

# بررسی انحلال و زوال‌پذیری نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی در محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک

محمد رضا نیکودل<sup>۱</sup>، امین جمشیدی<sup>۱</sup>، ناصر حافظی مقدس<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۱/۲۳

## چکیده

یکی از مشکلات ناشی از آلودگی هوا، بارش باران‌های اسیدی است. سولفات ( $SO_4$ ) و نیترات ( $NO_3$ ) از آلاینده‌های شاخص مناطق با اتمسفرهای آلوده هستند که در اثر ترکیب شدن با یون‌های هیدروژن، محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک را تشکیل می‌دهند. این محلول‌ها از عوامل مهم در انحلال و زوال‌پذیری سنگ‌های ساختمانی هستند. با توجه به نوع و pH محلول اسیدی، اثرات آنها روی سنگ‌ها متفاوت است. در این پژوهش ۱۴ نمونه سنگ ساختمانی با منشأهای مختلف تهیه شد و به منظور بررسی انحلال و زوال‌پذیری آنها و همچنین مقایسه اثر انحلالی اسید سولفوریک و اسید نیتریک، بر روی آنها آزمایش دوام (Durability Test) تا ۱۵ چرخه در این محلول‌ها با  $pH=1.5$ ،  $pH=3$  و  $pH=5$  و آب شرب با  $pH=7.3$  انجام و شاخص دوام محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد نمونه‌های با ترکیب غیر کربناتی در برابر این اسیدها مقاوم و نمونه‌های با ترکیب کربناتی نامقاوم هستند. افزون بر این، مقایسه نتایج شاخص دوام نشان می‌دهد اثر انحلالی اسید سولفوریک نسبت به اسید نیتریک،  $0.06/0.93$  درصد بیشتر است. همچنین با کاهش pH هر کدام از این اسیدها، انحلال نمونه‌ها بیشتر شده است. در پایان با توجه به نتایج به دست آمده، مناسب‌ترین سنگ‌ها برای نمای بیرونی ساختمان‌ها پیشنهاد شده است.

**کلیدواژه‌ها:** اسید سولفوریک، اسید نیتریک، pH شاخص دوام

**\*نویسنده مسئول:** محمد رضا نیکودل

E-mail: nikudelm@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه

دوام سنگ‌ها در شرایط اقلیمی متغیر و شدید یک عامل تعیین‌کننده برای پایداری سنگ‌های به کار برده شده در ساختمان‌ها است (Yavuz et al., 2006). براساس تعریف، دوام سنگ عبارت است از ارزیابی و سنجش مقاومت سنگ در برابر هوازگی، حفظ شکل، اندازه و وضعیت ظاهری اولیه در یک مدت زمان طولانی در شرایط محیطی حاکم بر سنگ (Bell, 1993). سنگ‌هایی که به عنوان نما در بیرون از ساختمان استفاده می‌شوند به دلیل این که در معرض عوامل مختلف مانند باران‌های اسیدی قرار می‌گیرند، پس از مدتی کارایی و دوام خود را از دست می‌دهند. بنابراین، برای استفاده از سنگ‌ها در نمای بیرونی ساختمان‌ها، ضروری است تأثیر باران‌های اسیدی روی آنها بررسی شود. باران اسیدی در اتمسفرهای آلوده شهری هنگامی به وجود می‌آید که pH باران بر اثر حل شدن گازهایی مثل دی‌اکسید گوگرد ( $SO_2$ ) و اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ ) کاهش یابد و به مقدار کمتر از ۵ برسد (Winkler, 1994; Bell, 2004). Moreiras et al. (2008) بیان کردند در شهرهای بزرگ صنعتی، وجود آلاینده‌هایی مانند اکسیدهای گوگرد و نیتروژن، منواکسید کربن و دی‌اکسید کربن و واکنش آنها با سنگ‌ها، باعث انحلال و زوال‌پذیری سنگ‌ها می‌شود. سولفات و نیترات ( $SO_4$  and  $NO_3$ ) از آلاینده‌های شاخص مناطق با اتمسفرهای آلوده هستند که در اثر ترکیب شدن با یون‌های هیدروژن، محلول‌های اسید سولفوریک ( $H_2SO_4$ ) و اسید نیتریک ( $HNO_3$ ) را تشکیل می‌دهند که از عوامل مهم در انحلال، زوال‌پذیری و کاهش طول دوام سنگ‌های ساختمانی هستند (Winkler, 1994). تأثیر محیط‌های مختلف روی سنگ‌ها و خاک‌ها توسط تعدادی از پژوهشگران بررسی شد (Butlin et al., 1992; Kamon et al., 1996; Singh et al., 1999; Singh et al., 2005; Sunil et al., 2006). بررسی ویژگی‌های مهندسی سنگ‌آهک در pH های مختلف اسیدی و قلیایی توسط Singh et al. (2006) نشان داد مقدار pH تأثیر مهمی روی این ویژگی‌ها دارد. Singh et al. (2005) اثر pH روی شاخص دوام شیل‌ها را در شرایط آزمایشگاهی بررسی قرار کردند. در پژوهش حاضر به بررسی انحلال و زوال‌پذیری نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی در محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک در pH های

مختلف و مقایسه اثر انحلالی این اسیدها با انجام آزمایش دوام (Durability Test) پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روشی پژوهش

در این پژوهش ۱۴ نمونه سنگ ساختمانی با منشأهای مختلف تهیه شد. ویژگی‌های سنگ‌شناسی با تهیه مقاطع نازک و ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها شامل چگالی، وزن مخصوص ( $G_s$ )، تخلخل و جذب آب بر اساس استاندارد (ISRM (1981) مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی انحلال و زوال‌پذیری نمونه‌ها و همچنین مقایسه اثر انحلالی محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک، آزمایش دوام تا ۱۵ چرخه در این محلول‌ها با  $pH=1.5$ ،  $pH=3$ ،  $pH=5$  و آب شرب با  $pH=7.3$  انجام شد و پس از برآورد شاخص دوام ( $Id_p$ )، نتایج مقایسه و تحلیل شد.

