بررسی و برآورد دوام سنگ‌های رسوبی رخنمون یافته منطقه دره شیخان (شمال‌غربی خرم‌آباد) در مقابل هوازدگی نمک

امین جمشیدی*، یاسین عبدی، بیژن یوسفی یگانه؛
دانشگاه لرستان، دانشکدهٔ علوم، گروه زمین‌شناسی

تاریخ دریافت: ۹۸/۰٤/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۹/۰٦

چکیده

سازند گچساران با سن میوسن، رخنمون وسیعی در برخی نواحی خرم آباد دارد. وجود سنگ ژیپس در این سازند، باعث ایجاد روان آب‌های شور در منطقه دره شیخان در شمال غربی خرم آباد شده است. روان آب‌ها باعث هوازدگی نمک در رخنمون‌های سنگی منطقه شامل ژیپس، کنگلومرا، ماسه سنگ، سنگ آهک، دولومیت، شیل دولومیتی و مارن مربوط به سازندهای گچساران، آسماری، شهبازان، کشکان، تاربور و امیران گردیده است. هدف از پژوهش حاضر بررسی و برآورد دوام سنگ‌های منطقه دره شیخان در شمال غربی خرم آباد در مقابل هوازدگی نمک ناشی از روان آب‌های شور است. برای رسیدن به اهداف پژوهش، ۸ نمونه سنگ مختلف از رخنمون‌های سنگی منطقه برداشت شد و آزمون دوام وارفتگی در محلول اشباع از نمک تا ۱۵ چرخه انجام شد. علاوه بر این ترکیب کانی‌شناسی، خصوصیات فیزیکی و مقاومتی نمونه‌ها شامل تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای تعیین شدند. بر اساس ارزیابی دوام نمونه‌ها، ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل و مقاومت نقش مهمی در دوام نمونه‌ها در برابر هوازدگی نمک دارند. مدل آماری حاصل از آنالیز رگرسیون چند متغیره نشان می‌دهد دوام سنگ‌ها در مقابل هوازدگی نمک می‌تواند با دقت مناسبی (R^2=0.95) با استفاده از تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای برآورد شود. این مدل به دلیل استفاده از پارامترهای ساده تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای، می‌تواند یک ارزیابی سریع و ارزان از دوام طولانی مدت سنگ‌ها در مقابل هوازدگی نمک داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: سنگ رسوبی، دوام، هوازدگی نمک، تخلخل، شاخص بار نقطه‌ای، مدل آماری

مقدمه

تبلور نمک‌های محلول یکی از مهم‌ترین عوامل هوازدگی در طبیعت است که می‌تواند باعث زوال و کاهش دوام سنگ‌ها شود. دوام به عنوان معیار توانایی سنگ برای حفظ ویژگی‌های شاخص مانند استحکام، میزان مقاومت در برابر عوامل محیطی و همچنین حفظ نمای ظاهری آن تعریف می‌شود [۱]. هوازدگی نمک باعث تخریب شیمیایی و فیزیکی، تغییر در ظاهر (رنگ و شوره زدگی) و خصوصیات فیزیکی و مقاومتی رخنمون‌های سنگی و همچنین سنگ‌های استفاده شده در سازه‌های مهندسی می‌شود. این تغییرات به نوبه خود باعث تغییر در دوام سنگ می‌شود. از اینرو ارزیابی دوام و زوال سنگ‌ها برای

*نویسندهٔ مسئول jamshidi.am@lu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

ارزیابی پایداری دامنه‌های سنگی و یا استفاده از سنگ‌هایی که به عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌شوند، امری ضروری و غیر قابل اجتناب است.

تاکنون جنبه‌های مختلفی از تاثیر هوازدگی نمک روی خصوصیات فیزیکی، مقاومتی و همچنین دوام انواع سنگ‌ها صورت گرفته است [۱۵-۲]. علاوه بر این تعدادی از محققین به بررسی الگوی تبلور، شرایط ترمودینامیکی هوازدگی نمک‌های مختلف و نحوه تبلور آن‌ها پرداخته‌اند [۱۹-۱٦].

وات و کولتن [۲۰] اثر رطوبت و تبلور نمک روی مصالح قرون وسطی (قرن‌های ۵ تا ۱۵ میلادی) و رابطه بین تغییرات شرایط محیطی و شدت تخریب سنگ در یکی از کلیساهای انگلستان را بررسی کردند. این محققین اثر چرخه‌های هوازدگی نمک را با استفاده از آنالیزهای تجزیه وزنی، کروماتوگرافی یونی و ارزیابی کیفیت مصالح تخریب شده، تعیین کردند. موترشد و همکاران [۲۱] تأثیر نمک‌های حاصل از محیط‌های دریایی روی ماسه‌سنگ‌های دو بنای تاریخی احداث شده در ساحل و خشکی را مطالعه کردند. نتایج این محققین نشان داد میزان هوازدگی به دلیل وجود نمک و ارگانیسم‌ها در سواحل ۱/۵۹ برابر آن در خشکی است. لوبلی و همکاران [۲۲] نقش کلرید سدیم به عنوان یک نمک محیط‌های دریایی در مکانیسم و الگوهای مختلف تخریب آجر را بررسی کردند. نتایج این محققین نشان داد کلرید سدیم به دو صورت باعث تخریب مصالح می‌شود ۱) مستقیم: خشک و مرطوب شدن، تبلور و انبساط-انقباض حرارتی ۲) غیر مستقیم: نقش کاتالیزگر (تسریع کننده) در بعضی از واکنش‌های شیمیایی. سوسا و همکاران [۲۳] تأثیر میکروترک‌ها و تخلخل روی ویژگی‌های فیزیکو-مکانیکی و دوام گرانیت‌های تزئینی را بررسی کنند. نتایج کار این محققین نشان داد گرانیت‌هایی با تخلخل کمتر از ۱/۵ درصد بعد از ۱۰۰ چرخه آزمایش هوازدگی نمک سالم و بی عیب مانده‌اند و با افزایش تخلخل، کاهش وزنی آن‌ها در آزمایش هوازدگی نمک بیشتر شده است. با توجه به نتایج آزمایش هوازدگی نمک، این محققین پیشنهاد کردند ضروری است برای استفاده از گرانیت‌های با تخلخل مؤثر بیشتر از ۳ درصد در نمای بیرونی ساختمان‌ها، احتیاط شود. زدف و همکاران [۲٤] اثر هوازدگی نمک روی سنگ‌های ساختمان‌های تاریخی کانیا (داسیت، آندزیت و توف) در ترکیه را بررسی کردند. نتایج این محققین نشان داد دوام سنگ‌ها در برابر هوازدگی نمک به ویژگی‌های شیمیایی، کانی‌شناسی و فیزیکی آن‌ها بستگی دارد. آنجلی و همکاران [۱۹] تأثیر دما و درجه اشباع سولفات سدیم در هوازدگی نمک، روی یک نمونه سنگ رسوبی را بررسی کردند. آزمایش تبلور نمک در دماهای ۵، ۲۲ و ۵۰ درجه سانتیگراد و درجه اشباع‌های مختلف توسط این محققین انجام شد. نتایج نشان داد در دمای ۵ درجه سانتیگراد میزان تخریب خیلی شدیدتر از دمای اتاق با دمای ۲۲ درجه سانتیگراد می‌باشد در صورتی که در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد نمونه‌ها سالم و بی عیب مانده‌اند. با افزایش درجه اشباع، تبلور نمک در قسمت‌های داخلی‌تر سنگ اتفاق می‌افتد. علاوه بر این الگوی تخریب در دماها و درجه اشباع‌های مختلف، روی نمونه‌ها متفاوت است. کولترونه و همکاران [۹] به منظور ارزیابی کیفیت سنگ‌های رسوبی به عنوان مصالح ساختمانی مجموعه‌ای از آزمایش‌های پتروفیزیکی و دوام (هوازدگی نمک و یخبندان) انجام دادند. نتایج نشان داد آزمایش‌های دوام باعث تغییر رنگ سنگ‌ها و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

همچنین کاهش وزنی آن‌ها به ویژه در آزمایش هوازدگی نمک شده‌اند. این محققین دلیل اصلی تخریب را به تفاوت کانی‌شناسی بین ذرات تشکیل دهنده و ماتریکس ۵ نمونه ماسه سنگ و وجود ناهمسانی قوی به علت حضور سطوح لایه بندی در نمونه کالک آرنایت نسبت دادند قبادی و بابازاده [۱۱] اثر هوازدگی نمک سولفات سدیم را روی مقاومت و دوام ۹ نمونه ماسه سنگ از سازند ماسه سنگ قرمز بالایی بررسی کردند. این محققین به این نتیجه رسیدند که تخلخل یک پارامتر مهم در دوام نمونه‌ها در مقابل هوازدگی نمک است. ذلولی و همکاران [۱۲] دوام ۱۵ نمونه تراورتن مختلف را در برابر هوازدگی نمک سولفات منیزیم بررسی کردند. اینها نشان دادند دوام نمونه‌ها یک رابطه مستقیم با مقاومت کششی برزیلین و یک رابطه معکوس با تخلخل موثر دارد. بناونته و همکاران [۱۳] اثر هوازدگی نمک سولفات سدیم روی ویژگی‌های فیزیکی و دوام دو نمونه تراورتن و توف کربناته را بررسی کردند. نتایج این محققین نشان داد که تراورتن در مقایسه با توف کربناته دارای دوام بیشتری در برابر هوازدگی نمک است. ترابی کاوه و همکاران [۱۵] نقش خصوصیات پتروگرافی در دوام سنگ آهک‌های استفاده شده در بنای تاریخی پرسپولیس (شهرستان مرودشت–استان فارس) در برابر هوازدگی نمک سولفات سدیم را بررسی کردند. این محققین به این نتیجه رسیدند که تخلخل یکی از مهمترین پارامترهای موثر در دوام سنگ‌ها در برابر هوازدگی نمک است.

