



## Review on Decay Factors and Decay Patterns of Carbonate Sedimentary Stones in Historic and Cultural Open-Air Sites

Atefeh Shekofteh<sup>1\*</sup>, Hossein Ahmadi<sup>2</sup>, Mehdi Yazdi<sup>3</sup>

1. PhD in Conservation of Cultural and Historic Artifacts, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran
2. Assistant Professor, Department of Conservation of Cultural and Historic Artifacts, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran
3. Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Vol. 2, No. 1, Spring 2019

Received: 2018/10/1

Accepted: 2019/01/16

DOI:



### Abstract

The number of historical open-air sites built of stone are relatively limited in comparison to the other historical sites in Iran, but these sites include great significance in terms of value, history and their undiscovered aspects. Since these stone open-air sites are generally about two thousand years old, they have been exposed to decay factors for a long time. Many information and data on the types of decay factors and their patterns are scattered in the articles and books generally available in English access to which is limited for experts in the field of conservation and restoration. This study attempted, through purposeful data from research on the open-air sites and monuments, to effectively address all aspects of the deterioration of carbonate sedimentary stones which constitute the majority of Iran's sites. In this way, using library references, environmental factors and common decay patterns in similar climate and industrial conditions are discussed. It has become clear from studies that, contrary to the impression, "environmental factors" are not only the factors in the deterioration of sedimentary stones, but also the physical and chemical properties of the stone (Intrinsic problems) are very important in the term of decay. Among the chemical and physical decay factors, chemical factors in deterioration are more important because they lead to the dissolution or alteration of the nature of the stone.

**Keywords:** Open-Air sites, Decay, Carbonate sedimentary stones, Physical decay, Chemical decay

Copyright © 2019, Knowledge of Conservation and Restoration. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-noncommercial 4.0. International License which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited

Corresponding Author:

Atefeh Shekofteh, PhD in Conservation of Cultural and Historic Artifacts, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: shekofte.as@gmail.com



## مروری بر عوامل و الگوهای تخریب در سنگ‌های رسوبی کربناته به‌کاررفته در محوطه‌های باز تاریخی و فرهنگی

عاطفه شکفته<sup>۱\*</sup>، حسین احمدی<sup>۲</sup>، مهدی یزدی<sup>۳</sup>

۱. دکتری مرمت آثار فرهنگی و تاریخی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران
۲. دانشیار، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران
۳. استاد، گروه علوم، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۶

### چکیده

محوطه‌های باز تاریخی ساخته‌شده از سنگ در ایران، در مقایسه با دیگر آثار، تعداد محدودی هستند؛ اما این آثار باقی‌مانده ارزش و قدمت بسیار دارند و نکات پژوهش‌نشده بی‌شماری در آنها وجود دارد. از آنجا که بیشتر این محوطه‌های سنگی در ایران قدمتی حدوداً دوهزارساله دارد، مدت زیادی در معرض عوامل آسیب‌رسان قرار گرفته است. اطلاعاتی در زمینه انواع عوامل آسیب‌رسان و الگوهای تخریبی آنها به‌شکل پراکنده در مقالات و کتب وجود دارد که عموماً به زبان انگلیسی هستند و دسترسی به آنها نیز برای کارشناسان حوزه حفاظت و مرمت آثار تاریخی دشوار است. در این پژوهش تلاش شده است با جمع‌آوری هدفمند اطلاعات حاصل از تحقیقاتی که تاکنون بر سنگ‌های محوطه‌های باز انجام شده، اقدام مؤثری در راستای روشن‌ساختن همه جنبه‌های تخریب در سنگ‌های رسوبی کربناته صورت گیرد که بخش بزرگی از محوطه‌های باز ایران را تشکیل داده‌اند. به این ترتیب با استفاده از منابع کتابخانه‌ای به معرفی عوامل آسیب‌رسان محیطی و الگوهای تخریبی رایج در محوطه‌ها با شرایط اقلیمی و صنعتی مشابه پرداخته می‌شود. مطالعات نشان داده است برخلاف تصور عموم، «عوامل محیطی» تنها فاکتورهای تخریب در سنگ‌های رسوبی نیستند؛ بلکه خواص فیزیکی و شیمیایی ذاتی (درونی) سنگ نیز در امر تخریب بسیار تأثیرگذار است. از بین عوامل تخریبی شیمیایی و فیزیکی، عوامل شیمیایی مخرب به‌دلیل اینکه به انحلال و یا تغییر ماهیت سنگ منجر می‌شوند، اهمیت بیشتری دارند.