## ۳- مطالعات سنگ‌شناسی

بررسی‌های سنگ‌نگاری نه تنها اطلاعاتی در مورد ترکیب کانی‌شناسی و منشأ سنگ می‌دهند، بلکه در ارزیابی پتانسیل انحلال‌پذیری و زوال‌پذیری سنگ‌ها در برابر عوامل هوازگی شیمیایی و فیزیکی نیز یک ابزار مهم هستند (Dreesen & Dusar, 2004). انحلال و زوال‌پذیری سنگ‌ها در برابر محلول‌های اسیدی به مقدار زیادی به متغیرهای ذاتی سنگ از جمله کانی‌شناسی بستگی دارد. سنگ‌ها به دلیل دارا داشتن کانی‌های تشکیل دهنده مختلف، دوام‌های متفاوتی در برابر محلول‌های اسیدی از خود نشان می‌دهند. در این پژوهش، با تهیه مقاطع نازک از نمونه‌ها، ترکیب کانی‌شناسی آنها در زیر میکروسکوپ پلاریزان و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۱، نوع و نسبت سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه آورده شده است.

## ۴- ویژگی‌های فیزیکی

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها شامل چگالی، وزن مخصوص ( $G_s$ )،

است. همچنین با کاهش pH از ۵ به ۱/۵، اختلاف بین شاخص دوام نمونه‌ها در این دو اسید افزایش می‌یابد (جدول ۳)، به طوری که در مرمر کرمان از ۰/۰۹۳ به ۰/۰۹۳ درصد، در سنگ آهک سنندج از ۰/۰۶ به ۰/۷۳ درصد، در مرمر سیرجان از ۰/۰۹ به ۰/۷۶ درصد، در سنگ آهک انارک (۱) از ۰/۱۲ به ۰/۸۰ درصد، در سنگ آهک انارک (۲) از ۰/۱۲ به ۰/۸۶ درصد، در تراورتن ماکو از ۰/۱۴ به ۰/۶۳ درصد و در تراورتن محلات از ۰/۱۷ به ۰/۴۴ درصد تغییر می‌کند. این موضوع نشان‌دهنده افزایش اختلاف انحلال پذیری نمونه‌ها در این اسیدها با کاهش pH است. نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج به دست آمده توسط Gupta & Ahmed (2007) که اثر pH آب و ویژگی‌های کانی‌شناسی روی شاخص دوام سنگ‌هایی با منشأهای مختلف را بررسی کرده بودند، همخوانی دارد. نتایج این پژوهشگران نیز نشان داد سنگ‌های غنی از کربنات کلسیم و منیزیم به‌طور شدیدی تحت تأثیر محلول‌های اسیدی قرار می‌گیرند در صورتی که نمونه‌های غنی از کوارتز، فلدسپار و مسکوویت مستقل از pH محلول آزمایش دوام هستند.

با توجه به این که کربنات کلسیم کانی اصلی تشکیل دهنده نمونه‌های کربناتی مورد مطالعه است در ادامه به منظور بررسی اثر انحلالی محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک، به انحلال‌پذیری کربنات کلسیم در این محلول‌ها پرداخته شده است. انحلال‌پذیری کربنات کلسیم به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (توسلی و همکاران، ۱۳۸۰):

$$K'sp = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}] = \frac{Ksp}{f_{Ca^{2+}} \times f_{CO_3^{2-}}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن  $K'sp$  حاصل ضرب انحلال‌پذیری بر مبنای غلظت،  $[Ca^{2+}]$  و  $[CO_3^{2-}]$  غلظت،  $Ksp$  حاصل ضرب انحلال‌پذیری دینامیکی کربنات کلسیم که مقدار ثابتی است،  $f_{Ca^{2+}}$  و  $f_{CO_3^{2-}}$  ضریب فعالیت یون‌های  $Ca^{2+}$  و  $CO_3^{2-}$  هستند که با توجه به شرایط محیطی قابل تغییرند. این تغییرات از رابطه حدی دبی-هوکل به دست می‌آیند. (روابط ۴ و ۵)

$$-\log f_{Ca^{2+}} = 0.51Z_{Ca^{2+}}^2 \sqrt{\mu} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن  $f_{Ca^{2+}}$  ضریب فعالیت یون  $Ca^{2+}$ ،  $Z$  بار یون  $Ca^{2+}$ ،  $\sqrt{\mu}$  قدرت یونی الکترولیت (اسید)

$$-\log f_{CO_3^{2-}} = 0.51Z_{CO_3^{2-}}^2 \sqrt{\mu} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن  $f_{CO_3^{2-}}$  ضریب فعالیت و  $CO_3^{2-}$ ،  $Z$  بار یون  $CO_3^{2-}$ ،  $\sqrt{\mu}$  قدرت یونی الکترولیت (اسید)

$$\mu = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 \times [C_i] \quad \text{رابطه (۶)}$$

$\mu$  قدرت یونی الکترولیت (اسید)،  $[C_i]$  غلظت یون‌ها و  $Z_i^2$  بار یون‌هاست. در جدول ۵ بر اساس روابط (۳) تا (۶)،  $K'sp$  کربنات کلسیم در اسید سولفوریک و اسید نیتریک محاسبه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود  $K'sp$  کربنات کلسیم در اسید سولفوریک نسبت به اسید نیتریک با pHهای یکسان بیشتر است. این موضوع به دلیل بیشتر بودن قدرت یونی اسید سولفوریک نسبت به اسید نیتریک است که باعث انحلال‌پذیری ( $K'sp$ ) بیشتر کربنات کلسیم و در نتیجه موجب پایین تر بودن شاخص دوام نمونه‌ها در اسید سولفوریک نسبت به اسید نیتریک می‌شود. همچنین با کاهش pH اختلاف میان شاخص دوام نمونه‌ها در این دو اسید افزایش می‌یابد (جدول ۴). این موضوع به دلیل افزایش اختلاف  $K'sp$  کربنات کلسیم در این دو اسید با کاهش pH است (جدول ۶ و شکل ۱۰).

