بررسی تأثیر هوازدگی بر دوام‌داری و زوال‌پذیری آثار تاریخی سنگی جنوب استان زنجان

مهدی هاشمی[۱]، داود فریدونی[۲]*

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران
۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰ تاریخ **پذیرش:** ۱۴۰۲/۰۵/۲۰

چکیده

در این پژوهش، دوام‌داری و زوال‌پذیری سنگ‌های دو اثر تاریخی سنگی شامل معبد صخره‌ای داش‌کسن و سنگ نوشته‌های تاریخی قبرستان سجاس در جنوب استان زنجان مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از هر اثر تاریخی دو نمونه بلوکی سنگ برای انجام مطالعات آزمایشگاهی انتخاب گردید. بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی، آثار تاریخی معبد صخره‌ای داش‌کسن بر روی توف‌های سازند کرج حجاری شده است. با مطالعه مقاطع نازک، نمونه‌های معبد داش‌کسن کریستال ویتریک توف و لیتیک ویتریک توف و نمونه‌های سنگ نوشته‌های تاریخی قبرستان سجاس، ماسه‌سنگ آهکی و ماسه‌سنگ بسیار دانه‌ریز تشخیص داده شدند که کوارتز کانی غالب تشکیل دهنده‌ی این سنگ‌ها می‌باشد. بر مبنای ویژگی‌های فیزیکی، نمونه‌های مورد مطالعه شده دارای چگالی و تخلخل متوسط می‌باشند. از نظر دوام‌داری و زوال‌پذیری هر چهار نمونه تحت ۱۵ چرخه آزمایش دوام-وارفتگی در آب معمولی و محلول سولفات سدیم قرار گرفتند. مدل تابع تخریب و نیمه عمر هر چهار نمونه تعیین و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که هر چهار نمونه دارای شاخص دوام-وارفتگی پایین‌تری در محلول سولفات سدیم نسبت به آب معمولی می‌باشند. نمونه‌های سنگ نوشته‌های تاریخی قبرستان سجاس به دلیل وجود کوارتز در زمینه آهکی یا رسی، دارای جذب آب و تخلخل بیشتر و بی‌دوام‌تر و نیمه عمر آن‌ها پایین‌تر از نمونه‌های معبد صخره‌ای داش‌کسن می‌باشند.

کلید واژه‌ها: معبد داش‌کسن، قبرستان تاریخی سجاس، آثار سنگی، دوام-وارفتگی، هوازدگی.

مقدمه

سنگ به عنوان یکی از قدیمی‌ترین مواد استفاده شده توسط بشر به عنوان مصالح ساختمانی بوده است (Shadmon, 1996; Ozbek, 2013). اولین بناهای تاریخی ساخته شده از سنگ مربوط به بیش از ۵۰۰۰ سال پیش می‌باشد (Cassar, 2002). در سراسر جهان برای ساخت آثار تاریخی از سنگ‌های طبیعی استفاده شده است. آثار تاریخی به عنوان بخشی از میراث

* نویسنده مسئول: d.fereidooni@du.ac.ir
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.2.101186

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

فرهنگی جهان محسوب می‌شوند که از انواع مختلف سنگ طبیعی ساخته شده‌اند (Shadmon, 1996; Smith, 1999; Cassar, 2010;). با گذشت زمان، سنگ‌های تشکیل دهنده آثار تاریخی تحت تأثیر هوازدگی، فرسایش، تخریب و مخاطرات طبیعی قرار می‌گیرند. تخریب و هوازدگی یکی از اصلی‌ترین عوامل مخرب چند بعدی و اجتناب‌ناپذیر در آثار تاریخی است که در مجاورت آب و هوا و شرایط محیطی ایجاد می‌شود (Heidari et al., 2017; Andriani et al., 2007). در جای جای کشور ایران بناهای تاریخی با ارزشی قرار دارند که در معرض مخاطرات طبیعی هستند و می‌توانند توسط این مخاطرات به شدت آسیب ببینند. هوازدگی سنگ‌ها، چه به صورت فیزیکی که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و چه به صورت شیمیایی که باعث تجزیه و انحلال کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها می‌گردد، به عنوان یک فرآیند طبیعی، مهم‌ترین عامل کنترل کننده دوام‌داری و زوال‌پذیری سنگ‌های تشکیل‌دهنده آثار تاریخی به حساب می‌آید. سرعت هوازدگی در آثار تاریخی به جنس و مشخصات سنگ مادر (ترکیب کانی‌شناسی، بافت، خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام‌پذیری) و به شرایط محیطی (ویژگی‌های اقلیمی، آب و هوای منطقه، توپوگرافی و عوامل انسانی) بستگی دارد. از این رو شناخت ویژگی‌های مهندسی و انجام مطالعات زمین‌شناسی مهندسی در آثار تاریخی و باستانی برای سنگ‌های تشکیل دهنده این آثار، ما را در جهت حفظ، نگهداری و بهسازی آن‌ها یاری می‌کند. همچنین حفاظت از آثار تاریخی علاوه بر مزایای فرهنگی حاوی مزایای اقتصادی نیز می‌باشد (Torok and Prikryl, 2010). شاخص دوام- وارفتگی (Id) متأثر از عواملی نظیر، تخلخل و نفوذپذیری سنگ‌ها، ماهیت مایع آزمایش، مقاومت سنگ در برابر تورم و تجزیه، اندازه و وزن نمونه‌ها، خصوصیات تجهیزات آزمایش، وضعیت گردشدگی نمونه‌ها، تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن، دقت فرد انجام دهنده آزمایش می‌باشد. این شاخص در حقیقت میزان دوام سنگ‌ها و مصالح سنگی در مقابل خرد شدن، تر و خشک شدن و همچنین اثر محلول‌های شیمیایی را بر روی سنگ‌ها نشان می‌دهد. به عبارتی، این شاخص میزان کیفیت سنگ را در مقابل عوامل فرسایش و هوازدگی را بررسی می‌کند. هوازدگی سنگ‌ها به عنوان یک فرآیند طبیعی، مهم‌ترین عامل تغییر دهنده دوام سنگ‌های سازنده آثار تاریخی به حساب می‌آید. آزمایش دوام-وارفتگی به عنوان یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی دوام‌داری و زوال‌پذیری سنگ‌ها می‌باشد. این آزمایش توسط فرانکلین و چندرا (Franklin and Chandra, 1972) ارائه گردید و تاکنون به صورت موفقیت‌آمیزی توسط محققین جهت بررسی دوام‌داری و زوال‌پذیری سنگ‌های کربناته (Khajevand and Fereidooni, 2022; Danaei and Fereidooni, 2023)، سنگ‌های آواری (Diamantis et al., 2021) و برخی از سنگ‌های دگرگونی (Fereidooni and Sousa, 2022) مورد استفاده قرار گرفته است.