در اکثر تحقیقات گذشته، آزمایش هوازدگی نمک برای تسریع فرآیند هوازدگی، در محلول‌های نمک سولفات سدیم و منیزیم یا در بعضی موارد کلرید سدیم انجام شده است. یکی از نقاط ضعف این تحقیقات عدم توجه به نوع نمک‌های واقعی که در محل استفاده سنگ یا منطقه وجود دارند، می‌باشد. از طرف دیگر، در تحقیقات گذشته عدم وجود مدل‌های آماری بر اساس پارامترهای ساده و مناسب که بتوانند دوام نمونه‌ها را در آزمایش هوازدگی نمک پیش بینی کند، کاملاً مشهود است.

در تحقیق حاضر تعداد ۸ نمونه سنگ رسوبی مختلف در رخنمون‌های سنگی منطقه دره شیخان واقع در شمال غربی خرم آباد تهیه شده است. به منظور تاثیر هوازدگی نمک روی نمونه‌ها، آزمایش دوام وارفتگی در محلول نمک تا ۱۵ چرخه انجام شده است. با تجزیه و تحلیل نتایج دو هدف دنبال می‌شود: ۱) بررسی دوام نمونه‌ها در مقابل هوازدگی نمک و ارتباط آن با تخلخل، مقاومت و ترکیب کانی‌شناسی ۲) ارائه مدل آماری با انجام آنالیزهای رگرسیون چند متغیره بر اساس تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای برای برآورد دوام طولانی مدت نمونه‌ها در مقابل هوازدگی نمک.

مواد و روش‌ها

۱. منطقهٔ مورد مطالعه و نمونه‌برداری

منطقه مورد مطالعه با نام دره شیخان واقع در شمال غربی خرم آباد و در مسیر جاده خرم آباد– الشتر با مختصات جغرافیایی بین '۱۵ °۴۸ تا '۲۲ °۴۸ طول خاوری و بین '۳۰ °۳۳ تا ۳۷ °۳۳ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). سازندهای رخنمون یافته در منطقه شامل سارندهای گچساران، آسماری، شهبازان، کشکان، تاربور و امیران هستند. این سازندها عمدتاً از سنگ‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

ژیپس، مارن، شیل، کنگلومرا، ماسه سنگ، دولومیت و سنگ آهک تشکیل شده‌اند. منطقه مورد مطالعه شامل برشی از دامنه جاده خرم‌آباد–الشتر در منطقه دره شیخان است که مجموعه سنگ‌های نامبرده را شامل می‌شود. شکل (۱) بخشی از دامنه جاده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این منطقه حضور سازند گچساران با داشتن ژیپس باعث آلوده شدن روان‌آب‌های سطحی و همچنین چشمه‌ها و چاه‌ها به وسیله نمک شده است. شکل (۲) حوضچه‌های حاصل از تبخیر شورابه‌ها و استحصال نمک در منطقه را نشان می‌دهد. روان‌آبهای سطحی حاوی نمک‌های محلول باعث هوازدگی نمک و در نتیجه کاهش دوام در برخی رخنمون‌های سنگی و مصالح سنگی استفاده شده در سازه‌های مهندسی مانند پایه پل‌ها شده‌اند. شکل (۳) نمایی از هوازدگی نمک در سنگ‌های استفاده شده در پایه یکی از پل‌های منطقه را نشان می‌دهد.

برای رسیدن به اهداف تحقیق، طی چند مرحله بازدید صحرایی از منطقه، بلوک‌هایی از ۸ نمونه سنگ مختلف با ابعاد مناسب برای انجام آزمایش‌های پیش بینی شده تهیه شد. در جدول (۱) نام و تعداد نمونه‌های آزمایش و استاندارد مورد استفاده ارائه شده است. در شکل (۱) نقاط نمونه‌برداری نشان داده شده است. نمونه‌های سنگ تهیه شده مربوط به کنگلومرا و شیل دولومیتی سازند امیران، مارن سازند تاربور، ماسه سنگ سازند کشکان، سنگ آهک سازند آسماری، دولومیت سازند شهبازان، ژیپس و سیلتستون سازند گچساران هستند.

جدول۱. نام و تعداد نمونه‌های آزمایش و استاندارد مورد استفاده

نام آزمایش	پارامتر	تعداد نمونه‌ها	استاندارد
بررسی‌های سنگ‌شناسی	ترکیب کانی‌شناسی	۳ مقطع نازک میکروسکوپی	ASTM (2005)
بررسی‌های فیزیکی	چگالی	۵	ISRM (1981)
بررسی‌های مکانیکی	شاخص بار نقطه‌ای	۵	ISRM (1981)
دوام وارفتگی در محلول نمک	شاخص دوام	۱۰ قطعه تقریباً ۵۰ گرمی	ISRM (1981)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

شکل ۱. موقعیت جعرافیایی، نقشهٔ زمین‌شناسی و بخشی از دامنهٔ جادهٔ محل نمونه‌برداری - نقاط نمونه‌برداری با ستاره روی نقشهٔ زمین‌شناسی مشخص شده‌اند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

شکل ۲. حوضچه‌های حاصل از تبخیر شورابه‌ها و استحصال نمک در منطقه مورد مطالعه

شکل ۳. هوازدگی نمک در سنگ‌های استفاده شده در پایه یکی از پل‌های منطقهٔ مورد مطالعه