**واژه‌های کلیدی:** محوطه‌های باز تاریخی، تخریب، سنگ رسوبی کربناته، آسیب فیزیکی، آسیب شیمیایی

## مقدمه

آثار سنگی در معماری ایران تنوع زیادی دارند. این آثار از «بقایای معماری» گرفته تا «نقش برجسته‌های صخره‌ای» را شامل می‌شود. از دست‌ساخته‌های معماری سنگی می‌توان به محوطه‌های سنگی اشاره کرد. پیشینه محوطه‌های سنگی تاریخی در ایران به پیش از ورود اسلام یعنی دوران هخامنشیان تا ساسانیان می‌رسد. هرچند این محوطه‌ها بخش بزرگی از آثار سنگی ایران را تشکیل نمی‌دهند، اما از لحاظ ارزش، قدمت و اطلاعات باستان‌شناسی جایگاه والایی دارند. از جمله مهم‌ترین این محوطه‌ها، محوطه تاریخی کنگاور، میراث جهانی تخت‌جمشید و میراث جهانی پاسارگاد هستند. جالب‌توجه است که سنگ‌های به‌کاررفته در هر سه محوطه تاریخی از نوع سنگ‌های رسوبی کربناته، به‌ویژه آهکی هستند (انصاری، ۱۳۹۴؛ Askari, Shekofteh, et al., 2016). علاوه بر موارد اشاره‌شده، بخش زیادی از آثار سنگی ایران از سنگ‌های رسوبی کربناته تشکیل شده است. به همین منظور در این پژوهش با هدف کارآمد بودن نتایج آن برای نمونه‌های مشابه در ایران، تمرکز بر شناسایی عوامل و الگوهای تخریب در سنگ‌های رسوبی آهکی قرار گرفت. در این راستا با مطالعات کتابخانه‌ای به دسته‌بندی گونه‌های تخریب و عوامل مؤثر بر تخریب سنگ پرداخته و فاکتورهای تأثیرگذار بر شدت آسیب، در هر کدام از عوامل مخرب دسته‌بندی شده‌اند. هدف آن است که این پژوهش الگوی راهنمایی برای کارشناسان حفاظت و مرمت در خصوص دسته‌بندی عوامل تخریب و چگونگی ارزیابی الگوی تخریب در محوطه‌های تاریخی باز، باشد.

## پیشینه و روش تحقیق

درباره عوامل مخرب در سنگ، اطلاعات بسیاری در کتاب‌ها و مقالات انگلیسی وجود دارد. علاوه بر آن کتاب «فرسودگی سنگ و حفاظت از آن» به زبان فارسی، از مراجع حفاظت‌گران است که در آن آلودگی جوی، تمیز کردن، استحکام‌بخشی و حفاظت سنگ با جزئیات توضیح داده شده است. اما مشکل این است که در مبحث تشخیص و فرسودگی سنگ، همه توضیحات و مثال‌ها بر سنگ‌های به‌کاررفته در محیط‌های شهری

با جنسیت‌های متفاوت مانند مرمرهای قندی، سنگ قرمز ورونا (سنگ آهک کلوخه‌ای متشکل از مواد آلی) و یا سنگ کاستوزا (سنگی رسوبی یک‌دست و متخلخل) که در شهرهای اروپایی برای ساختمان‌های مسکونی و یا کلیساها استفاده شده‌اند (آموروسو و فاسینا، ۱۳۷۰: ۲۶۴-۲۵۱)، تمرکز دارد و متأسفانه برای جنسیت نمونه‌های موجود در ایران و محوطه‌های باز سنگی ایران که اکثراً از محیط شهری خارج هستند، کاربرد چندانی ندارند. علاوه بر آن شیروانی در کتاب خود سنگ‌شناسی، آسیب‌شناسی، آنالیزهای دستگاهی، حفاظت و مرمت را به اختصار برای تمام سنگ‌ها در ۱۴۷ صفحه توضیح داده است (شیروانی، ۱۳۸۷) که نسبت به آنچه مدنظر این تحقیق است، کافی و کامل نیست. در ترجمه کتاب «حفاظت سنگ» که به‌تازگی چاپ شده است، اطلاعات بسیار مفیدی درباره آخرین پژوهش‌های علمی در زمینه حفاظت سنگ وجود دارد (دوئن و پراس، ۱۳۹۴). تفاوت تحقیق پیش‌رو با این کتاب در گزینش مطالب مرتبط با مشکلاتی است که در محوطه‌های تاریخی ایران وجود دارد و نیز نمونه‌هایی که کارشناسان حفاظت با آنها دست‌وپنجه نرم می‌کنند. به‌طور کلی، اکثر تحقیقات انجام‌شده در زمینه آثار تاریخی سنگی به رساله‌های دانشجویان رشته مرمت آثار تاریخی مربوط می‌شود. این رساله‌ها اکثراً به‌صورت موردی به معرفی نمونه خود پرداخته‌اند و هدف اصلی آنها عرضه راهکاری حفاظتی برای مرمت سنگ مدنظر بوده است (نیازی، ۱۳۸۳؛ هراتی اردستانی، ۱۳۸۴؛ شیخ‌الاسلامی، ۱۳۸۷). در این پژوهش از طریق مطالعات کتابخانه‌ای عوامل مخرب در محوطه‌های سنگی باز و مشابهت مشکلات آنها با نمونه آثار ایران شناسایی و دسته‌بندی شدند و فاکتورهایی که می‌توانند بر کنترل این عوامل تأثیر بگذارند نیز معرفی شده‌اند. درنهایت الگوهای تخریب برای شناسایی و تخمین عامل آن ارائه شده است.