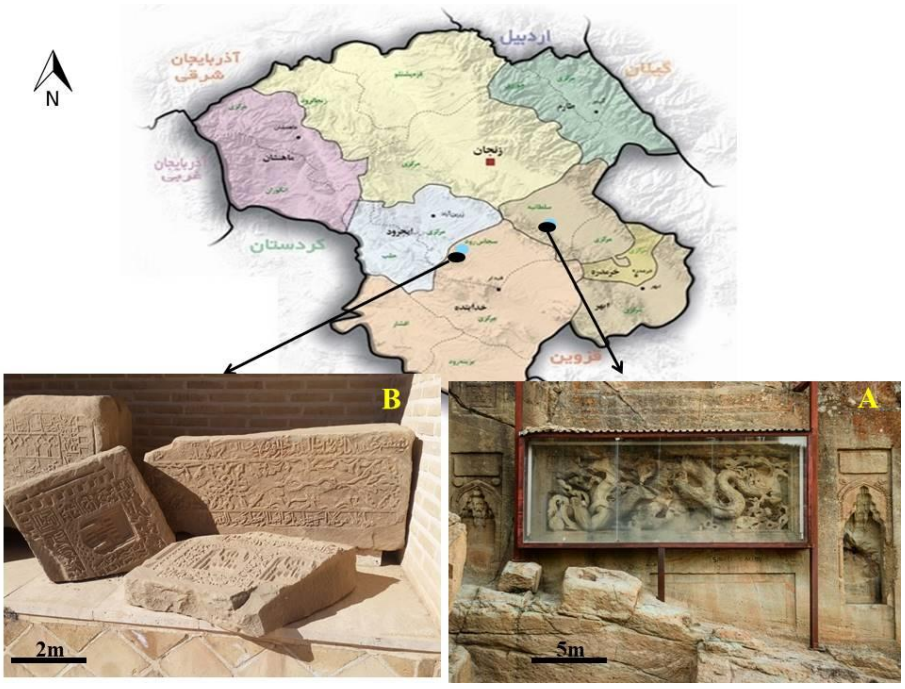
مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، دو اثر تاریخی سنگی در جنوب استان زنجان انتخاب شد (شکل ۱). اولین اثر، معبد صخره‌ای داش‌کسن، در ده کیلومتری جنوب شرقی شهرستان سلطانیه و در شرق روستای ویر قرار دارد که در سال ۱۳۵۳ به شماره ۱۰۲۶ به ثبت آثار ملی رسیده است. این معبد در وسعت زیادی با مساحت ۶۱۴ مترمربع در دل کوه داش‌کسن کنده شده است. در بعضی از قسمت‌ها، برش صخره‌ها به ارتفاع ۱۰ متر یا بیشتر انجام پذیرفته است. پلان معبد، محوطه‌ای مستطیل شکل به طول ۴۰۰ متر را در برمی‌گیرد و عرض آن نیز از شمال به جنوب از ۳۰۰ تا ۵۰ متر در تغییر است (ثبوتی، ۱۳۷۷).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

در محوطه اصلی بنا، سه طاق نسبتاً عمیق در دل کوه کنده شده و در حد فاصل طاق جنوبی و طاق‌های اضلاع شرقی و غربی، حجاری‌ها و نقش‌های زیبایی به چشم می‌خورد. در اضلاع شرقی و غربی معبد، نقش اژدها به صورت قرینه در داخل کادر به طول نزدیک به ۴ متر به‌صورت زیبا و ظریف حجاری شده است که نفوذ هنر آسیای شرقی را به معرض نمایش گذاشته‌اند و مشابه آن در ایران وجود ندارد.

دومین اثر تاریخی، سنگ نوشته‌های تاریخی شهر سجاس واقع در شمال غربی شهرستان خدابنده می‌باشد. سنگ نوشته‌های تاریخی، میراثی به جای مانده از نسل‌های گذشته است که گذشتگان برای آیندگان به یادگار گذاشته‌اند. این آثار با گذر زمان تحت عوامل طبیعی و انسانی در معرض هوازدگی، فرسودگی و تخریب قرار دارند. این سنگ نوشته‌ها به قبور تعلق دارند و برخی متعلق به کشته‌شدگان حمله مغول می‌باشند. شکل این سنگ نوشته‌ها صندوقی شکل، به صورت عمودی یا افقی قرار دارند و برخی از آن‌ها در محوطه حیاط تاریخی مسجد جامع سجاس متعلق به دوره سلجوقی به‌صورت موزه سنگی در فضای باز نگهداری می‌شوند. نقوش و عبارات حجاری شده بر روی این سنگ‌ها به صورت برجسته هستند و سنگ نوشته‌هایی که بر روی آن‌ها نقوش اسلیمی، درخت زندگی، لفظ و نام با خط‌های زیبا مربوط به دوره ایلخانی می‌باشد، قابل مشاهده است. به دلیل هوازدگی و فرسایش بر روی تعدادی از این سنگ نوشته‌ها، نقوش و عبارات حجاری شده از بین رفته یا قابل تشخیص نمی‌باشند. قدمت این سنگ نوشته‌ها مربوط به قرن‌های ششم، هفتم و هشتم هجری قمری است (هاشمی، ۱۳۹۷).



شکل ۱. تصاویر آثار سنگی تاریخی مورد مطالعه، A) معبد صخره‌ای داش‌کسن و B) سنگ نوشته‌های تاریخی سجاس

Fig. 1. Images of the studied historical stone monuments, A) the stone temple of Dashkasan, B) the historical stone inscriptions of Sojas

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی داوم‌داری و زوال‌پذیری سنگ‌های آثار سنگی تاریخی جنوب استان زنجان، پس از مطالعات دفتری از جمله موقعیت جغرافیای، قدمت، نوع سنگ بنا و غیره، بازدید صحرایی از مناطق مذکور انجام پذیرفت. با همانگی‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

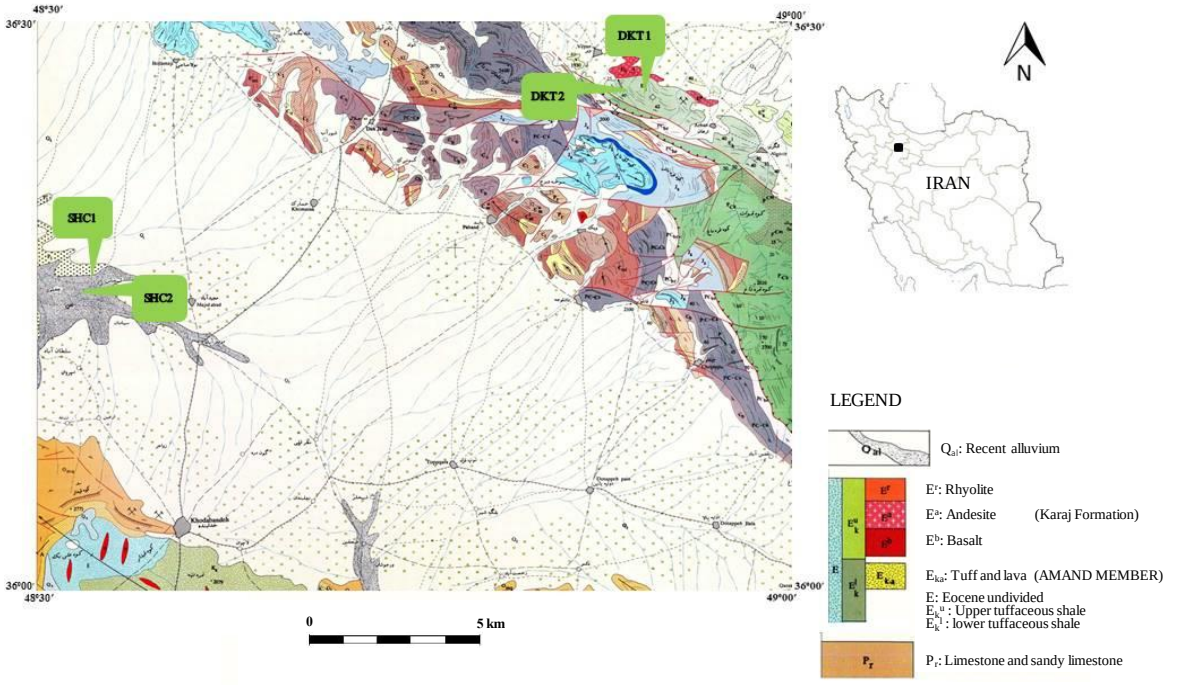
لازم با سازمان میراث فرهنگی، چهار نمونه بلوکی سنگ که دو نمونه از آن مربوط به سنگ نوشته‌های قبرستان تاریخی سجاس (SHC1, SHC2) می‌باشند و از نمونه‌های شکسته و غیر قابل استفاده از خود سنگ نوشته‌ها بودند، انتخاب شدند. همچنین دو نمونه از معبد داش‌کسن (DKT1, DKT2) از محوطه و محلی نزدیک به این اثر تاریخی تهیه گردید. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، در اولین مرحله مقاطع نازک صیقلی جهت انجام مطالعات میکروسکوپی به منظور تعیین ترکیب کانی‌شناسی و بافت سنگ‌های مورد مطالعه، تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند. سپس خصوصیات فیزیکی این نمونه‌ها با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شده با شکل منظم هندسی محاسبه گردید. همچنین آزمایش دوام-وارفتگی در ۱۵ چرخه در آب معمولی و ۱۵ چرخه در محلول سولفات سدیم (تناردیت) بر روی این نمونه‌ها انجام گردید و در نهایت با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، مدل تابع تخریب و نیمه عمر نمونه‌ها مورد مطالعه ارائه گردید.