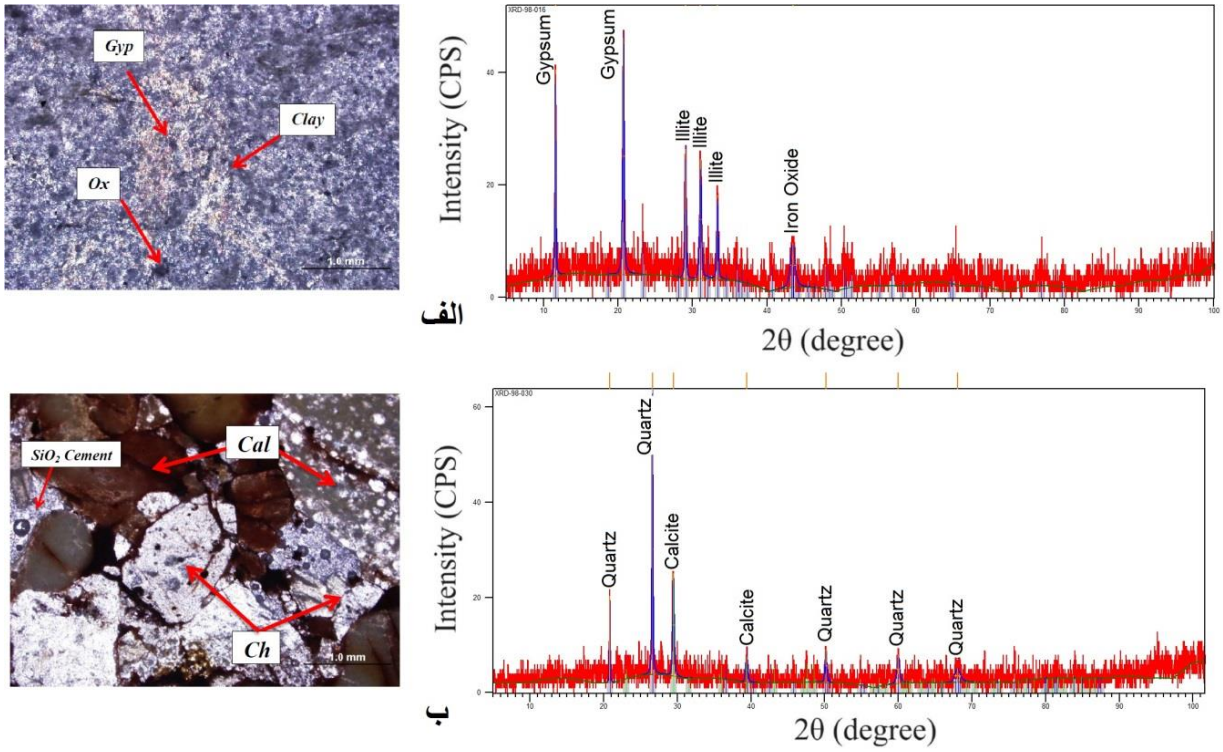
۲. مطالعات سنگ‌شناسی

به منظور مطالعات سنگ شناسی از هر نمونه سنگ مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شد. ترکیب کانی شناسی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان بررسی شدند. شکل (٤) تصاویر میکروسکوپی تعدادی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. علاوه بر مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی، آنالیزهای تجزیه شیمیایی XRD بر روی نمونه‌ها نیز انجام شد. هدف از آنالیز XRD، استفاده از آن به عنوان مکملی برای بررسی دقیق‌تر ترکیب کانی‌شناسی به همراه مقاطع نازک میکروسکوپی است. علاوه بر این یکسری کانی‌های خاص مانند کانی‌های اوپک که به وسیله مقاطع نازک نمی‌توان آن‌ها را شناسایی کرد با آنالیزهای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

XRD به راحتی قابل شناسایی و تشخیص هستند. شکل (٤) نتایج این آنالیزها را برای ژیپس و کنگلومرا نشان می‌دهد. نتایج ترکیب کانی شناسی نمونه‌ها در جدول (۲) ارائه شده‌اند. بر اساس مطالعات سنگ شناسی نمونه‌ها شامل ژیپس، مارن، شیل دولومیتی، سیلتستون، ماسه سنگ، سنگ آهک، دولومیت و کنگلومرا هستند.



شکل ٤. مقاطع نازک میکروسکوپی و نتایج آنالیزهای XRD تعدادی از نمونه‌های مورد مطالعه الف) ژیپس ب) کنگلومرا

جدول ۲. نتایج مطالعات کانی‌شناسی نمونه‌ها

نام زمین‌شناسی نمونه	سازند محل نمونه	ترکیب کانی‌شناسی
ژیپس	گچساران	ژیپس، رس، سیمان اکسید آهن
مارن	تاربور	رس ،کلسیت، سیمان اکسید آهن
شیل دولومیتی	امیران	رس، دولومیت، کوارتز
سیلتستون	گچساران	قطعات چرتی و آهکی، رس، کوارتز
ماسه سنگ	کشکان	قطعات چرتی و آهکی ، کوارتز
سنگ آهک	آسماری	خرده های فسیلی فراوان، میکرایت
دولومیت	شهبازان	دولومیت، کلسیت
کنگلومرا	امیران	خرده سنگ‌های چرتی و آهکی، سیمان سیلیسی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

۳. تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای

تخلخل نمونه‌ها بر اساس استاندارد انجمن بین المللی مکانیک [۲۵] سنگ تعیین شدند. برای هر سنگ، ۵ نمونه آزمایش شد و میانگین آن‌ها به عنوان تخلخل معرفی شد. از رابطه زیر برای تخلخل استفاده شده است:

$$n = \frac{(M_{sat-}M_d)/\rho_w}{V} \times 100 \quad (۱)$$

که در آنها n تخلخل بر حسب درصد، M_d و M_{sat} به ترتیب جرم خشک و اشباع بر حسب گرم، ρ_w جرم واحد حجم آب بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب، V حجم نمونه بر حسب سانتی متر مکعب می‌باشند.

جدول (۳) نتایج آزمایش‌های تعیین تخلخل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تخلخل نمونه‌ها از ٦/٤ درصد برای سنگ آهک تا ١٤/٥ درصد برای شیل دولومیتی تغییر می‌کند. بر اساس طبقه بندی ماتولا و همکاران [٢٦]، سنگ آهک در رده سنگ‌های با تخلخل کم (۱ تا ۵ درصد) و سایر نمونه‌ها در رده با تخلخل متوسط (۵ تا ۱۵ درصد) قرار گرفته‌اند.

آزمایش شاخص بار نقطه‌ای یکی از روش‌های ساده، سریع و ارزان برای تعیین مقاومت سنگ‌ها می‌باشد. در این تحقیق آزمایش شاخص بار نقطه‌ای روی ۵ نمونه از هر نوع سنگ به صورت محوری با نسبت ضخامت به قطر تقریباً ۰/۵ (W/D=0.5) و در شرایط خشک انجام شد. برای این، نمونه‌های آماده سازی شده از هر سنگ به مدت ٤٨ ساعت در گرمخانه با دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد قرار داده شدند تا به شرایط خشک برای انجام آزمایش برسند. نتایج به دست آمده از آزمایش شاخص بار نقطه‌ای برای قطر ۵۰ میلیمتر تصحیح شد ($PLI_{(50)}$) و در جدول (۳) ارائه شده‌اند. برای محاسبه $PLI_{(50)}$ از معادله (۲) استفاده شده است:

$$PLI_{50} = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \times PLI \quad (۲)$$

که در آن Is مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح نشده می‌باشد و از معادله (۳) به دست می‌آید:

$$PLI = \frac{P}{D_e^2} \quad (۳)$$

که در آن P بار گسیختگی بر حسب نیوتن و De قطر معادل نمونه بر حسب میلیمتر می‌باشد. قطر معادل برای نمونه‌هایی که تحت بارگذاری محوری قرار می‌گیرند از معادله (٤) به دست می‌آید:

$$D_e^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (٤)$$

که در آن A بر حسب میلیمتر مربع و از معادله (۵) به دست می‌آید:

$$A = \frac{W}{D} \quad (۵)$$

که در آن W و D به ترتیب ضخامت و قطر نمونه بر حسب میلیمتر می‌باشند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

از جدول (۲) مشاهد می‌شود که شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌ها بین ۲/۷ تا ۷/۱ مگاپاسکال متغیر است. حداقل و حداکثر شاخص بار نقطه‌ای مربوط به شیل دولومیتی و سنگ آهک است. بر اساس طبقه‌بندی شاخص بار نقطه‌ای توسط انجمن بین المللی مکانیک سنگ [۲۷]، شیل دولومیتی، سیلتستون و مارن در رده سنگ‌های قوی (٤-۲ مگاپاسکال) و ژیپس، کنگلومرا، ماسه سنگ، دولومیت و سنگ آهک در رده سنگ‌های خیلی قوی (۱۰-٤ مگاپاسکال) قرار می‌گیرند.

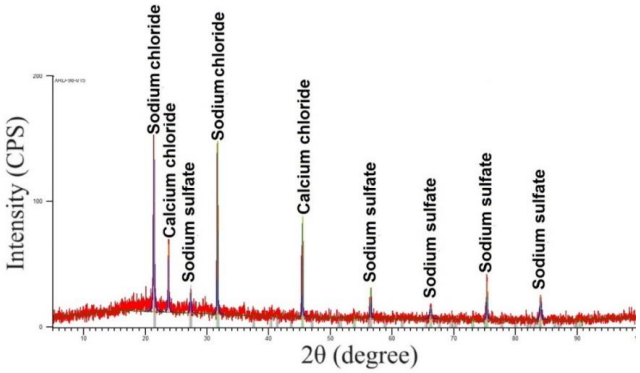
جدول ۳. تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌ها

نام زمین شناسی نمونه	تخلخل (٪)	شاخص بار نقطه‌ای (مگاپاسکال)
ژیپس	۷/۷ (۵/٤-۹/۰)	۵/۱(٤/۰-٦/۲)
مارن	۱۱/۲ (۹/۹-۱۲/۳)	٤/۰(۳/۲-۵/٤)
شیل دولومیتی	۱٤/۵ (۱۲/۷-۱٦/۱)	۲/۷ (۲/۵-٤/۱)
سیلتستون	۱۳/۰ (۱۱/۰-۱٤/۹)	۳/۱(۲/۵-٤/۸)
ماسه سنگ	۷ (۵/۹-۸/۱)	٦/۰(٤/۸-۷/۹)
سنگ آهک	٤/٦ (۳/۱-۵/۲)	۷/۱(۵/۷-۸/۰)
دولومیت	۵/٤(٤/۰-٦/۷)	٦/۵(۵/۳-۸/۱)
کنگلومرا	۷/۱ (۵/۸-۸/٤)	۵/۹(٤/۵-۷/۰)

* اعداد داخل پرانتز مقادیر حداقل و حداکثر ویژگی هستند.

