

## ارزیابی تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌هایی از تراورتن‌ها در مقابل تبلور نمک با استفاده از مدل

## تابع زوال

احمد ذلولی

دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، بخش زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

ماشالله خامه‌چیان

استاد زمین شناسی مهندسی، بخش زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

محمدرضا نیکودل

استاد زمین شناسی مهندسی، بخش زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۳/۱/۱۶

khamechm@modares.ac.ir

## چکیده

مقاومت فشاری تک محوری یکی از فاکتورهای مهم در انتخاب سنگ ساختمانی می‌باشد، به ویژه زمانی که به عنوان سنگ فرش به کار می‌رود. تبلور نمک یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار روی دوام و مقاومت سنگ‌های ساختمانی می‌باشد. سولفات منیزیم یکی از نمکهای مخرب سنگ ساختمانی به شمار می‌رود. بدین منظور ۱۵ نمونه تراورتن از معادن شهرستان آذرشهر، فیروزکوه و محلات انتخاب شد و ویژگی‌های سنگ‌شناسی و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بدست آمد. سپس به منظور بررسی تغییرات مقاومت فشاری تک محوری تحت آزمونهای تبلور نمک در محلول سولفات منیزیم ۱۴ درصد وزنی قرار گرفتند. مدل تابع زوال (نیمه عمر و ثابت زوال) برای ارزیابی تغییرات مقاومت فشاری تک محوری بکار برده شد. ارتباط افت مقاومت فشاری با تخلخل موثر، مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها و ارتباط ثابت زوال با تخلخل موثر و مقاومت کششی برزیلین با انجام آنالیزهای رگرسیون برقرار شد. نتایج نشان داد که با افزایش تخلخل موثر و کاهش مقاومت کششی برزیلین افت مقاومت فشاری تک محوری افزایش می‌یابد علاوه افت مقاومت در نمونه‌هایی با ساخت لایه‌ای بیشتر بود. ثابت زوال در نمونه‌ها از حدود ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۱۹ تغییر می‌کند که وابسته به تخلخل موثر و مقاومت کششی و ساخت نمونه‌ها می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** تراورتن، مقاومت فشاری تک محوری، تبلور نمک، مدل تابع زوال، سولفات منیزیم

## مقدمه

تراورتن، نوعی سنگ آهک است و بعضی مواقع به عنوان سنگ آهک تراورتن طبقه‌بندی می‌شود چون به طور عمده از کربنات کلسیم تشکیل شده است و دارای تخلخل ماکروسکوپی زیاد می‌باشد (Chin, 2007). Chafetz and Folk (1984) بیان کردند که تراورتن از چشمه‌های آب گرم و آب سرد رسوب می‌کند. اگر افت دمای آب در سطح زمین سریع و ناگهانی باشد آراگونیت تشکیل شده که منجر به تشکیل تراورتن انیکس شده و اگر افت دمای آب کند و تدریجی باشد تراورتن (کلسیت) تشکیل می‌شود. تراورتن‌ها به دلیل مقاومت قابل قبول، برش و صیقل‌پذیری ایده‌آل، شرایط استخراج ایده‌آل، زیبایی‌ظاهر، وجود تخلخل جهت چسبیدن به ملات و قیمت مناسب، نسبت به سایر سنگ‌ها بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. سنگ‌های ساختمانی پس از مدتی به دلیل شرایط محیطی، زیبایی و دوام خود را از دست می‌دهند. هوازدگی توسط نمک یکی از عوامل مهم در تغییر کیفیت و دوام سنگ‌های ساختمانی می‌باشد (Jefferson, 1993; Benavente et al., 2001; Ruedrich and Siegesmund, 2007). نمک‌های معمول در مصالح ساختمانی از اتمسفر، آبهای زیرزمینی، مصالح ساختمانی، خیابان و معابر منشاء می‌گیرند (Arnold, 1984). زمانی که نمک‌ها وارد منافذ سنگ می‌شوند باعث تخریب سنگ توسط فشار تبلور، انقباض و انبساط نمک‌ها به علت تغییر در رطوبت می‌شوند (Doehne, 1994; Fookes et al., 1988). البته هوازدگی توسط فشار تبلور از اهمیت خاصی برخوردار است. هنگامی که فشار تبلور نمک در منافذ سنگ‌ها از مقاومت کششی سنگ زیادتر شود، سنگ

دچار تخریب می‌شود (Ruedrich and Siegesmund, 2007). سولفات منیزیم یکی از نمک‌های مخرب سنگ‌های ساختمانی می‌باشد (Ruiz-Agudo et al., 2007). سولفات منیزیم دارای خاصیت انقباض و انبساط بر اثر تغییرات رطوبت می‌باشد، هنگامی که بلور بدون آب سولفات منیزیم در معرض رطوبت قرار گیرد سه برابر افزایش حجم رخ می‌دهد که این امر منجر به ایجاد فشار به جدار منافذ می‌شود (Ruiz-Agudo et al., 2007; Lopez- Arce et al., 2008; Doehne and Pinchin, 2008). تاکنون جنبه‌های مختلفی از چرخه‌های تبلور نمک روی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و همچنین دوام انواع سنگ‌ها صورت گرفته است (Scherer, 1999; Benavente et al., 2004; Yavuz, 2006; Benavente et al., 2007; Urosevic et al., 2010; Schneider et al., 2011; Cultrone et al., 2012). جمشیدی و همکاران، ۱۳۸۷؛ جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ ذلولی و همکاران (۱۳۹۱).

مقاومت فشاری تک محوری یکی از پارامترهای مهم در انتخاب سنگ ساختمانی می‌باشد بخصوص زمانی که به عنوان سنگفرش به کار می‌رود. در زمینه تاثیر تبلور نمک روی مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌های ساختمانی تحقیقاتی توسط محققین صورت گرفته است (Akin Ulusoy, 2007; and Yavuz and Topal, 2007; Ozsan 2011; Marques and Chastre, 2012). تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که مقاومت فشار تک محوری با افزایش تعداد چرخه‌های تبلور کاهش پیدا می‌کند.

(Ludovico-Marques and Chastre (2012) الگوی نمایی را

برای تغییرات مقاومت فشار تک محوری در چرخه‌های تبلور نمک ارائه دادند.

سنگ‌های با مقاومت پایین (۵۰-۲۵ MPa) و سایر نمونه‌ها در رده سنگ‌های با مقاومت متوسط (۱۰۰-۵۰ MPa) قرار می‌گیرند.

### آزمایش چرخه‌های تبلور نمک

روشهای مختلفی برای ارزیابی تاثیر تبلور نمک روی ویژگی‌های مقاومتی و دوام سنگ‌ها وجود دارد که می‌توان به استاندارد آمریکا (ASTM C 88- (1997))، استاندارد اروپا (EN12370 (1997))، استاندارد استرالیا (AS/NZS4456 (1997)) و استاندارد فرانسه (RILEM (1980)) اشاره کرد همه این روشها تبلور نمک را به صورت چرخه‌ای بررسی می‌کنند.

