

A study on the mechanism of freezing-thawing and salt crystallization processes in the deterioration of building stones

Amin Jamshidi¹ ✉

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 14 August 2025
Accepted 20 September 2025

Keywords:
Building stone,
Deterioration, Weathering,
Mechanism.

ABSTRACT

Stones are widely used for building facades, flooring, paving, stairs, kerbs and load-bearing components. Weathering processes can have adverse effects on stones in terms of their aesthetic and technical properties. Changes in these properties will lead to the stone deterioration, resulting in financial damage to the building from both architectural and structural perspectives. Understanding the mechanisms by which weathering processes cause stone deterioration can be as a useful and efficient tool for assessing the long-term durability behavior of stone during its service life in a building. This study systematically investigated the mechanisms of the freezing-thawing and salt crystallization processes in the building stones deterioration. To this end, published papers on the deterioration of building stones, including igneous, sedimentary, and metamorphic, due to freezing-thawing and salt crystallization processes were collected. Discussions performed on the mechanisms of freezing-thawing and salt crystallization reported in these papers from various perspectives were compared. The findings indicate that in each of these processes, more than one mechanism involved in the deterioration of building stone. In addition, results showed that depending on factors related to the surrounding environment of the stone and on the other hand, the inherent properties of the stone, various mechanisms will have different adverse effects in the deterioration of building stone.

Introduction

Stones are always exposed to weathering processes throughout their lifespan in a building. The nature of the weathering process is determined by the prevailing climatic conditions in the geographical region. Freezing-thawing and salt crystallization are the most common weathering processes and have the most adverse effect on the deterioration of building stone. If the stone does not have sufficient durability against these processes, its performance deteriorates in terms of its aesthetic and technical properties. Consequently, the building is damaged in architectural and structural terms. Therefore, it is essential to investigate the durability of a stone to select a suitable, high-quality one. This increases the stone's service life

in a given building location. To accurately and comprehensively assess the durability of a stone for use in construction, it is vital to investigate the mechanisms governing the weathering processes in the geographical region of the building. This paper investigates the mechanisms of weathering processes, including freezing-thawing and salt crystallization. The effects of each weathering process on the deterioration of building stones were examined systematically. The findings of the present study can be used to recognize and understand the deterioration of building stones subjected to freezing-thawing and salt crystallization.

Cite this article: Jamshidi, A. (2025). A study on the mechanism of freezing-thawing and salt crystallization processes in the deterioration of building stones. *Journal of Engineering Geology*, 19 (2), 246-270.
<https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.2.1016408>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.2.1016408>

Publisher: Kharazmi University.

Materials and methods

This paper provides a comprehensive review of previous studies on the durability of building stones subjected to deterioration processes, such as freezing-thawing and salt exposure. Using a systematic approach, the data from these studies were analyzed from an innovative perspective. The main mechanisms of freezing-thawing and salt crystallization in building stone deterioration were summarized and analyzed in detail. The results are presented as a coherent set for researchers to use in the context of building stone durability.

Discussion

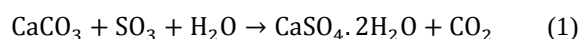
Freezing-thawing

Freezing and thawing are common weathering processes that contribute to the mechanical deterioration of building stones in cold regions. There is ongoing discussion about the mechanisms of stone deterioration during freezing and thawing. Two mechanisms are most commonly agreed upon by researchers: ice crystallization pressure, which occurs when water turns to ice, and hydraulic pressure, which occurs when water is transferred into the pore space network of the rock. Temperature fluctuations below and above 0°C lead to the freezing and thawing of water in the pore space inside the stone, respectively. Freezing water is associated with an approximately 9% volume increase and thus induces stress on the walls of the stone pores. When these stresses exceed the stone's tensile strength, new pore spaces are created and existing ones are developed. Repeated freezing and thawing cycles may eventually cause stone deterioration and loss of durability. Additionally, the transfer of water through a stone's pore space network, known as hydraulic pressure, is a mechanism that leads to stone deterioration when water turns to ice. As the temperature decreases, the water in the central parts of a pore begins to freeze, and eventually, all the water turns to ice. In the early stages of this process, the water in the membrane between the ice and the pore wall is forced out

of the pore due to the increase in ice volume. This leads to hydraulic pressure in the stone.

Salt crystallization

Salt crystallization is a weathering process that deteriorates building stones. Among these processes, salt crystallization is the strongest in terms of deterioration and reduction of durability. As salt solution penetrates the pore space of stone, two types of deterioration occur: mechanical and chemical. The growth of salt crystals within the stone's pores leads to induced stresses on the pore walls. If the stone's tensile strength is low and it cannot withstand the induced stresses, the stone will deteriorate and ultimately decay. The chemical reaction between the salt solution and the stone can also contribute to its deterioration. In carbonate stones, where calcite and dolomite are the main minerals, chemical deterioration clearly occurs due to sulfate salts attacking the stone. The chemical reaction of calcite with sulfur ions, such as sodium and magnesium sulfates, can be represented by the following equation:



Conclusions

The findings of the present study are summarized as follows;

Ice crystallization pressure and hydraulic pressure, which result from turning water into ice during the freezing-thawing process, are the two main mechanisms of stone deterioration.

Overall, two mechanisms of deterioration, mechanical and chemical, were identified in stone weathering during salt crystallization. Mechanical deterioration occurs due to the critical role of salt crystallization pressure in stone weathering, while chemical deterioration occurs due to the chemical reaction of the salt solution with the stone's constituent components.



مطالعه‌ای روی مکانیسم فرایندهای انجماد و آب شدن و تبلور نمک در زوال سنگ‌های ساختمانی

امین جمشیدی^۱✉

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

اطلاعات مقاله چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

کلیدواژه‌ها: سنگ ساختمانی، زوال، هوازدگی، مکانیسم.

سنگ‌ها کاربرد گسترده‌ای مانند نما، کف‌پوش، سنگ‌فرش، سنگ‌پله، جدول سنگی و اجزای باربر در ساختمان‌ها دارند. فرایندهای هوازدگی منجر به اثرات مضر روی سنگ‌های ساختمانی از جنبه‌های مختلف شامل خصوصیات زیباشناختی و فنی می‌شوند. هر گونه تغییرات در این خصوصیات، زوال سنگ را در پی خواهد داشت که باعث تحمیل خسارت‌های مالی از هر دو منظر معماری و سازه‌ای به ساختمان خواهد شد. شناخت مکانیسم فرایندهای هوازدگی در زوال سنگ می‌تواند در پیش‌بینی رفتار دوام بلند مدت سنگ در طی مدت سرویس‌دهی آن در ساختمان مفید و کارآمد باشد. در پژوهش حاضر به بررسی مکانیسم فرایندهای انجماد و آب شدن و تبلور نمک در زوال سنگ‌های ساختمانی در یک شیوه نظام‌مند پرداخته شده است. به این منظور مقالات منتشر شده در ارتباط با زوال سنگ‌های ساختمانی، شامل آذرین، رسوبی و دگرگونی، ناشی از فرایندهای انجماد و آب شدن و تبلور نمک گردآوری شد. بحث‌های صورت گرفته در مورد مکانیسم‌های انجماد و آب شدن و تبلور نمک گزارش شده در این مقالات از ابعاد مختلف مقایسه شدند. نتایج حکایت از این دارد که در هر کدام از این فرایندها، بیش از یک مکانیسم در زوال سنگ ساختمانی نقش دارد. علاوه بر این، یافته‌ها نشان می‌دهد که بسته به فاکتورهای مرتبط با محیط پیرامونی سنگ و از سوی دیگر ویژگی‌های ذاتی سنگ، مکانیسم‌های مختلف اثرات مضر متفاوتی روی زوال سنگ ساختمانی خواهند داشت.

مقدمه

سنگ‌های ساختمانی به دلیل زیبایی ذاتی و طبیعی و همچنین فراوانی و در دسترس بودن از دوران باستان به‌عنوان مصالح ساختمانی مورد استفاده بشر بوده‌اند و با گذر زمان کاربردهای آن‌ها افزایش گسترده‌ای یافته است. سنگ در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی مانند چوب، پلیمر، آجر، ملات و بتن دوام بیشتری در برابر فرایندهای هوازدگی همچون انجماد و آب شدن، تبلور نمک، رطوبت، محلول‌های شیمیایی و حرارت دارد (Winkler, 1994). این موضوع به ماهیت اجزای تشکیل‌دهنده سنگ، یعنی کانی‌ها در ارتباط است که منجر به استقامت و پایداری آن در درازمدت

همه انواع سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی موجود در طبیعت که کیفیت و معیارهای فنی لازم برای استفاده در ساختمان‌ها، سازه‌های عمرانی، فعالیت‌های معماری و بناهای باستانی را داشته باشند، سنگ ساختمانی نامیده می‌شوند. در اینجا باید بین مفهوم عام و خاص سنگ تفکیک قائل شد. اصطلاح سنگ به معنای عام (Rock) به همه انواع سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی موجود در طبیعت گفته می‌شود و در مقابل، مفهوم خاص سنگ (Stone) به معنای هر سنگی (Rock) است که قابلیت استفاده در ساختمان‌ها، سازه‌های عمرانی و هر فعالیت مرتبط را داشته باشد.

استناد: جمشیدی، ا. (۱۴۰۴). مطالعه‌ای روی مکانیسم فرایندهای انجماد و آب شدن و تبلور نمک در زوال سنگ‌های ساختمانی. مجله زمین‌شناسی مهندسی، ۱۹ (۲)،

<https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.2.1016408> ۲۷۰-۲۴۶



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 کارایی سنگ در ساختمان در درازمدت می‌شود.

براساس مطالعات گذشته، تعداد زیادی از ساختمان‌های مدرن و بناهای باستانی در سرتاسر جهان وجود دارند که سنگ‌های به‌کار برده‌شده در آن‌ها تحت تأثیر فرایندهای هوازدگی دچار زوال شده‌اند که نتیجه‌ای آن تخریب و آسیب جدی به ساختمان بوده است (Gomez Heras and Fort, 2007; Ghobadi and Babazadeh, 2015; Zalooli et al., 2024). 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 مدرن یا بنای باستانی در معرض فرایندهای هوازدگی خواهد داشت. هرچه دوام سنگ بهتر باشد، آسیب‌پذیری آن در برابر فرایندهای هوازدگی کمتر خواهد بود. بنابراین در انتخاب سنگ برای استفاده در ساختمان یا مصالح مرمتی برای جایگزینی با مصالح زوال‌یافته در بنای باستانی، بررسی و ارزیابی دوام آن ضروری است.

برای ارزیابی دقیق و جامع دوام سنگ با هدف انتخاب برای استفاده در ساختمان، بررسی مکانیسم/مکانیسم‌های فرایندهای هوازدگی حکمفرما بر منطقه جغرافیایی ساختمان امری حیاتی است. از آنجایی که مکانیسم و ماهیت فرایندهای هوازدگی مختلف با همدیگر متفاوت هستند، ازاینرو اثرات آن‌ها بر زوال و در نتیجه دوام سنگ ساختمانی متفاوت خواهند بود (Liu et al., 2019; Pirizadeh et al., 2022). بر اساس مطالعات آزمایشگاهی خانلری و عبدی لر (Khanlari and Abdilor, 2015)، ترابی کاه و

می‌شود. ارزانی، تنوع در رنگ و طرح، جذابیت به دلیل طبیعی بودن از دیگر مزایای سنگ در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی است که منجر به افزایش تقاضای مردم برای استفاده از آن در کارهای مختلف ساختمانی و محیط زندگی‌شان شده است.

