Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Investigating the role of physical and strength characteristics on the durability of building stones subjected to deterioration processes

Amin Jamshidi[1]✉

1. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: Jamshidi.am@lu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 23 October 2024
Received in revised form 10 December 2024
Accepted 13 December 2024

Keywords:
Building stone, Deterioration, Durability, Physical and strength characteristics.

ABSTRACT

The durability of a building stone is its resistance to deterioration processes under the climatic conditions of a given geographical area. This parameter plays an important role in the selection of a suitable building stone, as ignoring it can lead to premature deterioration of the stone during the life of a building. Therefore, before selecting a building stone, it is necessary to pay special attention to its durability and to select a stone that has a suitable resistance to environmental degradation processes. The physical and strength characteristics are among the factors that influence the durability of a building stone. The evaluation of these characteristics can provide valuable information about the durability of stone subjected to deterioration processes. In this work, the effects of physical and strength characteristics on the durability of building stones were investigated. The results indicate that porosity, water content, degree of saturation and pore size distribution are the most important physical characteristics determining the durability of a building stone. In addition, strength properties, including uniaxial compressive strength, tensile strength, flexural strength and abrasion resistance, also play an important role in the durability of a building stone. The results of the present study can be used as a simple, quick, inexpensive and practical tool to indirectly evaluate the durability of building stone against environmental degradation processes.

Introduction

In some cases, masonry is subject to deterioration during its life in a building. Climatic conditions and the location where the stone is used determine the nature of the deterioration process. The resistance of the stone to deterioration processes can be assessed with the durability parameter. Undoubtedly, when a building stone is exposed to a deterioration process, its inherent characteristics undergo some changes. A smaller change in the inherent characteristics indicates a better durability of the stone and vice versa. Therefore, in order to select a suitable and high quality building stone, it is necessary to study its durability. This will lead to an increase in the service life of the stone in a building.In order to assess durability more accurately, the study of the factors that influence durability can be of great help in selecting a higher quality stone for use in a particular location in a building and under particular climatic conditions. In the present study, the effects of inherent characteristics, including physical and strength characteristics, on the durability of building stones against deterioration processes were investigated. The results of this work can be used as a quick and inexpensive tool for preliminary assessment of the durability of building stones.

Materials and methods

This paper presents a comprehensive review of previous studies on various aspects of the durability of masonry exposed to deterioration processes such as freeze-thaw, salt crystallization, heat-cool, wet-dry, acid and alkaline solutions. A systematic method was used to analyze the data from previous studies

Cite this article: Jamshidi, A. (2024). Investigating the role of physical and strength characteristics on the durability of building stones subjected to deterioration processes. Journal of Engineering Geology, 18 (4), 543-564. https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.1016407

© The Author(s).

Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.1016407

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

from an innovative perspective. Based on the data analysis, the effects of physical properties (porosity, water content, degree of saturation and pore size distribution) and strength properties (uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, flexural strength and abrasion resistance) on the durability of building stones were investigated.

Discussion

The role of physical characteristics in the durability of building stone

Porosity: A building stone with a higher porosity has more pore space. Therefore, the contact surface of the stone matrix (i.e., the solid part) exposed to water/fluid is greater. This can lead to an increase in the adverse effects of the deterioration process (especially the chemical deterioration process).

Water content: Water content plays a critical role in the durability of stone in two ways. Water facilitates the lubrication and softening of the stone's constituents (particularly clay minerals). These processes facilitate the failure of the stone under external stresses caused by deterioration processes such as salt crystallization and freeze-thaw.Saturation degree: In addition to the role of the degree of saturation on the strength characteristics, it also directly controls the durability behaviour of the stone against deterioration processes. The intensity of stone deterioration due to the freeze-thaw process is significantly dependent on the degree of saturation. The water in the pore space of the stone becomes ice when the temperature drops below 0°C. This is associated with a 9% increase in volume, resulting in stress on the pore wall. When the ice crystallizes in pores with a degree of saturation above 91%, significant stress is induced in the pore wall. In addition, when the degree of saturation is less than 91%, the pores have some free space for volume increase due to the transformation of water into ice. Under these conditions, the intensity of the stress imposed on the pore wall is less than when the degree of saturation is greater than 91%.

Pore size distribution: The pore network plays a significant role in the durability of building stone against deterioration processes that occur in the presence of water/fluid. In general, the susceptibility of a stone to the freeze-thaw process increases as the number of fine pores increases. Stones with finer pores are also less resistant to salt crystallization than those with larger pores.

The role of strength characteristics in the durability of building stone

Processes such as freeze-thaw, salt crystallization, wet-dry, heat-cool and the activity of organisms create stresses in the body of a stone. In some cases, the stresses caused by these processes can lead to deterioration of the stone. The durability of a stone under the stresses of freeze-thaw and salt crystallization is a function of its mechanical properties, particularly those related to the strength of the stone. If the strength of the stone is low so that it cannot withstand the stresses imposed by the deterioration processes, the stone may undergo pore modification, which will result in its disintegration. In terms of durability, the strength of a stone is a measure of its resistance to stress induced by deterioration processes. The greater a stone's resistance to stress, the greater its durability against deterioration.

Conclusions

The physical and strength characteristics play significant roles in the durability of building stone subjected to environmental deterioration processes (such as freeze-thaw, salt crystallization, heat-cool, wet-dry, and the activity of organisms). According to the data analysis, an increase in porosity, water content and saturation degree and a decrease in pore size significantly reduce stone durability during deterioration processes. On the other hand, the stone strength has a critical effect on the stone so that with increasing uniaxial compressive

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

strength, Brazilian tensile strength, flexural strength, abrasion strength, and point load index, the stone durability increases.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]

[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

بررسی نقش خصوصیات فیزیکی و مقاومتی بر دوام سنگ‌های ساختمانی در برابر فرآیندهای زوال

امین جمشیدی [۱] ✉

۱. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، نام دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: jamshidi.am@lu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳

کلیدواژه‌ها:
سنگ ساختمانی، زوال، دوام، خصوصیات فیزیکی و مقاومتی.

چکیده

دوام سنگ ساختمانی به استقامت آن در برابر فرآیندهای زوال تحت شرایط اقلیمی حکم‌فرما بر منطقه جغرافیایی گفته می‌شود. این پارامتر در انتخاب سنگ ساختمانی مناسب نقش بسزایی دارد به طوری که نادیده گرفتن آن می‌تواند منجر به زوال زود هنگام سنگ در طی مدت سرویس‌دهی در ساختمان شود. بنابراین قبل از انتخاب سنگ ساختمانی، ضروری است توجه ویژه‌ای به دوام آن شود و سنگی انتخاب شود که دوام لازم در برابر فرآیندهای زوال محیطی را داشته باشند. از فاکتورهای تأثیرگذار بر دوام سنگ ساختمانی می‌توان به خصوصیات فیزیکی و مقاومتی اشاره کرد. ارزیابی این خصوصیات اطلاعات با ارزشی در زمینه دوام سنگ در برابر فرآیندهای زوال فراهم خواهد کرد. در مقاله حاضر به بررسی نقش خصوصیات فیزیکی و مقاومتی بر دوام سنگ ساختمانی پرداخته شده است. نتایج دلالت بر این دارد که تخلخل، محتوای آب، درجه اشباع و توزیع اندازه منافذ از شاخص‌ترین خصوصیات فیزیکی تعیین کننده دوام سنگ ساختمانی هستند. از سوی دیگر، خصوصیات مقاومتی شامل مقاومت‌های فشاری تک‌محوری، کششی برزیلین، خمشی و سایشی نیز نقش برجسته‌ای بر دوام سنگ ساختمانی دارند. یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند به عنوان یک ابزار ساده، سریع، کم هزینه و کاربردی برای ارزیابی غیر مستقیم دوام سنگ ساختمانی در برابر فرآیندهای زوال محیطی مورد استفاده قرار گیرند.

مقدمه

سنگ یکی از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی است که انسان از زمان ماقبل تاریخ از آن به‌عنوان ابزار کار، اسلحه و مصالح ساخت سرپناه استفاده کرده است. بناهای باستانی به‌جامانده از دوران قدیم همچون اهرام ثلاثهٔ مصر، آثار قدیمی یونان، کاخ‌ها و میدان‌های ورزشی امپراتوری رم در کشور ایتالیا، ساختمان‌هایی مانند پاسارگاد، پرسپولیس و شوش و آرامگاه بوعلی‌سینا و نادرشاه در ایران، که همگی با قطعات سنگی بسیار بزرگ، گاهی با وزن بیشتر از ۳۰ تن، ساخته شده‌اند نشان‌دهندهٔ استفادهٔ فراوان از سنگ در فعالیت‌های ساختمانی، معماری و بناهای باستانی دوران گذشته است (شکل ۱).

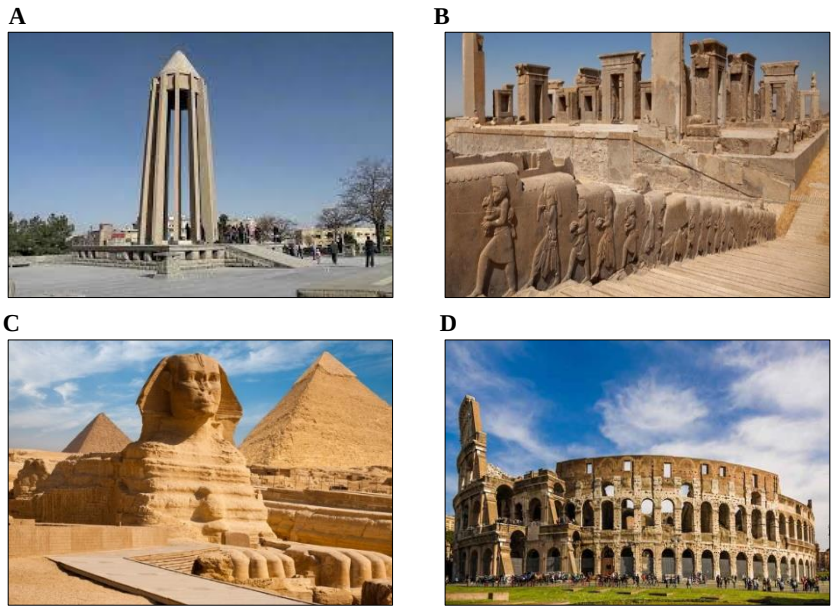
به دلیل فراوانی ذخایر و در دسترس بودن، امروزه استفاده از سنگ در محیط‌های پیرامون زندگی انسان جایگاه ویژه و منحصربه‌فردی پیدا کرده است. کاربری‌های مختلف سنگ در ساختمان‌های مسکونی، اداری و تجاری برای نما، کف‌پوش، سنگ‌فرش، سنگ پله، دیوار پوش، اجزای دیوار باربر، در پروژه‌های مهندسی برای سازهٔ حفاظتی مجاور آب، زیرسازی مسیر راه‌آهن، دیوار نگهدارندهٔ مسیر جاده‌ها، سنگ‌دانهٔ بتن، فعالیت‌های معماری برای مصالح ساخت مجسمه و تندیس و درنهایت به‌عنوان مصالح مرمتی در بناهای باستانی، برخی از موارد استفادهٔ سنگ توسط انسان است (شکل ۲). یکی از دلایل استفادهٔ فراوان سنگ، دوام آن