## ۷- بحث

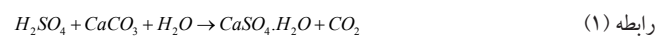
بر اساس مطالعات کانی‌شناسی و آزمایش شاخص دوام در محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک با pHهای ۱.۵، ۳ و ۵ و آب آشامیدنی با pH= 7.3، دیده شد ترکیب کانی‌شناسی، مقدار pH و نوع اسید از عوامل مهم در انحلال

تخلخل و جذب آب از روش استاندارد (ISRM, 1981) استفاده شده است. نتایج میانگین مقادیر به‌دست آمده از آزمایش‌های فیزیکی نمونه‌ها در جدول ۲ و شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. لازم به یادآوری است که بر روی هر کدام از نمونه‌ها ۵ آزمایش انجام شده و نتایج ارائه شده در این جدول، میانگین مقادیر این آزمایش‌ها هستند. وزن مخصوص ( $G_s$ ) نمونه‌ها متأثر از ترکیب کانی‌شناسی است که وزن مخصوص ( $G_s$ ) به نوبه خود روی چگالی تأثیر می‌گذارد. با توجه به این موضوع و بر اساس جدول ۱ و ۲ دیده می‌شود نمونه‌های با ترکیب کانی‌شناسی کربناتی وزن مخصوص بیشتر از ۲/۶۸ و نمونه‌های با ترکیب غیر کربناتی (به استثنای آمفیبولیت بیرجند) وزن مخصوص کوچک‌تر از ۲/۶۹ دارند. "بر اساس طبقه‌بندی (Anon, 1979) برای چگالی و تخلخل" (Bell, 2000)، بیشتر نمونه‌ها در رده با چگالی بالا (۲/۷۵-۲/۵۵) و متوسط (۲/۵۵-۲/۲۰) و تخلخل خیلی پایین (کمتر از ۱٪) و پایین (۵-۱٪) قرار گرفته‌اند.

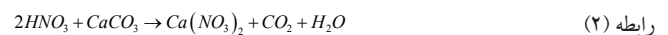
## ۵- انحلال و زوال‌پذیری نمونه‌ها در محلول‌های اسیدی و رابطه آن با ترکیب کانی‌شناسی

به منظور بررسی انحلال و زوال‌پذیری نمونه‌ها و همچنین مقایسه اثر انحلالی محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک، آزمایش دوام، بر اساس استاندارد (ISRM (1981 تا ۱۵ چرخه در هر یک از این محلول‌ها با pH=1.5، pH=3، pH=5 و همچنین آب آشامیدنی با pH=7.3 انجام شد. شکل ۴ دستگاه آزمایش دوام و نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش را نشان می‌دهد.

نتایج به‌دست آمده از محاسبه شاخص دوام ( $Id_{15}$ ) در جدول ۳ و به‌صورت نمودار ستونی در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، دیده می‌شود شاخص دوام نمونه‌هایی با ترکیب کانی‌شناسی غیر کربناتی (توف فرحزاد، گرانت مشهد، آمفیبولیت بیرجند، ایگمبریت ناین، داسیت یزد، گرانت ناین‌دان، تراکیت سبزوار) در محلول‌های اسیدی نسبت به آب آشامیدنی (pH=7.3) تغییرات بسیار جزئی و کم و بیش نامحسوسی است. این نشان می‌دهد که نمونه‌هایی با ترکیب کانی‌شناسی غیر کربناتی در برابر محلول‌های اسیدی مقاوم هستند و دچار انحلال نشده‌اند. از طرف دیگر، شاخص دوام نمونه‌هایی با ترکیب کانی‌شناسی کربناتی (مرمر کرمان، سنگ آهک سنندج، مرمر سیرجان، سنگ آهک انارک، تراورتن ماکو، تراورتن محلات) در محلول‌های اسیدی نسبت به آب آشامیدنی کمتر است. این نشان می‌دهد نمونه‌هایی با ترکیب کانی‌شناسی کربناتی در برابر محلول‌های اسیدی نامقاوم هستند و دچار انحلال شده‌اند. همچنین با کاهش pH شاخص دوام نمونه‌های کربناتی کاهش پیدا کرده است که نشان دهنده افزایش اثر انحلالی اسید سولفوریک و نیتریک با کاهش pH است. اسید سولفوریک بر اساس رابطه (۱) با کربنات کلسیم واکنش می‌دهد و باعث انحلال کربنات کلسیم و تشکیل ژپس می‌شود (Zappia et al., 1998; Giavarini et al., 2008).



واکنش اسید نیتریک با کربنات کلسیم بر اساس رابطه (۲) صورت می‌گیرد (Bravo et al., 2006).



## ۶- مقایسه اثر انحلالی اسید سولفوریک و اسید نیتریک

در شکل‌های ۷ تا ۱۰ شاخص دوام ( $Id_{15}$ ) نمونه‌های کربناتی در pHهای یکسان اسید سولفوریک و اسید نیتریک و آب آشامیدنی با pH=7.3 به منظور مقایسه اثر انحلالی این اسیدها روی نمونه‌های کربناتی نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود شاخص دوام نمونه‌ها در اسید سولفوریک نسبت به اسید نیتریک با pHهای یکسان کمتر است که نشان‌دهنده بیشتر بودن اثر انحلالی اسید سولفوریک

دوام نمونه‌های کربناتی در اسید سولفوریک نسبت به اسید نیتریک نشان می‌دهد که اثر انحلالی اسید سولفوریک بیشتر از اسید نیتریک است.

### ۸- نتیجه‌گیری

- نتایج آزمایش دوام در محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک نشان می‌دهد نمونه‌های با ترکیب غیر کربناتی در برابر این محلول‌ها مقاوم و نمونه‌های با ترکیب کربناتی نامقاوم هستند.