٤. تعیین نوع نمک در منطقه و انجام آزمایش دوام وارفتگی

برای تعیین نوع نمک، مقداری نمک از حوضچه‌های استحصال نمک در منطقه تهیه شد (شکل ۲ را ببینید). سپس نمک مورد آنالیز تجزیه شیمیایی (XRD) قرار گرفت. شکل (۵) نتیجه آنالیز تجزیه شیمیایی را نشان می‌دهد. بر اساس آنالیز صورت گرفته، مشاهده می شود که نوع نمک‌های منطقه شامل کلرید سدیم (NaCl)، کلرید کلسیم ($CaCl_2$) و سولفات سدیم (Na_2SO_4) هستند.



شکل ۵. نتایج آنالیز شیمیایی (XRD) نمک موجود در منطقه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

شاخص دوام که از آزمایش دوام وارفتگی تعیین می‌شود یک معیار بسیار مناسب برای نشان دادن حساسیت سنگ در برابر سایش و تر و خشک شدن متوالی و تأثیرات شیمیایی محلول است که روش تعیین آن توسط فرانکلین و چاندرا [۲۸] ارائه شد و در سال ۱۹۷۹ توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ به صورت استاندارد درآمد [۲۵]. در آزمایش دوام وارفتگی، ترکیبی از سایش و تر و خشک شدن به همرا تاثیر شیمیایی محلول آزمایش به منظور تسریع کردن فرآیند هوازدگی روی نمونه‌های سنگ اعمال می‌شود [۲۹].

در این تحقیق، آزمایش دوام وارفتگی در محلول اشباع نمک تا ۱۵ چرخه انجام شد و شاخص دوام در چرخه‌های ۲ و ۱۵ (Id_2, Id_{15}) تعیین شدند. شکل (٦) دستگاه آزمایش دوام وارفتگی و تعدادی از نمونه‌های آزمایش را نشان می‌دهد. تعداد ۱۵ چرخه آزمایش به این دلیل است که تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در چرخه‌های اولیه به دلیل ناهموار و گوشه‌دار بودن نمونه‌ها، افت وزنی که در طی انجام آزمایش دوام وارفتگی صورت می‌گیرد، نشانگر دوام واقعی نمونه نیست و با افزایش تعداد چرخه‌ها به دلیل از بین رفتن ناهمواری‌ها و گوشه‌های نمونه‌ها، دوام واقعی به دست می‌آید، در نتیجه برای ارزیابی دقیق‌تر دوام، آزمایش را باید با تعداد چرخه‌های بیشتری انجام داد [۳۲-۳۰].

در آزمایش دوام وارفتگی ۱۰ قطعه سنگ تقریباً کروی ٤۰ تا ٦۰ گرمی که در مجموع وزنی معادل ٤۵۰ تا ۵۵۰ گرم داشته تهیه و در یک ظرف استوانه‌ای مشبک که تا مقدار معینی از محلول پر است ریخته شده و به مدت ۱۰ دقیقه چرخیده می‌شود. بعد از آن نمونه‌ها به مدت ٢٤ ساعت در خشک‌کن قرار داده می‌شوند. سپس چرخه بعد تکرار می‌شود. پس از اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن، مقدار درصد وزنی باقیمانده نمونه پس از چرخه ۲ و ۱۵ تعیین و در نهایت شاخص دوام در چرخه‌های ۲ و ۱۵ (Id_2, Id_{15}) محاسبه می‌شود. برای تهیه محلول اشباع نمک برای آزمایش دوام، مقدار ۳۵۰ گرم نمک به یک لیتر آب اضافه شد. بنابراین غلظت وزنی محلول نمک برابر با ۳۵۰ گرم بر لیتر است. نتایج آزمایش‌های دوام وارفتگی در جدول (٤) نشان داده شده‌اند.

شکل ٦. دستگاه آزمایش دوام وارفتگی، نمک مورد استفاده و تعدادی از نمونه‌های تهیه شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

جدول ٤. شاخص دوام وارفتگی نمونه‌ها در چرخه دوم (Id_2) و چرخه پانزدهم (Id_{15})

نام زمین شناسی نمونه	Id_2	Id_{15}
ژیپس	۹٦/۵	۸۱/۲
مارن	۹٦/۱	۸۰/۱
شیل دولومیتی	۹۵/۵	۷٦/۰
سیلتستون	۹۵/۹	۷۹/۳
ماسه سنگ	۹۷/۲	۹۱/۹
سنگ آهک	۹۸/٤	۹٤/۷
دولومیت	۹۷/۱	۹۲/٦
کنگلومرا	۹۸/۸	۹۲/۲

بحث

۱. ارزیابی دوام نمونه‌ها درمقابل هوازدگی نمک

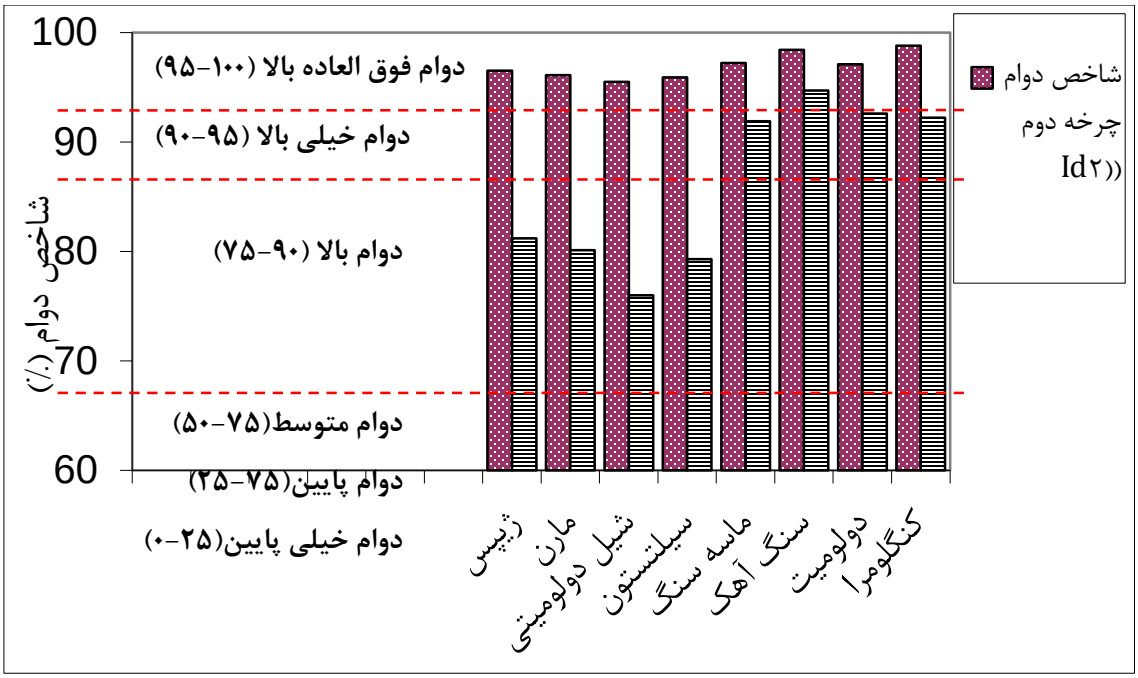
از شکل (۷) مشاهده می‌شود شاخص دوام نمونه‌ها در چرخه ۲ و ۱۵ با هم متفاوت هستند. با توجه به طبقه بندی سنگ‌ها توسط فرانکلین و چاندرا [۲۸] در شکل (۷)، بر اساس شاخص دوام در دومین چرخه محلول اشباع نمک، تمامی نمونه‌ها در رده سنگ‌های با دوام فوق العاده بالا (Id_2 95-100 (%)) قرار می‌گیرند. با این حال دوام نمونه‌ها در پانزدهمین چرخه آزمایش دوام وارفتگی در محلول اشباع نمک نشان می‌دهد ژیپس، مارن، شیل دولومیتی و سیلتستون در رده سنگ‌های با دوام بالا (Id_{15} 75-90(%)) و ماسه سنگ، دولومیت، سنگ آهک و کنگلومرا در رده سنگ‌های با دوام خیلی بالا (Id_{15} 90-95(%)) قرار می‌گیرند. دلیل کاهش دوام نمونه‌ها در چرخه پانزدهم نسبت به چرخه دوم، افزایش تعداد چرخه‌های آزمایش و در نتیجه افزایش تخریب ناشی از سایش، تر و خشک شدن متوالی و هوازدگی نمک است.