استناد: جمشیدی، ا. (۱۴۰۳). بررسی نقش خصوصیات فیزیکی و مقاومتی بر دوام سنگ‌های ساختمانی در برابر فرآیندهای زوال. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۴)، ۵۴۳-۵۶۴. https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.1016407

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

در برابر فرایندهای زوال محیطی است، در صورتی که سایر مصالح ساختمانی مانند سیمان، بتن، آجر، ملات، چوب و شیشه این ویژگی را به خوبی سنگ ندارند و بنابراین عمر سرویس‌دهی آن‌ها در مقایسه با سنگ کمتر است.



شکل ۱. استفاده از سنگ در بناهای باستانی A) آرامگاه بوعلی‌سینا (همدان، ایران) B) پرسپولیس (فارس، ایران) C) اهرام ثلاثه (مصر) D) تماشاخانه کولوسئوم (ایتالیا)

Fig. 1. The use of stone in ancient monuments A) Tomb of Bu-Ali Sina (Hamedan, Iran) B) Persepolis (Fars, Iran) C) Third Pyramids (Giza) D) Colosseum Amphitheatre (Italy)

شکل ۲. برخی کاربردهای سنگ ساختمانی در ساختمان‌های مدرن A) پوشش داخلی و کف‌پوش B) پوشش بام C) سنگ‌فرش D) سنگ پله

Fig. 2. Some uses of building stone in modern buildings A) Internal façade and flooring B) Roofing tile C) Paving D) Stair

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.10116407]

سنگ‌ها در طول مدت سرویس‌دهی در ساختمان همواره در معرض فرایندهای زوال هستند. شرایط اقلیمی و مکان کاربرد سنگ تعیین‌کنندهٔ نوع فرایند زوال است. انجماد و آب شدن، تبلور نمک، گرم و سرد شدن، تر و خشک شدن، رطوبت و فعالیت ارگانیسم‌ها از متداول‌ترین فرایندهای زوال هستند که بیشترین تأثیر را در تخریب و تجزیه سنگ ساختمانی دارند. اگر سنگ استقامت کافی در برابر این فرایندها را نداشته باشد، بعد از مدتی کارآیی خود را از جنبه‌های مختلف همچون خصوصیات زیباشناختی و فنی از دست می‌دهد و به ساختمان خسارت وارد می‌شود. در شکل (۳) آسیب زیباشناختی به نمای ساختمان به دلیل اثر آلاینده‌های اتمسفری و شوره‌زدگی نمک نشان داده شده است. استقامت سنگ در برابر فرایندهای زوال با پارامتر دوام ارزیابی می‌شود. دوام به حفظ مجموعه‌ای از خصوصیات ذاتی سنگ شامل ظاهری (مانند رنگ و تغییر شکل فیزیکی)، سنگ‌شناسی (مانند ترکیب کانی‌شناسی و بافت) و فنی (مانند تخلخل، مقاومت و تغییر شکل) در برابر فرایند یا فرایندهای زوال گفته می‌شود (Bell, 1993; Hashemi et al., 2018). بدون شک سنگ ساختمانی وقتی در معرض فرایند زوال قرار می‌گیرد دچار تغییراتی در خصوصیات ذاتی خود می‌شود. هرچه شدت تغییرات خصوصیات ذاتی کمتر باشد، حکایت از دوام بهتر سنگ دارد و برعکس. بنابراین برای انتخاب سنگ ساختمانی مناسب و باکیفیت، بررسی دوام آن ضروری است. این امر منجر به افزایش طول عمر و حفظ کارآیی سنگ در ساختمان در درازمدت می‌شود.

سنگ ساختمانی وقتی در معرض فرایندهای زوال قرار می‌گیرد، دچار تغییراتی در خصوصیات ذاتی خود می‌شود. بر اساس مطالعات گذشته، خیلی از ساختمان‌های مدرن و بناهای باستانی در سرتاسر جهان وجود دارند که مصالح سنگی و بنایی به کار برده شده در آن‌ها تحت تأثیر فرایندهای زوال دچار تخریب و آسیب جدی شده‌اند. در برخی موارد، این منجر به تحمیل هزینه‌های هنگفت عملیات حفاظت و مرمت شده است. یک سنگ ساختمانی یا مصالح مرمتی دارای دوام بهتر بی‌گمان نتیجه‌ای در استقامت و ماندگاری طولانی‌تر در ساختمان یا بنای باستانی در معرض فرایندهای زوال خواهد داشت. هرچه دوام سنگ بهتر باشد، آسیب‌پذیری آن در برابر فرایندهای زوال کمتر خواهد بود. بنابراین در انتخاب سنگ برای استفاده در ساختمان یا مصالح مرمتی برای جایگزینی با مصالح زوال یافته در بنای باستانی، بررسی و ارزیابی دوام آن امری اجتناب‌ناپذیر است.

شکل ۳. آسیب زیباشناختی به سنگ نمای ساختمان به دلیل برخی فرایندهای زوال مانند آلاینده‌های اتمسفری و شوره‌زدگی

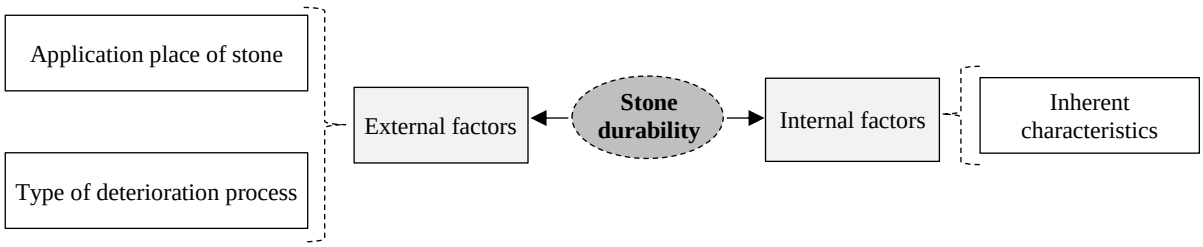
Fig. 3. Aesthetic damage to building facade stone due to some deterioration processes such as atmospheric pollutants and efflorescence

فاکتورهای متعددی تعیین‌کنندهٔ دوام سنگ ساختمانی هستند. مطابق با شکل (۴) این فاکتورها به دو گروه اصلی شامل فاکتورهای درونی و بیرونی تقسیم می‌شوند. فاکتورهای درونی شامل مجموعه‌ای از خصوصیاتی ذاتی

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.10164407]

سنگ هستند. فاکتورهای بیرونی آن‌هایی هستند که از بیرون بر سنگ تحمیل می‌شوند که خود به دو زیرگروه شامل مکان کاربرد سنگ و نوع فرایند زوال تفکیک می‌شوند. اندرکنش میان خصوصیات ذاتی سنگ، مکان کاربرد سنگ و نوع فرایند زوال تعیین‌کنندهٔ میزان دوام سنگ در طول مدت سرویس‌دهی آن در ساختمان است.

همانطور که در شکل (۴) نمایش داده شده است، دوام سنگ تابعی از فاکتورهای متعدد است که بخشی از آن‌ها به خصوصیات ذاتی سنگ در ارتباط هستند و برخی دیگر به مکان کاربرد سنگ در ساختمان و نوع فرایند زوال (Jamshidi, 2024). برای ارزیابی دقیق دوام، بررسی فاکتورهای تأثیرگذار بر آن می‌تواند کمک شایانی به انتخاب سنگ باکیفیت‌تر برای استفاده در مکان کاربرد و شرایط اقلیمی خاص داشته باشد. در مطالعه حاضر، به بررسی نقش خصوصیات ذاتی شامل خصوصیات فیزیکی و مقاومتی بر دوام سنگ‌های ساختمانی در برابر فرآیندهای زوال محیطی پرداخته شده است. نتایج می‌تواند به عنوان ابزاری سریع و کم هزینه برای ارزیابی مقدماتی دوام سنگ ساختمانی مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۴. فاکتورهای تعیین‌کننده دوام سنگ

Fig. 4. The factors affecting the stone durability

مواد و روش‌ها

در مطالعه حاضر، بررسی جامعی روی پژوهش‌های پیشین انجام شده روی جنبه‌های مختلف دوام سنگ‌های ساختمانی در برابر فرآیندهای زوال شامل انجماد و آب شدن، تبلور نمک، گرم و سرد شدن، تر و خشک شدن، محلول‌های اسیدی و قلیایی انجام شد. این پژوهش‌ها عمدتاً به صورت مقالات ملی و بین‌المللی منتشر شده در مجلات معتبر توسط افراد صاحب‌نظر در زمینه زوال و دوام سنگ‌های ساختمانی هستند. در ادامه آن دسته از پژوهش‌هایی که در ارتباط با اندرکنش دوام سنگ با خصوصیات فیزیکی و مقاومتی بودند استخراج شدند. در یک روش نظام‌مند، داده‌های مطالعات پیشین از دیدگاهی جدید و نوآورانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌ها، نقش خصوصیات فیزیکی شامل تخلخل، محتوای آب، درجه اشباع و توزیع اندازه منافذ و خصوصیات مقاومتی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلین، مقاومت خمشی و مقاومت سایشی بر دوام سنگ ساختمانی بررسی شده است.