## ویژگی‌های ذاتی سنگ‌های رسوبی کربناته

واژه رسوبی در سنگ‌های رسوبی<sup>۱</sup> از واژه سدیمنت<sup>۲</sup> به معنی «نهشته شدن» برگرفته شده است. به این معنی که در اثر ته‌نشست مواد جامد و تخریبی پوسته زمین (از طریق مواد شیمیایی محلول در آب یخچال‌ها، دریاها





و یا ترشح موجودات زنده)، این گونه سنگ‌های رسوبی به شکل لایه‌لایه در سطح پوسته جامد زمین شکل می‌گیرند. این ته‌نشست‌ها می‌تواند به طریق فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی تشکیل رسوب دهد (موسوی حرمی، ۱۳۹۱: ۲۱). سنگ رسوبی اغلب حاوی دانه‌ها (آواری)، زمینه<sup>۳</sup> و خلل و فرج است و به دو گروه آواری و غیرآواری (برجا) تقسیم می‌شود. سنگ‌های رسوبی آواری دانه‌درشت، دانه‌ریز و دانه‌متوسط هستند. در این پژوهش درباره سنگ‌های رسوبی غیرآواری‌ای بحث می‌شود که شامل سنگ‌های کربناته (آهکی و دولومیتی) هستند (مدنی و دیگران، ۱۳۸۰).

### خصوصیات و عیوب شیمیایی

بیشتر سنگ‌های کربناته متشکل از کلسیت هستند و سنگ‌آهک به آن دسته از سنگ‌هایی گفته می‌شود که نسبت فاز کربنات کلسیم  $\text{CaCO}_3$  آن به باقی فازها بیشتر باشد. اگر میزان ناخالصی آن بین ۱۰ تا ۵۰ درصد باشد به آن سنگ‌آهک ناخالص می‌گویند. اگر حاوی ۱۰ تا ۵۰ درصد دولومیت باشد، سنگ‌آهک دولومیتی است (فیض‌نیا، ۱۳۷۷: ۲). در سنگ‌های رسوبی ممکن است کمیت یک کانی نسبت به کانی‌های دیگر بیشتر باشد؛ اما به ندرت می‌توان سنگ رسوبی کاملاً خالص از یک نوع کانی یافت. عمل سیمانی‌شدن<sup>۴</sup> نیز معمولاً از طریق این کانی‌های چسباننده مثل کلسیت  $\text{CaCO}_3$ ، دولومیت  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  و کوارتز  $\text{SiO}_2$  رخ می‌دهد و علاوه بر این، سایر کانی‌های چسباننده

مانند اکسیدهای آهن، اپال  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ، پیریت  $\text{FeS}_2$  و به‌ویژه کانی‌های رسی نیز نقش سیمان را دارند (سحابی، ۱۳۸۱: ۱۵۱-۱۵۲). قابلیت تورم کانی‌های رسی، یکی از پارامترهایی است که در دوام سنگ‌ها تأثیرگذار است. کانی‌های رسی «قابل تورم»، علاوه بر قابلیت تورم بین کریستالی، قابلیت تورم اسمزی دارند و کانی‌های «غیرقابل تورم» فقط قابلیت تورم اسمزی دارند (Sebastián, et al., 2008) که در این بین کانی‌های قابل تورم خطر بالاتری در برابر آب به لحاظ انبساط (افزایش حجم) و حتی انقباض (کاهش حجم) ایجاد می‌کنند (Gonzalez and Scherer, 2004; Jiménez-González, et al., 2008). به این دلیل حضور کانی‌های رسی در سنگ‌های رسوبی کربناته، به‌خاطر تخریب پودری‌شدن و پدیده تورم از پارامترهای قابل توجه و تأثیرگذار بر تخریب سنگ هستند.