خیلی از بناهای باستانی و تاریخی در جهان دلالت بر این دارند که سنگ از مهم‌ترین مصالح ساختمانی استفاده‌شده توسط بشر بوده است. بناهایی مانند ساختمان‌های دوره هخامنشی (پاسارگاد، تخت جمشید، شوش) و آرامگاه‌های نادرشاه و بوعلی‌سینا در ایران و کاخ‌ها و میدان‌های ورزشی امپراتوری رم در ایتالیا، اهرام ثلاثه مصر و آثار قدیمی یونان مثال‌هایی هستند که در ساخت آن‌ها از سنگ استفاده شده است. 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 اشاره شده در بالا که همگی با قطعات سنگی بسیار بزرگ، گاهی با وزن بیشتر از ۳۰ تن، ساخته شده‌اند نشان‌دهنده استفاده فراوان از سنگ در فعالیت‌های ساختمانی، معماری و بناهای باستانی دوران گذشته است.

سنگ‌ها در طول مدت سرویس‌دهی در ساختمان همواره در معرض فرایندهای هوازدگی هستند. شرایط اقلیمی حکمفرما بر منطقه جغرافیایی تعیین‌کننده نوع فرایند هوازدگی است. انجماد و آب شدن و تبلور نمک از متداول‌ترین فرایندهای هوازدگی هستند که بیشترین تأثیر را در زوال سنگ ساختمانی دارند (Çelik and Korucu, 2023; Jamshidi, 2024b). اگر سنگ استقامت کافی در برابر این فرایندها را نداشته باشد، بعد از مدتی کارایی خود را از جنبه‌های مختلف همچون خصوصیات زیباشناختی و فنی از دست می‌دهد و به ساختمان از دو جنبه معماری و سازه‌ای خسارت وارد می‌شود. بدون شک سنگ ساختمانی وقتی در معرض فرایند هوازدگی قرار می‌گیرد دچار تغییراتی در

شدت اثرات زوال یک فرآیند هوازدگی در مقایسه با دیگر فرایندهای هوازدگی به دلیل متفاوت بودن مکانیسم این فرایندها است. بنابراین، شناخت مکانیسم فرایندهای هوازدگی می‌تواند کمک شایانی به شناخت بهتر و عمیق‌تر رفتار دوام سنگ‌های ساختمانی داشته باشد. این موضوع می‌تواند در انتخاب باکیفیت‌ترین سنگ برای استفاده در مناطق با شرایط اقلیمی متفاوت که فرایند هوازدگی خاص خود را دارند به عنوان راهنمای مفیدی باشد.

در مقاله حاضر، به بررسی مکانیسم فرایندهای هوازدگی متداول در طبیعت شامل شامل انجماد و آب شدن و تبلور نمک پرداخته شده است. ماهیت مکانیسم هر فرایند هوازدگی بر زوال سنگ‌های ساختمانی در یک شیوه نظام‌مند مورد بررسی و تجزیه و تحلیل واقع شده‌اند. نتایج این بررسی‌ها می‌تواند کمک شایانی به شناخت و درک چگونگی زوال سنگ ساختمانی در معرض فرایندهای هوازدگی داشته باشد.

همکاران (Torabi-Kaveh et al., 2019) و جمشیدی (Jamshidi, 2024b)، فرایندهای هوازدگی انجماد و آب شدن و تبلور نمک اثرات مضر متفاوتی روی ماسه‌سنگ و سنگ آهک داشته‌اند. اثر انجماد و آب شدن و تبلور نمک روی برخی خصوصیات فنی (مقاومت فشاری تک‌محوری، تخلخل و مقاومت کششی برزیلین) ماسه‌سنگ توسط قبادی و بابازاده (Ghobadi and Babazadeh, 2015)، بررسی شد و نتایج نشان داد که این فرایندها اثرات زوال متفاوتی بر دوام نمونه داشته‌اند. جمشیدی (Jamshidi, 2024b) بر اساس یک مطالعه جامع آزمایشگاهی گزارش داد که فرایندهای هوازدگی انجماد و آب شدن و تبلور نمک اثرات متفاوتی بر خصوصیات فیزیکو-مکانیکی و در نتیجه زوال سنگ آهک داشته‌اند. در جدول‌های (۱) و (۲) برخی از مطالعات پیشین انجام شده روی اثر فرایندهای انجماد و آب شدن و تبلور نمک روی خصوصیات ذاتی و بنابراین دوام سنگ‌های ساختمانی ارائه شده است. به طور کلی نتایج مطالعات پیشین دلالت بر این دارد که یکی از دلیل تفاوت

جدول ۱. برخی مطالعات پیشین انجام شده روی ویژگی‌های سنگ‌های در معرض انجماد و آب شدن

Table 1. Some of the previous studies performed on rocks' properties under freezing-thawing

Researcher/s	Rock type	Investigated properties								
		UCS	BTS	WA	WL	SH	PLI	Vp	n	
Akin and Ozsan (2011)	Travertine	x			x			x	x	
Jamshidi et al. (2016)	Travertine	x	x				x	x		
Hosseini and Khodayari (2019)	Sandstone	x							x	
Hashemi et al. (2018)	Limestone, Travertine					x		x		
Torabi-Kaveh et al. (2019)	Limestone	x	x				x	x		
Hale and Shakoore (2003)	Sandstone	x								
Mutluturk et al. (2004)	Carbonate, Diabase									
Yavuz et al. (2006)	Carbonate	x				x		x		
Bayram (2012)	Limestone	x								
Khanlari and Abdior (2015)	Sandstone	x						x	x	
Momeni et al. (2015)	Granite	x	x					x	x	
Ghobadi et al. (2016)	Tuff	x	x					x	x	
Pu et al. (2019)	Sandstone	x	x							
Amirkiyaei et al. (2020)	Carbonate							x		
Abdelhamid et al. (2020)	Limestone							x		
Amirkiyaei et al. (2021)	Carbonate	x								

Aral et al. (2021)	Basalts, Dolomite	×		×		×	×	×	
Jamshidi (2021)	Granite	×	×						
Quan et al. (2021)	Sandstone	×	×					×	
Huang et al. (2022)	Sandstone	×							

UCS uniaxial compressive strength, BTS Brazilian tensile strength, WA water absorption, WL weight loss, SH Schmidt hardness, PLI point load index, Vp P-wave velocity, n porosity

جدول ۲. برخی مطالعات پیشین انجام شده روی ویژگی‌های سنگ‌های در معرض تبلور نمک

Table 2. Some of the previous studies performed on rocks' properties under salt crystalization

Researcher/s	Rock type	Investigated properties								
		UCS	BTS	WA	WL	PLI	Vp	Vs	n	
Akin and Ozsan (2011)	Travertine	×			×		×		×	
Jamshidi et al. (2016)	Travertine	×	×			×	×			
Ghobadi and Babazadeh (2015)	Sandstone		×		×	×	×			
Torabi - Kaveh et al. (2019)	Limestone	×	×		×	×	×			
Angeli et al. (2007)	Sandstone, Limestone				×					
Yavuz and Topal (2007)	Marble	×	×	×			×		×	
Ludovico and Chastre (2012)	Sandstone	×			×					
Jamshidi et al. (2013)	Different rock types				×					
Ghobadi et al. (2014)	Sandstone		×		×	×	×			
Yavuz and Topal (2016)	Marble	×			×		×		×	
Heidari et al. (2017)	Limestone	×	×		×	×	×		×	
Zalooli et al. (2017)	Travertine		×		×	×	×			
Zalooli et al. (2018)	Rhyodacite, Andesite	×			×		×	×	×	
Dursun and Topal (2019)	Basalt	×		×	×		×		×	
Zalooli et al. (2020)	Granite				×		×	×	×	
Çelik and Sert (2020a)	Andesite	×					×			
Çelik and Sert (2020b)	Tuff	×			×		×			
Çelik and Ibrahimoglu (2021)	Travertine	×			×		×			

UCS uniaxial compressive strength, BTS Brazilian tensile strength, WA water absorption, WL weight loss, PLI point load index, Vp P-wave velocity, Vs S-wave velocity, n porosity

مواد و روش‌ها

هوازدگی (انجماد و آب شدن و تبلور نمک) را مورد بررسی

قرار داده‌اند. جمع‌آوری مقالات یکی از مراحل زمان‌بر پژوهش حاضر بود. یکی از نقاط قوت مقالات منتشر شده، تنوع سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه در آنها بود به گونه‌ای که دامنه گسترده‌ای از خصوصیات سنگ‌شناسی، فیزیکی، مکانیکی و حرارتی را در بر می‌گیرند. نتایج ارائه شده در مقالات پیشین در یک روش نظام‌مند بررسی شدند. در نهایت مکانیسم/مکانیسم‌های اصلی فرایندهای هوازدگی شامل انجماد و آب شدن و تبلور نمک در زوال سنگ ساختمانی جمع‌بندی و در جزئیات تجزیه و تحلیل شدند. نتایج به

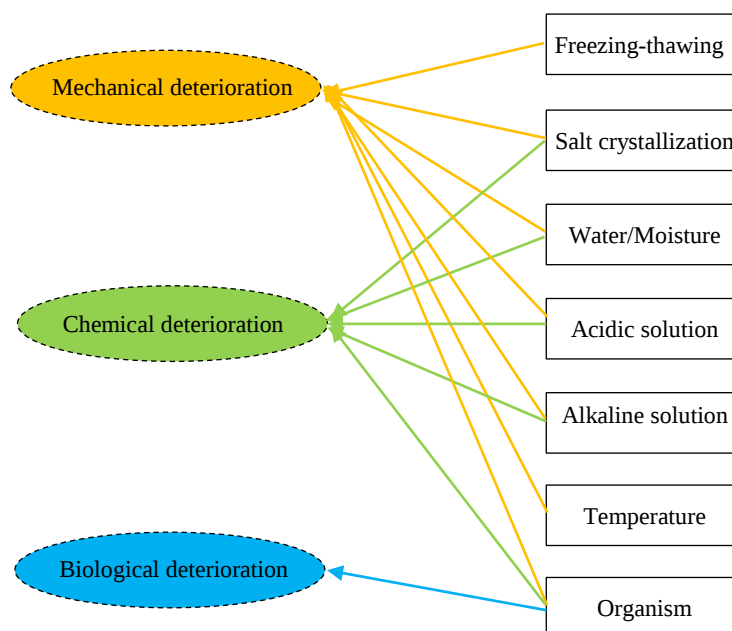
برای انجام پژوهش حاضر، تعداد قابل توجهی از مقالات منتشر شده در زمینه دوام سنگ‌های ساختمانی در معرض فرایندهای هوازدگی شامل انجماد و آب شدن و تبلور نمک جمع‌آوری شدند. در مرحله بعد، مقالاتی که تاکید ویژه‌ای روی مکانیسم/مکانیسم‌های زوال این فرایندها روی سنگ‌های ساختمانی مختلف داشتند در جزئیات بررسی شدند. مطالب ارائه شده در مقالات پیشین به صورت پراکنده بودند به طوری که برخی از این مقالات صرفاً به یکی از فرایندهای زوال پرداخته در صورتی که برخی دیگر هر دو فرایندهای

صورت یک مجموعه منسجم ارائه شده‌اند که می‌تواند مورد استفاده پژوهشگران حوزه دوام سنگ‌های ساختمانی با صرف وقت و هزینه کم قرار گیرند.