موقعیت جغرافیایی، جایگاه زمین‌شناسی و شرایط آب و هوایی

سنگ‌های آثار تاریخی مطالعه شده در این پژوهش، در منطقه‌ای با مساحت ۵۷۰ کیلومتر مربع در جنوب استان زنجان واقع گردیده که بخش‌هایی از شهرستان‌های خدابنده و سلطانیه را شامل می‌شود. این منطقه به طول‌های جغرافیایی ″۳۴ ′۳۷ °۴۸ و ″۵۶ ′۵۲ °۴۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۰۸ ′۱۳ °۳۶ و ″۳۴ ′۲۶ °۳۶ درجه شمالی محدود می‌گردد. سازندهای کهر، بایندر، سلطانیه، باروت، زاگون، لالون و میلا، دورود، روته، شمشک، دلیچای، لار و کرج با لیتولوژی خاص خود تشکیلات سنگی این ناحیه را شامل می‌شوند. بعلاوه در این منطقه، رسوبات مربوط به پلیوسن و کواترنری گسترش فراوانی دارند. هر چند که رسوبات و سازندهای موجود در این منطقه منطبق با زون البرز می‌باشد، ولی با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه و وجود توده‌های نفوذی مربوط به دوران ترشیری در شمال غرب محدوده و همچنین سازند کرج با لیتولوژی توف، بازالت، آندزیت و ریولیت به سن ائوسن این ایده را که این منطقه بخشی از زون ارومیه دختر بوده و سنگ‌های آذرین مذکور نیز در اثر فرآیند رانش صفحه عربی به زیر خرده قاره ایران مرکزی به وجود آمده و این سنگ‌ها در بخش کمان ماگمایی این فرآیند به وجود آمده را ایجاد می‌نماید (هاشمی، ۱۳۹۷). در این منطقه ساختارهای متعدد و متنوع تکتونیکی با سنین مختلف مشاهده می‌گردد که شامل گسل‌ها، چین خوردگی‌ها، شکستگی‌ها و درزه‌ها می‌باشند. در شکل ۲ موقعیت زمین‌شناسی آثار سنگی تاریخی و محل نمونه برداری بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه نمایش داده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]



شکل ۲. موقعیت زمین‌شناسی منطقه و محل‌های نمونه برداری (هاشمی ۱۳۹۷)

Fig. 2. Geological location of the region and sampling locations (Hashemi 1397)

با توجه به تأثیر شرایط آب و هوایی بر روی روند تخریب و هوازدگی در آثار تاریخی، دانستن داده‌های هواشناسی بسیار مهم است. شرایط آب و هوایی به همراه توپوگرافی و عوامل زیست محیطی تأثیر مهمی بر روی روند مکانیسم هوازدگی سنگ‌ها دارد (Gupta and Ahmed, 2007). استان زنجان به لحاظ داشتن تنوع نقاط ارتفاعی از یک سو و از سوی دیگر تأثیرپذیری از چند توده هوایی خزری، مدیترانه‌ای و صحرای مرکزی، صاحب اقلیم‌ها و اکوسیستم‌های متنوعی شده است. این استان یکی از استان‌های سردسیر و کوهستانی شمال‌غربی کشور به شمار می‌آید. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی به روش دومارتن شهرستان خدابنده در اقلیم مدیترانه‌ای سرد و شهرستان سلطانیه در این طبقه‌بندی در اقلیم نمیه خشک فراسرد قرار می‌گیرد. شرایط اقلیمی حاکم بر این مناطق باعث ایجاد چرخه‌های تر و خشک شدن و ذوب و انجماد در سنگ‌ها می‌شود که متعاقب آن ایجاد هوازدگی فیزیکی سنگ‌ها می‌باشد. بنابراین، نیاز به بررسی تأثیر فرآیند تر و خشک شدن بر روی تخریب و زوال آثار تاریخی این منطقه که از مهم‌ترین عوامل هوازدگی فیزیکی می‌باشند، در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

نتایج و بحث

۱- ویژگی‌های کانی‌شناسی و پتروگرافی

ترکیب کانی‌شناسی و بافت سنگ‌ها بر روی دوام‌داری و زوال‌پذیری آن‌ها به عنوان یک عامل اصلی تأثیرگذار است (Dhaka et al. 2002.; Lashkaripour and Boomeri, 2002; Nadeesha et al., 2017). تعیین ترکیب کانی‌شناسی و خصوصیات

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

بافتی به عنوان ابزاری برای ارزیابی دوام‌داری و زوال‌پذیری و پایداری سنگ‌ها در مقابل عوامل هوازدگی استفاده می‌شود (Jamshidi et al., 2013). دوام سنگ در برابر عوامل هوازدگی فیزیکی و شیمیایی، سایش و تر و خشک شدن به مقدار زیادی به پارامترهای ذاتی سنگ‌ها بستگی دارد. در این پژوهش، مطالعه ویژگی‌های کانی‌شناسی و پتروگرافی با تهیه مقطع نازک صیقلی مطابق با استاندارد ISRM (2007) انجام پذیرفت و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بر اساس مطالعات انجام شده بر روی مقطع نازک نمونه‌های معبد صخره‌ای داش‌کسن مشخص گردید که هر دو نمونه DKT1 و DKT2 متعلق به توف‌های سازند کرج به رنگ سبز روشن می‌باشند. به طور کلی در هر دو نمونه فوق، قطعات بلوری، شکل‌دار و نیمه شکل‌دار بوده و مقدار شکستگی‌ها و اندازه آن‌ها در این نمونه‌ها متفاوت است و جورشدگی ضعیف تا متوسط دارند. مجموعه کانی‌های ثانویه آلتراسیون شده مانند سرسیت، کانی‌های رسی، اکسید آهن در مقاطع نیز قابل مشاهده می‌باشد. شاردهای شیشه‌ای موجود در این توف‌ها اشکال مختلف جناغی، هلالی و داسی شکل دارند.

بر اساس مطالعه مقطع نازک میکروسکوپی، نمونه‌های سنگ نوشته‌های قبرستان تاریخی سجاس، ماسه سنگ آهکی و ماسه سنگ بسیار دانه ریز تشخیص داده شده‌اند. ذرات تشکیل دهنده نمونه SHC1، مخلوطی از ذرات تخریبی آهکی و کربناته هستند و نمونه SHC2 دارای جورشدگی خوب، ذرات دانه ریز و ۹۰ درصد از ترکیب آن را کانی کوارتز تشکیل داده است. . شکل ۳ نیز تصاویر میکروسکوپی از سنگ‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد که نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده در تصاویر نمایش داده شده است.