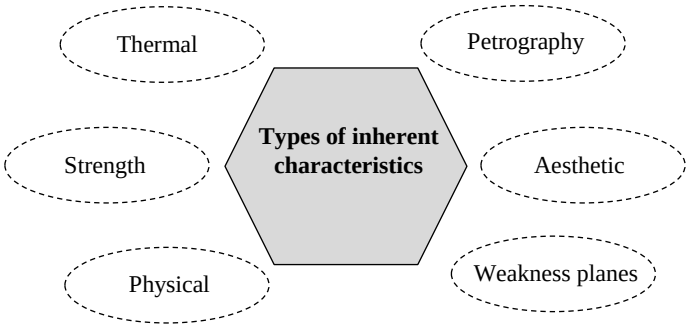
خصوصیات ذاتی سنگ

خصوصیات ذاتی به آن دسته خصوصیاتی گفته می‌شوند که تابعی از ماهیت و چگونگی تشکیل سنگ هستند. سنگ‌ها بر اساس ماهیت تشکیل به سه گروه آذرین، رسوبی و دگرگونی تقسیم می‌شوند. تفاوت در چگونگی تشکیل سنگ‌ها منجر به متفاوت بودن خصوصیات ذاتی آن‌ها می‌شود. سنگ آذرین که از تبلور مادهٔ مذاب سیلیکاته داغ به نام ماگما تشکیل

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

می‌شود، بی‌شک خصوصیات ذاتی متفاوتی با سنگ رسوبی تشکیل‌شده از رسوبات سست و ناپیوسته در محیط آبی خواهد داشت. همچنین یک سنگ دگرگونی که در شرایط دما و فشار بالا در اعماق زمین تشکیل شده است، ماهیت کاملاً متفاوتی درزمینهٔ خصوصیات ذاتی با سنگ‌های آذرین و رسوبی دارد. با توجه به متفاوت بودن چگونگی و محیط تشکیل، دو سنگ کاملاً مشابه در خصوصیات ذاتی در طبیعت وجود ندارد.

خصوصیات ذاتی نقش برجسته‌ای در دوام سنگ در برابر فرایندهای زوال دارند. ازآنجایی‌که خصوصیات ذاتی سنگ‌ها با همدیگر متفاوت‌اند، رفتار دوام سنگ‌ها نیز متفاوت خواهد بود. به‌طورکلی خصوصیات ذاتی سنگ در شش گروه سنگ‌شناسی، زیباشناختی، سطح ضعف، فیزیکی، مکانیکی و حرارتی قرار می‌گیرند (شکل ۵). هرکدام از این گروه‌های اصلی شامل تعدادی زیرگروه می‌شود که هرکدام به نحوی بر دوام سنگ تأثیر دارند. در ادامه به نقش خصوصیات فیزیکی و مقاومتی بر دوام سنگ پرداخته می‌شود.



شکل ۵. خصوصیات ذاتی تأثیرگذار بر دوام سنگ

Fig. 5. The inherent characteristics affecting the stone durability

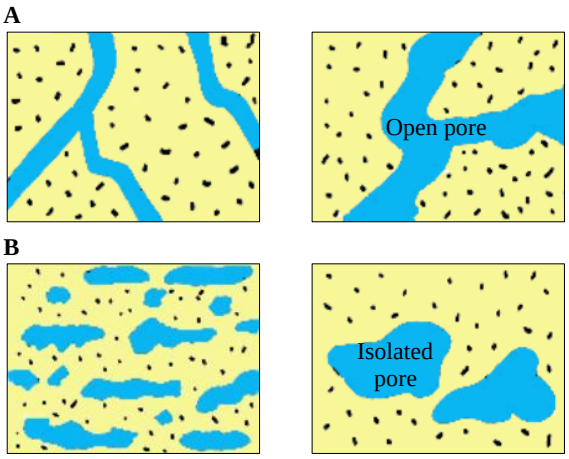
نتایج و بحث

نقش خصوصیات فیزیکی بر دوام سنگ ساختمانی

تخلخل

میزان حجم منافذ (حفره و ترک) در سنگ ساختمانی با پارامتری به نام تخلخل ارزیابی می‌شود. منافذ ممکن است به یکدیگر متصل باشند یا به‌صورت ایزوله باشند؛ به طوری که هیچ‌گونه ارتباطی بین آن‌ها وجود نداشته باشد. در حالت اول تخلخل مؤثر است بدین معنا که آب یا هر سیال دیگری می‌تواند از طریق منافذ پیوسته به هم به درون سنگ نفوذ کند. البته شرط دیگر برای نفوذ آب/ سیال به درون سنگ این است که منافذ علاوه بر پیوستگی با همدیگر، همچنین به سطح سنگ نیز متصل باشند. درصورتی که منافذ با همدیگر و همچنین به سطح سنگ متصل نباشند، تخلخل غیر مؤثر است. مجموع تخلخل مؤثر و غیر مؤثر را تخلخل کل می‌گویند (شکل ۶).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.10116407]

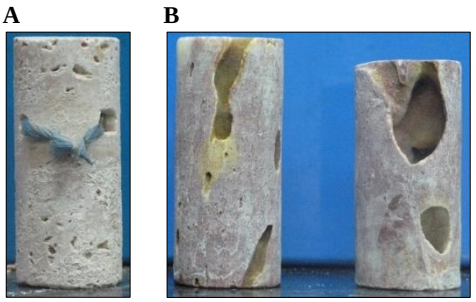


شکل ۶. تخلخل در سنگ ساختمانی A) تخلخل مؤثر B) تخلخل غیر مؤثر

Fig. 6. Porosity in building stone A) Open porosity B) Isolated porosity

آب یا سیالات مختلف مانند محلول‌های نمک، اسیدی و قلیایی از عوامل مهم زوال شیمیایی و مکانیکی سنگ‌های ساختمانی هستند. به‌استثنای عامل حرارت، تقریباً تمامی فرایندهای زوال همچون تر و خشک شدن، انجماد و آب شدن، تبلور نمک، محلول‌های قلیایی و اسیدی و حتی ارگانیسم‌ها در حضور آب یا سیالات رخ می‌دهند. این فرایندها هنگامی بر تخریب و فرسودگی سنگ تأثیر دارند که سنگ متخلخل باشد. توانایی جذب آب به‌وسیلهٔ سنگ تابعی از تخلخل است. البته نوع کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ سنگ نیز بر قابلیت جذب آب مؤثرند. بخشی از جذب آب در سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی مانند ماسه‌سنگ‌ها توسط این نوع کانی‌ها صورت می‌گیرد. در سنگ‌های ساختمانی تخلخل مؤثر است که به آن‌ها قابلیت جذب آب می‌دهد. چون این نوع تخلخل است که از طریق مجراهای به‌هم‌پیوسته امکان انتقال آب یا سیالات از سطح به درون سنگ را می‌دهد. در مقابل، تخلخل غیر مؤثر به دلیل منافذ و مجراهای ایزوله (منقطع) در جذب و نفوذ آب به درون سنگ نقشی ندارند. سنگ ساختمانی با تخلخل مؤثر بیشتر، فضاهای خالی بیشتری دارد. بنابراین سطح تماس اجزای تشکیل‌دهندهٔ سنگ با آب و سیالات بیشتر خواهد شد که این موضوع منجر به تشدید اثرات مضر فرایند زوال (به‌ویژه از نوع شیمیایی) خواهد شد. تراورتن یکی از سنگ‌های ساختمانی متخلخل است که به دلیل تخلخل مؤثر بالا به‌راحتی آب را در ساختار خود جذب می‌کند. شکل (۷) تخلخل مؤثر در تراورتن را نشان می‌دهد. این سنگ به دلیل مزایای متعددی که دارد، به فراوانی به‌عنوان سنگ نما در پوشش بیرونی ساختمان‌ها استفاده می‌شود. در شرایطی که تراورتن در معرض باران اسیدی قرار گیرد، به دلیل ترکیب کانی‌شناسی‌ای که دارد دچار زوال شیمیایی از طریق انحلال می شود. علاوه بر ترکیب کانی شنا سی، تخلخل بالا (به عبارت دیگر مقدار منافذ زیاد) در تراورتن منجر به افزایش سطح تماس اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن با محلول اسیدی خواهد شد که این خود باعث تشدید فرایند انحلال می‌شود (Parvizpur et al., 2022). این موضوع برای محلول های نمک که علاوه بر زوال مکانیکی قابلیت زوال شیمیایی اجزاء تشکیل‌دهندهٔ سنگ را دارند نیز صادق است.

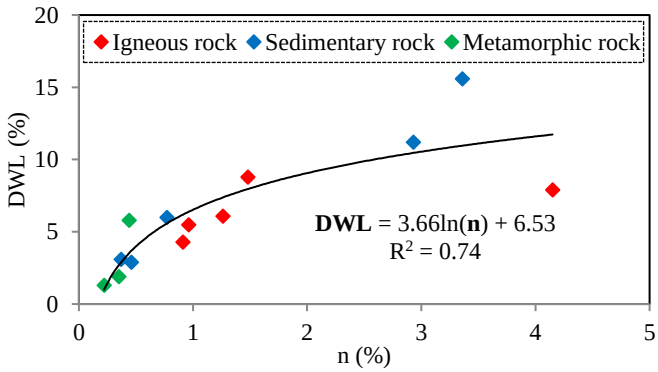
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.10116407]



شکل ۷. تخلخل مؤثر در تراورتن A) طناب آبی‌رنگ از میان یک مجرا عبور کرده است B) منافذ بزرگ با اندازهٔ تقریبی ۶۰ میلی‌متر

Fig. 7. Open porosity in travertine A) The blue rope has passed through a conduit B) Large pores with a size of approximately 60 mm

در پژوهش جمشیدی و همکاران (Jamshidi et al., 2013a) به مطالعهٔ نقش تخلخل مؤثر روی دوام سنگ‌های ساختمانی در برابر تبلور نمک پرداخته شد. نمودار برازش شده بین داده‌های آزمایشگاهی در شکل (۸) نشان می‌دهد که سنگ‌های با تخلخل مؤثر بیشتر (n) متحمل کاهش وزن خشک (DWL) شدیدتری در اثر تبلور نمک شده‌اند. در نتیجه می‌توان بیان کرد که تخلخل رابطهٔ مستقیمی با شدت زوال و بنابراین رابطهٔ معکوسی با دوام دارد.