مفهوم زوال سنگ ساختمانی

زوال (Deterioration) سنگ ساختمانی فرایند پیچیده‌ای است، بنابراین تعداد زیادی اصطلاح برای توصیف آن در متون علمی استفاده می‌شود. هوازدگی (Weathering) یکی از اصطلاحات مترادف با زوال، برای شرایطی است که سنگ در اثر فرایندهای محیطی طبیعی دچار فروپاشی (Disintegration) می‌شود. در مقابل، زوال به کاهش کیفیت ویژگی‌های ذاتی سنگ ازجمله جنبه‌های زیباشناختی و خصوصیتی فنی آن اشاره دارد. ازاین‌رو، اصطلاح هوازدگی برای تمامی سنگ‌های (Rock) موجود در طبیعت و زوال برای سنگ‌های ساختمانی (Building stone) استفاده می‌شود. اصطلاح دگرسانی (Degradation) به‌طور خاص برای کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ استفاده می‌شود. این اصطلاح، که زمین‌شناسان بیشتر به‌کار می‌برند، بیانگر تغییر ماهیت شیمیایی و فیزیکی یک کانی و تبدیل شدن آن به کانی دیگر است. تباهی (Degradation) و تخریب (Decay) هنگامی استفاده می‌شوند که خصوصیات سنگ به‌سمت بدتر شدن

پیش روند. تباهی به فروپاشی یک ماده دلالت دارد و در شاخه‌های علمی مختلف مانند شیمی، فیزیک یا زمین شناسی معانی خاص خود را دارد. در این زمینه، زیست شناسان برای جلوگیری از سردرگمی معانی تباهی، با اضافه کردن پیشوند «Bio» اصطلاح تباهی زیستی (Biodegradation) را به‌کار می‌برند که نشان‌دهنده نقش ارگانیسم‌ها در تباهی یک ماده است. تخریب به معنای نابودی و آسیب به ماده است که معمولاً برای دندان در علم دندانپزشکی استفاده می‌شود. به‌هرحال در مباحث مربوط به سنگ ساختمانی، اصطلاح تخریب به معنای خراب شدن سنگ به‌دلیل مراقبت و حفاظت نکردن از آن در برابر فرایند زوال است. آخرین اصطلاح مرتبط با سنگ‌های ساختمانی آسیب (Damage) است که در مقایسه با سایر اصطلاحات جنبه عمومی‌تری دارد. برای توصیف دقیق‌تر، معمولاً اصطلاحات دیگری همراه با آسیب استفاده می‌شود که می‌توان به آسیب انجماد و آب شدن (Frost damage)، آسیب فیزیکی (Physical damage) و آسیب شیمیایی (Chemical damage) اشاره کرد. فرایندهای هوازدگی سنگ ساختمانی در طبیعت متعدّدند که می‌توان آن‌ها را به روش‌های مختلفی طبقه‌بندی کرد. براساس نوع فرایند هوازدگی که منجر به زوال می‌شود، می‌توان سه نوع زوال را تفکیک کرد؛ مکانیکی، شیمیایی و زیستی (شکل ۱).



شکل ۱. ارتباط فرایند هوازدگی و نوع مکانیسم آن‌ها در زوال سنگ ساختمانی
 Fig. 1. The relationship between weathering process and the type of mechanism them in the deterioration of building stone

نکته حائز اهمیت این است که یک فرایند هوازدگی معین ممکن است هم‌زمان منجر به زوال مکانیکی، شیمیایی یا زیستی سنگ ساختمانی شود. فرایند تبلور نمک از محلول های اشباع درون منافذ سنگ مثالی در این زمینه است. فشار تبلور نمک و خوردگی محلول نمک به ترتیب به زوال مکانیکی و شیمیایی سنگ منجر می‌شوند. همچنین تر و خشک شدن می‌تواند باعث تغییر در ترکیب شیمیایی برخی کانی‌های آهن‌دار و انبساط و انقباض کانی‌های رسی شود که به ترتیب منجر به زوال شیمیایی و مکانیکی سنگ می‌شوند.

نتایج و بحث

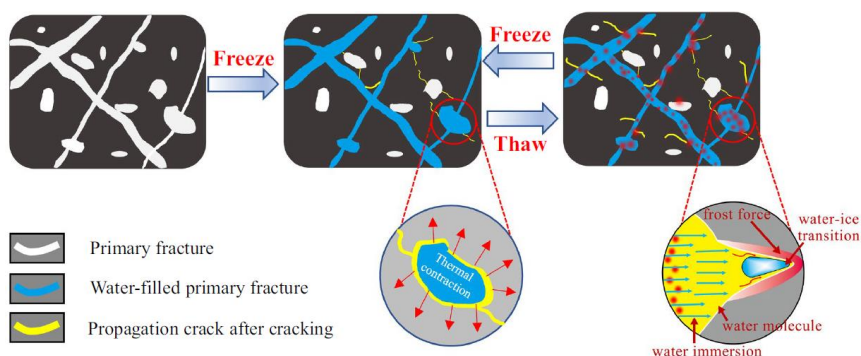
انجماد و آب شدن

انجماد و آب شدن از فرایندهای هوازدگی متداول در زوال مکانیکی سنگ‌های ساختمانی در مناطق سردسیر است.

در زوال مکانیکی می‌توان به فرایندهای انجماد و آب شدن و تبلور نمک اشاره کرد. در این نوع زوال، سنگ فقط دچار آسیب مکانیکی می‌شود و هیچ‌گونه تغییری در ترکیب شیمیایی اجزای تشکیل‌دهنده آن ایجاد نمی‌شود. در زوال شیمیایی سنگ دچار تغییر در ترکیب شیمیایی خود می‌شود. حضور آب برای رخ دادن این نوع زوال ضروری است. محلول‌های نمکی، اسیدی و قلیایی از فرایندهای مسبب زوال شیمیایی هستند. در آخرین نوع زوال، موجودات زنده گیاهی و جانوری (ارگانیسم‌ها) در آسیب رساندن به سنگ نقش دارند، از این رو به آن زوال زیستی می‌گویند. در طبیعت ممکن است چند فرایند هوازدگی به صورت هم‌زمان در زوال سنگ دخیل باشند. بنابراین موضوع زوال سنگ‌های ساختمانی، به‌ویژه هنگامی که برنامه‌ریزی برای اقدامات ترمیمی یا حفاظتی انجام می‌شود، بسیار پیچیده است.

بحث‌های زیادی دربارهٔ مکانیسم/مکانیسم‌های زوال سنگ در طی فرایند انجماد و آب شدن شده است (Chen et al., 2004; Jamshidi 2024a). دو مکانیسم شامل فشار تبلور ناشی از تبدیل شدن آب به یخ و فشار هیدرولیکی به دلیل رانده شدن آب در شبکهٔ منافذ سنگ در طی تبدیل شدن آب به یخ بیشتر مورد اجماع محققان است. در طی تبدیل شدن آب به یخ که به تبلور معروف است، افزایش حجمی در حدود ۹ درصد رخ می‌دهد. این افزایش حجم با فشاری در حدود ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع همراه است که به دیوارهٔ منافذ سنگ اعمال می‌شود (Jamshidi, 2021). هنگامی که فشار تبلور به پیش از مقاومت کششی سنگ برسد، منافذ و ریزترک‌های جدید در سنگ ایجاد می‌شود و آن‌هایی که از قبل در سنگ وجود داشته‌اند گسترش می‌یابند (شکل ۲). ادامه چرخه‌های انجماد و آب شدن که به دلیل نوسانات دمایی به زیر و بالای صفر درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد، در نهایت منجر به زوال و گسیختگی در سنگ می‌شود.

برای وقوع انجماد و آب شدن در منافذ سنگ شرایطی به شرح زیر باید وجود داشته باشند؛
 (۱) مکان کاربرد سنگ در قسمت‌های بیرونی ساختمان باشد.
 (۲) رطوبت یا آب در محیط به حدی باشد که بتواند به درون سنگ نفوذ کند.
 (۳) سنگ متخلخل باشد و شبکهٔ منافذ آن شرایطی داشته باشد که رطوبت یا آب به راحتی جذب آن شود.
 (۴) دمای هوای محیط به زیر و بالای صفر درجه سانتی‌گراد نوسان داشته باشد.
 نبود هر یک از شرایط بالا باعث می‌شود که فرایند انجماد و آب شدن رخ ندهد. برای مثال سنگ‌های آذرین درونی (گرانیت، دیوریت) یا سنگ آهک‌های متراکم و برخی سنگ‌های دگرگونی مانند مرمر به دلیل بافت بسیار فشرده‌ای که دارند تخلخل بسیار اندکی دارند که در نتیجه آب توانایی نفوذ به درون این نوع سنگ‌ها را ندارد. همچنین در مناطق با اقلیم گرم‌وخشک به دلیل اینکه نوسانات دمایی به زیر صفر درجه سانتی‌گراد وجود ندارد، فرایند انجماد و آب شدن در این نوع اقلیم رخ نمی‌دهد.



شکل ۲. طرح شماتیک توسعه منافذ و ریزترک‌ها در سنگ به دلیل فرایند انجماد و آب شدن
 Fig. 2. Schematic illustration of the development of stone pores and microcracks due to freezing-thawing process

وقوع می‌پیوند که حداقل ۹۱ درصد منافذ سنگ از آب اشغال شده باشد. البته برخی مطالعات نشان داده که با مقادیر درجه اشباع کمتر از ۹۱ درصد، همچنین ممکن است تغییراتی در شبکهٔ منافذ سنگ به وجود آید، اما شدت آن

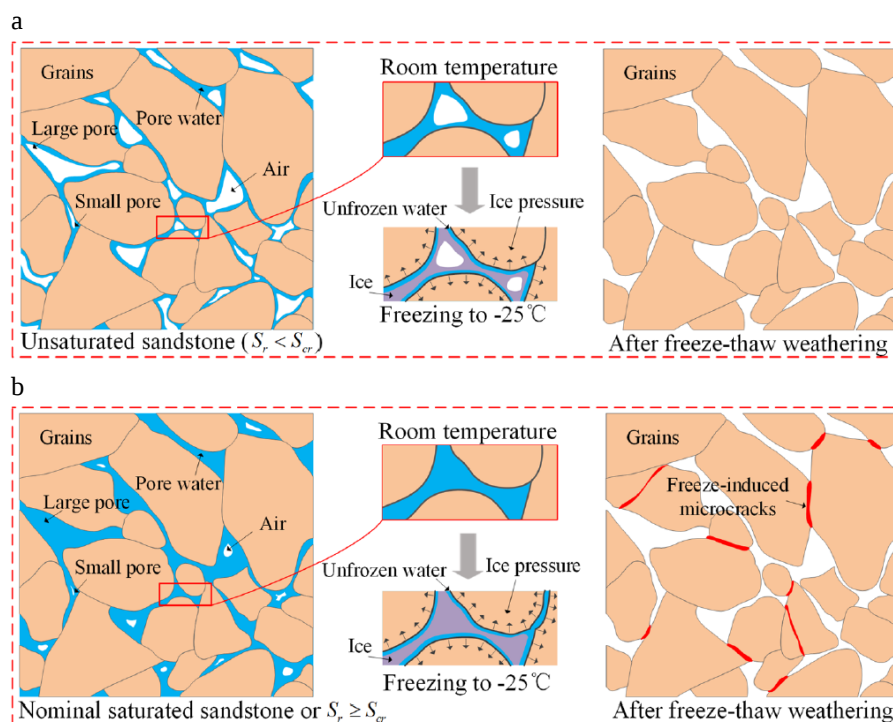
باید توجه کرد فشار تبلور برپایهٔ این واقعیت است که حجم یک سانتی‌متر مکعب آب بعد از تبدیل شدن به یخ به ۱/۰۹ سانتی‌متر مکعب افزایش می‌یابد. بنابراین، تغییر در منافذ و ریزترک‌های سنگ به دلیل انجماد و آب شدن هنگامی به

به دیواره منافذ سنگ در طی تبدیل شدن آب به یخ از رابطه زیر تعیین می‌شود (Steiger, 2004):

$$\Delta p = \frac{S_1 - S_{ice}}{V_{m,ice}} (T_f - T) \quad (1)$$

که در آن S_1 و S_{ice} به ترتیب بی‌نظمی آب و یخ هستند، $V_{m,ice}$ حجم مولی یخ، T_f دمای انجماد و T دمای لایه آب بین بلور یخ و دیواره منفذ است.