در این تحقیق آزمایش مطابق استاندارد (RILEM (1980)) انجام شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت در استخر محلول ۱۴ درصد وزنی سولفات منیزیم قرار گرفتند (مرحله غوطه‌ورسازی)، سپس نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای آزمایشگاه قرار گرفتند (مرحله خشک شدن سطح نمونه‌ها)، سپس نمونه‌ها به مدت ۸ ساعت در گرمخانه با دمای  $5 \pm 10$  درجه سانتیگراد قرار داده شدند (مرحله خشک شدن). بعد از این مرحله، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای آزمایشگاه قرار گرفتند تا به طور کامل سرد شوند (مرحله سرد شدن). هر چرخه ۲۴ ساعت طول کشید. آزمایش تبلور نمک تا ۶۰ چرخه انجام و تغییرات مقاومت فشاری تک محوری در پایان چرخه‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ... ۶۰ تعیین شد. لازم به ذکر است برای انجام این تحقیق ۳۶ نمونه استوانه-ای از هر تراورتن با ابعاد  $10 \times 4 \times 4$  سانتیمتر تهیه شد (۵۴۰ آزمون مقاومت فشاری تک محوری در چرخه‌های تبلور نمک انجام شد).

### مدل تابع زوال یا تخریب

Mutlurk et al., (2004) مدل تابع زوال برای بیان نرخ زوال سنگها پیشنهاد کردند. دو پارامتر ثابت زوال ( $\lambda$ ) و نیمه عمر ( $N_{1/2}$ ) برای بیان زوال در این مدل استفاده شده است. این مدل فرض می‌کند که نرخ از دست دادن پیوستگی سنگ به علت فرایندهای هوازدگی (تبلور نمک، انجماد و ذوب شدن آب و...) متناسب با پیکارچگی سنگ در شروع هر چرخه می‌باشد. (رابطه ۱) معادله این مدل را نشان می‌دهد.

در (رابطه ۱)  $\left(\frac{dI}{dN}\right)$  نرخ تخریب،  $\lambda$  ثابت زوال،  $I$  یکپارچگی یا پیوستگی سنگ (مقاومت فشار تک محوری یا مقاومت کششی برزیلین و...) و  $N$  تعداد چرخه‌ها می‌باشد. علامت منفی در (رابطه ۱) نشانگر از دست دادن یکپارچگی سنگ می‌باشد. اگر یکپارچگی اولیه سنگ را با  $I_0$  و یکپارچگی سنگ را بعد از  $N$  چرخه با  $I_N$  نشان داده شود (رابطه ۱) به صورت (رابطه ۲) در می‌آید.

$$\ln(I_0/I_N) = \lambda N \quad (2)$$

(رابطه ۲) رابطه‌ای نمایی می‌باشد که می‌تواند به شکل (رابطه ۳) درآید:

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

در (رابطه ۳)  $(e^{-N\lambda})$  ضریب زوال می‌باشد که نشانگر نسبت یکپارچگی باقیمانده بعد از  $N$  چرخه  $\left(\frac{I_N}{I_0}\right)$  می‌باشد. پارامتر  $\lambda$  میانگین افت یکپارچگی در هر چرخه می‌باشد. مقاومت در برابر تخریب با پارامتر نیمه عمر  $(N_{1/2})$  بیان می‌شود که با استفاده از روابط بالا بدست می‌آید. پارامتر نیمه عمر را می‌توان به عنوان تعداد چرخه‌های لازم برای کاهش ویژگی فیزیکی و مکانیکی به نصف مقدار اولیه‌اش تعریف کرد بنابراین سنگهایی که مقدار مقاوم در برابر تخریب هستند نیمه عمر بالایی دارند. پارامتر نیمه عمر نسبت معکوس با ضریب زوال  $(e^{-N\lambda})$  دارد. اگر پارامتر  $\left(\frac{I_N}{I_0}\right)$  در (رابطه ۲) با  $(I_{0/2})$  جایگزین شود نیمه عمر از (رابطه ۴) بدست می‌آید.

$$N_{1/2} = \ln 2 / \lambda \approx 0.693 / \lambda \quad (4)$$

در این تحقیق تاثیر تبلور نمک سولفات منیزیم روی تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تراورتن بررسی شده و ارتباط ویژگی‌های سنگ‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی (تخلخل موثر) و ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت کششی برزیلین) با افت مقاومت فشاری تک محوری بررسی شده است. با استفاده از مدل تابع زوال که با برقراری ارتباط نمایی میان مقاومت فشاری تک محوری و تعداد چرخه‌ها بدست می‌آید ثابت زوال و نیمه عمر برای نمونه‌های مورد آزمایش محاسبه شده است.

### مواد و روش پژوهش

برای انجام تحقیق حاضر، طی بازدید از معادن تراورتن شهرستان آذرشهر، محلات و فیروزکوه بلوک‌هایی با ابعاد مناسب تهیه و به آزمایشگاه زمین-شناسی دانشگاه تربیت مدرس انتقال داده شد و از آن‌ها نمونه‌ها و مغزه‌های لازم 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 تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلین نمونه‌های مورد مطالعه پرداخته شده است. سپس آزمایش تبلور نمک تا ۶۰ چرخه در محلول سولفات منیزیم انجام و تغییرات مقاومت فشاری تک محوری در چرخه‌های تبلور نمک تعیین شد. در ادامه با توجه به ویژگی‌های سنگ شناسی، فیزیکی، مکانیکی و تغییرات مقاومت فشاری تک محوری بدست آمده از انجام آزمایش‌ها، نتایج تجزیه و تحلیل شده است.

### مطالعات سنگ‌شناسی

مطالعات سنگ‌شناسی نه تنها اطلاعاتی در مورد ترکیب کانی‌شناسی و منشاء سنگ می‌دهند، بلکه در ارزیابی پتانسیل انحلال‌پذیری و زوال‌پذیری سنگ‌ها در برابر عوامل هوازدگی شیمیایی و فیزیکی نیز یک ابزار مهم است (Dreesen and Duser, 2004). در این تحقیق با تهیه مقاطع نازک از نمونه‌ها، ویژگی‌های سنگ‌شناسی شامل ترکیب کانی‌شناسی، ساخت و بافت با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان بررسی شد. در (جدول ۲) نتایج مطالعات سنگ‌شناسی ارائه شده است.