مقایسه نتایج آزمایش دوام وارفتگی در چرخه ۲ و ۱۵ (شکل ۷) نشان می‌دهد که شاخص دوام نمونه‌ها در چرخه ۱۵، کمتر از چرخه ۲ است. این نشان دهنده تأثیر افزایش تعداد چرخه‌های آزمایش در تسریع فرآیند هوازدگی در طی آزمایش دوام وارفتگی است. دلیل این رخداد را می‌توان به این صورت توضیح داد که در مرحله غوطه‌ور سازی نمونه‌ها در طی انجام آزمایش دوام وارفتگی، محلول نمک به درون خلل و فرج نمونه‌ها نفوذ می‌کند. در ادامه اگر ساختار خلل و فرج و مقاومت سنگ به گونه‌ای باشد که فشار تبلور نمک نتواند بر مقاومت سنگ غلبه کند و باعث تخریب سنگ شود، تجمع نمک موجود در خلل و فرج تأثیری در کاهش وزنی نمونه‌ها نخواهد شد. در صورتی که فشار تبلور نمک بتواند بر مقاومت سنگ غلبه کند، تخریب و جدایش ذرات از سطح نمونه‌ها رخ می‌دهد و کاهش وزنی نمونه‌ها در طی آزمایش دوام وارفتگی را در پی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

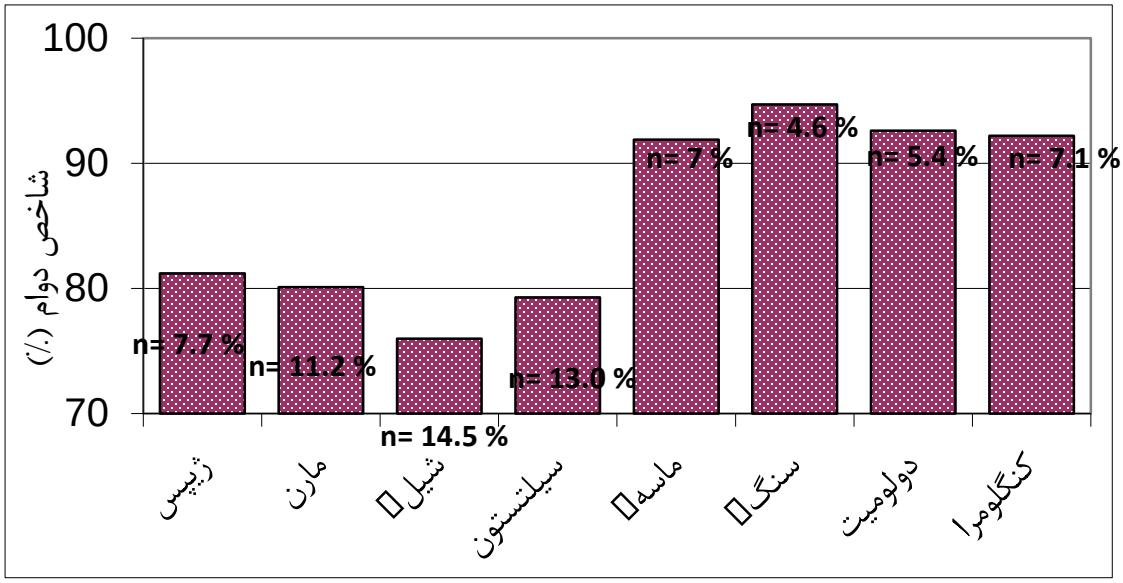
خواهد داشت که نتیجه آن کاهش شاخص دوام است. به هر حال با افزایش تعداد چرخه‌های آزمایش، تجمع نمک در خلل و فرج بیشتر خواهد شد و در نتیجه باعث افزایش تخریب ناشی از فشار تبلور نمک می‌شود.



شکل ۷. طبقه بندی شاخص دوام نمونه‌ها در چرخه ۲ و ۱۵ آزمایش دوام وارفتگی در محلول نمک [۲۸]

از جدول (٤) مشاهده می‌شود ژیپس، مارن، شیل دولومیتی و سیلتستون نسبت به ماسه سنگ، دولومیت، سنگ آهکو کنگلومرا دوام پایین‌تری در مقابل هوازدگی نمک از خود نشان داده‌اند. این موضوع می‌تواند به دلیل متفاوت بودن مقدار تخلخل، شاخص بار نقطه‌ای و ترکیب کانی شناسی آن‌ها باشد. هر چه تخلخل مؤثر بیشتر باشد، حفره‌های سنگ به هم پیوسته‌تر هستند و در نتیجه جذب آب بیشتر خواهد شد. سنگ‌های با جذب آب بالا در برابر هوازدگی‌های فیزیکی حاصل از چرخه‌های هوازدگی نمک بیشتر مستعد زوال هستند. از شکل (۸) مشاهده می‌شود ژیپس، مارن، شیل دولومیتی و سیلتستون که دارای تخلخل بیشتری (تخلخل بین ۷/۷ تا ١٤/٥ درصد) نسبت به سایر نمونه‌ها (تخلخل بین ٤/٦ تا ۷/۱ درصد) هستند دوام کمتری در مقابل هوازدگی نمک از خود نشان داده‌اند و دچار کاهش وزنی بیشتری در طی آزمایش دوام وارفتگی شده‌اند. شکل (۹) شیل دولومیتی به عنوان کم دوام ترین و سنگ آهک به عنوان با دوام ترین نمونه بعد از چرخه پانزدهم آزمایش دوام وارفتگی در محلول اشباع نمک را نشان می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]



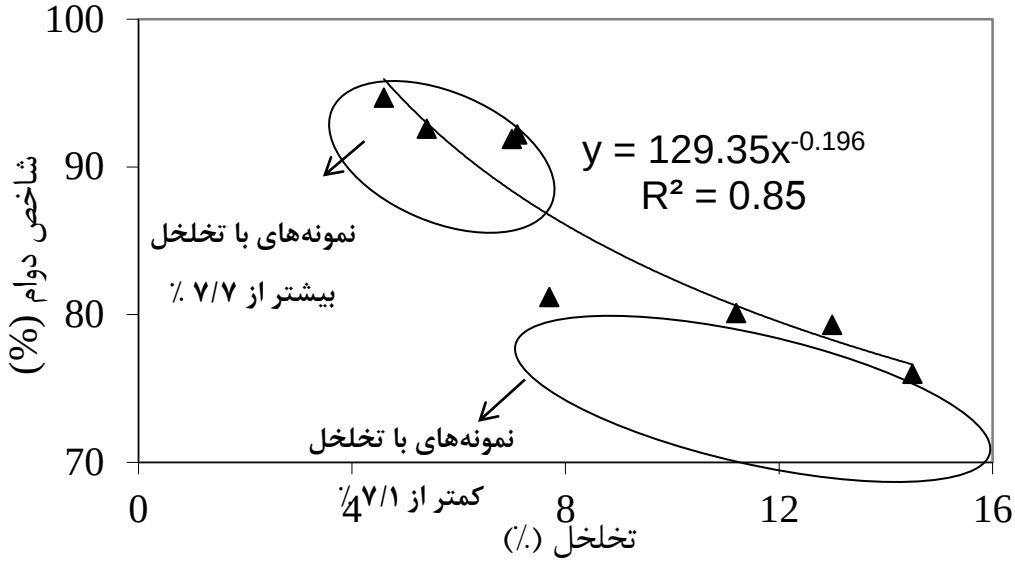
شکل ۹. شاخص دوام نمونه‌ها در چرخه پانزدهم آزمایش دوام وارفتگی در محلول اشباع نمک- در این شکل n تخلخل نمونه‌ها می‌باشد.

شکل ۱۰. شیل دولومیتی به عنوان کم دوام ترین و سنگ آهک به عنوان با دوام ترین نمونه بعد از چرخه ۱۵ آزمایش دوام وارفتگی در محلول اشباع نمک

به منظور بررسی رابطه کلی بین دوام نمونه‌ها در برابر هوازدگی نمک و تخلخل، آنالیز رگرسیون انجام شد. در این رگرسیون سعی شده خطی بر داده‌ها برازش شود که بالاترین مقدار ضریب تعیین را داشته باشد. شکل (۱۱) رابطه رگرسیون بین داوم نمونه‌ها در محلول اشباع نمک و تخلخل را نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۵) انواع مختلف منحنی برازش با ضرایب تعیین آنها ارائه شده است. از این جدول مشاهده می‌شود که بهترین خط برازش مربوط به منحنی توانی با ضریب تعیین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

۰/۸۵ است که در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که به طور کلی با افزایش تخلخل، دوام نمونه‌ها در برابر هوازدگی نمک کاهش یافته است.