کمتر از حالتی است که درجه اشباع بالاتر از ۹۱ درصد است. شکل (۳) المانی از سنگ را نشان می‌دهد که بخشی یا تمامی منافذ آن از آب اشغال شده‌اند (به ترتیب درجه اشباع کمتر از ۱۰۰ درصد و برابر با ۱۰۰ درصد). در شرایطی که درجه اشباع برابر ۱۰۰ درصد است، با تبدیل شدن آب به یخ و افزایش حجم ۹ درصدی، فشار تبلور به دیواره منافذ سنگ اعمال و در نتیجه زوال آن را در پی خواهد داشت. فشار تبلور



شکل ۳. مکانیسم زوال سنگ ناشی از فرایند انجماد و آب شدن در درجه‌های اشباع متفاوت (a) درجه اشباع کمتر از ۱۰۰ درصد و (b) درجه اشباع برابر با ۱۰۰ درصد

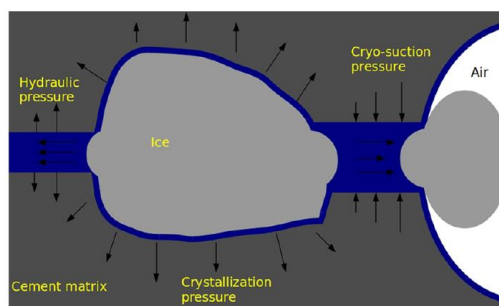
Fig. 3. Deterioration mechanism of the stone due to freezing-thawing process with varying degrees of saturation a) saturation degree < 100%, and b) saturation degree = 100%

منفذ به دلیل افزایش حجم یخ به خارج از منفذ رانده می‌شود که این منجر به فشار هیدرولیکی در سنگ می‌شود (شکل ۴). مقدار فشار هیدرولیکی به دمای انجماد و نرخ کاهش دما بستگی دارد. هرچه دمای انجماد کمتر و نرخ کاهش دما سریع‌تر باشد، شدت فشار هیدرولیکی افزایش و احتمال گسیختگی در سنگ بیشتر است. از سوی دیگر ریزمنفذهای به عنوان عاملی دیگر در حرکت آب ناشی از تبدیل شدن آب

رانده شدن آب در شبکه منافذ سنگ، که به فشار هیدرولیکی معروف است، دومین مکانیسمی است که منجر به زوال سنگ در طی تبدیل شدن آب به یخ می‌شود. با کاهش دما ابتدا آبی که در قسمت‌های مرکزی یک منفذ وجود دارند، شروع به انجماد می‌کند تا اینکه تمامی آب به یخ تبدیل شود. در مراحل ابتدایی این فرایند، آب غشائی در میان یخ و دیواره

پژوهشگران نقش فشار تبلور را بسیار برجسته‌تر و عامل اصلی زوال سنگ در مناطق سردسیر می‌دانند.

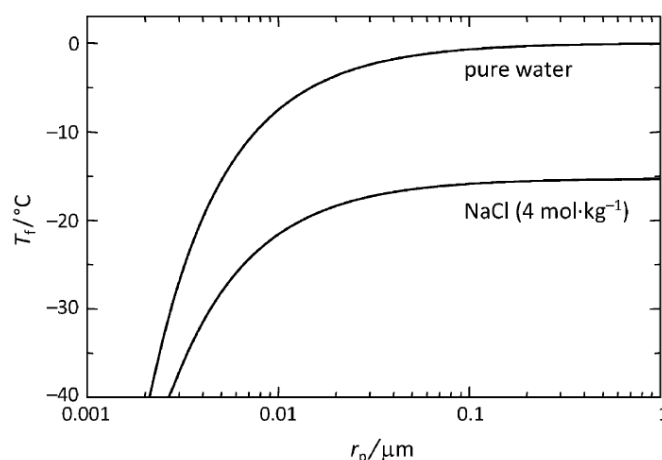
به یخ هستند. با افزایش ریزمنفدها، فشار هیدرولیکی در سنگ افزایش می‌یابد. با اینکه هردو فرایند فشار تبلور و فشار هیدرولیکی در طی تبدیل شدن آب به یخ رخ می‌دهند، ولی



شکل ۴. طرح شماتیک فشار هیدرولیک، فشار مکش و فشار تبلور تحمیل شده به سنگ ناشی از تبلور یخ در درون منفذ سنگ
Fig. 4. Schematic illustration of hydraulic pressure, cryosuction pressure, and crystallization pressure induced by ice crystallization into stone pore

یخ می‌شود. کاهش دمای انجماد به دلیل حضور نمک در آب باعث شده که از نمک به عنوان ضدیخ برای جلوگیری از یخ بستن آب در جاده، خیابان و معابر استفاده کنند. صرف نظر از وجود نمک‌های محلول در آب، اندازه منفذ سنگ روی دمای انجماد آب نیز نقش دارد (Topal and Doyuran, 1988; Jamshidi et al., 2017). آب در منافذ کوچک‌تر نسبت به آن‌هایی که بزرگ‌ترند در دماهای پایین‌تری یخ می‌بندد. مطابق با شکل (۵)، با کوچک‌تر شدن اندازه منفذ کاهش شدیدی در دمای انجماد رخ می‌دهد. بنابراین، در سنگ‌های متخلخل با دامنه گسترده‌ای از اندازه منافذ، با کاهش دما به زیر صفر درجه سانتی‌گراد، ابتدا آب در منافذ بزرگ‌تر منجمد می‌شود و به تدریج در منافذ با اندازه‌های کوچک‌تر. در منافذ کوچک‌تر از ۰/۱ میکرون آب صرفاً در دماهای خیلی پایین منجمد می‌شود؛ به طوری که در منافذ با اندازه ۰/۰۴ میکرون یک دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد برای انجماد آب خالص نیاز است.

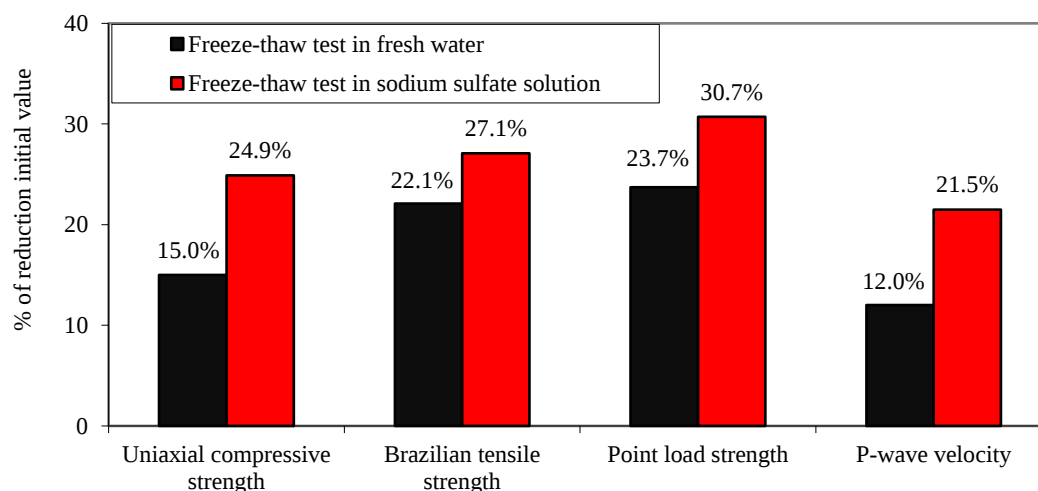
آب خالص در دمای صفر درجه سانتی‌گراد منجمد و تبدیل به یخ می‌شود. فاکتورهایی وجود دارد که می‌تواند دمای انجماد آب را تغییر دهد که برخی از آن‌ها به ماهیت آب و برخی دیگر به خصوصیات ذاتی سنگ مربوط هستند. آب در طبیعت به ندرت به صورت خالص یافت می‌شود و همواره دارای مقداری ناخالصی است. برای مثال، وجود نمک‌های محلول، عناصر سنگین فلزی، عناصر همراه با باران اسیدی در اتمسفرهای آلوده شهرهای صنعتی و پرتراфик از مواردی هستند که منجر به ایجاد ناخالصی در آب می‌شوند. در این زمینه نقش نمک‌های محلول روی دمای انجماد آب بسیار مهم است (Çelik and Korucu, 2023; Jamshidi, 2024b). وجود مقداری نمک در آب به شدت دمای انجماد آب را پایین می‌آورد. این موضوع در شکل (۵) نشان داده شده است. برای یک منفذ با اندازه مشخص، آب حاوی نمک کلرید سدیم نسبت به آب خالص دمای انجماد پایین‌تری دارد، به عبارت دیگر در دمای منفی‌تری منجمد و تبدیل به



شکل ۵. دما (T_f) انجماد آب خالص و محلول نمک کلرید سدیم به عنوان تابعی از اندازه منافذ سنگ (r_p) (Steiger, 2006)
 Fig. 5. Freezing temperature (T_f) in pure water and NaCl solution as a function of pore size (Steiger, 2006)

سنگ‌های ساختمانی در معرض فرایند انجماد و آب شدن، ممکن است شدت‌های مختلف زوال از کم تا زیاد را متحمل شوند. دو گروه فاکتور در شدت زوال سنگ نقش دارند. گروه اول آن‌هایی هستند که در ارتباط با فرایند انجماد و آب شدن هستند. از این گروه می‌توان تعداد چرخه‌های انجماد و آب شدن، دامنه دمایی انجماد و آب شدن، طول زمانی مرحله انجماد و مرحله آب شدن و نوع محلول انجماد (آب خالص یا ناخالص) را نام برد. فاکتورهای مربوط به گروه دوم به ماهیت سنگ ساختمانی برمی‌گردد. خصوصیات ذاتی مانند ترکیب کانی‌شناسی، بافت، تخلخل، توزیع اندازه منافذ، درجه اشباع و مقاومت (به‌ویژه مقاومت کششی) در این گروه قرار می‌گیرند.

جمشیدی و همکاران (Jamshidi et al., 2016) پژوهشی روی دوام سنگ تراورتن در برابر انجماد و آب شدن در آب خالص و آب حاوی نمک سولفات سدیم انجام دادند. اندازه گیری مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلین، شاخص بار نقطه‌ای و سرعت موج التراسونیک P قبل و بعد از آزمایش انجماد و آب شدن نشان داد که آب حاوی نمک تأثیر بیشتری بر زوال تراورتن داشته است (شکل ۶). هرچند وجود نمک منجر به کاهش دمای انجماد آب می‌شود، به هر حال این پژوهشگران اثر مضرتر فرایند انجماد و آب شدن در محلول نمک را به فشار تبلور نمک در منافذ سنگ نسبت دادند.