- با کاهش pH محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک، شاخص دوام نمونه‌های با ترکیب کربناتی کاهش پیدا کرده است که نشان‌دهنده افزایش اثر انحلالی این محلول‌ها با کاهش pH است.

- شاخص دوام نمونه‌های با ترکیب کربناتی نشان می‌دهد اسید سولفوریک اثر انحلالی بیشتری نسبت به اسید نیتریک با pH های یکسان دارد. این موضوع به دلیل بیشتر بودن قدرت یونی اسید سولفوریک و در نتیجه بیشتر بودن  $K'sp$  کربنات کلسیم در اسید سولفوریک نسبت به اسید نیتریک است.

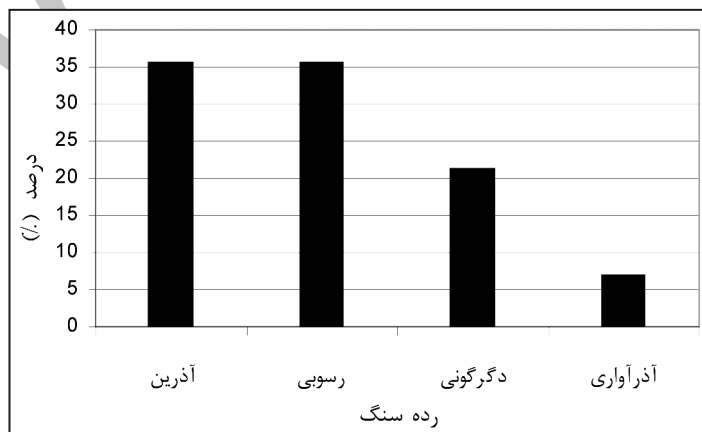
- با کاهش pH، اختلاف شاخص دوام نمونه‌های کربناته در اسید سولفوریک و اسید نیتریک به‌طور متوسط از ۰/۰۶ به ۰/۹۳ درصد افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل افزایش اختلاف  $K'sp$  کربنات کلسیم در این دو اسید با کاهش pH است.

- با توجه به نتایج آزمایش دوام در محلول‌های اسید سولفوریک و اسید نیتریک، توف فرحزاد، گرانت مشهد، آمفیبولیت بیرجند، ایگنمبریت ناین، داسیت یزد، گرانت نایندان و تراکیت سبزواری مناسب‌ترین سنگ‌ها برای استفاده در مناطق با اتمسفرهای آلوده هستند.

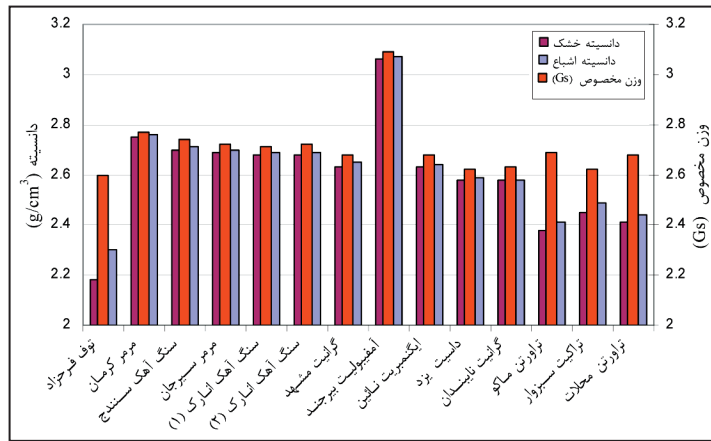
### سپاسگزاری

در پایان، از مسئولان آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به دلیل همکاری در طول انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