شکل ۸. رابطهٔ کاهش وزن خشک سنگ (DWL) در طی تبلور نمک و تخلخل مؤثر (n)

Fig. 8. Relationship between dry weight loss (DWL) due to salt crystallization and open porosity

بالاتر بودن تخلخل در سنگ ساختمانی قابلیت حفظ و نگهداری آب را افزایش می‌دهد، ازاین‌رو، رشد و حیات ارگانیسم‌هایی مانند سیانوباکتری، قارچ و گل‌سنگ را فراهم می‌کند. این ارگانیسم‌ها از طریق فرایندهای شیمیایی و مکانیکی منجر به زوال سنگ می‌شوند.

به‌عنوان جمع‌بندی، تخلخل به سه شیوهٔ مستقیم بر دوام سنگ در برابر فرایندهای زوال نقش دارد؛ ۱) تسهیل جذب آب/ سیال به درون سنگ

۲) افزایش سطح تماس اجزای تشکیل‌دهندهٔ سنگ با آب/سیال

۳) قابلیت حفظ و نگهداری آب/سیال.

درصورتی که تمامی خصوصیات ذاتی دو سنگ مشابه فرض شوند، سنگی که متراکم‌تر (تخلخل کمتر) است دوام بهتری را در برابر فرایندهای زوال مرتبط با آب و سیالات دارد. برای افرادی که در زمینهٔ دوام سنگ‌های ساختمانی فعالیت دارند، تخلخل مؤثر اهمیت بسزایی دارد. درواقع وقتی هدف بررسی

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

دوام سنگ باشد، نوع تخلخلی که در اولویت اول باید ارزیابی شود، تخلخل مؤثر است.

علاوه بر تأثیر مستقیم تخلخل در دوام سنگ ساختمانی (سه مورد پیشین)، نقش غیرمستقیم آن نیز اهمیت زیادی دارد. نکتهٔ مهم در ارتباط با نحوهٔ تأثیرگذاری تخلخل بر دوام سنگ توجه به نوع تخلخل است. تخلخل مؤثر و تخلخل کل (مجموع تخلخل مؤثر و تخلخل غیر مؤثر) به ترتیب به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر دوام سنگ تأثیر دارند. تأثیر غیرمستقیم تخلخل بر دوام سنگ به دلیل نقشی است که روی سایر خصوصیات ذاتی سنگ دارد. برخی از خصوصیات ذاتی سنگ، به‌ویژه آن‌هایی که در ارتباط با مقاومت سنگ هستند، از تخلخل تأثیر می‌پذیرند. رابطهٔ معکوسی میان تخلخل با مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین سنگ‌های ساختمانی را پژوهشگران مختلف گزارش کرده‌اند (Heidari et al., 2012; Jamshidi et al., 2018; Akbay, 2023). در فرایندهای زوال مکانیکی از جمله انجماد و آب شدن، انبساط و انقباض حرارتی و رشد بلورهای نمک تنش‌هایی به دیوارهٔ منافذ سنگ اعمال می‌شود. ازاین‌رو، استقامت در برابر تنش‌های تحمیلی تابعی از مقاومت سنگ خواهد بود. بیشتر بودن مقاومت سنگ، دوام بیشتر آن را در پی دارد. ازآنجایی‌که تخلخل کمتر باعث افزایش مقاومت می‌شود، بنابراین منجر به دوام بهتر سنگ در برابر فرایندهای زوال می‌شود. در ارتباط با نقش هم‌زمان تخلخل و مقاومت در دوام سنگ می‌توان از مطالعهٔ جمشیدی و همکاران (Jamshidi et al., 2017a) نام برد. دوام سنگ‌های ساختمانی با اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و مقاومت کششی برزیلین (BTS) آن‌ها بعد از فرایند تبلور نمک ارزیابی شد. بر اساس روابط (۱) و (۲)، تخلخل مؤثر کوچک‌تر و مقاومت بزرگ‌تر سنگ در شرایط بکر (قبل از فرایند تبلور نمک) منجر به کاهش کمتر در مقاومت بعد از فرایند زوال به دلیل تبلور نمک می‌شود.

$$UCS_a = 18.84 + 0.604UCS_b - 2.63n \quad (۱)$$

$$BTS_a = 1.45 + 0.648BTS_b - 0.22n \quad (۲)$$

که در آن‌ها n تخلخل مؤثر، UCS_a و UCS_b مقاومت فشاری تک‌محوری به ترتیب بعد و قبل از فرایند تبلور نمک و BTS_a و BTS_b مقاومت کششی برزیلین به ترتیب بعد و قبل از فرایند تبلور نمک هستند.

محتوای آب

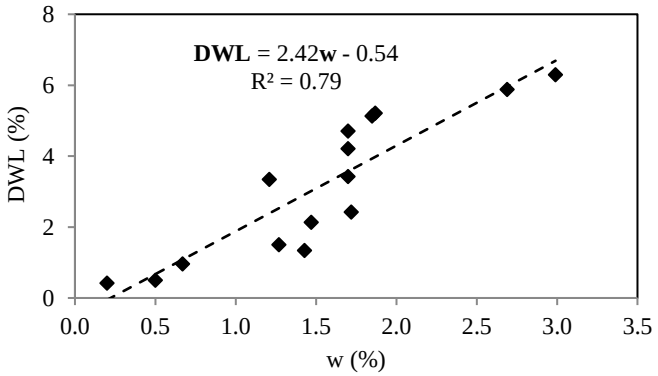
محتوای آب خصوصیت فیزیکی است که به میزان آب موجود در منافذ سنگ گفته می‌شود. محتوای آب رابطهٔ مستقیمی با توانایی جذب آب توسط سنگ دارد. درواقع سنگی با قابلیت جذب آب بالا، محتوای آب بیشتری دارد. توانایی جذب آب تابعی از تعدادی فاکتور است که مهم‌ترین آن‌ها ساختار منافذ (به‌ویژه اندازهٔ منافذ)، تخلخل مؤثر و اجزای تشکیل‌دهندهٔ سنگ هستند. افزایش اندازهٔ منافذ، تخلخل مؤثر و کانی‌های رسی باعث افزایش محتوای آب سنگ می‌شوند.

محتوای آب به دو صورت بر دوام سنگ نقش دارد. آب باعث تسهیل لغزندگی بین اجزای تشکیل‌دهندهٔ سنگ از یک‌سو و از سوی دیگر نرم‌شوندگی آن‌ها (به‌ویژه برای کانی‌های رسی) خواهد شد. این موارد گسیختگی آسان‌تر سنگ در برابر تنش‌های اعمالی ناشی از فرایندهای زوال مانند تبلور نمک و انجماد و آب شدن را در پی خواهد داشت (Jamshidi and Sousa, 2024). نقش دیگر آب بر دوام ناشی از تماس اجزای تشکیل‌دهندهٔ سنگ با آب است. آب در طبیعت به‌ندرت به‌صورت خالص یافت می‌شود و همواره مقداری ناخالصی در ترکیب آن وجود دارد. محلول‌های اسیدی ناشی از باران اسیدی، محلول‌های قلیایی ناشی از مواد شویندهٔ شیمیایی و محلول‌های نمک مثال‌هایی در این زمینه‌اند. محلول‌های شیمیایی اثر خورندگی بر اجزای تشکیل‌دهندهٔ سنگ و درنتیجه زوال شیمیایی آن دارند.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

با توجه به موارد اشاره شده پیشین، افزایش محتوای آب علاوه بر کاهش مقاومت سنگ در برابر تنش‌های تحمیلی ناشی از فرایندهای زوال، همچنین سنگ را مستعد آسیب‌پذیری بیشتر در برابر فرایندهای زوال می‌کند. بنابراین سنگ‌های ساختمانی با محتوای آب کمتر، دوام بیشتری در برابر فرایندهای زوال مرتبط با آب دارند. این منجر به افزایش طول عمر سنگ در طی مدت سرویس‌دهی آن در ساختمان می‌شود.

رابطهٔ کاهش وزن خشک سنگ‌های ساختمانی بعد از اعمال ۶۰ چرخه تبلور نمک سولفات منیزیم با محتوای آب در شکل (۹) ارائه شده است (Zalooli et al., 2017). رابطهٔ خطی خوبی با ضریب تعیین (R^2 = 0.79) به‌دست آمده است؛ به‌طوری که با افزایش محتوای آب کاهش شدیدتری در وزن خشک سنگ ساختمانی به دلیل تبلور نمک رخ داده است. یک سنگ با محتوای محلول نمک بالاتر یعنی مقدار نمک بیشتری در منافذ خود دارد. افزایش محلول نمک زوال مکانیکی و شیمیایی شدیدتر سنگ را به همراه دارد که به‌صورت کاهش وزنی بروز می‌کند. این نحوهٔ تأثیرگذاری محتوای آب بر زوال سنگ، برای سایر فرایندها شامل انجماد و آب شدن و محلول‌های اسیدی و قلیایی نیز وجود دارد.



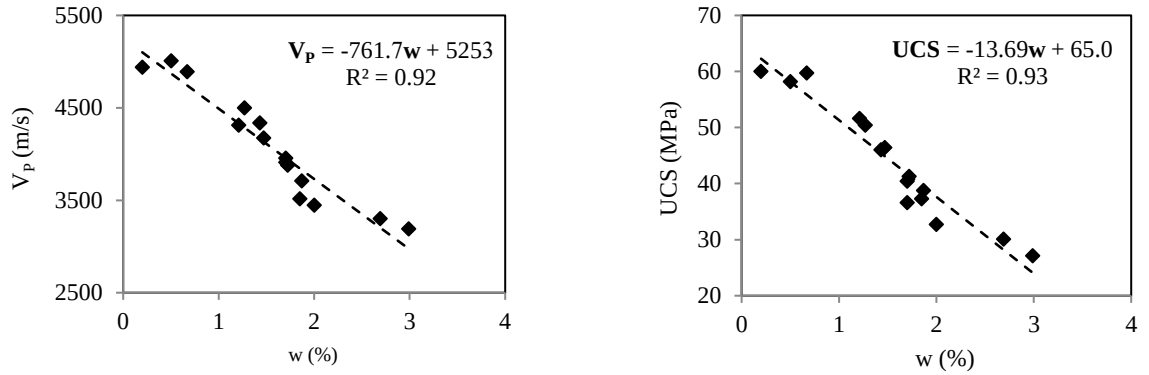
شکل ۹. رابطهٔ کاهش وزن خشک سنگ (DWL) در معرض تبلور نمک و محتوای آب(w)