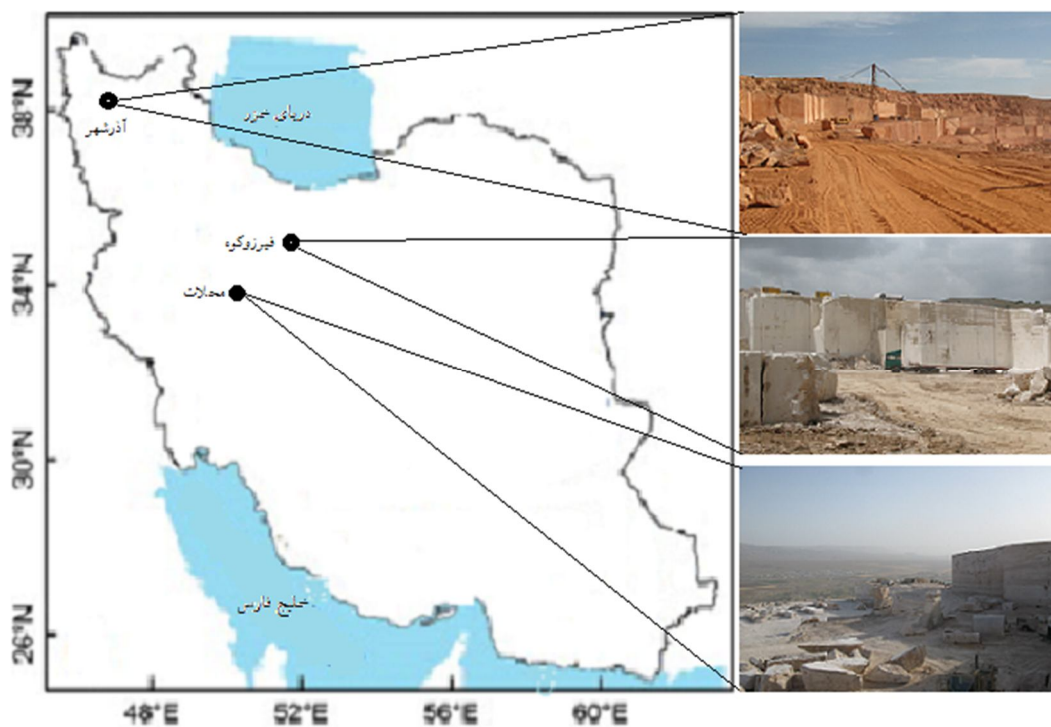
نتایج نشان می‌دهد کلسیت (اسپارایت و میکرو اسپارایت و میکرایت) کانی اصلی تشکیل دهنده تراورتن‌های مورد مطالعه است و در بعضی نمونه‌ها مانند تراورتن گردویی، تراورتن کرم دلچای، تراورتن پنیر کچه، تراورتن سفید عباس آباد، کرم دره بخاری و تراورتن شهاب سنگ، به همراه کلسیت، کانی کوارتز هم وجود دارد. نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس ساخت به دو گروه لایه‌ای مانند تراورتن قرمز، تراورتن گردویی و توده‌ای مانند تراورتن طوسی، تراورتن شکلاتی فیروزکوه طبقه‌بندی می‌شوند.

### ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

در این تحقیق برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی شامل چگالی خشک و اشباع، تخلخل موثر، 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 از هر تراورتن مورد آزمایش قرار گرفت و مقادیر میانگین هر یک از این ویژگی‌ها در (جدول ۳) ارائه شده‌اند. در (جدول ۳) مشاهده می‌شود میانگین مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین نمونه‌ها به ترتیب بین  $33/6$  تا  $65/7$  و  $3/89$  تا  $6/42$  مگاپاسکال تغییر می‌کند. با توجه به طبقه‌بندی (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

ویژگی مثل مقاومت فشاری تک محوری نشانگر مقادیر بالای ثابت زوال می-باشد.

ثابت زوال ( $\lambda$ ) می‌تواند با استفاده از آنالیز رگرسیون بدست آید البته باید برای بدست آوردن ثابت زوال، افت یکپارچگی در یک ویژگی مثل مقاومت فشاری تک محوری به شکل نمایی نشان داده شود (شکل ۲). کاهش ناگهانی در یک



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

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

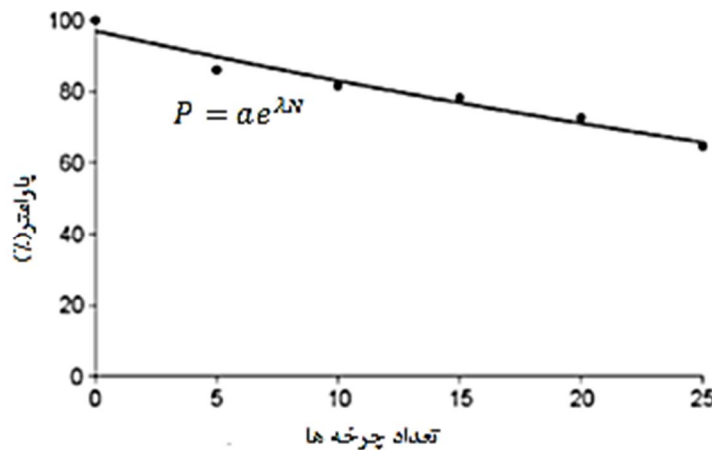
نام تجاری	نام زمین‌شناسی	رده	محل نمونه‌برداری	مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری
تراورتن قرمز	تراورتن	رسوبی	آذرشهر	05 78 835-41 75 768
تراورتن گردویی	تراورتن	رسوبی	آذرشهر	05 82 940-41 77 150
تراورتن لیمویی	تراورتن	رسوبی	آذرشهر	05 79 962-41 78 232
تراورتن طوسی	تراورتن	رسوبی	آذرشهر	05 75 086-41 72 118
تراورتن انیکس قرمز	تراورتن انیکس	رسوبی	آذرشهر	05 79 419-41 77 952
تراورتن انیکس سبز	تراورتن انیکس	رسوبی	آذرشهر	05 79 714-41 78 401
تراورتن انیکس سفید	تراورتن انیکس	رسوبی	آذرشهر	05 78 893-41 75 830
تراورتن شکلاتی دماند	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

جدول ۲. نتایج مطالعات سنگ‌شناسی نمونه‌ها

نام تجاری	کانی‌های تشکیل دهنده	ساخت	بافت
تراورتن قرمز	کلسیت	لایه‌ای	بافت آن عمدتاً اسپاریتی 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 اسپاریت دایزنی مشاهده می‌شود.
تراورتن لیمویی	کلسیت	لایه‌ای	بافت آن عمدتاً از میکرایت (گل آهکی، میکرو اسپاریت و اسپاریت 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 اسپاریتی مشاهده می‌شود.
تراورتن انیکس 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 انیکس سبز	کلسیت	لایه‌ای	بافت آن حالت بادبزنی است که به طور کامل متبلور است و در آن میزان کمی اکسیدهای آهن مشاهده می‌شود.
تراورتن انیکس 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 اینترا کلست (میکرایت) و پلت تشکیل شده است که در یک زمینه اسپاریتی قرار گرفته‌اند.
تراورتن کرم دلیچای	کلسیت و کوارتز	توده‌ای	بافت نمونه به صورت حلقه‌های متحدالمرکز عمدتاً پیروئیدی و به مقدار کمتر جلبکی است که این قطعات در یک زمینه اسپاریتی قرار گرفته‌اند.
تراورتن سفید آتشکوه	کلسیت	توده ای	بافت سنگ ادغامی از میکرایت و اسپاریت است که به طور توأم با هم دیده می‌شوند و زمینه سنگ را تشکیل داده‌اند.
تراورتن پنیر کچه	کلسیت و کوارتز	توده ای	بافت عمدتاً از میکرایت تشکیل شده است که در بخش‌هایی از آن به صورت سیمان اسپاریتی پر شده است.
تراورتن سفید عباس‌آباد	کلسیت و کوارتز	لایه ای	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	توده ای	بافت آن اجتماعی از میکرایت و اسپاریت می‌باشد که بخش میکرایتی به صورت خرده‌های اینتراکلاست و پلت مشاهده می‌شود.
کرم دره بخاری	کلسیت و کوارتز	لایه ای	زمینه سنگ از میکرایت و اسپاریت تشکیل شده است که در آن بافت بادبزنی و موزائیکی مشاهده می‌شود.
تراورتن شهاب سنگ	کلسیت و کوارتز	توده ای	بافت سنگ در دو حالت بادبزنی و نیز وجود اینتراکلاست و پلت‌ها که در یک زمینه اسپاریتی قرار گرفته‌اند تشکیل یافته است.

جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه

نام تجاری	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$n'$ (%)	$W_a$ (%)	$UCS$ (MPa)	$BST$ (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 پنیر 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



شکل ۲. محاسبه ثابت زوال در چرخه‌های تبلور نمک (اصلاح شده از Mutluturk et al., 2004)

### بحث و نتیجه گیری

#### تغییرات مقاومت فشاری تک محوری

(شکل ۳) تغییرات مقاومت فشاری تک محوری در چرخه‌های تبلور نمک را نشان می‌دهد. در این شکل محور قائم نمودارها مقاومت فشار تک محوری نرمال شده می‌باشد که به صورت درصد با استفاده از (رابطه ۵) تعیین شده است:

$$UCS_n = \frac{UCS_f}{UCS_i} \quad (5)$$

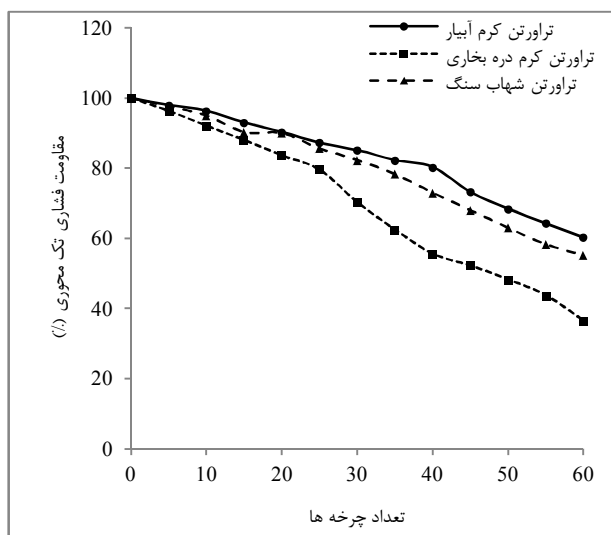
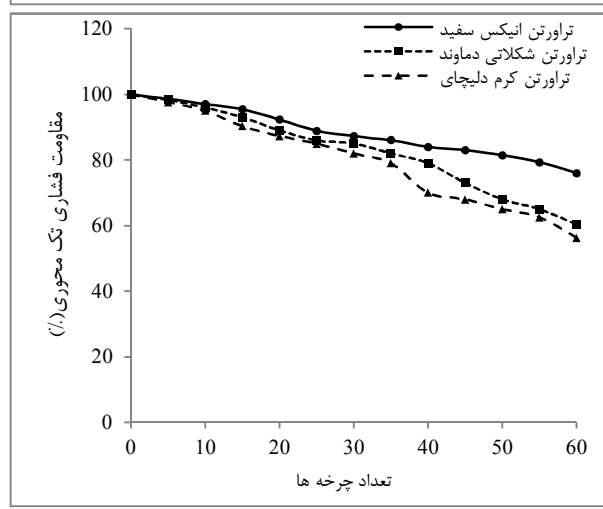
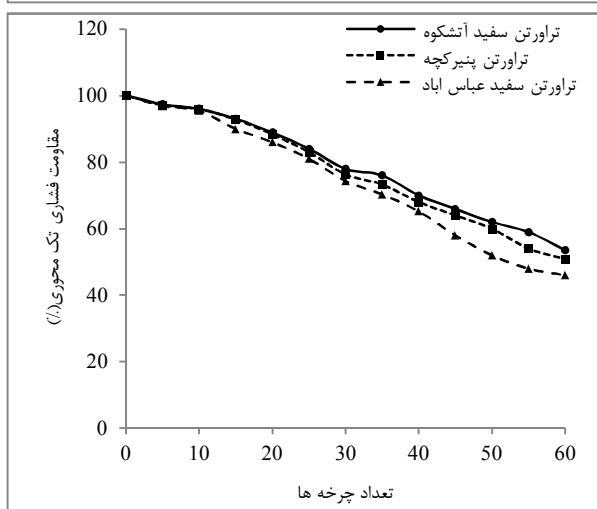
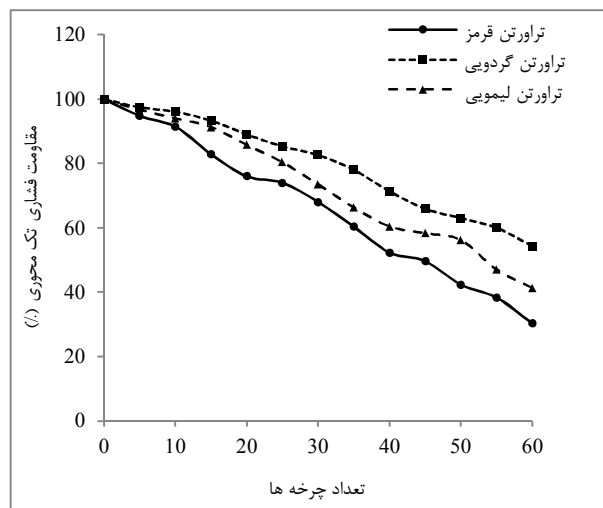
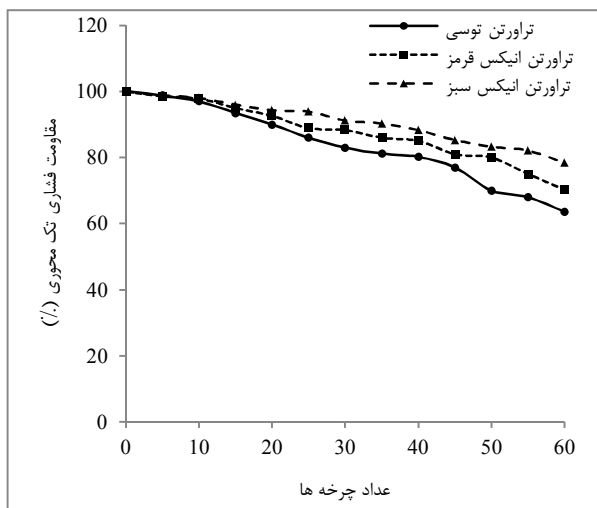
در این جا  $UCS_n$ ،  $UCS_f$  و  $UCS_i$  به ترتیب مقاومت فشاری تک محوری نرمال شده، مقاومت فشاری تک محوری در چرخه‌ها و مقاومت فشاری تک محوری اولیه می‌باشد. همانطور که از نمودارها مشاهده می‌شود مقاومت فشاری تک محوری با افزایش تعداد چرخه‌ها کاهش پیدا می‌کند ولی نرخ و میزان کاهش مقاومت در نمونه‌ها متفاوت است. بیشترین افت مقاومت فشاری تک محوری در انتهای چرخه‌های تبلور نمک مربوط به تراورتن قرمز آذرشهر با ۶۹/۶ درصد و کمترین آن مربوط به تراورتن انیکس سبز با افت مقاومت فشار تک محوری ۲۱/۶ درصد می‌باشد (جدول ۴). علت این موضوع را می‌توان به تخلخل موثر و ویژگی‌های مقاومتی نمونه‌ها مانند مقاومت کششی برزیلین نسبت داد. همانطور که در (جدول ۳) مشاهده می‌شود تراورتن انیکس سبز تخلخل موثر کمتر و مقاومت کششی برزیلین بیشتری (که نشان دهنده مقاومت سنگ در برابر فشار ناشی از تبلور نمک در حفرات می‌باشد) نسبت به تراورتن قرمز آذرشهر دارد.