شکل ۶. تغییرات خصوصیات مکانیکی تراورتن در معرض فرایند انجماد و آب شدن در آب خالص و محلول نمک سولفات سدیم (Jamshidi et al., 2016)

Fig. 6. Changes in the mechanical characteristics of travertine subjected to freezing–thawing process in fresh water and sodium sulfate solution (Jamshidi et al., 2016)

تبلور نمک

مکان‌ها و اقلیم‌ها در سرتاسر جهان از مناطق ساحلی دریاها

و دریاچه‌ها تا مناطق خشکی، از اقلیم‌های گرم و خشک تا اقلیم‌های مرطوب و پربارش یافت می‌شوند. در ایران نمک به وفور در مناطق ساحلی خلیج فارس و دریا‌های عمان و خزر و همچنین نواحی مجاور دریاچه‌های ارومیه و حوض سلطان قم وجود دارند. با توجه به اینکه مساحت زیادی از ایران را مناطق کویری با اقلیم‌های گرم و خشک فراگرفته، بنابراین بدیهی است که سنگ‌های ساختمانی به‌کاررفته در این مناطق در معرض هجوم نمک‌های محلول هستند. برخی از شهرهای ایران صنعتی یا نیمه‌صنعتی هستند که منجر به تولید حجم زیادی از گازهای آلاینده در اتمسفر می‌شوند. به این آلاینده‌ها، گازهای ساطع‌شده از وسایل نقلیه موتوری نیز اضافه خواهد شد. باران در ترکیب با گازهای آلاینده منجر به تولید محلول‌های اسیدی می‌شود. محلول‌های اسیدی در واکنش با کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ، به‌ویژه کلسیت و دولومیت، برخی نمک‌ها مانند ژیپس را تشکیل می‌دهند. ژیپس از کانی‌های مهم در هوازدهی مکانیکی سنگ‌ها به دلیل فرایند تر و خشک شدن است. بیان این نکته

تبلور نمک یکی از متداول‌ترین فرایندهای هوازدهی در زوال سنگ‌های ساختمانی است. در میان فرایندهای هوازدهی، تبلور نمک قوی‌ترین فرایند در زوال و کاهش دوام سنگ‌های ساختمانی است (Benavente et al., 2001; Jamshidi et al., 2013). در طبیعت نمک‌های مختلفی وجود دارد که در تماس با آب به‌صورت محلول درمی‌آیند. منشأ نمک‌ها بسیار متنوع است که می‌تواند طبیعی یا مصنوعی باشد. ترکیبات موجود در سیمان پرتلند و بتن، ذرات معلق نمک در بخار آب اقیانوس‌ها، دریاها و دریاچه‌ها، خاک، آب زیرزمینی و برخی ترکیبات موجود در سنگ از منابع طبیعی تولید نمک هستند. در مقابل بشر نقش زیادی در فراهم کردن شرایط تشکیل نمک در طبیعت به‌صورت مصنوعی دارد. وجود گازهای آلاینده اتمسفری در مناطق صنعتی (مانند اکسیدهای گوگرد و نیتروژن)، نمک‌های ضدیخ (مانند کلرید کلسیم، کلرید منیزیم، کارنالیت و کلرید سدیم)، کودهای شیمیایی و حیوانی مثال‌هایی از فعالیت‌های بشری در تسریع تولید نمک هستند. بنابراین، نمک‌ها در دامنه گسترده‌ای از

حائز اهمیت است که موارد و رخداد های اشاره شده در زمینه تشکیل نمک های متبلور به سایر مناطق جهان نیز تعمیم پذیرند.

بر اساس ترکیب شیمیایی، نمک های محلول در آب به چهار گروه سولفات ها، کلرید ها، کربنات ها و نیترات ها طبقه بندی می شوند. در جدول (۳) برخی از متداول ترین نمک ها همراه با فرمول شیمیایی و برخی خصوصیات فیزیکی آن ها ارائه شده است. سولفات سدیم، سولفات منیزیم و ژپس

(نمک های سولفات) و کلرید سدیم (نمک کلروره) از انواع نمک های فراوان و به شدت مضر در زوال سنگ های ساختمانی هستند. این نمک ها به صورت محلول در آب می توانند توسط سنگ متخلخل جذب شوند. طی فعل و انفعالاتی در منافذ سنگ، رشد بلور های نمک و واکنش محلول نمک با اجزای تشکیل دهنده سنگ به ترتیب منجر به زوال مکانیکی و شیمیایی سنگ می شوند.

جدول ۳: برخی نمک های متداول در زوال سنگ (Winkler, 1994)

Table 3. Some of common salts in stone deterioration (Winkler, 1994)

Salt	Chemical formula	Density (g/cm ³)	Molecular weight (g/mole)
Anhydrite	CaSO ₄	2.96	136
Bischofite	MgCl ₂ .6H ₂ O	1.57	203
Dodecahydrate	MgSO ₄ .12H ₂ O	1.45	336
Epsomite	MgSO ₄ .7H ₂ O	1.68	246
Gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O	2.32	127
Halite	NaCl	2.17	59
Heptahydrate	Na ₂ CO ₃ . 7H ₂ O	1.51	232
Hexahydrate	MgSO ₄ .6H ₂ O	1.75	228
Kieserite	MgSO ₄ . H ₂ O	2.45	138
Mirabilite	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	1.46	322
Natron	Na ₂ CO ₃ . 10H ₂ O	1.44	286
Tachhydrite	2MgCl ₂ .CaCl ₂ .12H ₂ O	1.66	514
Thenardite	Na ₂ SO ₄	2.68	142
Thermonatrite	Na ₂ CO ₃ . H ₂ O	2.25	124

برای یک محلول با توجه به غلظت نمک دو حالت وجود دارد؛ حالت اول هنگامی است که غلظت نمک به قدری کم است که محلول غیر اشباع تشکیل می شود. با افزایش غلظت نمک، محلول اشباع می شود. تبلور نمک در منافذ سنگ صرفاً در شرایطی رخ می دهد که محلول اشباع نمک وجود داشته باشد. غلظت نمک و دمای محلول دو فاکتور مهم در اشباع شدن محلول و در نتیجه تبلور نمک هستند. در شکل (۷) نقش غلظت نمک و دمای محلول در تبلور نمک به صورت شماتیک نمایش داده شده است. با تغییر غلظت نمک و دمای محلول سه شیوه برای حصول محلول اشباع نمک وجود دارد:

(۱) غلظت نمک ثابت باشد ولی دما کاهش یابد. در غلظت ثابت نمک، می توان انتظار تبلور نمک از محلول را داشت. این در شرایطی رخ می دهد که دما به دلایلی (مانند تغییر دمای هوا در طی شبانه روز) کاهش یابد. وقتی محلول از حالت غیر اشباع به محدوده اشباع می رسد، رشد بلور های نمک و در نتیجه تبلور نمک آغاز می شود. با کاهش بیشتر دما محلول فوق اشباع می شود که در این شرایط تبلور نمک با سرعت بیشتری رخ می دهد. این رخداد با خط A به B در شکل (۷) نمایش داده شده است.

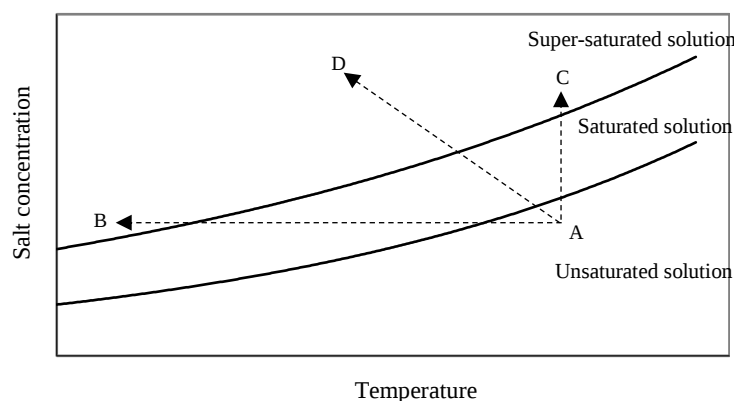
(۲) دما ثابت باشد ولی غلظت نمک افزایش یابد. هنگامی که در محلول نمک تبخیر رخ دهد، غلظت محلول نمک در

نرخ تبخیر منجر به تغییر حالت محلول نمک از غیراشباع به اشباع خواهد شد. به محض اشباع شدن محلول، تبلور نمک در منافذ سنگ آغاز می‌شود.

در طی نفوذ محلول نمک به منافذ سنگ دو نوع زوال شامل مکانیکی یا شیمیایی رخ می‌دهد که در ادامه به شرح هر کدام پرداخته شده است.

دمای ثابت افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به تغییر محلول غیراشباع به محلول اشباع می‌شود. در این شرایط، تبلور نمک از محلول آغاز می‌شود. خط A به C این رخداد را به تصویر کشیده است (شکل ۷).

۳) دما کاهش و غلظت نمک افزایشی باشد. این رخداد با خط A به D نمایش داده شده است. هم‌زمانی کاهش دمای هوا با اتمام روز و نزدیک شدن به شب و ازسوی دیگر افزایش



شکل ۷. رخداد فوق اشباع شدن محلول نمک با تغییرات غلظت نمک و دمای محلول (نقطه A نشان‌دهنده محلول غیراشباع است)
Fig. 7. Occurrence of super-saturation of a salt solution with changes in solution concentration and temperature (point A represents an unsaturated solution)

که در آن R ثابت گازی (برابر با ۰/۰۸۲ لیتر اتمسفر بر مول)،
T دمای مطلق، V_m حجم مولی بلور نمک، m غلظت محلول در هنگام تبلور نمک و m_{sat} غلظت محلول اشباع نمک است.
رابطه (۲) متداول‌ترین معادله برای تعیین فشار ناشی از رشد بلور نمک در یک منفذ محصور موجود در سنگ است. فشار تبلور در شرایطی رخ می‌دهد که محلول نمک به درجه فوق اشباع برسد. شرایط فوق اشباع هنگامی به وجود می‌آید که غلظت نمک به حدی برسد که مقداری از آن به صورت بلورهایی در محلول ته‌نشین یا به عبارت دیگر متبلور شوند. مطالعات پژوهشگران نشان می‌دهد که شرایط اشباع نیز منجر به تبلور نمک می‌شود، لیکن فشار تبلور ایجاد نمی‌شود. بنابراین فشار تبلور فقط در طی تبلور نمک در شرایط فوق اشباع محلول رخ می‌دهد.

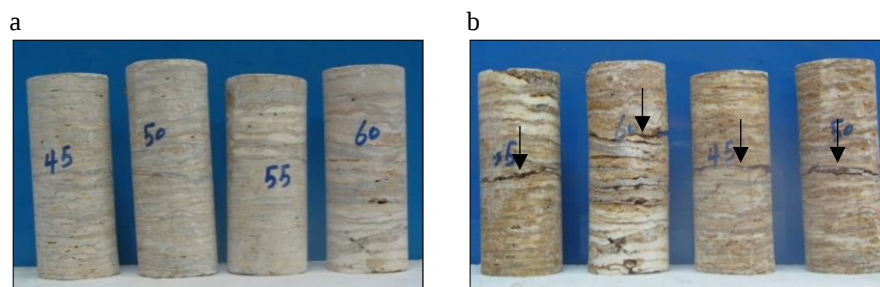
زوال مکانیکی

رشد بلورهای نمک در درون منافذ سنگ منجر به اعمال فشار به دیواره منافذ می‌شود. در شرایطی که مقاومت کششی سنگ پایین باشد و نتواند فشارهای اعمالی را تحمل کند، زوال و در نهایت تخریب سنگ رخ می‌دهد (شکل ۸).