Fig. 9. Relationship between dry weight loss (DWL) of stone due to salt crystallization and water content (w)

علاوه بر نقش انکارناپذیر محتوای آب در کاهش وزن خشک سنگ‌های ساختمانی در برابر فرایندهای زوال، در کاهش خصوصیات مقاومتی سنگ در معرض فرایندهای زوال نیز تأثیر مهمی دارد. سنگ‌های با محتوای آب کمتر، کاهش کمتری در خصوصیات مقاومتی (مانند مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلین، مقاومت خمشی و مقاومت سایشی) بعد از فرایندهای زوال تجربه می‌کنند (Jamshidi et al., 2016). هرچه میزان کاهش خصوصیات مقاومتی در برابر فرایندهای زوال کمتر باشد، دلالت بر دوام بهتر سنگ دارد. شکل (۱۰) رابطهٔ مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و سرعت موج التراسونیک P (Vp) سنگ ساختمانی بعد از فرایند انجماد و آب شدن با محتوای آب (w) را نشان می‌دهد. محتوای آب رابطهٔ معکوس با مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت موج التراسونیک P بعد از فرایند انجماد و آب شدن دارد. این نشان می‌دهد که با افزایش محتوای آب سنگ ساختمانی، دوام آن در برابر انجماد و آب شدن کاهش می‌یابد. درواقع بیشتر بودن محتوای آب شرایطی را فراهم می‌کند که آب بیشتری به یخ تبدیل و درنتیجه شدت تنش‌های تحمیلی به دیوارهٔ منافذ افزایش می‌یابد. این رخداد همراه با زوال مکانیکی شدیدتر

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

سنگ ساختمانی خواهد بود. در این راستا، پژوهش نیکودل و جمشیدی (Nikudel and Jamshidi, 2010) روی ۱۴ سنگ ساختمانی با منشأ آذرین، رسوبی و دگرگونی نیز نشان داد که سنگ‌های با محتوای آب بالاتر از یک درصد، دوام کمتری در برابر فرایندهای زوال از خود نشان داده‌اند.



شکل ۱۰. رابطهٔ کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و سرعت موج التراسونیک P (Vp) سنگ ساختمانی بعد از فرایند انجماد و آب شدن با محتوای آب (w)

Fig. 10. Relationship between reduction of uniaxial compressive strength (UCS) and P-wave velocity (Vp) after freeze-thaw process with the water content (w) for building stone

درجه اشباع

منافذ و ریزترک‌های سنگ ممکن است به‌طور بخشی یا کامل از آب یا سیالات دیگر اشغال شده باشند. درجهٔ اشباع معیاری کمی برای بیان حجمی از منافذ است که با آب اشغال شده‌اند. وقتی سنگ خشک باشد درجهٔ اشباع صفر درصد و در حالتی که تمامی منافذ از آب پر شده باشند، معادل ۱۰۰درصد خواهد بود. درجهٔ اشباع روی رفتار خصوصیات مقاومتی سنگ نقش مهمی دارد. مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلین، مقاومت خمشی و مقاومت سایشی با افزایش درجهٔ اشباع سنگ کاهش می‌یابند. در طرف مقابل، سرعت موج التراسونیک P روند افزایشی را با افزایش درجهٔ اشباع نشان می‌دهد. این موضوع ناشی از این واقعیت است که سرعت انتشار موج التراسونیک P در یک سنگ با منافذ اشغال‌شده از آب بیشتر از حالتی است که همان منافذ با هوا پر شده باشند. هر کاهشی در خصوصیات مکانیکی به دلیل افزایش درجهٔ اشباع به‌صورت غیرمستقیم در رفتار دوام سنگ بروز خواهد کرد (Jamshidi, 2023).

علاوه بر نقش درجهٔ اشباع روی خصوصیات مقاومتی، به‌طور مستقیم کنترل‌کننده رفتار دوام سنگ در برابر فرایندهای زوال نیز است. شدت زوال سنگ به دلیل فرایند انجماد و آب شدن به‌طور چشمگیری به درجهٔ اشباع وابسته است. آب موجود در منافذ سنگ بعد از کاهش دمای هوا به زیر صفر درجه سانتی‌گراد به یخ تبدیل می‌شود. این رخداد همراه با ۹درصد افزایش حجم خواهد بود که باعث اعمال تنش به دیوارهٔ منافذ می‌شود. بعد از انجماد آب در منافذ با درجهٔ اشباع بالاتر از ۹۱درصد، تنش زیادی به دیوارهٔ منافذ وارد می‌شود. به‌هرحال، در حالتی که درجهٔ اشباع زیر ۹۱درصد است، فضای خالی لازم برای افزایش حجم ناشی از تبدیل آب به یخ وجود خواهد داشت. ازاین‌رو، شدت تنش اعمالی به دیوارهٔ منافذ کمتر از شرایطی است که درجهٔ اشباع بالای ۹۱درصد است.

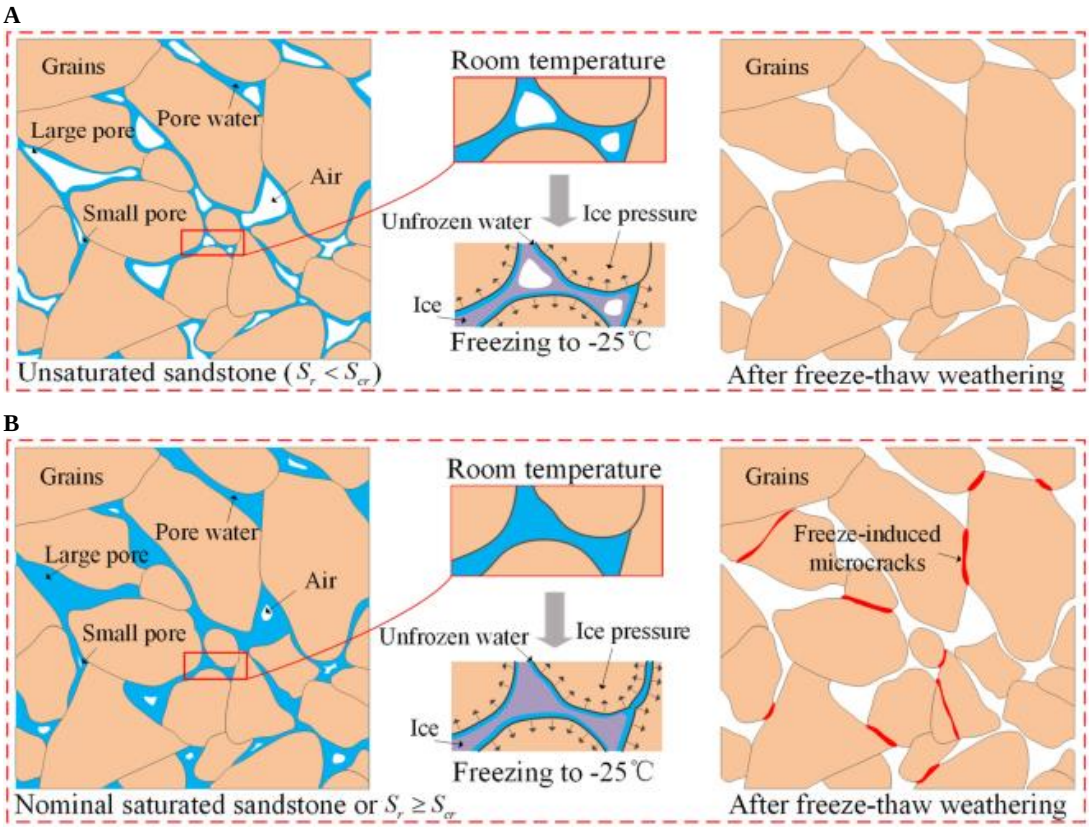
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

باید توجه کرد که در هر درجهٔ اشباعی، افزایش حجم بعد از تبدیل شدن آب به یخ رخ می‌دهد که همراه با اعمال تنش به دیوارهٔ منافذ خواهد بود. میزان شدت تنش تابعی از درجهٔ اشباع منافذ و ریزترک‌های سنگ است. پژوهش‌ها نشان داده که مقدار درجهٔ اشباع یکسانی برای تمامی سنگ‌ها وجود ندارد. به عبارت دیگر هر نوع سنگ درجهٔ اشباع مخصوص به خود را دارد که وقتی فراهم شود بیشترین مقدار تنش به دیوارهٔ منافذ در طی فرایند انجماد آب به وقوع می‌پیوندد. مقدار درجهٔ اشباع در این شرایط، درجهٔ اشباع بحرانی (Critical saturation degree) نامیده می‌شود که برای سنگ‌های مختلف مقادیر متفاوتی دارد. درجهٔ اشباع بحرانی تابعی از شبکهٔ منافذ شامل توزیع اندازه، شکل هندسی و چگونگی پیوستگی آن‌ها به همدیگر است. در این ارتباط، چن و همکاران (Chen et al., 2004) با مطالعهٔ تأثیر فرایند انجماد و آب شدن روی سنگ توف نشان دادند که وقتی درجهٔ اشباع به ۷۰درصد می‌رسد، زوال شدیدی در نمونه رخ می‌دهد درصورتی که برای مقادیر کمتر از ۷۰درصد، نمونه دوام بالایی دارد. بنابراین یک درجهٔ اشباع بحرانی معادل با ۷۰درصد برای رخداد اثرات زوال فرایند انجماد و آب شدن لازم است. در مطالعهٔ دیگری ونگ و همکاران (Weng et al., 2023) با بررسی دوام ماسه‌سنگ در برابر فرایند انجماد و آب شدن درجهٔ اشباع بحرانی معادل با ۵۰درصد را به‌دست آوردند.