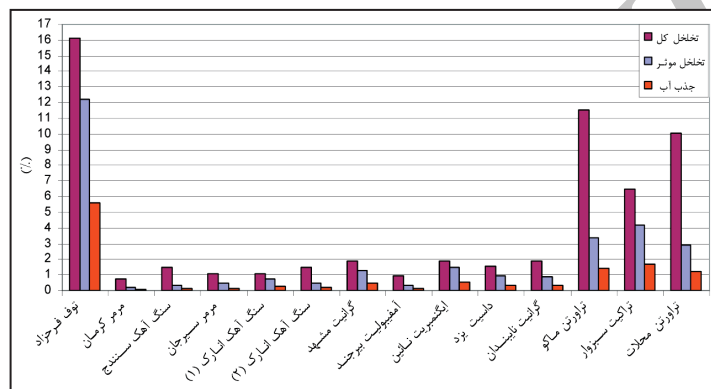
نمونه‌های مورد مطالعه هستند. نتایج آزمایش شاخص دوام در محلول‌های اسیدی و آب آشامیدنی نشان می‌دهد که نمونه‌هایی با ترکیب کانی‌شناسی غیر کربناتی شامل توف فرحزاد، گرانت مشهد، آمفیبولیت بیرجند، ایگنمبریت ناین، داسیت یزد، گرانت نایندان و تراکیت سبزواری در برابر محلول‌های اسیدی مقاوم هستند و دچار انحلال نشده‌اند، اما نمونه‌هایی با ترکیب کربناتی شامل مرمر کرمان، سنگ‌آهک سنج، مرمر سیرجان، سنگ‌آهک انارک، تراورتن ماکو و تراورتن محلات در برابر محلول‌های اسیدی نامقاوم بوده و دچار انحلال شده‌اند. در واقع نمونه‌های غنی از کربنات کلسیم تحت تأثیر محلول‌های اسیدی قرار گرفته‌اند در صورتی که نمونه‌های غنی از کوارتز، فلدسپار و بیوتیت مستقل از pH محلول‌های اسیدی هستند. با کاهش pH اسید سولفوریک از ۵ به ۱/۵، شاخص دوام ( $Id_{15}$ ) نمونه‌های با ترکیب غیر کربناتی تغییرات بسیار جزئی و تقریباً نامحسوس دارد اما شاخص دوام ( $Id_{15}$ ) نمونه‌های با ترکیب کربناتی کاهش می‌یابد (جدول ۳)، به گونه‌ای که مرمر کرمان از ۹۷/۳۰ به ۹۵/۹۴، سنگ‌آهک سنج از ۹۷/۱۷ به ۹۵/۸۹، مرمر سیرجان از ۹۵/۶۲ به ۹۴/۲۸، سنگ‌آهک انارک (۱) از ۹۷/۷۳ به ۹۶/۴۷، سنگ‌آهک انارک (۲) از ۹۷/۵۹ به ۹۶/۳۵، تراورتن ماکو از ۹۶/۳۰ به ۹۴/۸۶ و تراورتن محلات از ۹۶/۲۳ به ۹۵/۲۰ تغییر می‌کند. افزون بر این با کاهش pH اسید نیتریک از ۵ به ۱/۵، شاخص دوام ( $Id_{15}$ ) مرمر کرمان از ۹۷/۳۹ به ۹۶/۸۷، سنگ‌آهک سنج از ۹۷/۲۳ به ۹۶/۶۲، مرمر سیرجان از ۹۵/۷۱ به ۹۵/۰۴، سنگ‌آهک انارک (۱) از ۹۷/۸۵ به ۹۷/۲۷، سنگ‌آهک انارک (۲) از ۹۷/۷۱ به ۹۷/۲۱، تراورتن ماکو از ۹۶/۴۴ به ۹۵/۴۹ و تراورتن محلات از ۹۶/۴۰ به ۹۵/۶۴ تغییر می‌کند. در واقع کاهش شاخص دوام نمونه‌های کربناتی با کاهش pH نشان می‌دهد که مقدار pH نقش مهمی در شدت انحلال این نمونه‌ها دارد. همچنین شاخص دوام ( $Id_{15}$ ) نمونه‌های کربناتی نشان می‌دهد نوع اسید، یکی از عوامل مهم دیگر در شدت انحلال نمونه‌ها است (جدول ۳). به طور مثال شاخص دوام ( $Id_{15}$ ) مرمر کرمان در pH=5 اسید سولفوریک و اسید نیتریک به ترتیب برابر ۹۷/۳۰ و ۹۷/۳۹، در pH=3 به ترتیب برابر با ۹۶/۹۵ و ۹۷/۱۲، و در pH=1.5 به ترتیب برابر با ۹۵/۹۴ و ۹۶/۸۷ است. پایین تر بودن شاخص



شکل ۱- نوع و نسبت سنگ‌های ساختمانی مورد بررسی



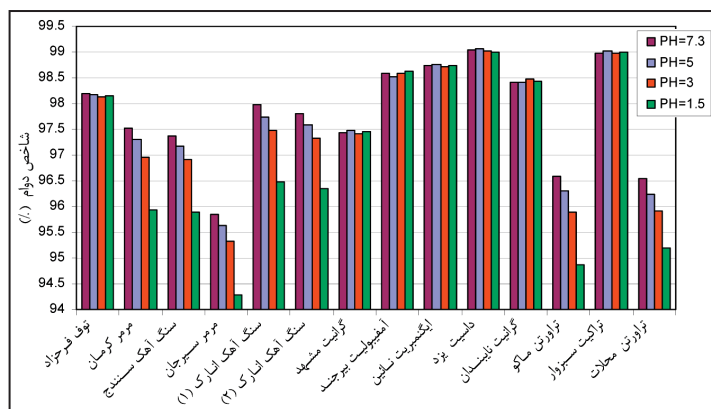
شکل ۲- نمودار ستونی دانسیته خشک، دانسیته اشباع و وزن مخصوص (Gs) نمونه‌ها



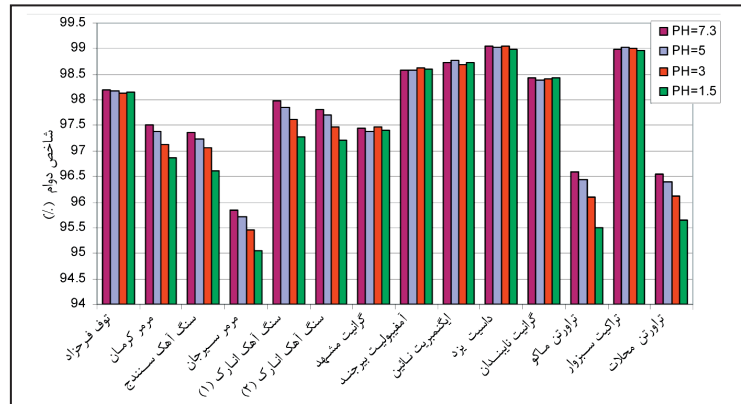
شکل ۳- نمودار ستونی تخلخل مؤثر، تخلخل کل و جذب آب نمونه‌ها



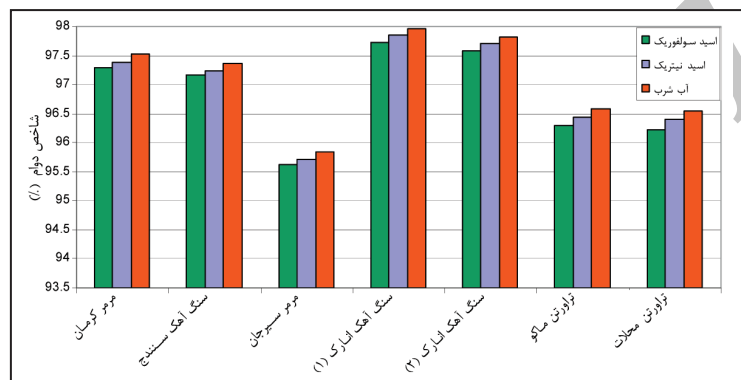
شکل ۴- الف) دستگاه آزمایش دوام (ب) نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش



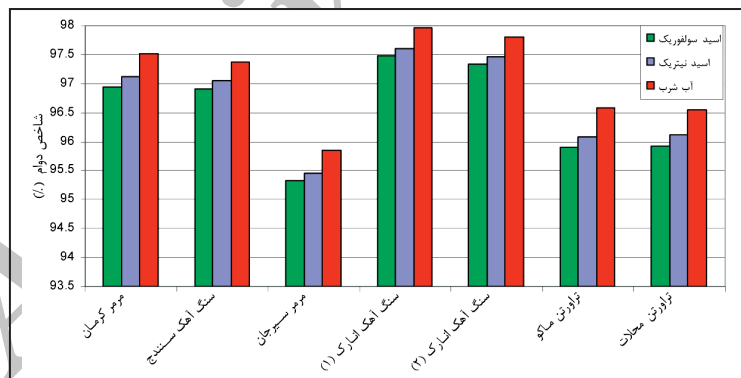
شکل ۵- نمودار ستونی شاخص دوام (Id<sub>5</sub>) در pHهای مختلف اسید سولفوریک و آب آشامیدنی با pH=7.3



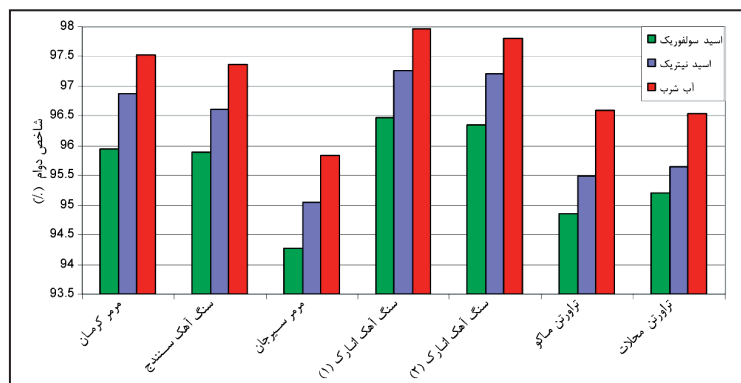
شکل ۶- نمودار ستونی شاخص دوام (Id<sub>15</sub>) در pHهای مختلف اسید نیتریک و آب آشامیدنی با pH=7.3



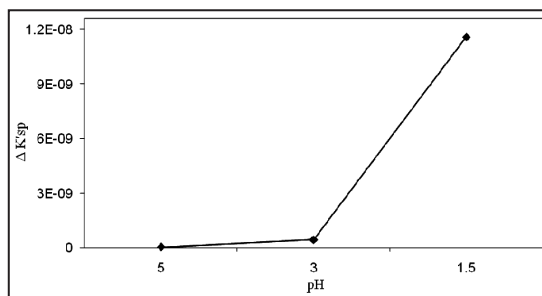
شکل ۷- نمودار ستونی شاخص دوام (Id<sub>15</sub>) در pH=5 اسید سولفوریک و اسید نیتریک و آب آشامیدنی با pH=7.3



شکل ۸- نمودار ستونی شاخص دوام (Id<sub>15</sub>) در pH=3 اسید سولفوریک و اسید نیتریک و آب آشامیدنی با pH=7.3



شکل ۹- نمودار ستونی شاخص دوام (Id<sub>15</sub>) در pH=1.5 اسید سولفوریک و اسید نیتریک و آب آشامیدنی با pH=7.3



شکل ۱۰- اختلاف  $K'sp$  کربنات کلسیم در اسید سولفوریک و اسید نیتریک در pHهای مختلف

جدول ۱- نام زمین‌شناسی، رده و ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌ها

نام زمین‌شناسی	رده	ترکیب کانی‌شناسی
توف شیشه‌ای	آذر آواری	شیشه آتشفشانی در حال تبلور دوباره به کوارتز (۶۵٪) - کوارتز (۲۵٪) - پلاژیوکلاز (۵٪) - فلدسپار پتاسیم (۵٪)
مرمر	دگرگونی	میکرو اسپارایت (۱۰۰٪)
سنگ آهک	رسوبی	زمینه میکرایت (۷۵٪) - رگه‌های کلسیت اسپاری همراه با کانی‌های کدر (۲۵٪)
مرمر	دگرگونی	کلسیت اسپاری (۱۰۰٪)
سنگ آهک	رسوبی	کلسیت اسپاری و فسیل اسپاریتی شده (۴۰٪) - زمینه میکرایت (۳۰٪) - دولومیت (۳۰٪)
سنگ آهک	رسوبی	کلسیت اسپاری و فسیل اسپاریتی شده (۵۵٪) - زمینه میکرایت (۳۵٪) - دولومیت (۱۰٪)
آلکالی گرانیت	آذرین	کوارتز (۵۰٪) - فلدسپار قلیایی در حال تجزیه به سریسیت (۳۰٪) - بیوتیت (۱۰٪) - مسکوویت (۱۰٪)
آمفیبولیت	دگرگونی	آمفیبول در حال تجزیه به کلریت (۳۵٪) - پلاژیوکلاز آلبیتی و الیگوکلازی (۳۰٪) - گارنت (۲۰٪) - اسفن (۱۰٪) - اپیدوت (۵٪)
ایگنمبریت	آذرین	شیشه آتشفشانی (۶۵٪) - خرده سنگ با ترکیب آندزیتی و تراکیتی (۲۰٪) - شیشه آتشفشانی در حال تبلور دوباره به کوارتز (۱۰٪) - فلدسپات پتاسیم (۵٪)
داسیت	آذرین	زمینه شیشه آتشفشانی (۵۵٪) - فلدسپار قلیایی (۲۵٪) - کوارتز (۱۵٪) - بیوتیت (۵٪)
آلکالی گرانیت	آذرین	کوارتز (۴۵٪) - فلدسپار آلکالن (۴۰٪) - پلاژیوکلاز (۱۰٪) - بیوتیت (۵٪)
تراورتن	رسوبی	زمینه میکرو اسپارایت (۵۵٪) - اکسید‌های آهن (۳۵٪) - کلسیت اسپاری (۱۰٪)
تراکیت	آذرین	زمینه کوارتز و فلدسپار ریز بلور (۶۵٪) - فلدسپار (۱۵٪) - کوارتز (۱۰٪) - بیوتیت (۱۰٪)
تراورتن	رسوبی	کلسیت اسپاری (۵۵٪) - زمینه میکرو اسپارایت (۴۵٪)