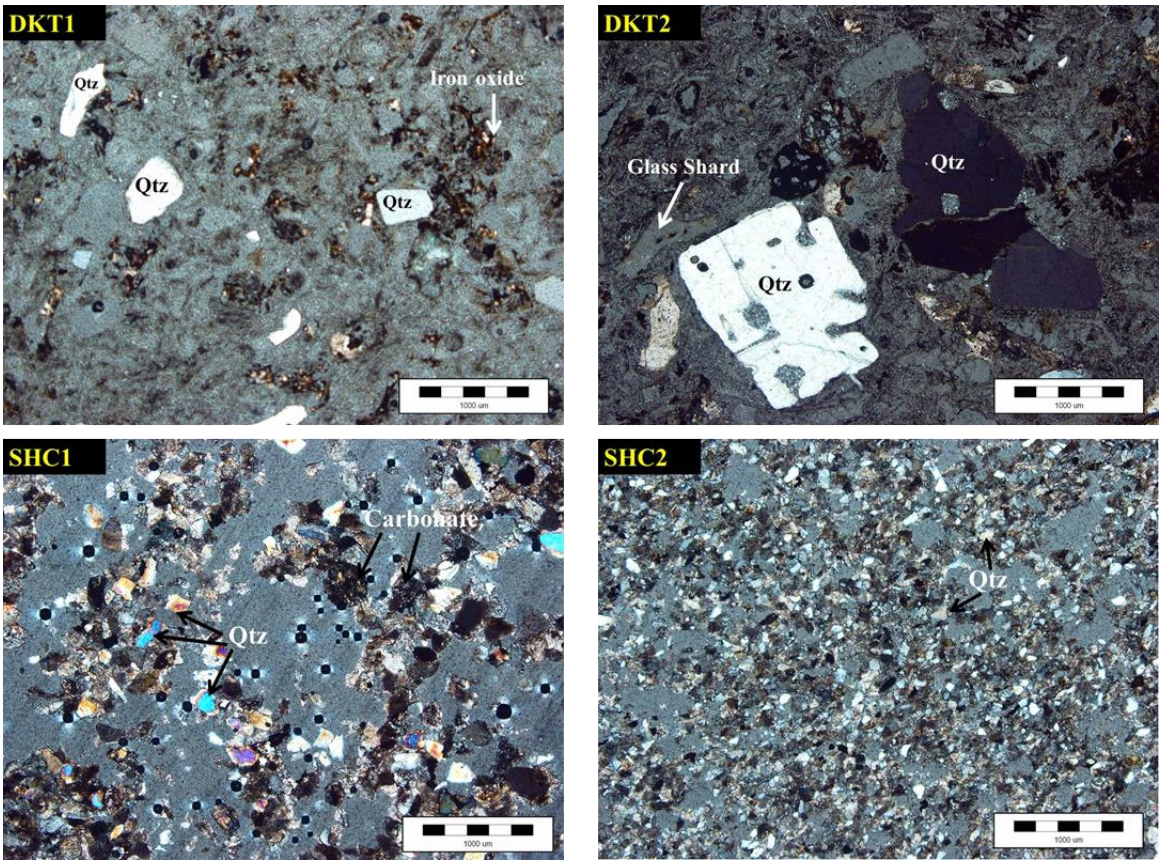
جدول ۱. خصوصیات کانی‌شناسی و بافت سنگ‌های مورد مطالعه

Table 1. Mineralogical characteristics and textures of the studied rocks

نمونه	نام سنگ	اندازه ذرات	زمینه (ماتریکس)	محتوای کانی‌شناسی
DKT1	کریستال‌ویتریک توف	دانه ریز	شیشه	کوارتز، شیشه، اکسیدهای آهن
DKT2	لیتیک ویتریک توف	دانه درشت	شیشه و خرده‌هایی از سنگ	کوارتز خلیجی شکی، شاردهای جناغی شکل، خرده سنگ آتشفشانی
SHC1	ماسه‌سنگ آهکی	متوسط	آهک	کوارتز، کربنات
SHC2	ماسه‌سنگ دانه ریز	بسیار دانه ریز	رس	کوارتز، کانی‌های رسی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه

Fig. 3. Microscopic images of the studied rock samples

۲- ویژگی‌های فیزیکی

با توجه به تأثیر ویژگی‌های فیزیکی بر روی دوام‌داری و زوال‌پذیری سنگ‌ها، ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه شامل وزن واحد حجم خشک، وزن واحد حجم اشباع، وزن مخصوص، تخلخل و جذب آب با استفاده از روش پیشنهادی ISRM (2007) تعیین شدند. برای این منظور، بعد از مغزه گیری از هر نمونه و تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی استوانه‌ای، با استفاده از شکل هندسی مشخص نمونه‌ها و به کمک روش اشباع سازی در آب، پارامترهای مذکور محاسبه شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های فیزیکی در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس طبقه‌بندی انون (Anon, 1979)، برای وزن واحد حجم و تخلخل، نمونه‌های مورد مطالعه در رده با وزن واحد حجم متوسط (۲/۲ تا ۲/۵۵ گرم بر سانتیمتر مکعب) و تخلخل متوسط (۵ تا ۱۵ درصد) قرار گرفته‌اند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه

Table 2. Physical characteristics of the studied rock samples

نمونه سنگ	مقدار	وزن واحد حجم خشک (γ_d) (g/cm^3)	وزن واحد حجم اشباع (γ_{sat}) (g/cm^3)	وزن مخصوص (G_s)	تخلخل (n) (%)	جذب آب (W_a) (%)
DKT1	Min.	2.23	2.35	2.54	11.06	4.82
	Max.	2.30	2.41	2.58	12.31	5.52
	Ave.	2.27	2.38	2.57	11.68	5.16
	S.D.	0.03	0.03	0.02	0.62	0.35
DKT2	Min.	2.22	2.35	2.54	10.99	4.85
	Max.	2.29	2.40	2.57	12.42	5.59
	Ave.	2.27	2.38	2.56	11.42	5.04
	S.D.	0.03	0.02	0.02	0.67	0.37
SHC1	Min.	2.26	2.38	2.58	11.50	5.01
	Max.	2.29	2.41	2.61	12.45	5.45
	Ave.	2.28	2.40	2.59	12.07	5.30
	S.D.	0.02	0.02	0.02	0.51	0.25
SHC2	Min.	2.27	2.55	2.55	10.06	4.39
	Max.	2.31	2.59	2.59	11.27	4.97
	Ave.	2.29	2.56	2.56	10.69	4.67
	S.D.	0.02	0.02	0.02	0.61	0.29

۳- دوام‌داری و زوال‌پذیری

در این پژوهش، آزمایش دوام-وارفتگی بر اساس روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 2007) انجام شده است. برای انجام این آزمایش، ۱۰ قطعه سنگ با وزنی در حدود ۴۰ تا ۶۰ گرم از نمونه‌ها تهیه شد، و در ۱۵ چرخه از آزمایش دوام-وارفتگی با آب معمولی، دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین با توجه به آن که در طبیعت هر دو فرآیند تر و خشک شدن و تبلور نمک می‌توانند به طور همزمان بر روی سنگ‌ها تأثیر گذاشته و هوازدگی آن‌ها را تشدید کند (Steiger et al., 2011)، ۱۵ چرخه نیز در محلول سولفات سدیم (۱۴ درصد وزنی) در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در چرخه‌های ۱۰ دقیقه‌ای و ۲۰ دور در دقیقه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفته و پس از خنک شدن وزن خشک آن‌ها تعیین گردید. شاخص دوام-وارفتگی (Id) محاسبه شده برای نمونه‌های مورد مطالعه در آب معمولی و محلول سولفات سدیم در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین در شکل ۴، تغییرات شاخص دوام-وارفتگی با تعداد چرخه‌های آزمایش برای حالت‌های آب معمولی و محلول سولفات سدیم نشان داده شده است. بر اساس طبقه‌بندی فرانکلین و چندرا (Franklin and Chandra, 1972) برای اولین چرخه همه نمونه‌ها در آب معمولی و محلول سولفات سدیم در رده شدیداً مقاوم (۹۵-۱۰۰ درصد) قرار گرفتند، همچنین بر اساس طبقه‌بندی گمبل (Gamble, 1971) برای دومین چرخه، نمونه SHC1 در آب معمولی و در محلول سولفات سدیم در رده کمی با دوام (۸۵-۹۵ درصد) قرار می‌گیرد و سایر نمونه‌ها در رده با دوام (۹۸- ۹۵ درصد) طبقه‌بندی می‌شوند. همانگونه که

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

مشاهده می‌شود با افزایش تعداد چرخه‌های آزمایش از مقدار شاخص دوام-وارفتگی کاسته می‌شود. نمونه‌های سنگ نوشته‌های تاریخی شهر سجاس افت وزنی بیشتری در محلول سولفات سدیم با افزایش چرخه‌ها دارند. این موضوع به دلیل تبلور نمک و وجود کانی‌های رسی و کربنات کلسیم در زمینه سنگ می‌باشد. شاخص دوام-وارفتگی نمونه SHC1 با افزایش تعداد چرخه‌های آزمایش شدیدتر می‌باشد، به‌طوری که در چرخه پانزدهم مقدار این شاخص به ۰/۱۸ درصد رسیده است. در شکل ۵ تصاویر نمونه‌های آزمایش دوام-وارفتگی قبل از انجام آزمایش و چرخه ۱۵ در آب معمولی و سولفات سدیم نشان داده شده است.