مطالعات روی چگونگی مکانیسم/مکانیسم‌های تولیدکننده فشار ناشی از رشد بلورهای نمک هنوز ادامه دارد و تاکنون محققان به اجماع نرسیده‌اند. به هر حال اعتقاد بر این است که فشار ناشی از رشد بلورهای نمک غالباً از طریق فرایندهای تبلور نمک و آگیری نمک ایجاد می‌شود.

فشار تبلور نمک (Δp) در منافذ سنگ از رابطه زیر تعیین می‌شود؛

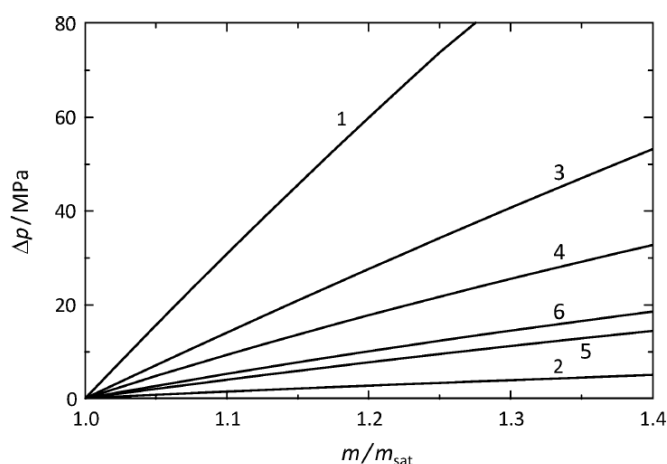
$$\Delta p = \frac{RT}{V_m} \ln\left(\frac{m}{m_{sat}}\right) \quad (2)$$



شکل ۸. تراورتن a) شرایط بکر (قبل از آزمایش تبلور نمک) و b) زوال مکانیکی ناشی از تبلور نمک (فلش‌ها زوال را نشان می‌دهند)
 Fig. 8. Travertine a) Initial conditions (before salt crystallization test), and b) Mechanical deterioration due to salt crystallization (arrows indicate deterioration)

کردند. سنگ با ردهٔ مقاومتی بهتر، دوام بیشتری در برابر فرایند تبلور نمک دارد. مطالعات پیشین روی سنگ‌های مختلف دلالت بر این دارد که مقاومت کششی سنگ‌ها به ندرت به ۱۵ مگاپاسکال می‌رسد. براساس فشار تبلور نمک های ارائه شده در شکل (۹)، این فشارها به مراتب بزرگ‌تر از مقاومت کششی سنگ‌ها هستند و بنابراین به راحتی منجر به زوال و گسیختگی در آنها می‌شوند. در یک مطالعهٔ آزمایشگاهی، اشتایگر و آسموسن (Steiger and Asmussen, 2008) نشان دادند که در طی تبلور بلورهای نمک از محلول فوق اشباع سولفات سدیم، فشاری در حدود ۱۵ مگاپاسکال به دیوارهٔ منافذ سنگ اعمال می‌شود که زوال و گسیختگی شدید سنگ را به همراه دارد.

در شکل (۹) فشار تبلور محاسبه شده از رابطه (۲) برای برخی از متداول ترین و مخرب ترین نمک‌ها در زوال سنگ‌ها ارائه شده است. فشار حاصل از تبلور نمک به دیوارهٔ منافذ و در نتیجه کل بدنهٔ سنگ اعمال می‌شود. فشار تبلور ممکن است به بیش از مقاومت کششی سنگ برسد که در این شرایط با گسیختگی سنگ همراه خواهد بود. بنابراین، مقاومت کششی می‌تواند شاخص مهمی در ارزیابی دوام سنگ در برابر فشار تبلور نمک باشد. در این ارتباط، جمشیدی و سوسا (Jamshidi and Sousa, 2025) سنگ‌های ساختمانی با منشأ آذرین را براساس مقاومت کششی برزیلین به ۵ ردهٔ مقاومتی، شامل ضعیف ($> 1/3 \text{ MPa}$)، کمی ضعیف (MPa)، قوی ($1/3 - 4/2 \text{ MPa}$)، خیلی قوی ($4/2 - 10/1 \text{ MPa}$)، و به شدت قوی ($< 19/3 \text{ MPa}$) طبقه بندی

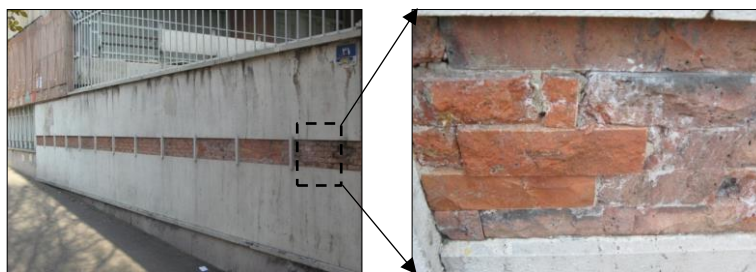


شکل ۹. فشار تبلور (Δp) محلول‌های اشباع با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (۱) نمک طعام (NaCl) (۲) میرابلیت ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) (۳) تناردیت (Na_2SO_4) (۴) نیترانیت (NaNO_3) (۵) اپسومیت ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (۶) هگزاهیدرایت ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (m : غلظت محلول نمک هنگام تبلور نمک، m_{sat} : غلظت محلول اشباع نمک) (Steiger, 2005)

Fig. 9. Crystallization pressures (Δp) at 25 °C in supersaturated solutions of (1) halite (NaCl), (2) mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), (3) thenardite (Na_2SO_4), (4) nitratine (NaNO_3), (5) epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (6) hexahydrite ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (m : salt solution concentration in the moment of salt crystallization, m_{sat} : salt solution concentration in the saturated conditions (Steiger, 2005)

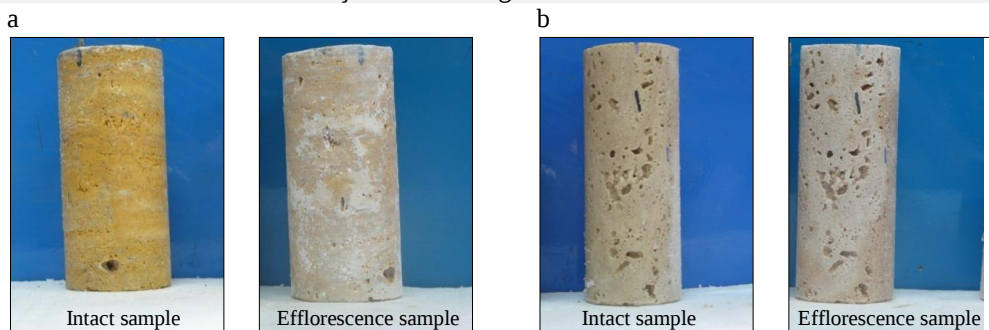
می‌شود (شکل ۱۰). رنگ سنگ ساختمانی از عواملی است که می‌تواند شدت اثرات مضر شوره‌زدگی به ظاهر سنگ را کاهش دهد. در این راستا جمشیدی و همکاران (Jamshidi et al., 2020) اثر شوره‌زدگی روی تراورتن‌های آذرشهر و محلات را در محیط آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج حاکی از این بود که تراورتن‌های با رنگ روشن مانند کرم نسبت به تراورتن‌های رنگی آسیب‌پذیری کمتری در برابر اثر مضر شوره‌زدگی داشته‌اند (شکل ۱۱). بنابراین در هنگام انتخاب سنگ ساختمانی برای استفاده در مناطقی با احتمال رخداد تبلور نمک توصیه می‌شوند که حتی‌الامکان سنگ‌های با رنگ روشن مدنظر قرار گیرند.

تبلور نمک از محلول اشباع ممکن است در منافذ (منافذ محصور) یا اینکه در سطح (منافذ نامحصور) سنگ رخ دهد. در حالت اول که منفذ محصور است فشار تبلور وجود دارد. اگر مقدار فشار تبلور به حدی باشد که بتواند بر مقاومت سنگ غلبه کند، زوال مکانیکی اتفاق می‌افتد. در حالتی که تبلور نمک در سطح سنگ رخ دهد، پدیده‌ای به نام شوره زدگی اتفاق می‌افتد. برخلاف تبلور نمک در درون منافذ محصور سنگ، شوره‌زدگی به دلیل اینکه در منافذ نامحصور رخ می‌دهد، همراه با فشار تبلور نیست. بنابراین، تأثیری در زوال سنگ ندارد و فقط با ایجاد ظاهری ناموزون در سطح سنگ منجر به آسیب به نمای ساختمان از جنبهٔ زیباشناختی



شکل ۱۰. شوره زدگی در سنگ استفاده شده به عنوان دیوارپوش ساختمان

Fig. 10. Efflorescence in stone used as façade of building



شکل ۱۱. شوره زدگی (a) تراورتن لیمونی و (b) تراورتن کرم

Fig. 11. Efflorescence a) Lemon travertine, and b) Cream travertine

بر مول، T دمای مطلق، V_h و V_a به ترتیب حجم فاز آب دار و بدون آب نمک و P_w و P'_w به ترتیب فشار بخار آب و فشار بخار نمک آب دار هستند.

نمک های سولفات کلسیم، سولفات سدیم، سولفات منیزیم و کربنات سدیم از متداول ترین نمک های موجود در طبیعت هستند که در طی جذب و دفع آب در ساختار خود در زوال سنگ ها نقش دارند. میزان فشار آبیگری نمک ها متأثر از دو فاکتور محیطی شامل دما و رطوبت نسبی است. عموماً بیشینه فشار آبیگری در شرایطی رخ می دهد که دما حداقل و رطوبت نسبی حداکثر باشد. در جدول (۴) معادله آبیگری برخی نمک ها همراه با فشار آبیگری آن ها به عنوان تابعی از تغییرات دما (T) و رطوبت نسبی (RH) ارائه شده است.

