد، بین ۲ تا ۵ درصد و بیشتر از ۵ درصد طبقه‌بندی کرد. جدول (۷) طبقه‌بندی نمونه‌ها را بر اساس تخلخل مؤثر نشان داده شده است. در واقع نمونه‌های رده (۱) کمتر از ۰/۹۶ درصد افت وزنی را از خود نشان داده‌اند این در صورتی است که در رده (۲) افت وزنی بین ۰/۹۶ تا ۵/۸۸ درصد و در رده (۳) بیشتر از ۵/۸۸ درصد افت وزنی بعد از ۶۰ چرخه تبلور نمک از خود نشان داده‌اند.

۳-۷. رابطه شاخص تجزیه و سرعت تجزیه نمونه‌ها با تخلخل مؤثر، مقاومت کششی برزیلین و افت وزنی

در شکل (۶) رابطه شاخص تجزیه و سرعت تجزیه با تخلخل مؤثر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود یک رابطه خطی با ضریب تعیین ۰/۵۲ بین شاخص تجزیه و تخلخل مؤثر و یک رابطه خطی با ضریب تعیین ۰/۸۸ بین سرعت تجزیه و تخلخل مؤثر وجود دارد. از مقادیر ضرایب تعیین می‌توان نتیجه گرفت که سرعت تجزیه دارای همبستگی قوی‌تری با تخلخل مؤثر می‌باشد. کم بودن ضریب تعیین در رابطه شاخص تجزیه و تخلخل مؤثر به علت این موضوع است که مقادیر شاخص تجزیه برای نمونه‌ها در دو مقدار ۲۰ و ۱۵ قرار گرفته‌اند. با توجه به این موضوع، نظر محققین تحقیق حاضر بر این عقیده استوار است که سرعت تجزیه نسبت به شاخص تجزیه، پارامتر مناسب‌تری برای ارزیابی زوال‌پذیری نمونه‌های مورد مطالعه در مقابل چرخه‌های تبلور نمک است.

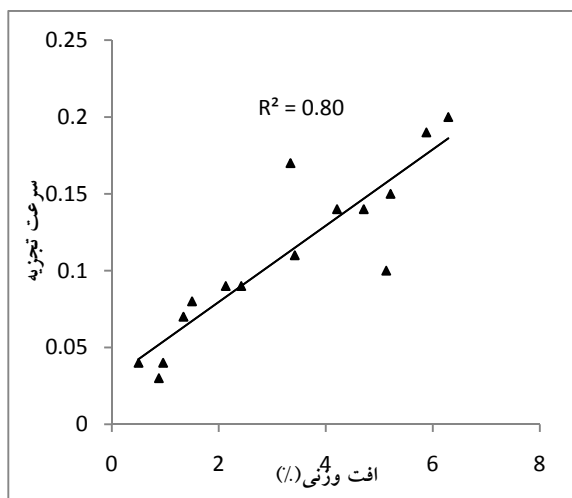
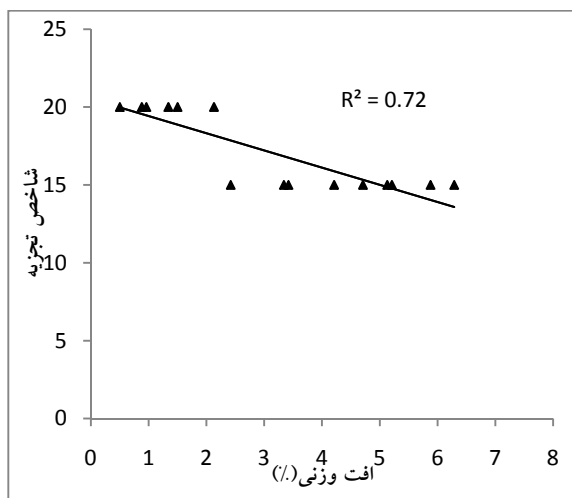


شکل ۶. رابطه شاخص تجزیه و سرعت تجزیه با تخلخل مؤثر

رابطه بین شاخص تجزیه و سرعت تجزیه با مقاومت کششی برزیلین در شکل (۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود مقدار ضریب تعیین بین سرعت تجزیه و مقاومت کششی برزیلین ( $R^2=0.87$ ) به مراتب بیشتر از ضریب تعیین بین