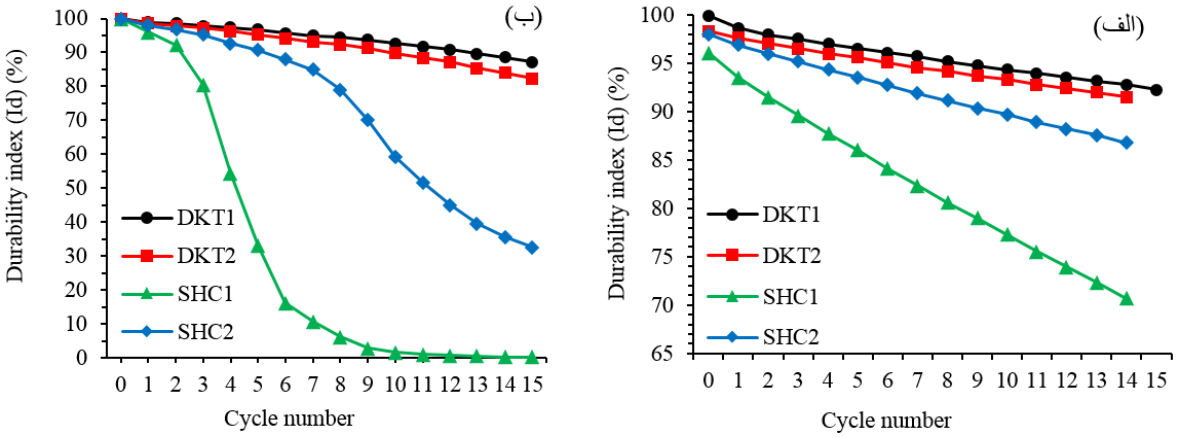
جدول۳. مقادیر شاخص دوام-وارفتگی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه

Table 3. Slake-durability index values of the studied rock samples

شماره چرخه	شاخص دوام ـ وارفتگی (%) Id							
	DKT1		DKT2		SHC1		SHC2	
	آب معمولی	سولفات سدیم	آب معمولی	سولفات سدیم	آب معمولی	سولفات سدیم	آب معمولی	سولفات سدیم
قبل از آزمایش	100	100	100	100	100	100	100	100
1	98.67	98.87	98.34	98.48	96.15	96.13	98.04	98.00
2	97.99	98.47	97.62	97.90	93.62	92.17	96.91	96.77
3	97.48	97.95	97.07	97.15	91.50	80.48	96.02	95.14
4	97.01	97.30	96.52	96.31	89.59	54.48	95.17	92.83
5	96.51	96.53	95.99	95.26	87.75	32.94	94.33	90.69
6	96.12	95.72	95.55	94.16	85.99	16.28	93.57	87.91
7	95.68	94.86	95.07	93.07	84.14	10.85	92.74	84.86
8	95.19	94.47	95.55	92.41	82.37	6.10	91.92	87.95
9	94.80	93.64	94.17	91.09	80.63	2.85	91.16	70.09
10	94.36	92.65	93.70	89.71	78.95	1.70	90.38	59.33
11	93.96	91.75	93.22	86.36	77.27	1.02	89.69	51.66
12	93.52	90.76	92.86	87.13	75.55	0.64	88.93	45.10
13	93.13	89.58	92.42	85.51	73.94	0.42	88.21	39.62
14	92.78	88.51	92.02	83.93	72.33	0.29	87.59	35.59
15	92.34	87.25	91.56	82.25	70.70	0.18	86.77	32.64

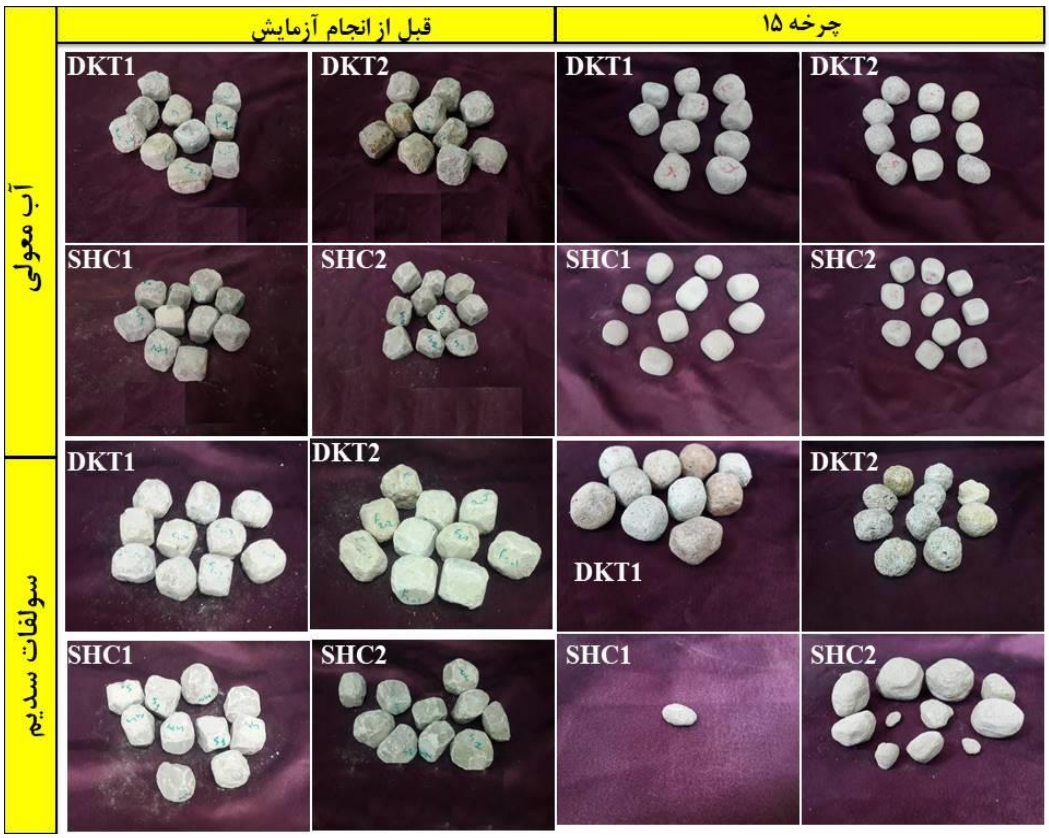
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]



شکل ۴. تغییرات شاخص دوام-وارفتگی با افزایش چرخه‌های آزمایش برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه در الف) آب معمولی و ب) محلول سولفات سدیم

Fig. 4. Changes in slake-durability index with increasing test cycles for the studied rock samples in a) normal water, and b) sodium sulfate solution



شکل ۵. تصاویر نمونه سنگ‌های مورد مطالعه در آزمایش دوام-وارفتگی قبل از انجام و بعد از چرخه ۱۵ آزمایش

Fig. 5. Images of the studied rock samples in the slake-durability test before and after the 15th test cycle

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

۴- مدل‌سازی ریاضی ارزیابی دوام-وارفتگی

در این پژوهش، از مدل ارائه شده توسط ماتلوتترک (Mutluturk et al., 2004) بر پایه دو پارامتر ثابت تخریب و نیمه عمر برای بیان دوام‌پذیری نمونه‌های مورد مطالعه تحت آزمایش مخرب تسریع شده دوام-وارفتگی استفاده شده است. اکثر محققین در تحقیقات اولیه خود از روش‌های کیفی برای بیان هوازدگی سنگ‌ها استفاده کرده‌اند و به دلیل عدم قطعیت‌هایی که در روش‌های کیفی وجود دارند، پژوهش‌ها به مرور زمان به سمت ارائه مدل‌های کمی و عددی در ارزیابی هوازدگی، سوق پیدا کرده‌اند. با پیشرفت هوازدگی در سنگ‌ها، تغییرات تدریجی در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها ایجاد می‌گردد که این تغییرات می‌توانند به عنوان روش کمی به منظور بیان هوازدگی، مورد استفاده قرار گیرند (Gupta and Ahmed, 2007). بررسی دوام طولانی مدت سنگ‌ها با استفاده از روش‌های عددی موجود برای ارزیابی دوام‌پذیری آزمایش‌های مخرب تسریع شده ناکافی می‌باشد (Altindag et al., 2004; Mutluturk et al., 2004; Benavente et al., 2004; Akin and Ozsan, 2011; Ghobadi and Babazadeh, 2014). تاکنون محققین زیادی از این مدل برای بیان دوام‌داری سنگ‌ها در شرایط آزمایشگاهی استفاده کرده‌اند (Altindag et al., 2004; Mutluturk et al., 2004; Benavente et al., 2004; Akin and Ozsan, 2011; Yagiz, 2011; Jamshidi et al., 2013; Ghobadi and Babazadeh, 2014; Ghobadi and Fereidooni, 2015; Ghobadi et al., 2016; Fereidooni and Khajevand, 2018; Kolay, 2016; Zalooli et al., 2018; Eslami et al., 2018). این مدل با استفاده از تحلیل‌های رگرسیونی فرض می‌کند که نرخ از دست دادن یکپارچگی سنگ به علت فرآیندهای هوازدگی متناسب با یکپارچگی سنگ در شروع هر چرخه می‌باشد. رابطه ۱ معادله این مدل را نشان می‌دهد:

$$-\left(\frac{dI}{dN}\right) = \lambda I \qquad (۱)$$

در این رابطه، $\left(\frac{dI}{dN}\right)$ عبارت است از نرخ تخریب، λ ثابت تخریب، I یکپارچگی یا پیوستگی سنگ و N تعداد چرخه‌های آزمایش می‌باشد. علامت منفی رابطه نیز نشان دهنده افت یکپارچگی سنگ (تخریب سنگ) است. اگر یکپارچگی اولیه سنگ با I_0، و یکپارچگی سنگ بعد از N چرخه با I_N نشان داده شود، با استفاده از انتگرال‌گیری از رابطه فوق، بین یکپارچگی اولیه سنگ (I_0) و یکپارچگی پس از N چرخه (I_N) رابطه زیر به صورت لگاریتمی بدست می‌آید:

$$\int_{I_0}^{I_N}\left(\frac{dI}{dN}\right) = \lambda I \rightarrow ln\left(\frac{I_0}{I_N}\right) = \lambda N \qquad (۲)$$

در حالت نمایی، رابطه فوق به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$I_N = I_0 e^{-\lambda N} \qquad (۳)$$

در این رابطه، $e^{-\lambda N}$ فاکتور تخریب نامیده می‌شود که نشان دهنده مقدار یکپارچگی باقیمانده پس از N چرخه از آزمایش است و پارامتر ثابت تخریب (λ)، میانگین افت یکپارچگی در هر چرخه می‌باشد. در پژوهش حاضر، ثابت تخریب و نیمه عمر نمونه‌های مورد مطالعه در ۱۵ چرخه از آزمایش دوام-وارفتگی آب معمولی، ۱۵ چرخه در محلول سولفات سدیم مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۴ نتایج حاصل از این بررسی‌ها شامل روابط نمایی شاخص دوام-وارفتگی با تعداد چرخه‌های آزمایش، ضریب همبستگی، ثابت تخریب و نیمه عمر نمونه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. همه نمونه‌های مورد مطالعه در این مدل، در ۱۵ چرخه آب معمولی و محلول سولفات سدیم، دارای ضریب همبستگی قابل قبولی می‌باشند. نمونه‌های مورد مطالعه در

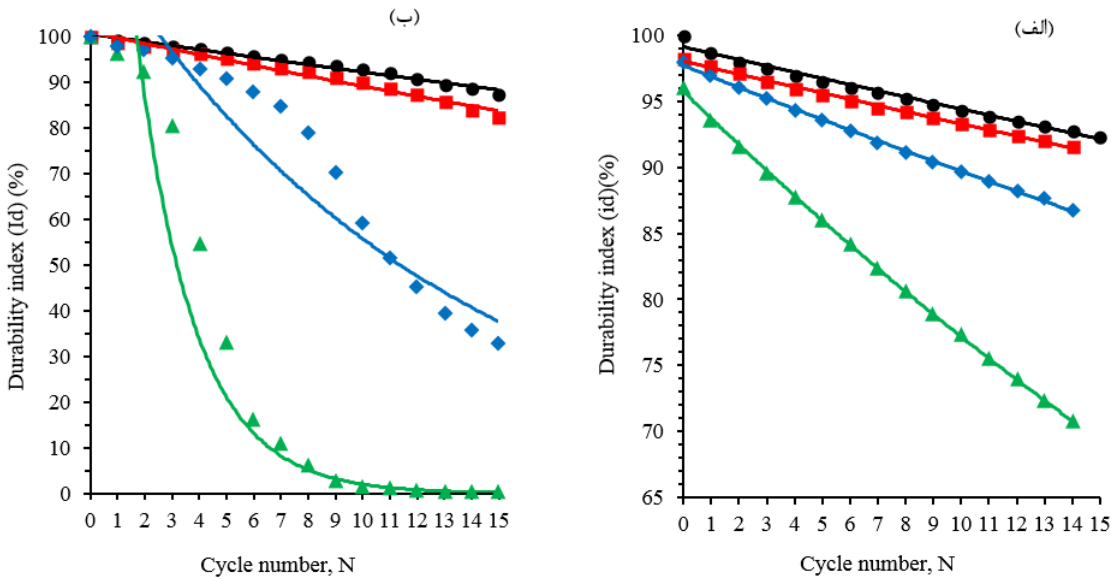
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

محلول نمکی دارای نیمه عمر پایین‌تر و نرخ تخریب بالایی دارند و در آب معمولی نیمه عمر بالاتر و نرخ تخریب کمتر است. طولانی‌ترین نیمه عمر در آب معمولی یعنی ۱۳۸/۶ چرخه متعلق به نمونه‌های معبد داش‌کسن (DKT1, DKT2) می‌باشند و نمونه SHC2 با مقدار ۳۱/۵ چرخه، دارای کمترین نیمه عمر است. در محلول سولفات سدیم، نمونه DKT1 دارای نیمه عمر طولانی‌تری می‌باشد (۷۷ چرخه) و نمونه SHC1 کمترین نیمه عمر را دارد (۱/۵ چرخه). در شکل‌های ۶ و ۷ نمودار تابع تخریب و نمودار میله‌ای نیمه عمر بر پایه شاخص دوام-وارفتگی نمونه‌ها ارائه شده است.

جدول ۴. مقادیر ثابت تخریب، نیمه عمر، ضریب همبستگی و روابط نمایی شاخص دوام-وارفتگی با تعداد چرخه‌ها در آزمایش برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه

Table 4. Degradation constant values, half-life, correlation coefficient, and exponential relationships of slake-durability index with the number of cycles in the test for the studied rock samples

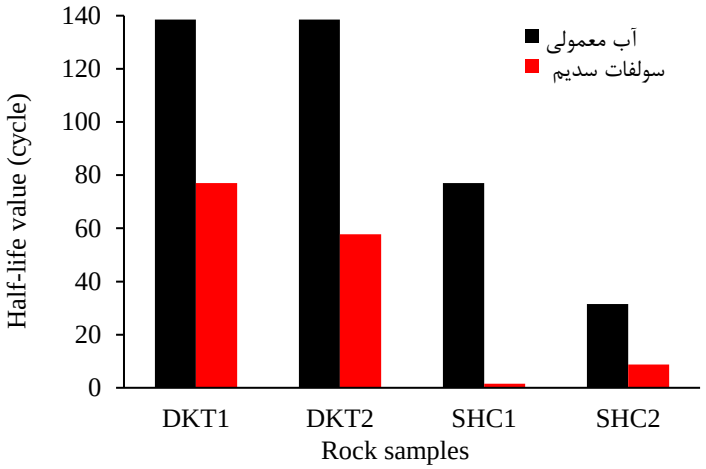
شرایط آزمایش	نمونه	رابطه شاخص دوام با تعداد چرخه‌ها	ضریب همبستگی (R^2)	ثابت تخریب (λ)	نیمه عمر ($N_{½}$)
آب معمولی (۱۵ چرخه)	DKT1	$Id = 99.125e^{-0.005N}$	0.98	0.005	138.6
	DKT2	$Id = 98.032e^{-0.005N}$	0.99	0.005	138.6
	SHC1	$Id = 97.709e^{-0.009N}$	0.99	0.009	77.00
	SHC2	$Id = 95.761e^{-0.022N}$	0.99	0.022	31.50
محلول سولفات سدیم (۱۵ چرخه)	DKT1	$Id = 100.52e^{-0.009N}$	0.98	0.009	77.00
	DKT2	$Id = 100.91e^{-0.012N}$	0.98	0.012	57.80
	SHC1	$Id = 223.7e^{-0.472N}$	0.98	0.472	1.50
	SHC2	$Id = 122.29e^{-0.079N}$	0.90	0.079	8.80