جدول ۲- نتایج آزمون تعیین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها

نام سنگ	چگالی خشک ( $g/cm^3$ )	چگالی اشباع ( $g/cm^3$ )	وزن مخصوص ( $G_s$ )	تخلخل مؤثر (%)	تخلخل کل (%)	جذب آب (%)
توف فرحزاد	۲/۱۸	۲/۳۰	۲/۶۰	۱۲/۲۱	۱۶/۱۵	۵/۶۱
مرمر کرمان	۲/۷۵	۲/۷۶	۲/۷۷	۰/۲۲	۰/۷۲	۰/۰۸
سنگ آهک سندج	۲/۷۰	۲/۷۱	۲/۷۴	۰/۳۷	۱/۴۶	۰/۱۴
مرمر سیرجان	۲/۶۹	۲/۷۰	۲/۷۲	۰/۴۴	۱/۱۰	۰/۱۶
سنگ آهک انارک (۱)	۲/۶۸	۲/۶۹	۲/۷۱	۰/۷۷	۱/۱۱	۰/۲۹
سنگ آهک انارک (۲)	۲/۶۸	۲/۶۹	۲/۷۲	۰/۴۶	۱/۴۷	۰/۱۷
آلکالی گرانیت مشهد	۲/۶۳	۲/۶۵	۲/۶۸	۱/۲۶	۱/۸۷	۰/۴۸
آمفیبولیت بیرجند	۳/۰۶	۳/۰۷	۳/۰۹	۰/۳۵	۰/۹۷	۰/۱۲
ایگنمبریت نائین	۲/۶۳	۲/۶۴	۲/۶۸	۱/۴۸	۱/۸۷	۰/۵۶
داسیت یزد	۲/۵۹	۲/۵۹	۲/۶۲	۰/۹۶	۱/۵۳	۰/۳۷
آلکالی گرانیت نایبندان	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۶۳	۰/۹۱	۱/۹۰	۰/۳۵
تراورتن ماکو	۲/۳۸	۲/۴۱	۲/۶۹	۳/۳۶	۱۱/۵۲	۱/۴۱
تراکیت بهروزوار	۲/۴۵	۲/۴۹	۲/۶۲	۴/۱۵	۶/۴۹	۱/۶۹
تراورتن محلات	۲/۴۱	۲/۴۴	۲/۶۸	۲/۹۳	۱۰/۰۷	۱/۲۲

جدول ۳- شاخص دوام ( $Id_{15}$ ) نمونه‌ها در آب آشامیدنی و محلول‌های اسیدی با pHهای مختلف

شاخص دوام ( $Id_{15}$ )							نام سنگ
اسید نیتریک			اسید سولفوریک			آب آشامیدنی	
pH=1.5	pH=3	pH=5	pH=1.5	pH=3	pH=5	pH=7.3	
۹۸/۱۵	۹۸/۱۲	۹۸/۱۷	۹۸/۱۶	۹۸/۱۴	۹۸/۱۸	۹۸/۲۰	توف فرحزاد
۹۶/۸۷	۹۷/۱۲	۹۷/۳۹	۹۵/۹۴	۹۶/۹۵	۹۷/۳۰	۹۷/۵۲	مرمر کرمان
۹۶/۶۲	۹۷/۰۵	۹۷/۲۳	۹۵/۸۹	۹۶/۹۱	۹۷/۱۷	۹۷/۳۷	سنگ آهک سنندج
۹۵/۰۴	۹۵/۴۵	۹۵/۷۱	۹۴/۲۸	۹۵/۳۳	۹۵/۶۲	۹۵/۸۴	مرمر سیرجان
۹۷/۲۷	۹۷/۶۱	۹۷/۸۵	۹۶/۴۷	۹۷/۴۸	۹۷/۷۳	۹۷/۹۷	سنگ آهک انارک (۱)
۹۷/۲۱	۹۷/۴۷	۹۷/۷۱	۹۶/۳۵	۹۷/۳۳	۹۷/۵۹	۹۷/۸۱	سنگ آهک انارک (۲)
۹۷/۴۱	۹۷/۴۷	۹۷/۳۹	۹۷/۴۵	۹۷/۴۱	۹۷/۴۸	۹۷/۴۴	آلکالی گرانیت مشهد
۹۸/۶۰	۹۸/۶۳	۹۸/۵۷	۹۸/۶۲	۹۸/۵۸	۹۸/۵۳	۹۸/۵۹	آمفیولیت بیرجند
۹۸/۷۲	۹۸/۶۹	۹۸/۷۷	۹۸/۷۴	۹۸/۷۱	۹۸/۷۶	۹۸/۷۳	ایگنبریت نائین
۹۸/۹۹	۹۹/۰۵	۹۹/۰۲	۹۹/۰۱	۹۹/۰۳	۹۹/۰۶	۹۹/۰۴	داسیت یزد
۹۸/۴۴	۹۸/۴۰	۹۸/۳۹	۹۸/۴۴	۹۸/۴۷	۹۸/۴۱	۹۸/۴۲	آلکالی گرانیت نایندان
۹۵/۴۹	۹۶/۰۹	۹۶/۴۴	۹۴/۸۶	۹۵/۹۰	۹۶/۳۰	۹۶/۵۹	تراورتن ماکو
۹۸/۹۶	۹۹/۰۱	۹۹/۰۳	۹۹	۹۸/۹۷	۹۹/۰۲	۹۸/۹۸	تراکیت سبزوار
۹۵/۶۴	۹۶/۱۱	۹۶/۴۰	۹۵/۲۰	۹۵/۹۲	۹۶/۲۳	۹۶/۵۴	تراورتن محلات