شکل ۱۱.رابطه دوام نمونه‌ها در آزمایش دوام وارفتگی در محلول اشباع نمک و تخلخل

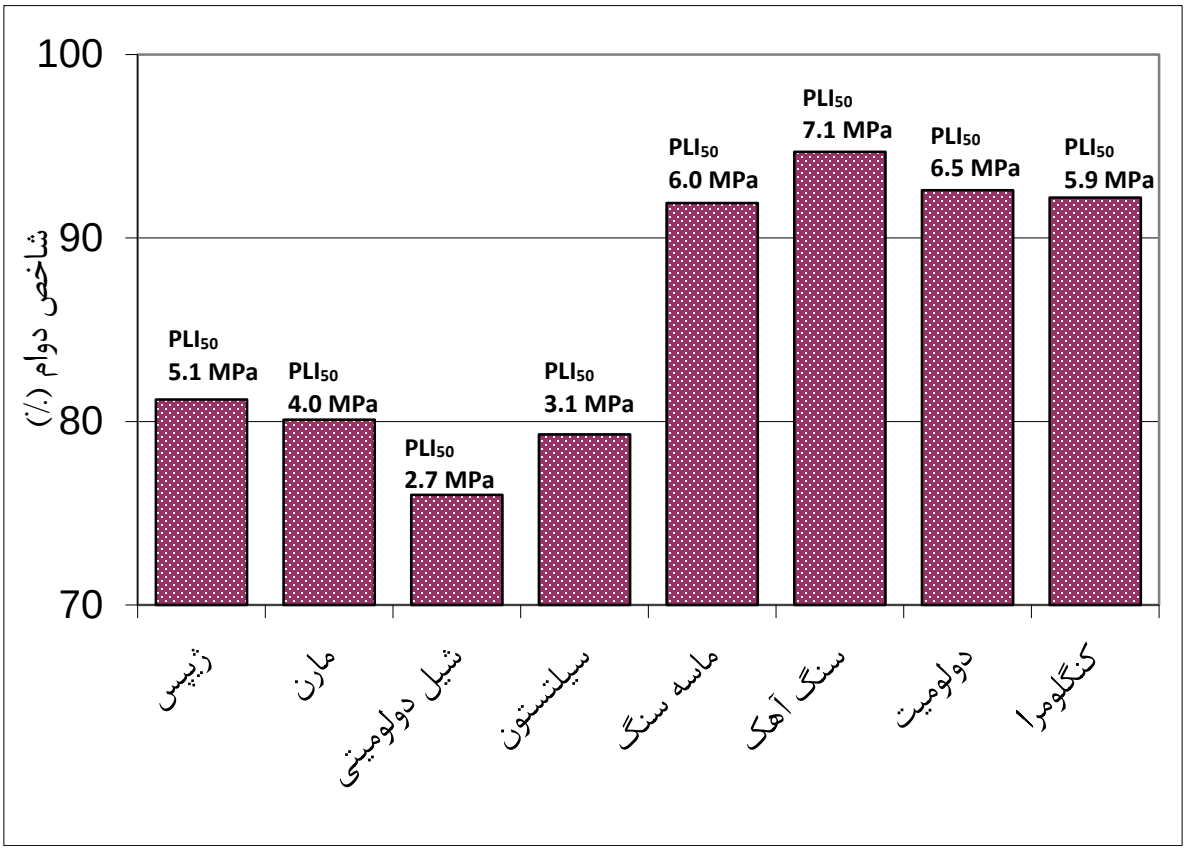
جدول ۵. انواع روابط بین دوام نمونه‌ها در آزمایش دوام وارفتگی در محلول اشباع نمک و تخلخل

رابطه	نوع رابطه	R^2
$Id_{15} = 104.18e^{-0.022n}$	نمایی	۰/۸۳۷
$Id_{15}=-1.8843n+102.61$	خطی	۰/۸۳۰
$Id_{15}=-16.71\ln(n)+121.13$	لگاریتمی	۰/۸۴۳
$Id_{15}=129.35n^{-0.196}$	توانی	۰/۸۴۵

علاوه بر تخلخل، مقاومت سنگ از دیگر عوامل مهم تأثیر گذار در دوام سنگ‌ها در برابر هوازدگی نمک است. از آنجایی که تبلور نمک باعث ایجاد تنش در سطح داخلی حفره‌های سنگ می‌شوند در نتیجه خصوصیات مقاومتی سنگ نقش مهمی در دوام سنگ‌ها در برابر تبلور نمک خواهند داشت. با توجه به این موضوع، بر اساس مقاومت سنگ می‌توان یک ارزیابی از دوام آن در برابر هوازدگی نمک داشت. با توجه به شکل (۱۲)، ژیپس، مارن، شیل دولومیتی و سیلتستون شاخص بار نقطه‌ای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. از طرف دیگر این نمونه‌ها دوام کمتری در برابر هوازدگی نمک از خود نشان داده‌اند. به هر حال از شکل (۱۲) مشاهده می‌شود ژیپس، مارن، شیل دولومیتی و سیلتستون با شاخص بار نقطه‌ای بین ۲/۷ تا ۵/۱ مگاپاسکال نسبت به نمونه‌های ماسه سنگ، دولومیت، سنگ آهک و کنگلومرا با شاخص بار نقطه‌ای بین ۵/۹ تا ۷/۱ مگاپاسکال، دوام کمتری در برابر هوازدگی نمک از خود نشان داده‌اند.



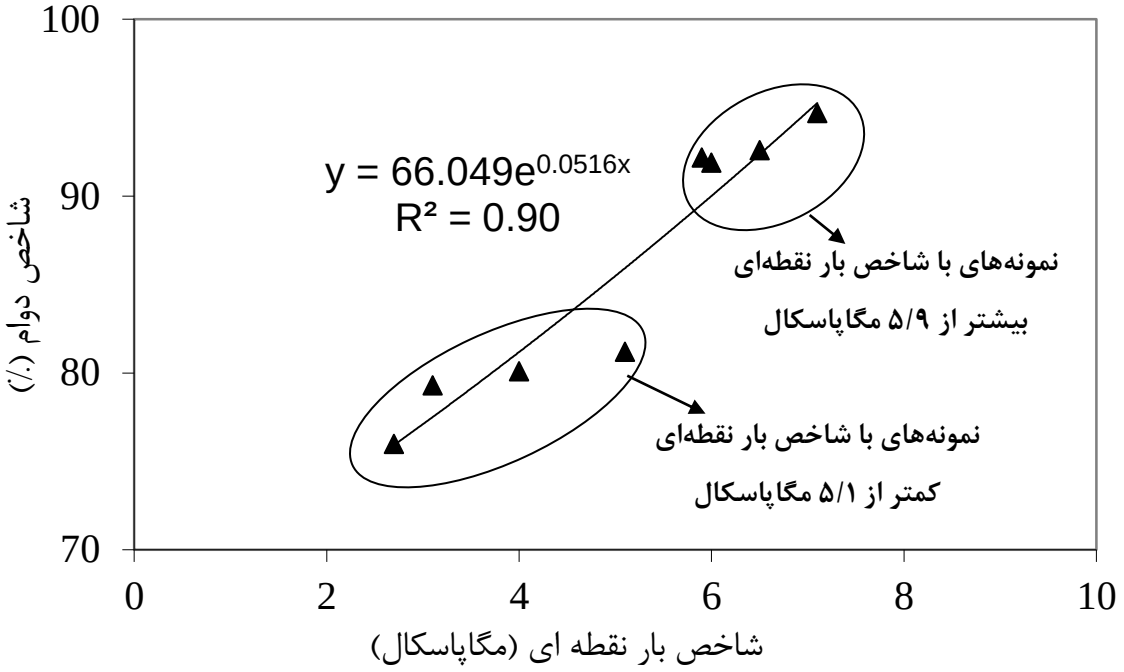
شکل ۱۲.شاخص دوام نمونه‌ها در چرخه پانزدهم آزمایش دوام وارفتگی در محلول اشباع نمک- در این شکل PLI_{50} شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌ها می‌باشد.

شکل (۱۳) رابطه بین دوام نمونه‌ها و شاخص بار نقطه‌ای را نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود یک رابطه نمایی با ضریب تعیین ۰/۹۰ بین دوام نمونه‌ها و شاخص بار نقطه‌ای حاصل شده است. لازم به ذکر است رابطه نمایی نسبت به سایر روابط مانند خطی، توانی و لگاریتمی دارای ضریب تعیین بالاتری بود و در اینجا به عنوان رابطه نهایی بین دوام

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

نمونه‌ها و شاخص بار نقطه‌ای معرفی شد. انواع روابط ممکن بین دوام نمونه‌ها و شاخص بار نقطه‌ای همراه با ضرایب تعیین آنها در جدول (٦) نشان داده شده اند.