این موضوع باعث کمتر بودن افت مقاومت فشار تک محوری تراورتن انیکس سبز در مقایسه با تراورتن قرمز آذرشهر شده است. در تعدادی از نمونه‌ها که تخلخل موثر بالایی دارند نسبت به بعضی دیگر که تخلخل موثر پایین‌تری دارند افت مقاومت فشار تک محوری کمتری را از خود نشان می‌دهند. برای مثال تراورتن لیمویی و سفید عباس آباد به ترتیب با تخلخل ۴/۶۵ درصد و ۴/۵۳ درصد، افت مقاومت فشاری تک محوری بیشتری (به ترتیب افت مقاومت فشار تک محوری ۵۸/۷ و ۵۴) نسبت به تراورتن پنیرکچه با تخلخل موثر ۴/۸۶ درصد (افت مقاومت فشار تک محوری ۴۹/۱ درصد) در انتهای چرخه ۶۰ دارند.

علت این موضوع می‌تواند متفاوت بودن ساخت نمونه‌ها باشد به طوری که ساخت تراورتن شهاب سنگ توده‌ای 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 تاثیر قرار دهد.

همین حالت در تراورتن گردویی نیز مشاهده می‌شود با اینکه تراورتن گردویی تخلخل موثر کمتری نسبت به تراورتن شهاب سنگ دارد (تخلخل موثر تراورتن گردویی ۳/۱ درصد و تراورتن شهاب سنگ ۴/۲ درصد می‌باشد) ولی درصد افت مقاومت فشار تک محوری تقریباً یکسانی بعد از ۶۰ چرخه دارند (درصد افت مقاومت فشاری تک محوری تراورتن گردویی و شهاب سنگ به ترتیب ۴۴/۸ و ۴۵/۷ درصد می‌باشد). بنابراین ساخت نمونه‌ها در کنار تخلخل موثر و مقاومت کششی برزیلین نقش مهمی در کنترل افت وزنی نمونه‌ها را دارد.

همانطوری که در نمودارها مشخص است نمونه‌های با تخلخل بالا مانند تراورتن قرمز و کرم دره بخاری) معمولاً در چرخه‌های ابتدایی افت زیادی دارند ولی نمونه‌های با تخلخل کمتر به ویژه تراورتن‌های انیکس با تخلخل کمتر از ۲ درصد افت کمتری در چرخه‌های ابتدایی نشان می‌دهند علت این امر آن است که مقدار فشار تبلور وارده با مقدار نمکی که درون سنگ انباشته می‌شود ارتباط مستقیم دارد و هرچه قدر نمک زیادی درون سنگ انباشته شود مقدار فشار وارده بیشتر شده و در نتیجه از مقاومت سنگ بیشتر کاسته می‌شود. جدول (۴) رابطه‌نمایی مقاومت فشار تک محوری با تعداد چرخه‌ها، ثابت زوال و نیمه عمر نمونه‌ها را طی چرخه‌های تبلور نمک سولفات منیزیم نشان می‌دهد. روابط میان تغییرات مقاومت فشاری تک محوری و تعداد چرخه‌ها با ایجاد رابطه‌نمایی میان این دو پارامتر بدست آمده است. همانطوری که مشاهده می‌شود ثابت زوال برای نمونه‌ها از ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۱۹ و نیمه عمر از ۳۶/۵ تا ۱۷۳/۳ تغییر می‌کند. با افزایش تخلخل موثر ثابت زوال افزایش یافته و نیمه‌عمر کاسته می‌شود. همانطوری که اشاره شد با افزایش نیمه عمر، مقاومت سنگ در چرخه‌های تبلور نمک نیز افزایش می‌یابد. این نتایج با داده‌های بدست آمده توسط Akin and Ozsan (2011) مطابقت دارد. طبق تحقیقات Akin and Ozsan (2011) که تاثیر سولفات منیزیم و سولفات سدیم را بر دوام و مقاومت تراورتن‌ها بررسی می‌کردند مقدار ثابت زوال تراورتن‌ها در محلول سولفات منیزیم ۰/۰۱۰ تا ۰/۰۱۵ برای تراورتن‌ها محاسبه شد. البته محدوده تغییرات تخلخل موثر و مقاومت کششی تراورتن‌های مورد مطالعه در این پژوهش بیشتر از محدوده تغییرات تخلخل موثر و مقاومت کششی برزیلین تراورتن‌های مورد مطالعه توسط محقق نامبرده بود که این عامل باعث شده محدوده تغییرات در ثابت زوال (۰/۰۰۴ تا ۰/۰۱۹) و نیمه عمر تراورتن‌ها در این تحقیق بیشتر باشد.



شکل ۳. تغییرات مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌ها در مقابل چرخه‌های تبلور نمک

جدول ۴. درصد افت مقاومت فشاری تک محوری، رابطه مقاومت فشار تک محوری با تعداد چرخه ها، ثابت زوال و نیمه عمر نمونه ها بعد از ۶۰ چرخه تبلور سولفات منیزیم

نمونه	درصد افت مقاومت فشاری تک محوری بعد از ۶۰ چرخه	رابطه مقاومت فشاری تک محوری با تعداد چرخه ها	ثابت زوال ( $\lambda$ )	نیمه عمر ( $N_{1/2}$ )
تراورتن قرمز	۶۹/۶	$UCS = 110.01e^{-0.019N}$	۰/۰۱۹	۳۶/۵
تراورتن گردویی	۴۵/۷	$UCS = 106.49e^{-0.010N}$	۰/۰۱۰	۶۹/۳
تراورتن لیمویی	۵۸/۷	$UCS = 109.04e^{-0.015N}$	۰/۰۱۵	۴۶/۲
تراورتن طوسی	۳۶/۴	$UCS = 103.59e^{-0.007N}$	۰/۰۰۷	۹۰/۰
تراورتن انیکس قرمز	۲۹/۷	$UCS = 102.58e^{-0.005N}$	۰/۰۰۵	۱۳۸/۶
تراورتن انیکس سبز	۲۱/۶	$UCS = 101.78e^{-0.004N}$	۰/۰۰۴	۱۷۳/۳
تراورتن انیکس سفید	۲۴/۸	$UCS = 100.89e^{-0.005N}$	۰/۰۰۵	۱۳۸/۶
تراورتن شکلاتی دماوند	۳۹/۷	$UCS = 104.56e^{-0.008N}$	۰/۰۰۸	۸۶/۷
تراورتن کرم دلیچای	۴۳/۷	$UCS = 104.24e^{-0.009N}$	۰/۰۰۹	۷۷/۰
تراورتن سفید آتشکوه	۴۶/۴	$UCS = 106.02e^{-0.011N}$	۰/۰۱۱	۶۳/۰
تراورتن پنیرکچه	۴۹/۱	$UCS = 107.00e^{-0.012N}$	۰/۰۱۲	۵۷/۸
تراورتن سفید عباس آباد	۵۴	$UCS = 108.60e^{-0.014N}$	۰/۰۱۴	۵۰/۰
تراورتن کرم آبیار	۳۹/۷	$UCS = 105.05e^{-0.008N}$	۰/۰۰۸	۸۶/۷
تراورتن کرم دره بخاری	۶۳/۴	$UCS = 109.92e^{-0.017N}$	۰/۰۱۷	۴۰/۸
تراورتن شهاب سنگ	۴۴/۸	$UCS = 105.89e^{-0.010N}$	۰/۰۱۰	۶۹/۳

دارند و بیشترین افت در این گروه مربوط به تراورتن انیکس قرمز با تخلخل ۱/۷۷ درصد و کمترین مقدار افت مقاومت مربوط به تراورتن انیکس سبز با تخلخل ۰/۵۴ درصد می باشد.