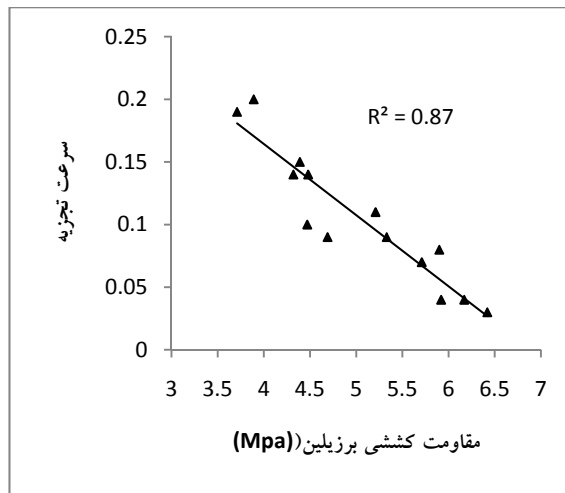
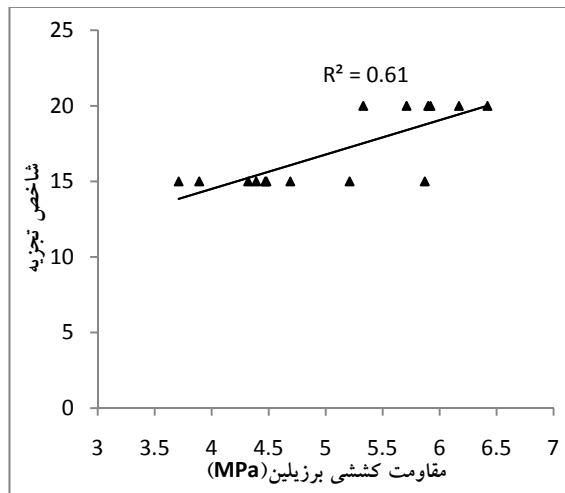
در شکل (۶) مشاهده می‌شود نمونه‌هایی با تخلخل مؤثر کمتر از ۲ درصد و تعدادی از نمونه‌های با تخلخل مؤثر بین ۲ تا ۵ درصد، دارای شاخص تجزیه بالاتری نسبت به نمونه‌های با تخلخل مؤثر بیشتر از ۵ درصد هستند. علاوه بر این مشاهده

شروع به تخریب کند (شاخص تجزیه پایین) ولی در انتهای آخرین چرخه آزمایش افت وزنی کمتری از خود نشان دهد و برعکس. برای مثال تراورتن قرمز و گردویی به ترتیب ۶/۲۹ و ۳/۳۴ درصد افت وزنی در انتهای چرخه ۶۰ دارند. برای این دو نمونه سرعت تجزیه به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۰/۱۱ است ولی شاخص تجزیه هر دو ۱۵ می‌باشد (جدول ۶). این نشان می‌دهد که سرعت تجزیه نسبت به شاخص تجزیه پارامتر مناسب‌تری برای ارزیابی زوال‌پذیری نمونه‌ها در مقابل چرخه‌های تبلور نمک است.



شکل ۸ رابطه شاخص تجزیه و سرعت تجزیه با افت وزنی نمونه‌ها

شاخص تجزیه و مقاومت کششی برزیلین ( $R^2=0.61$ ) است. این نشان می‌دهد سرعت تجزیه دارای همبستگی قوی‌تری با مقاومت کششی برزیلین است. لازم به ذکر است به دلیل آنومالی که تراورتن گردویی در نمودار شکل (۷) بین سرعت تجزیه و مقاومت کششی برزیلین ایجاد کرده بود، این داده از آنالیزها حذف شد.



شکل ۷. رابطه شاخص تجزیه و سرعت تجزیه با مقاومت کششی برزیلین

شکل (۸) رابطه شاخص تجزیه و سرعت تجزیه با افت وزنی نمونه‌ها به ترتیب با ضرایب تعیین به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۸ را نشان می‌دهد. در ارزیابی زوال‌پذیری نمونه‌ها در مقابل چرخه‌های تبلور نمک ممکن است نمونه‌ای در چرخه‌های پایین

## ۸. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر زوال پذیری ۱۵ نمونه تراورتن از نقاط مختلف ایران با استفاده از پارامترهای شاخص تجزیه و سرعت تجزیه با انجام آزمایش چرخه های تبلور نمک در سولفات منیزیم مورد بررسی قرار گرفت. مقدار این پارامترها بر اساس اندازه گیری افت وزنی نمونه، چرخه ای که در آن تخریب نمونه شروع می شود و همچنین تعداد چرخه های آزمایش تبلور نمک برای ۱۵ نمونه تراورتن تعیین شد و رابطه این دو پارامتر با تخلخل مؤثر، مقاومت کششی برزیلین و افت وزنی نمونه ها با انجام آنالیزهای رگرسیون برقرار شد.

نتایج آنالیزهای رگرسیون نشان می دهد که در تمامی روابط، سرعت تجزیه همبستگی قویتری نسبت به شاخص تجزیه با تخلخل مؤثر، مقاومت کششی برزیلین و افت وزنی نمونه ها دارد. این موضوع نشان دهنده مناسب تر بودن سرعت تجزیه برای ارزیابی زوال پذیری نمونه های مورد مطالعه در مقابل چرخه های تبلور نمک است.

همچنین نتایج نشان می دهد که علاوه بر تخلخل مؤثر و مقاومت کششی برزیلین، ساخت نمونه ها به ویژه لایه بندی نقش مهمی در کنترل زوال پذیری نمونه ها در مقابل چرخه های تبلور نمک دارد. به طور کلی نمونه های با تخلخل مؤثر پایین تر و مقاومت کششی برزیلین بالاتر، زوال پذیری کمتری از خود نشان دادند. علاوه بر این در نمونه های که دارای ساخت

لایه ای هستند زوال پذیری بیشتری نسبت به آن هایی که دارای ساخت توده ای بودند از خود نشان دادند.