برخی از نمک ها وقتی در تماس با رطوبت قرار می گیرند، به راحتی آب را جذب می کنند و از طرف دیگر با تغییر در رطوبت و دمای محیط آب خود را از دست می دهند. در خیلی از موارد فرم آب دار نمک فاز پایدار آن است و به همین دلیل رطوبت محیط را جذب می کند. جذب رطوبت به وسیله نمک منجر به افزایش حجم آن می شود که در طی آن فشار به دیواره منافذ سنگ اعمال می شود. فرایند جذب رطوبت به وسیله نمک که همراه با فشار به دیواره منافذ است به فشار آبیگری معروف است. فشار اعمال شده به دیواره منافذ سنگ در اثر آبیگری نمک از رابطه (۳) محاسبه می شود؛

$$\Delta p = \frac{nRT}{V_h - V_a} 2.3 \log \left(\frac{P_w}{P'_w} \right) \quad (3)$$

که در آن n تعداد مول های آب جذب شده در طی فرایند آبیگری نمک، R ثابت گازی (برابر با $82/07$ میلی متر اتمسفر

جدول ۴. فشار آبیگری (برحسب مگاپاسکال) نمک‌های متداول (Winkler, 1994)

Table 4. Hydration pressure of some common salts (Winkler, 1994)

CaSO ₄ . 1/2H ₂ O → CaSO ₄ . 2H ₂ O					
	RH = 60%	RH = 70%	RH = 80%	RH = 90%	RH = 100%
T = 0 C°	138	160	182	200	219
T = 20 C°	88	115	137	157	176
T = 40 C°	42	70	94	116	135
T = 60 C°	0	25	51	72	93
MgSO ₄ . H ₂ O → MgSO ₄ . 6H ₂ O					
	RH = 80%	RH = 90%	RH = 100%	-	-
T = 65.3 C°	1	23	42	-	-
MgSO ₄ . 6H ₂ O → MgSO ₄ . 7H ₂ O					
	RH = 60%	RH = 70%	RH = 80%	RH = 90%	RH = 100%
T = 10 C°	8	10	12	13	15
T = 20 C°	5	7	9	10	12
T = 30 C°	2	4	6	8	10
T = 40 C°	-	1	4	7	9
Na ₂ CO ₃ . H ₂ O → Na ₂ CO ₃ . 7H ₂ O					
	RH = 60%	RH = 70%	RH = 80%	RH = 90%	RH = 100%
T = 0 C°	24	45	64	80	94
T = 10 C°	5	26	46	62	77
T = 20 C°	-	9	28	46	61
T = 30 C°	-	-	9	28	43
Na ₂ CO ₃ . 7H ₂ O → Na ₂ CO ₃ . 10H ₂ O					
	RH = 60%	RH = 70%	RH = 80%	RH = 90%	RH = 100%
T = 0 C°	6	28	49	67	82
T = 10 C°	-	11	32	50	67
T = 20 C°	-	•	16	35	52
T = 30 C°	-	-	•	19	36

زوال شیمیایی

اگرچه در مطالعات گذشته بیشتر به جنبه‌های زوال مکانیکی سنگ‌های ساختمانی در اثر رشد بلورهای نمک (فشار تبلور و فشار آبیگری) پرداخته شده است، اما برخی پژوهشگران نشان داده‌اند که واکنش شیمیایی محلول نمک با سنگ نیز ممکن است در زوال آن نقش داشته باشد (Jamshidi et al., 2016; Menéndez and Petránová, 2016). در سنگ‌های کربناته که کانی‌های کلسیت و دولومیت از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده آن‌ها هستند، زوال شیمیایی به‌دلیل هجوم نمک‌های سولفات به‌وضوح رخ می‌دهد. واکنش شیمیایی کانی کلسیت در سنگ‌های کربناته با یون سولفور در محلول نمک‌های سولفات مانند سولفات سدیم و سولفات منیزیم مطابق معادله زیر است:



مطابق با معادله (۴) محصول واکنش کلسیت با یون سولفور کانی ژپس است که یکی از نمک‌های مضر در زوال سنگ‌های ساختمانی متخلخل است. تشکیل ژپس در سنگ‌های کربناته طی دو فرایند شامل تبلور و خوردگی به ترتیب منجر به زوال مکانیکی و شیمیایی می‌شود (Parvizpur et al., 2022). به‌عبارت دیگر نمک‌های سولفات علاوه بر اثرات شیمیایی روی سنگ‌های کربناته، با تشکیل ژپس منجر به تسریع زوال آن‌ها نیز می‌شوند. در شکل (۱۲) زوال شیمیایی تراورتن به‌دلیل واکنش کانی کلسیت با یون سولفور موجود در نمک سولفات سدیم نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش چرخه‌های تبلور نمک بر شدت زوال تراورتن به‌طور محسوسی افزوده شده است. علاوه بر نقش کانی کلسیت در زوال شیمیایی سنگ‌های ساختمانی کربناته، وجود لایه‌بندی با میان لایه‌های حاوی مواد آلی و ترکیبات آهن‌دار (مانند اکسیدهای آهن) نیز به

عنوان عامل تسریع کننده‌ای در آسیب‌پذیری این نوع سنگ
ها در برابر حملات شیمیایی نمک‌ها شناخته شده است.



شکل ۱۲. زوال شیمیایی تراورتن بعد از آزمایش تبلور نمک (a) ۴۰ چرخه (b) ۵۰ چرخه و (c) ۶۰ چرخه (خطوط غیرممتد زوال را نشان می‌دهند)

Fig. 12. Chemical deterioration of travertine after salt crystallization test a) 40th cycles b) 50th cycles, and c) 60th cycles (dashed lines indicate deterioration)

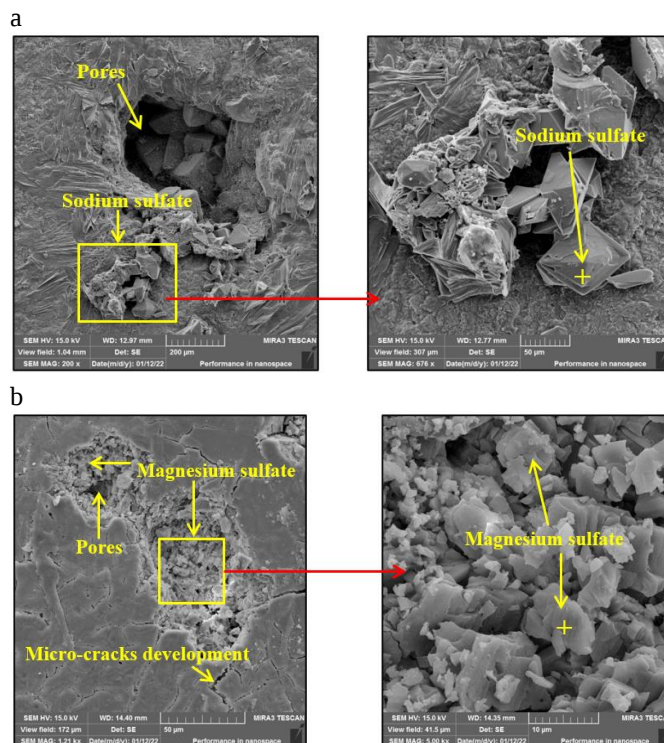
(شهرستان محلات) در برابر محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم انجام دادند، نتایج زیر به دست آمد؛

(۱) شواهد ماکروسکوپی دلالت بر اثر مخرب‌تر سولفات سدیم نسبت به سولفات منیزیم بر زوال مکانیکی و شیمیایی تراورتن دارد.

(۲) روند کاهشی در خصوصیات فنی تراورتن (مقاومت کششی برزیلین، شاخص بار نقطه‌ای، سرعت موج التراسونیک P) با افزایش چرخه‌های آزمایش تبلور نمک.

(۳) اثر زوال شدیدتر نمک سولفات سدیم در مقایسه با سولفات منیزیم به ماهیت متفاوت الگوی تبلور آن‌ها مرتبط است (شکل ۱۳). الگوی تبلور نمک‌های سولفات سدیم و سولفات منیزیم در منافذ تراورتن تابعی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این نمک‌ها مانند چگالی، کشش سطحی و چسبندگی است.

شدت زوال مکانیکی و شیمیایی سنگ‌ها در اثر محلول‌های نمک تابعی از ویژگی‌های ذاتی سنگ (اجزای تشکیل‌دهنده، بافت، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی)، ماهیت محلول نمک (نوع نمک، غلظت و دمای محلول) و شرایط محیطی (رطوبت نسبی و دمای محیط) است. نمک‌های سولفات سدیم و سولفات منیزیم دو نمک فراوان در طبیعت‌اند که از مخرب‌ترین نمک‌ها در زوال سنگ‌ها هستند. ازاین‌رو، در خیلی از مطالعات آزمایشگاهی این نمک‌ها برای شبیه‌سازی شرایط واقعی طبیعت استفاده می‌شوند. در این راستا می‌توان به مطالعات بنانونته و همکاران (Benavente et al., 2004) و روئیز آگودو و همکاران (Ruiz-Agudo et al., 2007) اشاره کرد. در پژوهشی که بهرامی و همکاران (Bahrami et al., 2023) روی تغییرات ظاهری (تخریب شیمیایی و مکانیکی، رنگ و شوره‌زدگی) و خصوصیات فنی تراورتن عباس‌آباد



شکل ۱۳. الگوی تبلور نمک در سنگ ساختمانی متخلخل بر اساس تصویر میکروسکوپ الکترونی (a) سولفات سدیم و (b) سولفات منیزیم (Bahrami et al., 2023)

Fig. 13. Salt crystallization pattern in the porous building stone based on scanning electron microscope (SEM) image a) Sodium sulfate, and b) magnesium sulfate (Bahrami et al., 2023)

نتیجه گیری

انجماد و آب شدن و تبلور نمک دو فرآیند متداول در هوازدگی سنگ‌ها هستند که به کرات در طبیعت تحت شرایط اقلیمی خاص رخ می‌دهند. تاکنون بحث‌های زیادی در زمینه مکانیسم‌های زوال این فرایندها در مطالعات پیشین صورت گرفته است. این مطالعات به صورت پراکنده هستند و یک اجماع میان محققان در ارتباط با نوع مکانیسم زوال فرایندهای انجماد و تبلور نمک در هوازدگی سنگ‌ها وجود ندارد. به هر حال برخی نظریه‌های مکانیسم زوال این فرایندها مورد استقبال محققان گرفته و دارای اعتبار بیشتری هستند در صورتی که در برخی دیگر نظریه‌ها هنوز نقدهایی وارد است و در حال حاضر مورد بحث و جدل هستند. پژوهش

حاضر با هدف بررسی مکانیسم/مکانیسم‌های فرایندهای انجماد و آب شدن و تبلور نمک در زوال سنگ‌ها انجام شد. مطالعات پیشین روی دوام سنگ‌های در معرض انجماد و آب شدن و تبلور نمک در یک روش نظام‌مند مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج پژوهش حاضر در موارد زیر به صورت خلاصه ارائه شده‌اند.

- فشار تبلور ناشی از تبدیل شدن آب به یخ و فشار هیدرولیکی به دلیل رانده شدن آب در شبکه منافذ سنگ در طی تبدیل شدن آب به یخ در طی فرایند انجماد و آب شدن دو مکانیسم اصلی در زوال سنگ‌ها هستند.
- درجه اشباع و توزیع اندازه منافذ سنگ از فاکتورهای مهم در فشار تبلور ناشی از تبدیل شدن آب به یخ و فشار

- تا به امروز بحث‌های زیادی در ارتباط با عامل اصلی زوال مکانیکی در طی فرایند تبلور نمک بین محققان صورت گرفته است. برخی محققان فشار تبلور و برخی دیگر فشار آگیری را در زوال سنگ برجسته‌تر می‌دانند، به هر حال اجماع بیشتر محققان روی مکانیسم فشار تبلور است.

- زوال شیمیایی در طی فرایند تبلور نمک تابعی از ترکیب شیمیایی محلول نمک و اجزای تشکیل دهنده سنگ است. سنگ‌های انحلال‌پذیر مانند سنگ آهک، تراورتن و مرمر به شدت تحت تأثیر مکانیسم زوال شیمیایی فرایند تبلور نمک قرار می‌گیرند، در صورتی که سنگ‌هایی با منشا آذرین و دگرگونی در برابر زوال شیمیایی مقاوم هستند.