در شکل (۱۱) رفتار دوام سنگ با دو درجهٔ اشباع متفاوت در برابر فرایند انجماد و آب شدن به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است. زمانی که درجهٔ اشباع کمتر از درجهٔ اشباع بحرانی باشد، تنش تولیدشده بعد از تبدیل آب به یخ قادر به ایجاد منافذ و ریزترک‌های جدید یا توسعهٔ آن‌هایی که از قبل وجود داشته‌اند را نخواهد داشت (شکل ۱۱A). در طرف مقابل سنگ با درجهٔ اشباع بزرگ‌تر از درجهٔ اشباع بحرانی دوام ضعیفی در برابر فرایند انجماد آب دارد؛ به‌طوری که تبدیل آب به یخ با ایجاد و توسعهٔ منافذ و ریزترک‌ها و بنابراین زوال سنگ همراه خواهد بود (شکل ۱۱B). به‌طور خلاصه، دوام سنگ به‌شدت متأثر از درجهٔ اشباع است. افزایش درجهٔ اشباع باعث تأثیر شدیدتر فرایند انجماد و آب شدن بر زوال سنگ خواهد شد. به عبارت دیگر، سنگ‌هایی با درجهٔ اشباع بالاتر دوام کمتری در برابر فرایند انجماد و آب شدن دارند.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.10116407]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]



شکل ۱۱. دوام سنگ در برابر فرایند انجماد و آب شدن A) درجهٔ اشباع کمتر از درجهٔ اشباع بحرانی B) درجهٔ اشباع بیشتر از درجهٔ اشباع بحرانی (تصویر سمت چپ و راست به ترتیب قبل و بعد از فرایند انجماد آب هستند)

Fig. 11. Stone durability against freeze-thaw A) Saturation degree < Critical saturation degree B) Saturation degree > Critical saturation degree (left and right images are belonging to condition of before and after freeze-thaw process, respectively)

توزیع اندازه منافذ

منافذ سنگ‌های ساختمانی بر اساس اندازه به چهار رده شامل ریز منفذ، متوسط منفذ، درشت منفذ و بزرگ منفذ تقسیم می‌شوند. افراد و مؤسسات مختلف برای هرکدام از این رده‌ها دامنهٔ اندازهٔ متفاوتی ارائه داده‌اند. یکی از قدیمی‌ترین طبقه‌بندی‌ها را دی کوروین (De Quervain, 1967) پیشنهاد داده است که در آن منافذ با شعاع کوچک‌تر از ۵ میکرون را ریز منفذ در نظر می‌گیرد. همچنین منافذ با اندازه‌های بین ۵ تا ۲۰۰ و ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرون به ترتیب در رده‌های متوسط منفذ و درشت منفذ قرار می‌گیرند. در این طبقه‌بندی، منافذ با شعاع بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرون، بزرگ منفذ نامیده می‌شوند. در یکی از جدیدترین طبقه‌بندی‌ها، استاندارد DIN 66131 (1993) سه رده منفذ شامل ریز (شعاع کمتر از ۰/۰۰۲ میکرون)، متوسط (شعاع بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۵ میکرون) و درشت (شعاع بزرگ‌تر از ۰/۰۵ میکرون) را معرفی کرده است.

شبکهٔ منافذ نقش بسزایی در دوام سنگ‌های ساختمانی در برابر آن دسته از فرایندهای زوال که در ارتباط با آب/سیال هستند ایفا می‌کند. در فرایند انجماد و آب شدن دو پدیدهٔ فشار تبلور ناشی از تبدیل شدن آب به یخ و فشار هیدرولیکی تولیدشده از رانده شدن آب باعث زوال سنگ می‌شوند. به طور معمول آسیب‌پذیری سنگ از فرایند انجماد و آب شدن

با افزایش فراوانی منافذ ریز بیشتر می‌شود. این موضوع به بالاتر بودن فشار تبلور یخ و فشار هیدرولیکی آب در منافذ ریزتر در طی تبدیل آب به یخ در ارتباط است. همچنین دوام سنگ‌های دارای منافذ ریزتر در مقایسه با سنگ‌های با منافذ درشت‌تر در برابر فرایند تبلور محلول‌های نمک کمتر است (Scherer, 2004). در این راستا، بناونته و همکاران (Benavente et al., 2004) نیز نشان دادند که فشار تبلور نمک در منافذ ریز قوی‌تر از منافذ درشت است و درنتیجه سنگ دوام کمتری در برابر فشار تبلور و آبگیری در طی فرایند تبلور نمک دارد.

میانگین شعاع منافذ معیاری برای کمی کردن فراوانی اندازهٔ منافذ موجود در سنگ‌های ساختمانی است. این معیار را اولین‌بار لارسن و کادی (Larsen and Cady, 1969) برای بررسی دوام سنگ در برابر فرایند انجماد و آب شدن معرفی کرد. این پژوهشگران شعاعی بحرانی برابر با ۲/۵ میکرون برای منافذ پیشنهاد دادند. در طی تبدیل آب به یخ، آب موجود در سنگ‌های با میانگین شعاع منافذ بزرگ‌تر از ۲/۵ میکرون راحت‌تر و آسان‌تر از شبکهٔ منافذ زهکشی و به بیرون رانده می‌شوند. بنابراین فشار هیدرولیکی حداقل و سنگ دوام بیشتری دارد. در طرف مقابل، رانده شدن آب به بیرون برای سنگ‌های با میانگین شعاع منافذ کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون به‌کندی رخ می‌دهد که این همراه با فشار هیدرولیکی شدید به دیوارهٔ منافذ خواهد بود. بنابراین این سنگ‌ها دوام کمتری در برابر فرایند انجماد و آب شدن دارند.

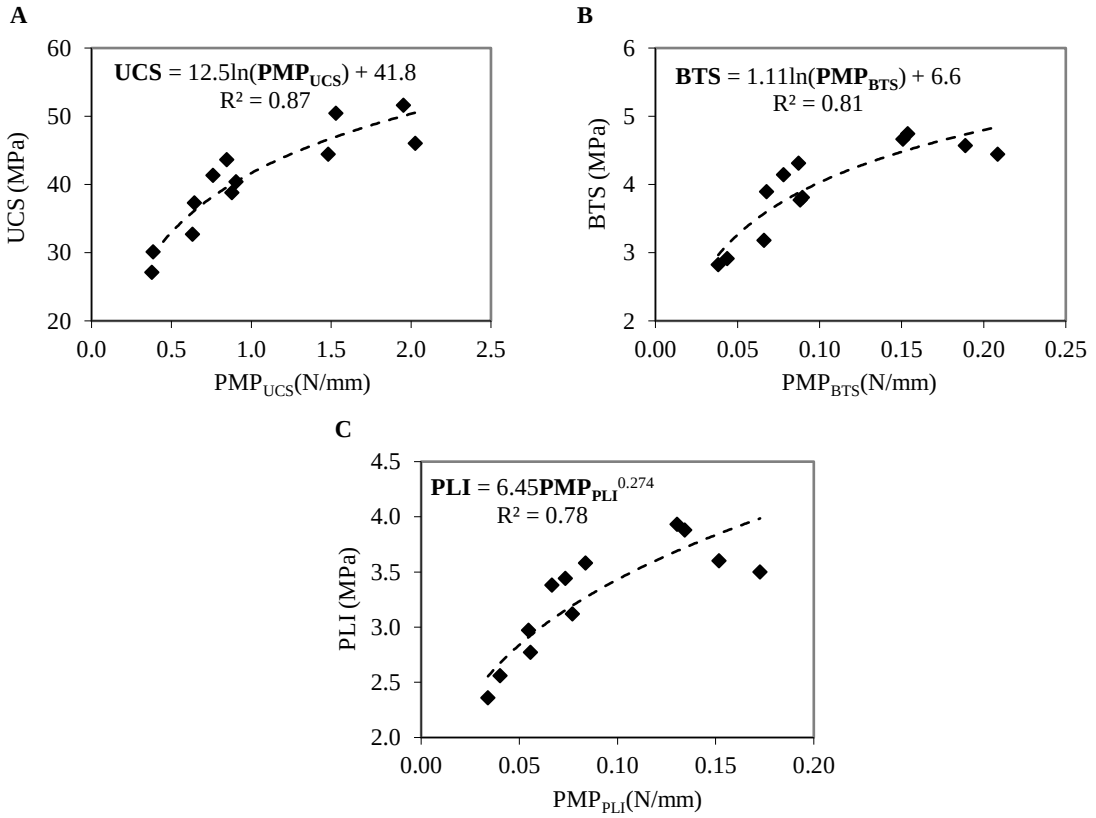
در یکی از پژوهش‌های بنیادی و کاربردی در دههٔ گذشته، جمشیدی و همکاران (Jamshidi et al., 2017b) با بررسی خصوصیات مقاومتی سنگ‌های ساختمانی قبل و بعد از فرایند انجماد و آب شدن، یک پارامتر فیزیکو-مکانیکی (Physico-mechanical parameter) برای برآورد دوام آن ارائه دادند. در این پارامتر، سه خصوصیت سنگ شامل مقاومت در شرایط بکر (MS)، میانگین اندازهٔ منافذ (MPS) و تخلخل مؤثر (n) دخیل هستند. فرم ریاضی پارامتر فیزیکو-مکانیکی به‌صورت رابطهٔ زیر است؛

$$PMP = \frac{MS \times MPS}{n} \qquad (۳)$$

رابطهٔ مقاومت سنگ (مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلین و شاخص بار نقطه‌ای) بعد از فرایند انجماد و آب شدن و پارامتر فیزیکو-مکانیکی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همبستگی مستقیمی با ضریب تعیین بزرگ‌تر از ۰/۷۸ بین مقاومت سنگ بعد از فرایند انجماد و آب شدن و پارامتر فیزیکو-مکانیکی وجود دارد. سنگ با مقدار بالاتر پارامتر فیزیکو-مکانیکی، مقادیر بالاتری از خصوصیات مقاومتی بعد از فرایند انجماد و آب شدن و بنابراین دوام داشته است. از سوی دیگر سنگ با میانگین اندازهٔ منافذ بزرگ‌تر، مقدار پارامتر فیزیکو-مکانیکی بالاتری دارد (رابطهٔ ۳). بنابراین می‌توان بیان کرد که سنگ با میانگین اندازهٔ منافذ بزرگ‌تر دوام بهتری در برابر فرایند انجماد و آب شدن داشته است.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.10116407]

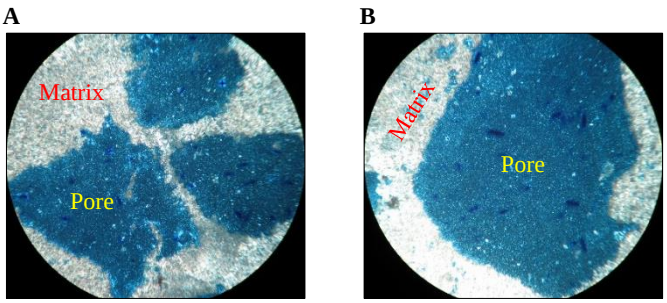
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]