مقایسه ضرایب تعیین بین شاخص دوام با تخلخل (۰/۸۵) و شاخص دوام با شاخص بار نقطه‌ای (۰/۹۰) نشان دهنده این است که مقاومت سنگ نسبت به تخلخل می‌تواند ارزیابی مناسب‌تری از دوام نمونه‌ها در برابر هوازدگی نمک داشته باشد.



شکل ۱۳. رابطه دوام نمونه‌ها در آزمایش دوام وارفتگی در محلول اشباع نمک و شاخص بار نقطه‌ای

جدول ٦. انواع روابط بین دوام نمونه‌ها در آزمایش دوام وارفتگی در محلول اشباع نمک و شاخص بار نقطه‌ای

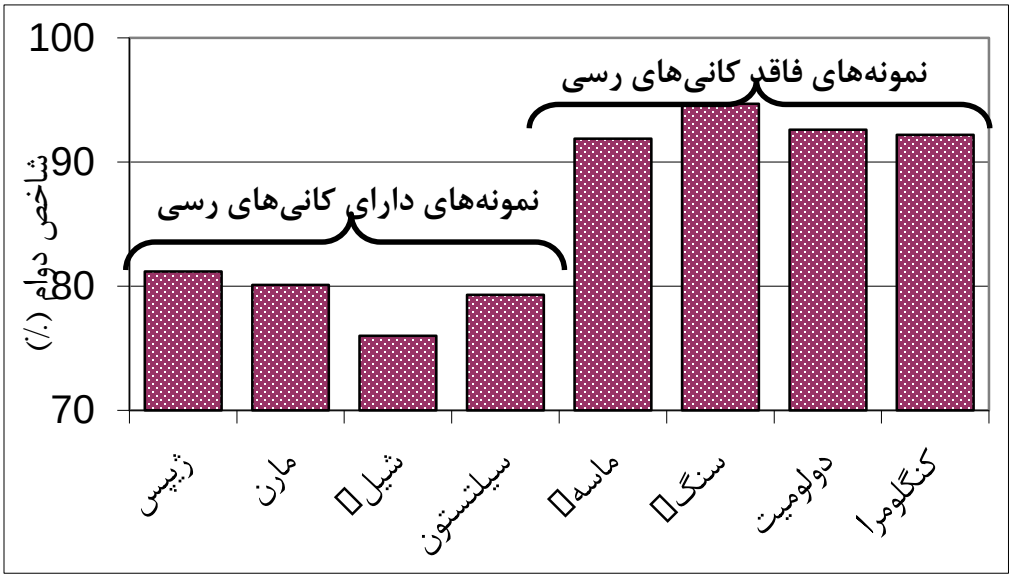
رابطه	نوع رابطه	R^2
$Id_{15} = 66.049e^{0.0516PLI}$	نمایی	۰/۹۰۳
$Id_{15}=4.4009PLI+63.776$	خطی	۰/۸۹۹
$Id_{15}=19.484\ln(PLI)+55.462$	لگاریتمی	۰/۸٦۱
$Id_{15}=59.862PLI^{0.229}$	توانی	۰/۸۷۰

مطالعات سنگ‌شناسی نه تنها اطلاعاتی در مورد ترکیب کانی‌شناسی و منشاء سنگ می‌دهند، همچنین در ارزیابی دوام سنگ‌ها در برابر هوازدگی نمک نیز یک ابزار مهم است، به دلیل اینکه مقاومت سنگ (که در ارتباط نزدیک با دوام است) به

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

مقدار زیادی به ویژگی‌های سنگ شناسی از جمله ترکیب کانی‌شناسی آن بستگی دارد [۱۰]. مطالعات سنگ‌شناسی که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه را می‌توان به دو گروه نمونه‌های دارای کانی‌های رسی (ژیپس، مارن، شیل دولومیتی و سیلتستون) و نمونه‌های فاقد کانی رسی (ماسه سنگ، دولومیت، سنگ آهک و کنگلومرا) تقسیم نمود. کانی‌های رسی به دلیل ساختار و قابلیت جذب آب بالایی که دارند، نسبت به سایر کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های رسوبی مانند کلسیت، کوارتز، فلدسپات بیشتر مستعد تخریب توسط فرآیندهای هوازدگی در طی چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی در آزمایش دوام وارفتگی هستند. به همین دلیل نمونه‌های ژیپس، مارن، شیل دولومیتی و سیلتستون به دلیل دارا بودن کانی‌های رسی دارای دوام کمتری نسبت به نمونه‌های ماسه سنگ، دولومیت، سنگ آهک و کنگلومرا که فاقد کانی‌های رسی هستند، می‌باشند (شکل ١٤).

با توجه به مطالب فوق می توان گفت به طور کلی نمونه‌هایی که دارای تخلخل بالاتر، مقاومت کمتر و دارای کانی‌های رسی در ترکیب خود هستند، دوام کمتری در برابر هوازدگی نمک از خود نشان می‌دهند.



شکل ١٤.شاخص دوام نمونه‌ها در چرخه پانزدهم آزمایش دوام وارفتگی در محلول اشباع نمک

۲. برآورد دوام نمونه‌ها با استفاده از آنالیز رگرسیون چند متغیره

در تحقیق حاضر، از آنالیز رگرسیون چند متغیره برای تخمین دوام نمونه‌ها بعد از چرخه‌های آزمایش دوام وارفتگی در محلول نمک استفاده شده است. در این آنالیز، شاخص دوام بعد از چرخه‌های آزمایش دوام وارفتگی در محلول نمک به عنوان پارامتر وابسته و تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای به عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته شده‌اند. فرم کلی رابطه حاضر به صورت زیر است:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

$$Id_N=\beta_0+\beta_1 n+\beta_2 PLI \quad (٦)$$

که در آن Id_N مقدار شاخص دوام تخمین زده شده بعد از ۱۵ چرخه آزمایش دوام وارفتگی در محلول نمک، n تخلخل نمونه‌ها، PLI شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌ها، β_0 یک ثابت و β_1 و β_2 ضرایب رگرسیون هستند.

با استفاده از نرم افزار SPSS® v.16 code داده‌های حاصل از جدول (۳) و (٤) تجزیه و تحلیل و مدل آماری برای تخمین دوام نمونه‌ها ارائه شده است. مدل آماری فوق به صورت رابطه زیر است:

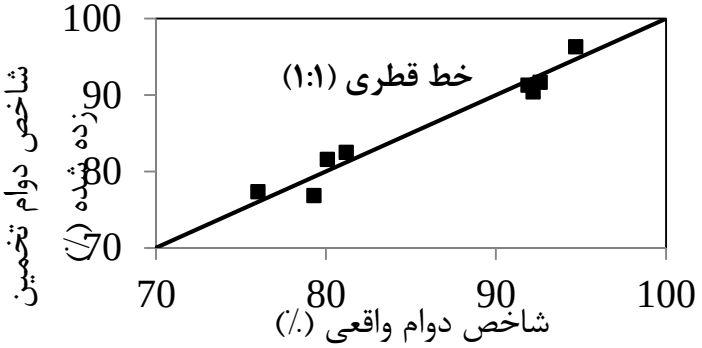
$$Id_N=-10.712+3.715n+12.668PLI \qquad R^2=0.95 \quad (۷)$$

همان‌طور که از رابطه (۷) مشاهده می‌شود مدل دارای ضریب تعیین ۰/۹۵ می‌باشد که نشان دهنده همبستگی بالا بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل است.

یکی از مهمترین آزمون‌های آماری برای ارزیابی میزان برازش یک مدل آزمون F فیشر است. این آزمون نشان می‌دهد که آیا متغیرهای مستقل قادرند به خوبی تغییرات متغیر وابسته را توضیح دهند یا خیر. اگر F به دست آمده از مدل بیشتر از F موجود در جدول باشد نشان دهنده کارایی و مناسب بودن مدل در تخمین متغیر وابسته است. F موجود در جدول برای درجه‌های آزادی مختلف متغیرها در کتاب‌های آماری محاسبه شده است. بر اساس آنالیز آماری، مقدار F به دست آمده از مدل رابطه (۷) برابر با ۵۰/۳۳ است. F موجود در جدول برای تعداد نمونه‌های مورد مطالعه برابر با ۵/۷۹ است. بیشتر بودن F حاصل از مدل در مقایسه با F جدول نشان دهنده توانایی مناسب مدل ارائه شده در تخمین دوام نمونه‌ها بعد از ۱۵ چرخه آزمایش دوام وارفتگی در محلول نمک است.