طبقه بندی نمونه ها بر اساس شاخص تجزیه و سرعت تجزیه نشان می دهد که نمونه هایی با تخلخل کمتر از ۲ درصد و نمونه هایی با تخلخل کمتر از ۴ درصد و ساخت توده ای در رده نمونه های با شاخص تجزیه بالا قرار می گیرند، بنابراین در کوتاه مدت زوال پذیری کمتری از خود نشان می دهند. این در صورتی است که نمونه هایی با تخلخل بالای ۵ درصد و نمونه هایی با تخلخل بیشتر از ۴ درصد و ساخت لایه ای در رده شاخص تجزیه متوسط قرار دارند. بر اساس سرعت تجزیه، همه نمونه ها در رده سرعت تجزیه پایین قرار دارند و بیان کننده این موضوع است که نمونه ها در دراز مدت زوال پذیری کمتری از خود نشان می دهند.

## تشکر و قدردانی

محققین تحقیق حاضر بر خود لازم می دانند از زحمات جناب آقای دکتر محسن رنجبران عضو هیئت علمی بخش زمین شناسی دانشگاه تهران که زحمت مطالعه مقاطع نازک را متقبل شده اند تشکر نمایند. از معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس به خاطر حمایت مالی قدردانی می شود. همچنین از زحمات مدیریت و پرسنل معادن تراورتن های شهرستان های آذرشهر، محلات و فیروزکوه تشکر می گردد.

## منابع

جمشیدی، ا.، نیکودل، م. ر.، حافظی مقدس، ن.، ۱۳۸۷. مقایسه اثر تخریبی محلول های سولفات سدیم و سولفات منیزیم روی نمونه هایی از سنگ های ساختمانی. مجموعه مقالات دوازدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، اهواز.

جمشیدی، ا.، نیکودل، م. ر.، خامه چیان، م.، ذلولی، ا.، ۱۳۹۱. ارزیابی دوام تراورتن قرمز آذرشهر در مقابل یخبندان و تبلور نمک با انجام آزمون های آزمایشگاهی. مجموعه مقالات سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

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: 205–213.

- 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.
- Benavente, D., García del Cura, M.A., Fort, R., Ordonez, S., 1999. Thermodynamic modeling of changes induced by salt pressure crystallization in porous media of stone. *Journal of Crystal Growth*, 204: 168-178.
- Benavente D, Garcia del Cura MA, 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., García del Cura, M.A., Fort, R., Ordóñez, S., 2004. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74: 113-127.
- Benavente, D., Martínez, J., Cueto, N., Cura, M.A, 2007, Salt weathering in dual-porosity building dolostones, *Engineering Geology*, 94: 215-226.
- Chafetz, H.S., Folk, R.L., 1984. Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54 (1): 289–316.
- Cultrone, G., Luque, A., Sebastián, E., 2012. Petrophysical and durability tests on sedimentary stones to evaluate their quality as building materials. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45: 415-422.
- Dreesen, R., Duser, M., 2004. Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): role of petrography in provenance and durability assessment. *Materials Characterization* 53: 273–287.
- IAEG, 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. part 1: Rock and soil materials. *Bulletin Association Engineering Geology*, 19, 364–371.
- ISRM., 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. In: Ulusay R, Hudson J.A (Eds.), *Suggested methods prepared by the commission on testing methods*, 1974–2006.
- ISRM., 1981. *Rock characterization testing and monitoring. ISRM suggested methods*. Pergamon Press, Oxford.
- RILEM, 1980. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Commission 25-PEM. *Materials and Structures*, 13: 175–253.
- Rodriguez-Navarro, C., Doehnea, E., Sebastian, E., 2000. How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials. *Cement and Concrete Research*, 30: 1527-1534.
- Ruedrich, J., Siegesmund, S., 2007. Salt and ice crystallisation in porous sandstones. *Environmental Geology* 52: 225-249.
- Scherer, G., 1999. Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research*, 29: 1347-1358.
- Schneider, C., Gommeaux, M., Fronteau, G., Oguchi, C.T., Eyssautier, S., Kartheuser, B., 2011. A comparison of the properties and salt weathering susceptibility of natural and reconstituted stones of the Orval Abbey (Belgium). *Environmental Earth Sciences*, 63: 1447–1461.
- 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.
- 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.
- Urosevic, M., Pardo, E., Cardell, C., 2010. Rough and polished travertine building stone decay evaluated by a marine aerosol ageing test. *Construction and Building Materials*, 24: 1438-1448.
- 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., 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., Kekec, B., 2007, Effect of salt crystallization on stones of historical buildings and monuments, Konya, Central Turkey. *Building and Environment*, 42: 1453-1457.