شکل ۱۲. رابطهٔ مقاومت سنگ بعد از فرایند انجماد و آب شدن با پارامتر فیزیکو-مکانیکی A) مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) B) مقاومت کششی برزیلین (BTS) C) شاخص بار نقطه‌ای (PLI)

Fig. 12. Relationship between stone strength after freeze-thaw process with the physico-mechanical parameter (PMP) A) Uniaxial compressive strength (UCS) B) Brazilian tensile strength (BTS) C) Point load index (PLI)

علاوه بر نقش اندازهٔ منافذ سنگ در شدت فشار تبلور یخ و فشار هیدرولیکی آب/سیال، این فاکتور همچنین در میزان سطحی از منافذ که در معرض فرایندهای زوال قرار می‌گیرد نیز تأثیر دارد. برای بیان میزان سطح منافذ سنگ از پارامتری به نام مساحت سطح ویژه (Specific surface area) استفاده می‌شود که به‌عنوان مقدار سطح جانبی منافذ در واحد حجم گفته می‌شود. برای مثال اگر در یک سنگ متخلخل حاوی یک سانتی‌متر مکعب فضای خالی، میزان سطح جانبی منافذ پنج سانتی‌متر مربع باشد، مساحت سطح ویژهٔ منافذ برابر با پنج سانتی‌متر مربع خواهد بود. دو سنگ ساختمانی با مقدار تخلخل یکسان می‌توانند مقادیر مساحت سطح ویژهٔ متفاوتی به دلیل تفاوت در اندازهٔ منافذ داشته باشند. شکل (۱۳) دو سنگ متخلخل با مقدار تخلخل یکسان ولی با اندازهٔ منافذ متفاوت را در زیر میکروسکوپ پلاریزان نشان می‌دهد. سنگ با میانگین اندازهٔ منافذ کوچک‌تر، مساحت سطح ویژهٔ بزرگ‌تری دارد و برعکس. با بزرگ‌تر شدن مساحت سطح ویژه میزان سطحی از اجزای تشکیل‌دهندهٔ سنگ که در تماس با فرایندهای زوال مرتبط با آب (مانند انجماد و آب شدن، تبلور نمک، محلول‌های اسیدی و قلیایی) قرار می‌گیرند، افزایش می‌یابد. به‌عنوان نتیجه، سنگ در برابر فرایند زوال دوام کمتری نشان می‌دهد و ازاین‌رو سرعت فرسودگی و تخریب در آن بیشتر خواهد بود.



شکل ۱۳. میانگین اندازهٔ منافذ و مساحت سطح ویژه برای دو سنگ ساختمانی با میزان تخلخل یکسان A) میانگین اندازهٔ منافذ کوچک‌تر و مساحت سطح ویژهٔ بزرگ‌تر B) میانگین اندازهٔ منافذ بزرگ‌تر و مساحت سطح ویژهٔ کوچک‌تر

Fig. 13. Mean pore size and specific surface area two different building stones with the same values of porosity A) lower mean pore size and higher specific surface area B) Higher mean pore size and lower specific surface area

نقش خصوصیات مقاومتی بر دوام سنگ ساختمانی

فرایندهایی مانند انجماد و آب شدن، تبلور نمک، تر و خشک شدن، گرم و سرد شدن و فعالیت ارگانیسم‌ها، تنش‌هایی در سنگ ایجاد می‌کنند. در برخی شرایط تنش‌های ایجادشدهٔ از این فرایندها ممکن است باعث گسیختگی و تخریب سنگ شوند. دوام سنگ در برابر تنش‌های ناشی از فرایندهای زوال تابعی از خصوصیات مکانیکی، به‌ویژه آن‌هایی که در ارتباط با مقاومت سنگ‌اند است. اگر مقاومت به‌گونه‌ای باشد که نتواند تنش‌های اعمالی از سوی فرایندهای زوال را تحمل کند، سنگ دچار تغییرات در ساختار و شبکهٔ منافذ خواهد شد و در ادامه ممکن است به گسیختگی آن منجر شود. در مباحث مرتبط با دوام، مقاومت سنگ معیاری از استقامت آن در برابر تنش‌های اعمالی از سوی فرایندهای زوال است. هرچه سنگ استقامت بیشتری در برابر تنش‌های اعمالی داشته باشد، دوام آن در برابر فرایندهای زوال بیشتر است.

مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلین، مقاومت خمشی، مقاومت سایشی و شاخص بار نقطه‌ای از خصوصیات مقاومتی هستند که در مطالعات دوام سنگ‌های ساختمانی استفاده می‌شوند. فرایندهای انجماد و آب شدن و تبلور نمک در منافذ سنگ رخ می‌دهند. در طی رخداد این فرایندها، تنش‌هایی به دیوارهٔ منافذ اعمال می‌شود که درنهایت به تمام بدنهٔ سنگ سرایت می‌کند. ازآنجایی‌که تنش‌های ناشی از فرایندهای زوال ماهیت کششی دارند، در میان خصوصیات مقاومتی، مقاومت کششی در ارتباط نزدیک‌تری با دوام سنگ‌های ساختمانی خواهد بود (Jamshidi et al., 2013b). لیکن، با توجه به ماهیت مشابه خصوصیات مقاومتی سنگ، همهٔ آن‌ها می‌توانند به‌عنوان معیاری مناسب برای ارزیابی دوام سنگ استفاده شوند.

مقاومت سنگ تابعی از خصوصیات سنگ‌شناسی و فیزیکی است. درواقع این خصوصیات تعیین‌کنندهٔ میزان مقاومت سنگ هستند. با توجه به تنوع خصوصیات سنگ‌شناسی و فیزیکی، دامنهٔ مقاومت سنگ‌ها بسیار گسترده است. مقاومت یکی از فاکتورهای مهم است که میزان دوام سنگ در برابر فرایندهای زوال را تعیین می‌کند. در پژوهش‌های گذشته مشخص شده که سنگ‌های ساختمانی با مقاومت بیشتر، دوام بهتری در برابر تنش‌های ناشی از فرایندهای زوال دارند. در این راستا بناونته و همکاران (Benavente et al., 2004) و جمشیدی و همکاران (Jamshidi et al., 2015) نشان دادند که سنگ‌های ساختمانی با مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین بزرگ‌تر، دوام بالاتری در برابر

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

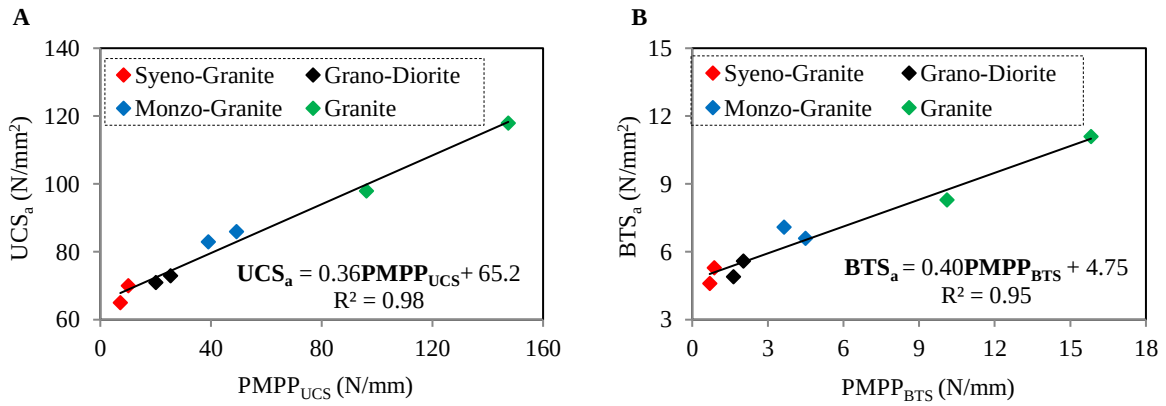
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

فرایندهای انجماد و آب شدن و تبلور نمک دارند. در یکی از مطالعات اخیرِ جمشیدی (Jamshidi, 2021)، یک پارامتر پترو-مکانیکی (Petro-mechanical predictor parameter) برای ارزیابی دوام سنگ‌های ساختمانی گرانیتی در برابر انجماد و آب شدن مطابق معادلهٔ زیر معرفی شد؛

$$PMPP = \frac{IS_b \times IQF_b}{\left(\frac{MGS_b + MGS_a}{2}\right)} \quad (۴)$$

که در آن IS_b، IQF_b و MGS_b به ترتیب مقاومت (مقاومت فشاری تک‌محوری یا مقاومت کششی برزیلین)، نسبت کوارتز به فلدسپار و میانگین اندازهٔ دانه‌ها قبل از فرایند انجماد و آب شدن و MGS_a میانگین اندازهٔ دانه‌ها بعد از فرایند انجماد و آب شدن هستند.

پارامتر پترو-مکانیکی به‌طور هم‌زمان نقش سه فاکتور مقاومت، ترکیب کانی‌شناسی و بافت را روی دوام سنگ لحاظ می‌کند. در معادلهٔ (۴) می‌توان مشاهده کرد که پارامتر پترو-مکانیکی رابطهٔ مستقیمی با مقاومت سنگ در شرایط بکر دارد. از سوی دیگر افزایش پارامتر پترو-مکانیکی نشان‌دهندهٔ دوام بیشتر سنگ در برابر فرایند زوال است. به‌عنوان نتیجه، بیشتر بودن مقاومت سنگ منجر به دوام بهتر آن در برابر فرایند انجماد و آب شدن می‌شود. این موضوع از طریق روابط توسعه داده‌شده میان مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین بعد از فرایند انجماد و آب شدن با پارامتر پترو-مکانیکی در شکل (۱۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پارامتر پترو-مکانیکی رابطهٔ مستقیمی با مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین بعد از فرایند انجماد و آب شدن دارد. به‌طورکلی سنگ‌های ساختمانی با مقاومت بیشتر دوام بهتری در برابر فرایندهای زوال دارند. لیکن این در شرایطی صادق است که سایر فاکتورهای تأثیرگذار بر دوام برای دو سنگ یکسان فرض شوند و فقط در مقاومت با یکدیگر متفاوت باشند.