هر چند ضریب تعیین بالایی (۰/۹۵) برای مدل ارائه شده وجود دارد (رابطه ۷) ولی باید گفت ضریب تعیین صرفاً نمی‌تواند دلیلی بر تخمین دقیق دوام نمونه‌ها باشد. برای بررسی این موضوع، خط قطری (۱:۱) برای دوام نمونه‌ها ترسیم شد. این خط از پلات کردن مقادیر واقعی شاخص دوام اندازه‌گیری شده در چرخه ۱۵ آزمایش دوام در محلول نمک در مقابل مقادیر تخمین شده آن از مدل رابطه (۷) به دست می‌آید.

مقادیر واقعی دوام و تخمین شده آن از مدل رابطه (۷) در شکل (۱۵) نشان داده شده است. هر چه توزیع نقاط به خط قطری نزدیکتر باشند یا روی آن قرار گیرند نشان دهنده تخمینی دقیق‌تر از دوام نمونه‌ها با استفاده از مدل ارائه شده است. همان‌طور که از شکل (۱۵) مشاهده می‌شود نقاط خیلی نزدیک به خط قطری هستند که نشان دهندهٔ مناسب بودن مدل برای تخمین دوام نمونه‌ها در محلول نمک است.



شکل ۱۵. شاخص دوام واقعی نمونه‌ها در آزمایش دوام وارفتگی در محلول نمک و مقادیر تخمین زده شده آن از مدل رابطه (۳)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سنگ‌های رخنمون یافته منطقه دره شیخان در شمال غربی خرم آباد شامل ژیپس، کنگلومرا، ماسه سنگ، سیلتستون، سنگ آهک، شیل دولومیتی و مارن مربوط به سازندهای گچساران، آسماری-شهبازان، کشکان، تاربور و امیران تهیه شدند. مجموعه‌ای از آزمایش‌های دوام در محلول نمک، تخلخل، شاخص بار نقطه‌ای و مطالعات سنگ‌شناسی روی نمونه‌ها انجام شد و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- با افزایش تعداد چرخه‌های آزمایش دوام وارفتگی، دوام نمونه‌ها کاهش پیدا کرد. دلیل این موضوع افزایش مقدار نمک و تجمع آن در حفره‌ها و ریزترک‌های نمونه‌ها است که نتیجه آن افزایش فشار تبلور نمک و تخریب نمونه‌ها است.

۲- تخلخل، مقاومت و ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌ها نقش مهمی در دوام نمونه‌ها در مقابل هوازدگی نمک داشتند. نتایج نشان داد نمونه‌هایی با تخلخل بالا، مقاومت کم و دارای رس در ترکیب خود، دوام کمتری در برابر فشار تبلور ناشی از هوازدگی نمک از خود نشان می‌دهند. از طرف دیگر با افزایش تخلخل و کاهش مقاومت، دوام نمونه‌ها در برابر هوازدگی نمک کاهش یافت.

۳- کانی‌های رسی به دلیل ساختار و قابلیت جذب آب بالایی که دارند، نسبت به سایر کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های رسوبی مانند کلسیت، کوارتز، فلدسپات بیشتر مستعد تخریب توسط فرآیندهای هوازدگی در طی چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی در آزمایش دوام وارفتگی هستند. به همین دلیل نمونه‌های مورد مطالعه شامل ژیپس، مارن، شیل دولومیتی و سیلتستون به دلیل دارا بودن کانی‌های رسی دارای دوام کمتری نسبت به نمونه‌های ماسه سنگ، دولومیت، سنگ آهک و کنگلومرا که فاقد کانی‌های رسی هستند، بودند.

٤- در تحقیق حاضر یک مدل آماری با استفاده از آنالیز رگرسیون چند متغیره برای تخمین دوام نمونه‌ها در آزمایش دوام وارفتگی در محلول نمک ارائه شد. در این مدل دوام بعد از چرخه‌های آزمایش به عنوان پارامتر وابسته و تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای به عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از آزمون‌های آماری و خط قطری، دقت و صحت این مدل مورد بررسی قرار گرفت که نشان دهنده کارایی و دقت مناسب (R^2=0.95) آن در تخمین دوام نمونه‌ها است.

۵- مدل آماری ارائه شده در این تحقیق به دلیل استفاده از پارامترهای ساده تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای، می‌تواند یک ارزیابی سریع و ارزان از دوام طولانی مدت سنگ‌ها در برابر هوازدگی نمک داشته باشد.

منابع

1. Bell, F.G., 1993, Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. Environmental Geology, 21: 187–200.

2. Scherer, G., 1999. Crystallization in pores. Cement and Concrete Research, 29: 1347–1358.

3. 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

4. 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.

5. Benavente, D., Martinez, J., Cueto, N., Cura, M.A, 2007a, Salt weathering in dual-porosity building dolostones. Engineering Geology, 94: 215–226.

6. Benavente, D., Martinez-Martinez, J., Garcia del Cura, M.A., Can averas, M.A., 2007b, The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks. Environmental Geology, 52: 215–224.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Jamshidi, A., Nikudel, M.R., Khamehchiyan, M., 2013, Estimating the durability of building stones against Salt crystallization: considering the physical properties and strength characteristics. Journal of Geopersia 3(2): 35–48.

11. Ghobadi, M.H., Babazadeh, R., 2015. Experimental studies on the effec ts of cyclic freezing–thawing, salt crystallization, and thermal shock on the physical and mechanical characteristics of selected sandstones. Rock Mechanics and Rock Engineering 48, 1001–1016.

12. Zalooli, A., Khamehchiyan, M., Nikudel, M.R., Jamshidi, A., 2017, "Deterioration of Travertine Samples Due to Magnesium Sulfate Crystallization Pressure: Examples from Iran. Geotechnical and Geological Engineering, 35(1), 463–473.

13. Benavente, D, Martinez-Martinez, J, Cueto, N, Ordoez, S, Garcia-del- Cura, M., 2018, Impact of salt and frost weathering on the physical and durability properties of travertines and carbonate tufas used as building material. Environmental Earth Sciences, 77:147

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

14. Zalooli, A., Freire-Lista, D.M., Khamehchiyan, M., Nikudel, M.R, Fort, R., Ghasemi, S., 2018, Ghaleh-khargushi rhyodacite and Gorid andesite from Iran: characterization, uses, and durability. Environmental Earth Sciences, 77:315

15. Torabi-Kaveh M., Heidari, M., Mohseni, H., Menendez, B., 2019, Role of petrography in durability of limestone used in construction of Persepolis complex subjected to artificial accelerated ageing tests. Environmental Earth Sciences, 78:297

16. Benavente, D., Garcia 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.

17. Rodriguez-Navarroa, C., Doehnea, E., Sebastianb, E., 2000, How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials. Cement and Concrete Research, 30: 1527–1534.

18. Tsui, N., Flatt, R., Scherer, G., 2003, Crystallization damage by sodium sulfate. Journal of Cultural Heritage, 4: 109–115.

19. 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: pp 193–199.

20. Watt, D., Colston, B., 2000. Investigating the e€ects of humidity and salt crystallisation on medieval masonry. Building and Environment, 35, 737-749.

21. Mottersheada, D., Gorbushinab, A., Lucasc, G., Wrightd, J., 2003, The in uence of marine salts, aspect and microbes in the weathering of sandstone in two historic structures. Building and Environment, 38, 1193 – 1204.

22. Lubelli, B., Hees, R., Groot, C., 2004, The role of sea salts in the occurrence of different damage mechanisms and decay patterns on brick masonry. Construction and Building Materials, 18, 119-124.

23. Sousa, M.O. Suarez del Rio, M. Calleja, L. Argandona, V. and Rodriguez, A., 2005, Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. Engineering Geology, 77, 153-168.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]

24. Zedef, V. Kocak, K. Doyen, A. Ozsen, H. and Kekec, B., 2007. Effect of salt crystallization on stones of historical buildings and monuments, Konya, Central Turkey. Building and Environment, 42, 1453-1457.

25. ISRM., 1981. Rock characterization testing and monitoring. ISRM suggested methods. Pergamon Press, Oxford.

26. Matula, M., Dearman, W.R., Golodkovskaja, G.A., Pahl, A., Radbruch-Hall Dorothy, H., 1979, Part 1: rock and soil materials. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 19, 364–371.

27. ISRM, 1978, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization

28. Franklin, J.A., Chandra, A., 1972. The slake durability test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 9, 325–341.

29. Koncagül, E., and Santi, P., 1999. Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36, 139-153.

30. Gökceoğlu, C., Ulusay, R., and Sönmez, H., 2000. Factors affecting the durability of selected weak and claybearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of then number of drying and wetting cycles. Engineering Geology, 57, 215-237.

31. Gupta, V., and Ahmed, I., 2007. 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.

32. Ghobadi, M.H., Mousavi, S., 2014. The effect of pH and salty solutions on durability of sandstones of the Aghajari Formation in Khouzestan province, southwest of Iran Arabian Journal of Geosciences 7, 641–653.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.2.1]