هر سه تراورتن انیکس ساخت لایه ای دارند. در رده (۲) افت مقاومت فشاری تک محوری بین ۳۶/۴ تا ۵۸/۷ درصد مقدار اولیه به ترتیب مربوط به تراورتن های لیمویی با تخلخل ۴/۶۵ درصد و ساخت لایه ای و تراورتن طوسی با تخلخل ۳ درصد و ساخت توده ای می باشد، در این گروه تراورتن طوسی کمترین مقدار تخلخل را دارد. در رده (۳) افت مقاومت فشار تک محوری بیشتر از ۶۳/۴ درصد می باشد. در این گروه تراورتن کرم دره بخاری و قرمز آذرشهر به ترتیب با تخلخل ۶/۴ و ۷/۴۱ درصد قرار دارند ساخت این دو تراورتن لایه ای می باشد. تخلخل بالا و ساخت لایه ای این تراورتن ها باعث شده این تراورتن ها بیشترین مقدار افت در مقاومت فشاری تک محوری را داشته باشند.

با توجه به رابطه افت وزنی نمونه ها با تخلخل مؤثر در (شکل ۴)، تخلخل مؤثر نمونه ها را می توان بر اساس تغییرات افت وزنی به سه رده نمونه های با تخلخل مؤثر کمتر از ۲ درصد، بین ۲ تا ۵ درصد و بیشتر از ۵ درصد طبقه بندی کرد. (جدول ۵) طبقه بندی نمونه ها را بر اساس تخلخل مؤثر نشان داده شده است. در واقع نمونه های رده ۱ کمتر از ۰/۹۶ درصد افت وزنی را از خود نشان داده اند 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 داده اند.

### رابطه افت مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها با تخلخل مؤثر و مقاومت کششی برزیلین

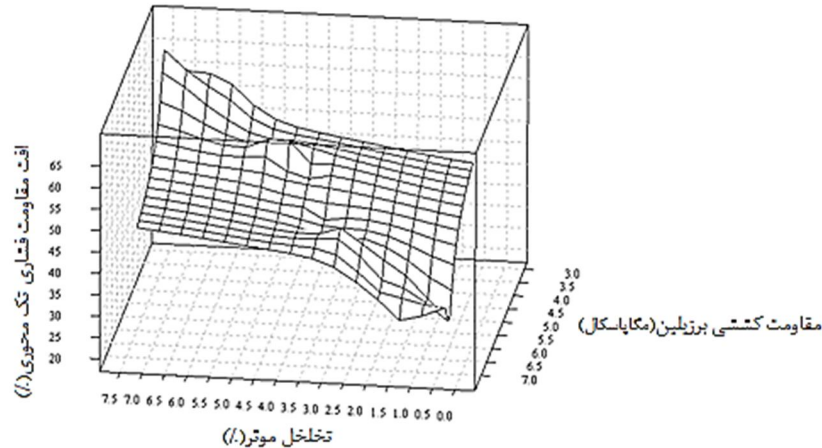
تحقیقات گذشته نشان داده که مقاومت فشاری تک محوری سنگ ها به علت تبلور نمک به پارامترهای مختلفی مانند تخلخل مؤثر و ویژگی های مقاومتی بستگی دارد (Akin and Ozsan, 2011; Ludovico-Marquesand chastre, 2012). در (شکل ۵) رابطه بین درصد افت مقاومت فشاری تک محوری در انتهای چرخه ۶۰ با تخلخل مؤثر و مقاومت کششی برزیلین به صورت سه بعدی و دوبعدی نشان داده شده است.

نمودار سه بعدی (شکل ۴) نشان می دهد که بیشترین افت در مقاومت فشاری تک محوری زمانی است که تخلخل مؤثر بالا و مقاومت کششی برزیلین پایین باشد. البته در این نمودار آنومالی نیز مشاهده می شود که علت این امر، تفاوت ساخت نمونه ها (توده ای و لایه ای) می باشد. همانطور که در (شکل ۵) مشاهده می شود یک رابطه خطی با ضریب تعیین ۰/۹۲ بین افت مقاومت فشار تک محوری با تخلخل مؤثر و یک رابطه خطی بین افت مقاومت فشار تک محوری در چرخه ۶۰ و مقاومت کششی برزیلین با ضریب تعیین ۰/۷۹ وجود دارد. از این نمودارها مشاهده می شود که با افزایش تخلخل مؤثر و کاهش مقاومت کششی برزیلین، افت مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها در مقابل تبلور نمک افزایش پیدا کرده است.

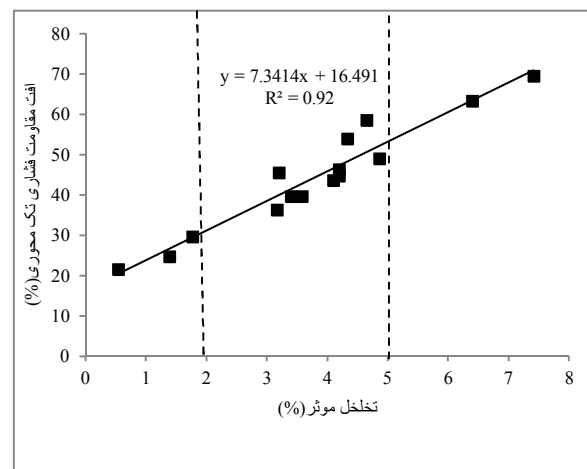
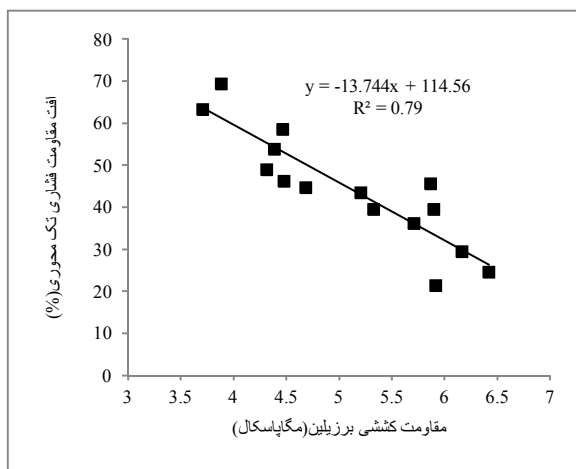
در واقع تخلخل به ویژه تخلخل مؤثر نقش مهمی در میزان مقاومت سنگ در برابر تبلور نمک دارد چون مقدار فشار تبلور وارده با مقدار نمکی که درون سنگ انباشته می شود ارتباط مستقیم دارد و هرچه قدر نمک زیادی درون سنگ انباشته شود مقدار فشار وارده بیشتر شده و در نتیجه از مقاومت سنگ بیشتر کاسته می شود.