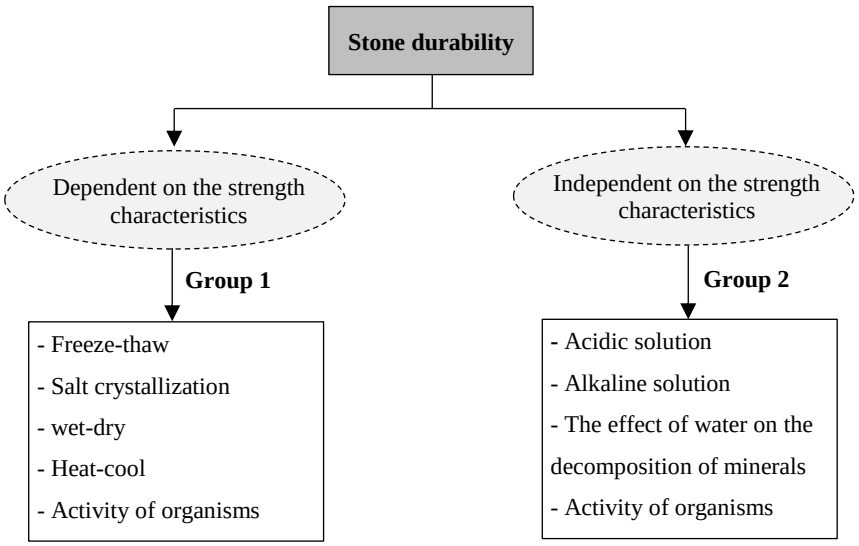


شکل ۱۴. رابطهٔ دوام سنگ در برابر انجماد و آب شدن با پارامتر پترو-مکانیکی A) مقاومت فشاری تک‌محوری B) مقاومت کششی برزیلین
نکته: دوام سنگ از طریق مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS_a) و مقاومت کششی برزیلین (BTS_a) بعد از فرایندهای انجماد و آب شدن ارزیابی شده است

Fig. 14. Relationship between stone durability against freeze-thaw and petro-mechanical predictor parameter (PMPP) A) Uniaxial compressive strength (UCS) B) Brazilian tensile strength (BTS). Note: stone durability was assessed through values of uniaxial compressive strength (UCSa) and Brazilian tensile strength (BTSa) after freeze-thaw process.

خصوصیات مقاومتی هنگامی در دوام سنگ نقش دارند که فرایند زوال همراه با ایجاد تنش باشد. به‌هرحال با توجه به ماهیت برخی فرایندهای زوال، دوام سنگ می‌تواند مستقل از خصوصیات مقاومتی باشد. با توجه به تأثیر داشتن یا

نداشتن خصوصیات مقاومتی بر دوام سنگ، فرایندهای زوال به دو گروه به شرح شکل (۱۵) تقسیم می‌شوند. گروه اول فرایندها آن‌هایی هستند که موجب ایجاد تنش و درنتیجه زوال مکانیکی سنگ می‌شوند. از این گروه می‌توان به انجماد و آب شدن، تبلور نمک، تر و خشک شدن، گرم و سرد شدن و فعالیت ارگانیسم‌ها اشاره کرد. در طرف مقابل، گروه دوم شامل فرایندهایی هستند که منجر به زوال شیمیایی سنگ می‌شوند. در این گروه هیچ‌گونه تنشی در سنگ ایجاد نمی‌شود. هجوم محلول‌های اسیدی (باران اسیدی) و قلیایی (مواد شویندهٔ بهداشتی)، اثر رطوبت/آب بر تجزیهٔ کانی‌ها و در برخی شرایط فعالیت ارگانیسم‌ها در گروه دوم قرار می‌گیرند. فرایند زوال در این گروه از نوع شیمیایی است که صرفاً تابعی از نوع و ماهیت مواد شیمیایی عامل زوال و ترکیب شیمیایی اجزای سازندهٔ سنگ است.



شکل ۱۵. طبقه‌بندی فرایندهای زوال بر اساس نقش خصوصیات مقاومتی در دوام سنگ

Fig. 15. Classification of the deterioration processes based on the role of strength characteristics on the stone durability

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که خصوصیات فیزیکی و مقاومتی نقش بسزایی در دوام سنگ ساختمانی در برابر فرآیندهای زوال محیطی (همچون انجماد و آب شدن، تبلور نمک، گرم و سرد شدن، تر و خشک شدن، رطوبت و فعالیت ارگانیسم‌ها) دارند. بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌ها، افزایش تخلخل، محتوای آب و درجه اشباع و کاهش اندازه منافذ موجد در سنگ باعث کاهش قابل توجه دوام سنگ در برابر فرآیندهای زوال می‌شود. از سوی دیگر، مقاومت سنگ رابطه مستقیمی با دوام سنگ دارد به طوری که با افزایش مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلین، مقاومت خمشی، مقاومت سایشی و شاخص بار نقطه‌ای، دوام سنگ بیشتر خواهد شد. به هر حال، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین نسبت به شاخص بار نقطه‌ای پارامترهای مناسب‌تری نسبت برای ارزیابی غیر مستقیم دوام سنگ هستند.

یک شناخت عمیق از خصوصیات فیزیکی و مقاومتی، منجر به ارزیابی دقیق‌تر از دوام سنگ و بنابراین ماندگاری بهتر آن در طول مدت سرویس‌دهی در ساختمان خواهد شد. از آنجایی که انجام آزمایش‌های دوام سنگ در محیط آزمایشگاه

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.10116407]

نیاز به صرف هزینه و زمان زیادی (هفته‌ها یا ماه‌ها) دارند، بنابراین خصوصیات فیزیکی و مقاومتی می‌توانند به عنوان ابزاری کم هزینه و سریع برای ارزیابی غیر مستقیم دوام سنگ در برابر فرآیندهای زوال محیطی مورد استفاده قرار گیرند.

با توجه به اینکه در مطالعه حاضر نقش خصوصیات فیزیکی و مقاومتی به صورت مجزا بر دوام سنگ در برابر فرآیندهای زوال بررسی شدند، بنابراین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده اثر همزمان این خصوصیات بر دوام سنگ با طراحی آزمون‌های آزمایشگاهی زوال تسریع شده مورد بررسی قرار گیرند.

References

Akbay, D. (2023). Investigating the accuracy of specimen shape for point load index test in predicting the uniaxial compressive strength for rocks using regression analysis and machine learning. Mining, Metallurgy and Exploration, 40, 2107–2115.

Bell, F.G. (1993). Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. Environmental Geology, 21, 187–20.

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.

Chen, T.C., Yeung, M.R., & Mori, N. (2004). Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action. Cold Regions Science and Technology, 38, 127–136.

De Quervain, F. (1967). Technische Gesteinskunde. Lehrbücher und Monographien aus dem Gebiete der exakten Wissenschaften. Mineralogisch-geotechnische Reihe, Bd 1", Birkhäuser, Basel.

DIN 66131 (1993). Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach Brunauer, Emmett und Teller (BET). Beuth Verlag, Berlin.

Hashemi, M., Bashiri Goudarzi, M., & Jamshidi, A. (2018). Experimental investigation on the performance of Schmidt hammer test in durability assessment of carbonate building stones against freeze-thaw weathering. Environmental Earth Science, 77, 684.

Heidari, M., Khanlari, G.R., Torabi-Kaveh, M., & Karegarian, S. (2012). Predicting the uniaxial compressive and tensile strengths of gypsum rock by point load testing. Rock Mechanics and Rock Engineering, 45, 265–273.

Jamshidi, A., Nikudel, M., & Khamehchiyan, M. (2015). A statistical model to estimate the mechanical properties of some travertines under freeze-thaw cycles. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 24(95), 37–46.

Jamshidi, A., Nikudel, M.R., & Khamehchiyan, M.A. (2016). Decay function models for long-term durability assessment and comparison the effect freeze-thaw and salt crystallization on the mechanical properties of Silver Travertine (Azarshahr, East Azerbaijan). Advanced Applied Geology, 6(1), 1–9.

Jamshidi, A. (2021). Predicting the strength of granitic stones after freeze-thaw cycles: considering the petrographic characteristics and a new approach using petro-mechanical parameter. Rock Mechanics and Rock Engineering, 54, 2829–2841

Jamshidi, A. (2023). An investigation on ultrasonic wave velocity of laminated sandstone under freeze-thaw and salt crystallization cycles: Insights from anisotropy effects. Journal of Building Engineering, 71, 106461.

Jamshidi, A. (2024). Study of building stones durability against the freeze-thaw process: current methods and recommendations for the future. Journal of Building Engineering, 86, 108722.

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

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

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]

Jamshidi, A., Nikudel, M.R., Khamehchiyan, M., & Zalooli, A., Yeganefar, H. (2017a). Estimating the mechanical properties of travertine building stones due to salt crystallization using multivariate regression analysis. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, 28 (3), 231–241.

Jamshidi, A., Nikudel, M.R., & Khamehchiyan, M. (2017b). A novel physico-mechanical parameter for estimating the mechanical strength of travertines after a freeze-thaw test. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76 (1), 181–190.

Jamshidi, A., & Sousa, L. (2024). Accuracy of point load index and Brazilian tensile strength in predicting the uniaxial compressive strength of the rocks: a comparative study. Materials, 17(20), 5081.

Jamshidi, A., Zamanian, H., & Zarei Sahamieh, R. (2018). The effect of density and porosity on the correlation between uniaxial compressive strength and P-wave velocity. Rock Mechanics and Rock Engineering, 51 (4), 1279–1286.

Larsen, T.D., & Cady, P.D. (1969). Identification of frost-susceptible particles in concrete aggregate. National Cooperative Highway Research Program Report, 66, 62 p.

Nikudel, M.R., & Jamshidi, A. (2010). Investigation of engineering properties of some samples from building stones in cycles of freeze-thaw. Journal of Scinces, 35, 43–52 (In Persian).

Parvizpur, Sh., Jamshidi, A., Sarikhani, R., & Ghassemi Dehnavi, A. (2022). The pH effect of sulfuric acid on the physico-mechanical properties of Atashkuh travertine, Central Iran. Environmental Earth Science, 81 (5), 1–10.

Scherer, G. (2004) Stress from crystallization of salt. Cement and Concrete Research, 34, 1613–1624.

Weng, L., Wu, Z., Chu, Z., Xu, X., & Liu, Q. (2023). Evolution of the unfrozen water content for partially-saturated sandstones and the critical degree of saturation. Rock Mechanics and Rock Engineering, 56, 1–18.

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.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.4.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1016407]