- نوع، غلظت و دمای محلول نمک و ازسوی دیگر خصوصیات ذاتی سنگ مانند تخلخل و مقاومت سنگ از عوامل موثر در شدت مکانیسم‌های زوال تبلور نمک (زوال مکانیکی و شیمیایی) هستند.

هیدرولیکی به دلیل رانده شدن آب هستند. با افزایش درجه اشباع و کوچکتر شدن اندازه منافذ، شدت زوال سنگ در طی فرایند انجماد و آب شدن تشدید می‌شود.

- در طبیعت هیچگاه آب مسبب فرایند انجماد و آب شدن به صورت خالص نیست و همواره مقداری ناخالصی در ترکیب شیمیایی آن وجود دارد. یکی از این ناخالصی نمک‌های مختلف هستند که در ترکیب شیمیایی آب حضور دارند. وجود نمک به شدت روی دمای انجماد آب و ذوب یخ تأثیر دارند. این به نوبه خود روی نوع مکانیسم‌های زوال فرایند انجماد و آب شدن تأثیر دارند.

- به طور کلی دو مکانیسم زوال شامل مکانیکی و شیمیایی در هوازدگی سنگ‌ها در معرض فرایند تبلور نمک تشخیص داده شد. در زوال مکانیکی، فشار تبلور نمک و فشار آگیری نمک نقش اساسی در هوازدگی سنگ را دارند در صورتی که زوال شیمیایی به دلیل واکنش شیمیایی محلول نمک با اجزا تشکیل دهنده سنگ رخ می‌دهد.

References

- Abdelhamid, M.M.A., Li, D., G. & Ren, G. (2020). Evaluation of point load test effectiveness in estimation of long-term durability of some Chinese limestone rocks due to frost action. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A, Science*, 44, 1393–1406.
- Akin, A., & Ozsan, A. (2011). Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 101–114.
- Amirkiyaei, V., Ghasemi, E. & Faramarzi, L. (2021). Estimating uniaxial compressive strength of carbonate building stones based on some intact stone properties after deterioration by freeze-thaw. *Environmental Earth Sciences*, 80, 352.
- Amirkiyaei, V., Ghasemi, E., & Faramarzi, L. (2020). Determination of P-wave velocity of carbonate building stones during freeze-thaw cycles. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 5999–6009.
- Angeli, M., Bigas, J.P., Benavente, D., Menéndez, B., Hébert, R., & David, C. (2007). Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage. *Environmental Geology*, 52, 205–213.
- Aral, I.F. Boy, R. & Dincer, A.R. (2021). Effects of freeze-thawing cycles on the physical and mechanical properties of basaltic and dolomitic rocks evaluated with a decay function model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 2955–2962.
- Bahrami, Sh., Sarikhani, R., Jamshidi, A., Ghassemi Dehnavi, A., & Emami Mybodi, M.R. (2023). A comparative study of the effects of sodium and magnesium sulfates on the physico-mechanical characteristics of Abasabad travertine, Mahallat, Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt, Iran. *Environmental Earth Science*, 82, 92.

- Bayram, F. (2012). Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 83–84, 98–102.
- Benavente, D., Garcia del Cura, M.A., Bernabeu, A., & Ordonez, S. (2001). Quantification of salt weathering in porous stones using experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology*, 59, 313–25.
- 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.
- Çelik, M.Y., & İbrahimoglu, A. (2021). Characterization of travertine stones from Turkey and assessment of their durability to salt crystallization. *Journal of Building Engineering*, 43, 102592.
- Çelik, M.Y., & Korucu, M.R. (2023). The effect of freeze-thaw cycles performed with salt solutions (NaCl and Na₂SO₄) on carbonate building stones. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82, 64.
- Çelik, M.Y., & Sert, M. (2020a). Accelerated aging laboratory tests for the evaluation of the durability of hydrophobic treated and untreated andesite with respect to salt crystallization, freezing–thawing, and thermal shock. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 3751–3770.
- Çelik, M.Y., & Sert, M. (2020b). The role of different salt solutions and their concentration ratios in salt crystallization test on the durability of the Döğer tuff (Afyonkarahisar, Turkey) used as building stones of cultural heritages. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 5553–5568.
- 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.
- Dursun, F., & Topal, T. (2019). Durability assessment of the basalts used in the Diyarbakır City Walls, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 78, 456.
- Ghobadi, M.G., & Babazadeh, R. (2015). Experimental studies on the effects of cyclic freezing-thawing, salt crystallization, and thermal shock on the physical and mechanical characteristics of selected sandstones. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 1001–1016.
- Ghobadi, M.G., Babazadeh, R., & Khodabakhsh, S. (2014). Petrophysical and durability tests on sandstones for the evaluation of their quality as building stones using Analytical Hierarchy Process (AHP). *Geopersia*, 4, 25–43.
- Ghobadi, M.G., Taleb Beydokhti, A.R., Nikudel, M.R., Asiabandha, A., & Karakus, M. (2016). The effect of freeze-thaw process on the physical and mechanical properties of tuff. *Environmental Earth Sciences*, 75, 846.
- Gomez Heras, M., & Fort, R. (2007). Patterns of halite (NaCl) crystallisation in building stone conditioned by laboratory heating regimes. *Environmental Geology*, 52, 239–247.
- Hale, P.A., & Shakoor, A.A. (2003). Laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones. *Environmental and Engineering Geoscience*, 9, 117–130.
- 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 Sciences*, 77, 684.
- Heidari, M., Torabi-Kaveh, M., & Mohseni, H. (2017). Assessment of the effects of freeze-thaw and salt crystallization aging tests on Anahita Temple Stone, Kangavar, West of Iran. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, 121–136.
- Hosseini, M., & Khodayari, A.R. (2019). Effect of freeze-thaw cycle on strength and rock strength parameters (A Lushan sandstone case study). *Journal of Mining and Environment*, 10, 257–270.
- Huang, S., He, Y., Yu, S., & Cai, C. (2022). Experimental investigation and prediction model for UCS loss of unsaturated sandstones under freeze-thaw action. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 32, 41–49.
- 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. (2024a). 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. (2024b). A laboratory study on the durability of limestone wastes in harsh environments for their suitability as aggregate in concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03274.
- Jamshidi, A., & Sousa, L. (2025). A quantitative-qualitative classification for igneous building stones based on Brazilian tensile strength: Application to the stone durability. *Applied Sciences*, 15(7), 3907.
- Jamshidi, A., Nikudel, M.R., & Khamsehchiyan, M. (2013). Estimating the durability of building stones against salt crystallization: considering the physical properties and strength characteristics. *Geopersia*, 3, 35–48.
- Jamshidi, A., Nikudel, M.R., & Khamsehchiyan, M. (2016). Evaluation of the durability of Gerdoee travertine after freeze-thaw cycles in fresh water and sodium sulfate solution. *Engineering Geology*, 202, 36–43.
- Jamshidi, A., Nikudel, M.R., & Khamsehchiyan, M. (2017). 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, 181–190.
- Jamshidi, A., Nikudel, M.R., Khamsehchiyan, M., & Sarikhani, R. (2020). Durability assessment of travertines against salt weathering: an experimental study. *New Findings in Applied Geology*, 14, 1–15 (In Persian).
- Khanlari, G., & Abdilor, Y. (2015). Influence of wet-dry, freeze-thaw, and heat-cool cycles on the physical and mechanical properties of Upper Red sandstones in central Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74, 1287–1300.
- Liu, Q., Qian, Z., & Wu, Z. (2019). Micro/macro physical and mechanical variation of red sandstone subjected to cyclic heating and cooling: an experimental study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 1485–1499.
- Ludovico-Marques, M., & Chastre, C. (2012). Effect of salt crystallization aging on the compressive behavior of sandstone blocks in historical buildings. *Engineering Failure Analysis*, 26, 247–257.
- Menéndez, B., & Petráňová, V. (2016). Effect of mixed vs single brine composition on salt weathering in porous carbonate building stones for different environmental conditions. *Engineering Geology*, 210, 124–139.
- Momeni, A., Khanlari, G.R., Heidari, M., Bagheri, R., & Bazvand, E. (2015). Assessment of physical weathering effects on granitic ancient monuments, Hamedan, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 74, 5181–5190.
- Mutlur, 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. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 237–244.
- 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, 1–10.
- Pirizadeh, S., Sarikhani, R., Jamshidi, A., & Ghassemi Dehnavi, A. (2022). Physico-mechanical properties of the sandstones and effect of salt crystallization on them: A comparative study between stable and unstable slopes (a case study of the Khorramabad-Zal highway in Iran). *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01375.
- Pu, H., Sha, Z., Liu, D., & Liu, S. Experimental study on mechanical properties of sandstone under freeze-thaw condition, *Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, New York City, New York, 2019.
- Quan, D., Lian, S., Bi, J., & Wang, C. (2021). Analysis of mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles based on digital image correlation (DIC). *Geofluids*, 2021, 7101873.
- Ruiz-Agudo, E., Mees, F., Jacobs, P. & Rodriguez-Navarro, C. (2007). The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates. *Environmental Geology*, 52, 269–281.

- Steiger, M. (2004). Influence of salts on the freezing temperature of water: implications on frost damage to porous materials. *Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, ICOMOS, Stockholm*, pp. 179–186.
- Steiger, M. (2005). Crystal growth in porous materials—I: the crystallization pressure of large crystals. *Journal of Crystal Growth*, 282, 455–469.
- Steiger, M. (2006). Freezing of salt solutions in small pores. In: Konsta-Gdoutos MS (ed) *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*. Springer, Dordrecht, pp. 661–668.
- Steiger, M., & Asmussen, S. (2008). Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: the phase diagram $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$ and the generation of stress. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72, 4291–4306.
- Topal, T., & Doyuran, V. (1988). Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey. *Environmental Geology*, 34, 5–20.
- Torabi-Kaveh, M., Heidari, M., Mohseni, H., & Menéndez, B. (2019). Role of petrography in durability of limestone used in construction of Persepolis complex subjected to artificial accelerated aging tests. *Environmental Earth Sciences*, 78, 297.
- Winkler, E.M. (1994). *Stone in Architecture, properties, durability*. Third Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Printed in Germany.
- Yavuz, A.B., & Topal, T. (2007). Thermal and salt crystallization effects on marble deterioration: examples from western Anatolia, Turkey. *Engineering Geology*, 90, 30–40.
- Yavuz, A.B., & Topal, T. (2016). Effects of different drying temperatures on the physical and mechanical properties of some marbles (Muğla, Turkey) during salt crystallization tests. *Environmental Earth Sciences*, 75, 982.
- Yavuz, H., Altindag, R., Sarac, S., Ugur, I., & Sengun, N. (2006). Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 767–775.
- Zalooli, A., Freire-Lista, D.M., Khamsehchiyan, M., Nikudel, M.R., Fort, R., & Ghasemi, Sh. (2018). Ghaleh-khargushi rhyodacite and Goid andesite from Iran: characterization, uses, and durability. *Environmental Earth Sciences*, 77, 315.
- Zalooli, A., Khamsehchiyan, 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.
- Zalooli, A., Khamsehchiyan, M., Nikudel, M.R., Fort, R., Ghasemi, Sh., & Freire-Lista, D.M. (2024). The influence of petrographic properties on mechanical characteristics and the durability of the greenschist subjected to simulated weathering tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57, 3393–3408.
- Zalooli, A., Khamsehchiyan, M., Nikudel, M.R., Freire-Lista, D.M., Fort, R., & Ghasemi, Sh. (2020). Artificial microcracking of granites subjected to salt crystallization aging test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 5499–5515.