شکل ۶. نمودار ثابت تخریب نمونه سنگ‌های مورد مطالعه در آزمایش دوام ـ وارفتگی در الف) آب معمولی و ب) محلول سولفات سدیم

Fig. 6. Degradation constant diagram of the studied rock samples in the slake-durability test in a) normal water, and b) sodium sulfate solution

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]



شکل ۷. نمودار میله‌ای مقادیر نیمه عمر نمونه سنگ‌های مورد مطالعه بر پایه شاخص دوام-وارفتگی

Fig. 7. Bar diagram of half-life values of the studied rock samples based on the slake-durability index

نتیجه‌گیری

از نظر زمین‌شناسی معبد صخره‌ای داش‌کسن بر روی سازند کرج به جنس توف ساخته شده است. به لحاظ سنگ‌شناسی، نمونه‌ی DKT1 دارای تراکم زیاد و ذرات دانه‌ریز و نمونه DKT2 دارای ذرات درشت‌دانه با قطر بین ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر می‌باشند، هر دو نمونه به رنگ سبز روشن هستند. با مطالعه مقطع نازک این نمونه‌ها، مشخص گردید کانی غالب هر دو نمونه کوارتز است و دارای کانی‌های ثانویه آلتراسیون شده می‌باشند. نمونه‌های سنگ نوشته‌های تاریخی شهر سجاس از نظر زمین‌شناسی طبق بررسی‌های انجام شده از کوه‌های سلطانیه و شمالی سنگ نوشته‌ها می‌باشند. با مطالعه مقطع نازک، نمونه SHC1 ماسه سنگ آهکی و نمونه SHC2 ماسه سنگ بسیار دانه‌ریز تشخیص داده شد. کانی غالب هر دو نمونه که بیش ۹۰ درصد آن‌ها را تشکیل می‌دهد کوارتز می‌باشد که در زمینه سست آهکی و رسی قرار دارد. از نظر دوام‌داری هر دو نمونه معبد داش‌کسن، در آب معمولی و محلول سولفات سدیم مطابق با طبقه‌بندی‌های فرانکلین و چندرا (Fraklin and Chandra, 1972) و گمبل (Gambel, 1971) برای اولین و دومین چرخه آزمایش دوام-وارفتگی به ترتیب در رده شدیداً مقاوم و با دوام قرار می‌گیرند. دوام‌داری نمونه‌های سنگ نوشته‌های تاریخی سجاس، مطابق با طبقه‌بندی فرانکلین و چندرا برای اولین چرخه آزمایش دوام-وارفتگی هم در آب معمولی و هم در محلول سولفات سدیم در رده شدیداً مقاوم قرار می‌گیرند. طبق رده‌بندی گمبل برای دومین چرخه آزمایش دوام-وارفتگی، در آب معمولی، نمونه‌ها در رده با دوام و در محلول سولفات سدیم، نمونه SHC1 در رده کمی با دوام و نمونه SHC2 در رده با دوام قرار دارند. به دلیل وجود دانه‌های کوارتز در سیمان و زمینه مختلف، شاخص دوام-وارفتگی هر نمونه متفاوت است، به طوری که نمونه‌های سنگ نوشته‌های تاریخی به دلیل وجود کوارتز در سیمان آهکی و رسی، شاخص دوام-وارفتگی پایین‌تری نسبت به نمونه‌های معبد صخره‌ای داش‌کسن داشته‌اند. با مطالعه خصوصیات فیزیکی تأثیرگذار بر دوام‌داری سنگ‌ها مطابق با طبقه‌بندی آنون (Anon, 1979) نمونه‌های مورد مطالعه دارای وزن واحد حجم و تخلخل متوسط می‌باشند. نتایج آزمایش دوام-وارفتگی نشان می‌دهد که با افزایش چرخه‌های آزمایش،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

شاخص دوام-وارفتگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد و نرخ این کاهش در محلول سولفات سدیم بیشتر از آب معمولی است، که این موضوع تبلور نمک و تأثیر آن بر روی هوازدگی و زوال‌پذیری این سنگ‌ها را نشان می‌دهد. با ایجاد یک همبستگی بین پارامترهای مختلف نمونه SHC1 به دلیل جذب آب و تخلخل بیشتر، شاخص دوام-وارفتگی پایین‌تری در آب معمولی دارد و به دلیل تبلور نمک در داخل این نمونه، شاخص دوام-وارفتگی و نیمه عمر بسیار پایین‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته و این نمونه در محلول سولفات سدیم ناپایدار است.

منابع

هاشمی، م.، ۱۳۹۷. بررسی ویژگی‌های مهندسی آثار تاریخی سنگی جنوب استان زنجان با تأکید بر دوام‌داری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه دامغان، ۱۴۹ صفحه.

Akin, M., Ozsan, A., 2011. Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests. Bull Eng Geol Environ, 70: 101–114.

Altindag, R., Alyildiz, I.S., Onargan, T., 2004. Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze–thaw cycles. Int. J. Rock Mec. Min. Sci, 41: 1023–1028.

Andriani, G. F., Walsh, N., 2007. The effects of wetting and drying, and marine salt crystallization on calcarenite rocks used as building material in historic monuments. In: Pikryl, R. 8z Smith, B. J., (eds), Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation. Geological Society, London, Special Publications, 271, 179–188.

Anon, 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1: Rock and soil materials, Bulletin International Association Engineering Geology, 19, 355–371.

Benavente, D., Garcia-del-Cura, M.A., Fort, R., Ordonez, S., 2004. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. Eng Geol, 74, 113–127.

Cassar, J., 2010. The use of limestone in a historic context—the experience of Malta. In: Smith, B.J., Gomez-Heras, M., Viles, H. & Cassar, J. (eds) Natural Stones, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. Geological Society, London, Special Publications, 331, 13–25.

Danaei, S., Fereidooni, D., 2023. On the importance of specimen's geometric shape effects on the slake-durability index of limestones and grain size distribution of the sediment particles obtained during the test. Construction and Building Materials, 394, 132205.

Dhakal, G., Yoneda, T., Kato, M., Kaneko, K., 2002. Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks., Engineering Geology, 65, 31–45.

Diamantis, K., Fereidooni, D., Khajevand, R., Migiros, G., 2021. Effect of textural characteristics on engineering properties of some sedimentary rocks. J Cent South Univ, 28, 926–938.

Eslami, J., Walbert, Ch., Anne-Lise Beaucour., Ann Bourges, b.,c., Noumowe, A., 2018. Influence of physical and mechanical properties on the durability of limestone subjected to freeze-thaw cycles. Construction and Building Materials 162, 420–429.

Fereidooni, D., Khajevand, R., 2018. Correlations Between Slake-Durability Index and Engineering Properties of Some Travertine Samples Under Wetting–Drying Cycles. J Geotech Geol Eng, 36, 1071–89.

Fereidooni, D., Khajevand, R., 2018. Correlations between slake-durability index and engineering properties of some travertine samples under wetting–drying cycles. Geotechnical and Geological Engineering, 36, 1071–1089.

Fereidooni, D., Sousa, L., 2022. Predicting the Engineering Properties of Rocks from Textural Characteristics Using Some Soft Computing Approaches. Materials, 15(22), 7922.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

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

Gamble, J.C., 1971. Durability-plasticity clasificaion of shale and other argillaceous rocks. Ph.D Theses, University of Illinois, Urabana.

Ghobadi, M. H., Taleb Beydokhti, A. R., Nikudel, M. R., Asiabanha, A., Karakus, M., 2016. The effect of freeze–thaw process on the physical and mechanical properties of tuff. J Environ Earth Sci, 75, 846.