با توجه به رابطه مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها با تخلخل مؤثر، نمونه ها را می توان بر مبنای تخلخل مؤثر به سه رده نمونه های با تخلخل مؤثر کمتر از ۲ درصد، بین ۲ تا ۵ درصد و بیشتر از ۵ درصد طبقه بندی کرد (شکل ۵).

(جدول ۵) طبقه بندی نمونه ها را بر اساس تخلخل مؤثر نشان می دهد. در واقع نمونه های رده (۱) کمتر از ۲۹/۷ درصد افت مقاومت فشاری تک محوری را از خود نشان داده اند در این گروه تراورتن های انیکس سبز، قرمز و سفید قرار



شکل ۴. رابطه افت مقاومت فشاری در چرخه ۶۰ با تخلخل موثر و مقاومت کششی برزیلین



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

جدول ۵. طبقه‌بندی نمونه‌ها بر اساس تخلخل موثر با توجه به افت مقاومت فشاری تک محوری آن‌ها در مقابل تبلور نمک

رده	۱	۲-۵	۳
تخلخل موثر (%)	کمتر از ۲		بیشتر از ۵
افت مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها (%)	کمتر از ۲۹/۷ درصد مقدار اولیه	بین ۳۶/۴ تا ۵۸/۷ درصد مقدار اولیه	بیشتر از ۶۳/۴ درصد مقدار اولیه
نام تجاری	تراورتن انیکس (قرمز، سبز، سفید)	تراورتن گردویی، لیمویی، توسی، سفید ایشکوه، کرم آبیاری، پنیرکچه، سفیدعباس‌آباد، شهاب سنگ، تراورتن کرم دلچای و شکلاتی دماوند	تراورتن قرمز آذرشهر و کرم دره بخاری

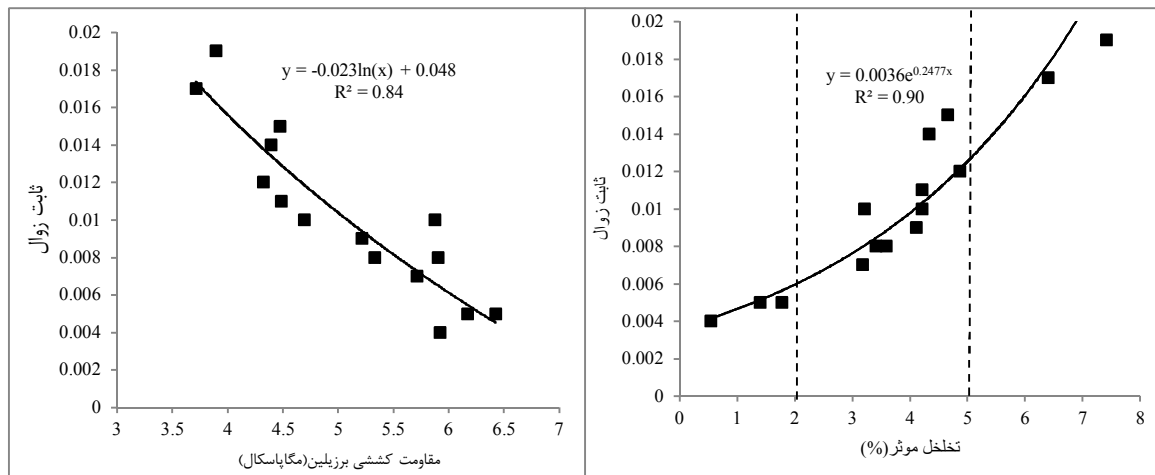
نتیجه نیمه عمر بالایی دارند که نشان دهنده مقاومت بالا در برابر تبلور نمک می‌باشند. نمونه‌های با تخلخل ۲ تا ۵ درصد، ثابت زوال ۰/۰۰۷ (تراورتن طوسی) تا ۰/۰۱۵ (تراورتن لیمویی) دارند و نمونه‌های با تخلخل بیشتر از ۵ درصد ثابت زوال ۰/۰۱۷ تا ۰/۰۱۹ دارند. بنابراین نمونه‌های این گروه (تراورتن قرمز و کرم دره بخاری) بیشترین زوال را در طی چرخه‌های تبلور سولفات منیزیم داشتند. (شکل ۷) رابطه بین افت مقاومت فشاری تک محوری در چرخه ۶۰ نسبت به مقدار اولیه و ثابت زوال را نشان می‌دهد همانطوری که مشاهده می‌شود رابطه خطی با ضریب تعیین ۰/۹۷ بین این دو پارامتر وجود دارد.

### رابطه ثابت زوال نمونه‌ها با تخلخل موثر، مقاومت کششی

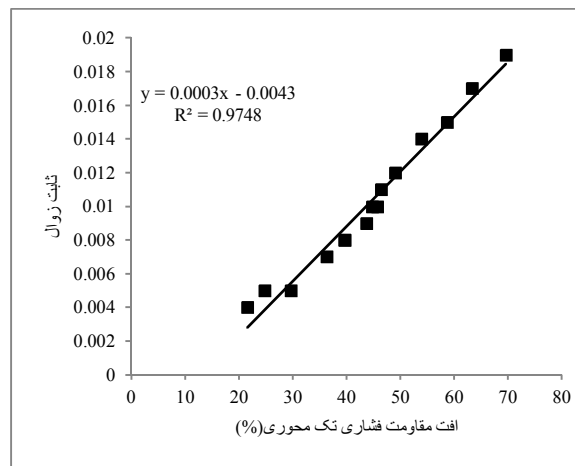
#### برزیلین و افت مقاومت فشاری تک محوری

در (شکل ۶) رابطه ثابت زوال با تخلخل موثر و مقاومت کششی برزیلین نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود یک رابطه نمایی با ضریب تعیین ۰/۹۰ بین ثابت زوال و تخلخل موثر و یک رابطه لگاریتمی با ضریب تعیین ۰/۸۴ بین ثابت زوال و مقاومت کششی برزیلین وجود دارد. از مقادیر ضرایب تعیین می‌توان نتیجه گرفت که ثابت زوال دارای همبستگی قویتری با تخلخل موثر می‌باشد. نمونه‌هایی که تخلخل پایینتر از ۲ درصد دارند (جدول ۵) ثابت زوال پایینتری دارند (۰/۰۰۴ تا ۰/۰۰۵) و در





شکل ۶. رابطه ثابت زوال با تخلخل موثر و مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها



شکل ۷. رابطه ثابت زوال با افت مقاومت فشاری تک محوری در چرخه ۶۰

## نتیجه‌گیری

زوال و کمترین مقدار نیمه عمر و در نتیجه کمترین مقاومت را در برابر تبلور نمک داشتند. با توجه به نتایج تحقیق حاضر برای مکانهایی که سنگهای ساختمانی در معرض نمک قرار می‌گیرند توصیه می‌شود که اولاً از تراورتن‌هایی با ساخت توده‌ای یا ماسیو استفاده شود ثانیاً مقاومت کششی و تخلخل موثر تراورتن‌ها حداقل ۴ مگاپاسکال و حداکثر ۵ درصد باشد و در مناطقی با غلظت بالای نمک تراورتن‌هایی با مقاومت کششی حداقل ۶ مگاپاسکال و تخلخل موثر حداکثر ۳ درصد استفاده شود.