 جدول ۴- اختلاف شاخص دوام ( $Id_{15}$ ) نمونه‌های کربناتی در اسید سولفوریک و اسید نیتریک با pH یکسان

نام سنگ	pH	pH		
		۵	۳	۱/۵
مرمر کرمان		۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۹۳
سنگ آهک سنندج		۰/۰۶	۰/۱۴	۰/۷۳
مرمر سیرجان		۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۷۶
سنگ آهک انارک (۱)		۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۸۰
سنگ آهک انارک (۲)		۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۸۶
تراورتن ماکو		۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۶۳
تراورتن محلات		۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۴۴

 جدول ۵- مقادیر  $K'sp$  کربنات کلسیم محاسبه شده در اسید سولفوریک و اسید نیتریک با pHهای مختلف

پارامتر	محلول	اسید سولفوریک			اسید نیتریک		
		pH=5	pH=3	pH=1.5	pH=5	pH=3	pH=1.5
$\mu$		$1/5 \times 10^{-5}$	$1/5 \times 10^{-3}$	$1/5 \times 10^{-1/5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-1/5}$
$f_{Ca^{2+}}$		۰/۹۸۲	۰/۸۳۴	۰/۳۵۹	۰/۹۸۵	۰/۸۶۱	۰/۴۳۴
$f_{Co^{2+}}$		۰/۹۸۲	۰/۸۳۴	۰/۳۵۹	۰/۹۸۵	۰/۸۶۱	۰/۴۳۴
$Ksp$		$4/8 \times 10^{-9}$	$4/8 \times 10^{-9}$	$4/8 \times 10^{-9}$	$4/8 \times 10^{-9}$	$4/8 \times 10^{-9}$	$4/8 \times 10^{-9}$
$K'sp$		$4/98 \times 10^{-9}$	$6/91 \times 10^{-9}$	$3/71 \times 10^{-8}$	$4/94 \times 10^{-9}$	$6/46 \times 10^{-9}$	$2/55 \times 10^{-8}$

جدول ۶- اختلاف  $K'sp$  کربنات کلسیم محاسبه شده در اسید سولفوریک و اسید نیتریک در pHهای مختلف

pH	5	3	1.5
$\Delta K'sp$	4E-11	4.5E-10	1.16E -8

### کتابنگاری

توسلی، و.، خلیلی، ه.، معصومی، ع.، ۱۳۸۰- مبانی شیمی تجزیه، جلد اول، چاپ چهارم، ترجمه اسکوگ.، وست.، هالر، تهران: مرکز نشر جهاد دانشگاهی، ۳۹۰ ص

### References

- Bell, F. G., 1993- Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation, *Environmental Geology*, 21, 187-200.
- Bell, F. G., 2000- *Engineering Properties of Soils and Rocks*, 2<sup>nd</sup> edition, Blackwell Science, 482p.
- Bell, F. G., 2004- *Engineering Geology and Construction*, 1<sup>st</sup> edition, Spon Press, 797p.
- Bravo, A., Soto A. R., Sosa, E. R., Sanchez. A. P., Alarcon, J. A. L., Kahl, J. & Ruiz, B., 2006- Effect of acid rain on building material of the El Tajin archaeological zone in Veracruz, Mexico, *Environmental Pollution*, 144, 655-660.
- Butlin, R. N., Coote, A. T., Devenish, M., Hughes, I. S. C., Hutchens, C. M., Irwin, J. G., Lloyd, G. O., Massey, S. W., Webb, A. H. & Yates, T. J. S., 1992- Preliminary results from the analysis of stone tablets from the National Material Exposure Programme (NMEP), *Atmospheric Environment*, 26, 189-198.
- 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.
- Giavarini, C., Santarelli, M. L., Natalini, R. & Freddi, F., 2008- A non-linear model of sulphation of porous stones: Numerical simulations and preliminary laboratory assessments”, *Journal of Cultural Heritage*, 9, 14-22.
- Gupta, V. & Ahmed, I., 2007- The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India, *Engineering Geology*, 95, 79-87.
- I.S.R.M. Rock characterization, 1981- In: Brown ET, editor. *Testing and monitoring - ISRM suggested methods*, Oxford, UK: Pergamon Press, 211p.
- Kamon, M., Ying, C. & Katsumi, T., 1996- Effect of acid rain on lime and cement stabilized soils, *Japanese Geotechnical Society*, 36 (4), 91–96.
- Moreiras, S., Paraguassu, A. & Ribeiro, R., 2008- Dimension stone for building facades: methodology for structural design, *Bull Engineering Geology Environmental*, 67, 53-57.
- Singh, T.N., Sharma, P.K., Khandelwal, M., 2006- Effect of pH on the Physico - mechanical properties of marble. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66 (1), 81–87
- Singh, T. N., Singh, S. K., Mishra, A., Singh, P. K. & Singh, V. K., 1999- Effect of acidic water on physico mechanical behaviour of rock, *Indian Journal of Engineering and Material Sciences* 6, 66–72.
- Singh, T. N., Verma, A. K., Singh, V., Sahu, A., 2005- Slake durability study of shaly rock and its prediction, *Environmental Geology*, 47, 246–253.
- Sunil, B.M., Nayak, S., Shrihari, S., 2006- Effect of pH on the geotechnical properties of laterite, *Engineering Geology*, 85, 197–203.
- Winkler, E. M., 1994- *Stone in Architecture*, 3<sup>rd</sup> edition, Springer-Verlag, 313p.
- Yavuz, H., Altindag. R., Sarac, S., Ugur, I. & Sengun, N., 2006- Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering, *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, 43, 767-775.
- Zappia, G., Sabbioni, C., Riontino, C., Gobbi, G. & Favoni, O., 1998- Exposure tests of building materials in urban atmosphere, *The Science of the Total Environment*, 224, 235-244.