Ghobadi, M., Babazadeh, R., 2014. Experimental studies on the effects of cyclic freezing-thawing, salt crystallization, and thermal shock on the physical and mechanical characteristics of selected sandastones. Rock Mech Rock Eng, 48, 1001–1016.

Ghobadi, M.H., Fereidooni D., 2015. Effect of mineralogy on durability and strength of hornfelsic rocks under acidic rainfall in urban areas., Journal of Engineering Geology, Kharazmi University 9(2), 2765–2788.

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. Eng Geo., l 95, 79–87.

Heidari, M., Torabi-Kaveh, M., Chastre, C., Ludovico-Marques, M., Mohseni, H., Akefi, H., 2017. Determination of weathering degree of the Persepolis stone under laboratory and natural conditions using fuzzy inference system. J Construction and Building Materials, 145, 28–41.

ISRM, 2007. The Blue Book: The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. 1974-2006, Ulusay, R., and Hudson, J.A., (eds), Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, Kazan Offset Press, Ankara.

Jamshidi, A., Nikudel, M. R., Khamehchiyan, M., 2013. Predicting the long-term durability of building stones against freeze–thaw using a decay function model., J Cold Regions Science and Technology, 92, 29–36.

Khajevand, R., Fereidooni, D., 2022. The effects of water acidity and engineering properties on rock durability. Earth Sciences Research Journal, 26(1), 69–82.

Kolay, E., 2016. Modeling the effect of freezing and thawing for sedimentary rocks. J Env Earth Sci, 75, 210.

Lashkaripour, G.R., Boomeri, M., 2002. The role of mineralogy on durability of weak rocks. Pak. J. Appl. Sci., 2–6, 698–701.

Mutluturk, M., Altindag, 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., International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41, 237–244.

Nadeesha H. Koralegedara, J. Barry Maynard., 2017. Chemical, mineralogical and textural properties of the Kope Formation mudstones: How they affect its durability. Engineering Geology, 228, 312–322.

Ozbek, A., 2013. Investigation of the effects of wetting–drying and freezing–thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites. Bull Eng Geol Environ, 73(2), 595–609.

Shadmon, A., 1996. Stone – A Introduction, 2nd ed. Intermediate Technology Publications, London.

Smith, M.R., 1999. Stone: Building Stone, Rock Fill and Armourstone in Construction. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 16.

Steiger, M., Charola, AE., Sterflinger, K., 2011. Weathering and Deterioration. In: Siegesmund, S., Snethlage, R., (eds), Stone in architecture: properties, durability, 4th edn. Springer, Berlin, 227–316.

Torok, A., Prikryl, R., 2010. Current methods and future trends in testing, durability analyses and provenance studies of natural stones used in historical monuments, Engineering Geology, 115, 139–142.

Yagiz, S., 2011. Correlation between slake durability and rock properties for some carbonate rocks. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70, 377–83.

Zalooli, A., Khamehchiyan, M. and Nikudel, M.R., 2019. Durability assessment of Gerdoi and red travertines from Azarshahr, East Azerbaijan province, Iran. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78, 1683–1695.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

Investigating the effect of weathering on the durability and deterioration of historical stone monuments in the south of Zanjan province

Mehdi Hashemi[1], Davood Fereidooni[2]*

1. M.Sc. Student, Department of Applied Geology, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran
2. Associate Professor, Department of Applied Geology, School of Earth Sciences, Damhan University, Damghan, Iran

Received: 31 May 2023 Accepted: 11 Aug 2023

Abstract

In this research, the durability and deterioration of two historical stone monuments, including the Dashkasan rock temple and the historical stone inscriptions of the Sojas cemetery in the south of Zanjan province, were investigated. For this purpose, two stone block samples were selected from each historical work for laboratory study. Based on the geological investigations, the historical monuments of the Dashkasan rock temple were carved on tuffs of the Karaj Formation. According to the thin section study, the Dashkasan temple rocks composed of the crystal vitric tuff and lithic vitric tuff and the samples of the historical inscriptions of the Sojas cemetery were limestone and very fine-grained sandstone, quartz being the dominant mineral of these rocks. In terms of physical characteristics, the samples studied have medium density and porosity. In terms of durability and deterioration, all four samples were subjected to 15 cycles of the slake durability test in normal water and sodium sulphate solution. The degradation function model and half-life of all four samples were determined and analysed. The results show that all four samples have a lower slake-durability index in sodium sulphate solution than in normal water. Due to the presence of quartz in lime or clay matrix, the samples of historical stone inscriptions from Sojas cemetery have more water absorption and porosity and are more durable, and their half-life is lower than the samples from Dashkasan rock temple.

Keywords: Dashkasan rock temple, Sojas historical cemetery, Stone monuments, Slake-durability, weathering.

Introduction

Historic monuments are considered part of the world's cultural heritage and are made of various types of natural stone. Over time, the stones that make up historic monuments are affected by weathering, erosion, destruction and natural hazards. Destruction and weathering are the main multidimensional and unavoidable destructive factors in historical works that are created in the vicinity of weather and environmental conditions. In Iran, there are valuable historical buildings that are exposed to natural hazards and can be severely damaged by these hazards. The weathering of stones, either physically, which affects the physical and mechanical properties of the stones, or chemically, which causes the decomposition and dissolution of the minerals that make up the stones, as a natural process, is the most important factor controlling the durability and deterioration of the stones that make up the works.

*Corresponding author: d.fereidooni@du.ac.ir
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.2.101186

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]

The rate of weathering of historic monuments depends on the nature and characteristics of the parent rock (mineralogical composition, texture, physical, and mechanical and durability properties) and the environmental conditions (climatic characteristics, regional climate, topography and human factors). Therefore, the knowledge of the technical characteristics and the execution of engineering geological studies in historical and ancient works for the stones that make up these works help us to preserve, maintain and improve them.

Methodology

In the present research, in order to investigate the durability and deterioration of historical stone monuments in the south of Zanjan Province, after the desk studies including geographical location, age, type of building stone, etc., a field visit was made to the mentioned areas. Four stone block samples were selected, two of which were related to the inscriptions of Sojas historical cemetery and were among the broken and unusable samples of the inscriptions themselves. In addition, two samples from the Dashkasan Temple were prepared from the area and a site close to this historical monument. After the samples were transferred to the laboratory, the first step was to carry out microscopic studies to determine the mineralogical composition and texture of the rocks studied. The physical properties of these samples were then calculated using the laboratory samples prepared. These samples were also subjected to the slake-durability test of 15 cycles in normal water and 15 cycles in sodium sulphate solution. Finally, using mathematical modelling, the model of degradation function and half-life of the studied samples was presented.

Results and discussion

Based on the thin section studies of the Dashkasan Rock Temple samples, it was determined that both samples belong to the light green tuffs of the Karaj Formation. Based on the study of microscopic thin sections, the samples of inscriptions in the historical cemetery of Sejas were identified as calcareous sandstone and very fine-grained sandstone. The samples studied belong to the category of medium unit weight and porosity. According to the classification of Franklin and Chandra (1972), all samples were classified as highly resistant in normal water and sodium sulphate solution. Also according to Gamble's (1971) classification, the sample from SHC1 is classified as slightly resistant in normal water and sodium sulphate solution and the other samples are classified as resistant. As the number of test cycles increases, the value of the durability index decreases. The samples studied have a lower half-life and a high degradation rate in saline solution, and a higher half-life and a lower degradation rate in normal water.

Conclusions

In terms of durability, both the Dashkesen temple samples in normal water and sodium sulphate solution are in the highly durable category according to the classifications of Franklin and Chandra (1972) and Gambel (1971) respectively. According to Franklin and Chandra's (1972) classification, the Soja historical stone inscriptions are classified as extremely durable in both normal water and sodium sulphate solution. According to Gamble's (1971) classification, in normal water the samples are in the durable category and in sodium sulphate solution the sample of SHC1 is in the slightly durable category and the sample of SHC2 is in the durable category. The samples studied in salt solution have a lower half-life and a higher degradation rate, and in normal water the half-life is higher and the degradation rate is lower.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.101186]