## تشکر و قدردانی

محققین تحقیق حاضر بر خود لازم می‌دانند از معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس به خاطر حمایت مالی قدردانی نمایند. همچنین از زحمات مدیریت و پرسنل معادن تراورتن‌های شهرستان‌های آذرشهر، محلات و فیروزکوه تشکر می‌گردد همچنین نویسندگان مقاله از زحمات داوران محترم مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته قدردانی می‌نمایند.

در تحقیق حاضر تغییرات مقاومت فشار تک محوری ۱۵ نمونه تراورتن از نقاط مختلف ایران با استفاده از مدل تابع زوال (ثابت زوال و نیمه عمر) با انجام آزمایش چرخه‌های تبلور نمک در سولفات منیزیم مورد بررسی قرار گرفت. افت مقاومت فشاری در انتهای چرخه ۶۰ برای تراورتن‌های مورد مطالعه ۲۱/۶ تا ۶۹/۶ درصد مقدار اولیه تغییر می‌کند. همبستگی بین افت مقاومت در چرخه ۶۰ و ثابت زوال با تخلخل موثر و مقاومت کششی برزیلین با انجام آنالیزهای رگرسیون بررسی شد. نتایج این آنالیزها نشان داد که بیشترین مقدار افت مقاومت فشاری تک محوری زمانی است که مقاومت کششی نمونه‌ها پایین و تخلخل موثر آنها بالا باشد. نتایج آنالیزهای رگرسیون نشان می‌دهد که در تمامی روابط، تخلخل موثر ارتباط بیشتری با افت مقاومت و ثابت زوال دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر تخلخل موثر و مقاومت کششی برزیلین، ساخت نمونه‌ها به ویژه لایه‌بندی نقش مهمی در کنترل افت مقاومت نمونه‌ها در مقابل چرخه‌های تبلور نمک دارد. ثابت زوال در نمونه‌ها از حدود ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۱۹ تغییر می‌کند. نمونه تراورتن‌های انیکس که کمترین مقدار تخلخل موثر و بیشترین مقدار مقاومت کششی برزیلین را داشتند کمترین مقدار ثابت زوال و بیشترین مقدار نیمه عمر، در نتیجه مقاومت بالایی در برابر تبلور نمک دارند ولی نمونه‌هایی با تخلخل بالای ۵ درصد بیشترین مقدار ثابت

## منابع

- جمشیدی.ا.، نیکودل.م.ر.، حافظی مقدس.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.
- جمشیدی.ا.، نیکودل.م.ر.، خامه‌چیان.م.، ذلولی.ا.، ۱۳۹۱، ارزیابی دوام تراورتن قرمز آدرشهر در مقابل یخبندان و تبلور نمک با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، مجموعه مقالات سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- ذلولی.ا.، خامه‌چیان.م.، نیکودل.م.ر.، جمشیدی.ا.، ۱۳۹۱، بررسی ترکیب شیمیایی سیال روی شاخص دوام شکستگی سنگ تراورتن، دومین همایش انجمن علمی زمین شناسی، دانشگاه شهید بهشتی.
- Akin.M., Özsan. A., 2011, Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol:70, p:101-114.
- Arnold.A., 1984, Determination of salts from monuments, *Studies in conservation*, vol:29, p:129-138
- 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*, vol:59, p:313-25
- AS/NZS4456., 1997, Methods of test for masonry units and segmental pavers method 10, Determining resistance to salt attack method A for dimension stone.
- ASTM C 88-90., 1997, Standard test method for soundness of aggregate by use of sodium sulfate or magnesium sulfate, *Annu Book ASTM Stand*4.2 37± 42.
- 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*, vol:74, p:113-127.
- Benavente.D., Martinez.J., Cueto.N., Cura.M.A., 2007, Salt weathering in dual-porosity building dolostones, *Engineering Geology*, vol:94, p:215-226.
- Chafetz.H.S., Folk.R.L., 1984, Travertines depositional morphology and the bacterially constructed constituents, *Journal of Sedimentary Petrology*, vol:54, No: 1, p:289-316.
- Chin.I.R., 2007, Travertine successful and unsuccessful performance preconceived notions and mischaracterizations. *Journal of ASTM International*, vol:4, No:7, p:93-101.
- 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*, vol:45, p:415-422.
- Doehhne.E., 1994, In situ dynamics of sodium sulfate hydration and dehydration in stone pores: Observations at high magnification using the environmental scanning electron microscope, *The conservation of monuments in the Mediterranean Basin, Venice*, p:143-150.
- Doehne.E., Pinchin.S., 2008, Time-lapse macro-imaging in the field: monitoring rapid flaking of magnesian limestone. In: Lukaszewicz J, Niemcewicz P (eds) *Proceedings of the 11th international congress on deterioration and conservation of stone*. Torun Nicolaus Copernicus University Press, vol:1, pp:365-372.
- EN 12370, 1999, Natural stone test methods, Determination of resistance to salt crystallization.
- Fookes.P.G., Gourley.C.S., Ohikere.C., 1988, Rock weathering in engineering time, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol:21, p:33-57.
- 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*, vol:53, p:273-287.
- Jefferson.D., 1993, Building stone: the geological dimension, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol:26, p:305-319.
- ISRM., 2007, The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring, In: Ulusay R, Hudson JA (eds), *Suggested methods prepared by the commission on testing methods*.
- ISRM., 1981, Rock characterization testing and monitoring, ISRM suggested methods. In: Brown ET (ed), Pergamon Press, Oxford.
- Lopez-Arce.P., Garcia-Guinea.J., Benavente.D., Tormo.L., Doehne.E., 2008, Deterioration of dolostone by magnesium sulfate salt: an example of incompatible building materials at Bonaval Monastery, Spain, *Constr Build Mater*, vol:23, p:846-855.
- Ludovico-Marques.M., Carlos.C., Graça V., 2012, Modelling the compressive mechanical behaviour of granite and sandstone historical building stones, *Construction and Building Materials*, vol:28, No:1, p:372-381.
- Mutluturk.M., Altıdag.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, *Int J Rock Mech & Min Sci*, vol:41, p:237-244.
- RILEM., 1980, Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods, *Materials and Structures*, vol:13, p:175-253.
- Ruedrich.J., Siegesmund.S., 2007, Salt and ice crystallisation in porous sandstones, *Environmental Geology*, vol:52, p:225-249.
- Scherer.G., 1999, Crystallization in pores, *Cement and Concrete Research*, vol:29, p:1347-1358.
- Ruiz-Agudo.E., Mees.F., Jacob.P., Rodriguez-Navarro.C., 2007, The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates. *Environmental Geology*, vol:52, p:269-281.
- Scherer.G., 1999, Crystallization in pores, *Cement and Concrete Research*, vol:29, p: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*, vol:63, p:1447-1461.
- Ulusoy.M., 2007, Different igneous masonry blocks and salt crystal weathering rates in the architecture of historical city of Konya, *Building and Environment*, vol:42, p: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*, vol:24, p: 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*, vol:51, p:211-227.
- Yavuz.A.B., Topal.T., 2007, Thermal and salt crystallization effects on marble deterioration: Examples from Western Anatolia, Turkey, *Engineering Geology*, vol:90, p:30-40.