انحلال‌پذیری ترکیبات شیمیایی سنگ یکی دیگر از پارامترهایی است که باید مدنظر قرار گیرد. انحلال سنگ به درجه انحلال‌پذیری کانی‌های آن بستگی دارد، میزان انحلال کربنات کلسیم در آب  $(10^{-4} \times 14)$  نسبتاً پایین است (جدول ۱). بدین خاطر ترکیبات کربنات کلسیم و به‌ویژه کوارتز از لحاظ انحلال‌پذیری در آب مشکل‌چندانی ندارند؛ به‌جز رگه‌ها و شکستگی‌هایی که در برخی سنگ‌ها با کلسیت ثانویه و درزه‌های فشاری رسی پر شده‌اند که ممکن است مشکل‌ساز باشد.

جدول ۱. انحلال‌پذیری ترکیبات شیمیایی معمول در سنگ‌های کربناته در دمای زیر  $25^\circ\text{C}$  با آب مقطر (cc100/g) ((Wang and Nancollas, 2008; Matteini et al. 2011; <http://periodic-table-of-elements.org>)

ترکیبات شیمیایی					
کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ )	کربنات منیزیم ( $\text{MgCO}_3$ )	هیدروکسید کلسیم ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )	دی‌هیدرات سولفات کلسیم ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	سیلیکون دی‌اکسید ( $\text{SiO}_2$ )	آباتیت دی‌هیدرات فسفات کلسیم ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ ) مستکویت ( $\text{KAl}_2(\text{OH})_2\text{-AlSi}_3\text{O}_{10}$ )
میزان انحلال	$14 \times 10^{-4}$	$6/3 \times 10^{-3}$	$1/85 \times 10^{-4}$	$2/41 \times 10^{-4}$	$1/6 \times 10^{-11}$
			نامحلول	نامحلول	نامحلول

اما مشکل عمده کربنات کلسیم، آب‌های آلوده جوی (در صورت وجود این پدیده) است که pH پایین دارند و یا اسیدهایی که از طریق فعالیت گل‌سنگ‌ها ایجاد می‌شوند. از آنجا که کربنات کلسیم در برابر pH پایین‌تر از ۵ انحلال نسبتاً بالایی دارد (جدول

جدول ۲. انحلال‌پذیری کربنات کلسیم در pHهای متفاوت (<http://ion.chem.usu.edu>)

pH	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۲
انحلال‌پذیری mol/L	۱۷۰	۱/۷	۰/۰۲	۰/۰۰۱	$۱/۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۷/۸ \times ۱۰^{-۵}$

## ویژگی‌های پترولوژیکی

بافت سنگ‌های آهکی به لحاظ دانه‌های تشکیل‌دهنده بسیار متنوع است. بافت این سنگ‌ها می‌تواند علاوه بر دانه‌های مشابه سنگ‌های آواری، کریستال‌های یکنواخت و به‌هم‌پیوسته (حاصل از رسوبات شیمیایی) داشته باشد و یا حاوی بخش‌هایی از بقایای موجودات دریایی (به طریق رسوب‌گذاری حیاتی) باشد (Flügel, 2004: 94). در واقع بافت سنگ و ویژگی‌های پترولوژیکی آن، یکی از پارامترهای مهم «خصوصیات ذاتی سنگ» است که ریزپارامترهای قابل‌اهمیتی در دوام سنگ دارد؛ شامل دانه‌بندی، همگنی، درجه جورشده‌گی، درجه ساییدگی ذرات و منافذ و توزیع آنها. هرکدام از این ریزپارامترها براساس تأثیری که بر دوام سنگ می‌گذارند، تعاریف و ارزش‌گذاری متفاوتی دارند؛ مثلاً سنگ‌های آهکی با دانه‌بندی ریز با درجه جورشده‌گی ضعیف مستعد «تخریب مکانیکی» هستند (Flügel, 2004: 114). دانه‌های سخت مانند کوارتز ساییدگی کمتری نسبت به دانه‌های کربناتی داشته و مقاوم‌تر هستند و هرچه دانه‌ها ریزتر و در اندازه‌های متنوع باشد، احتمال جورشده‌گی آنها بالاتر است (Flügel, 2004: 174). بنابراین دانه‌های ریز همگن با درجه ساییدگی کمتر و درجه جورشده‌گی خوب، بهترین حالت دانه‌بندی سنگ رسوبی است.

## خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ آهک

به‌طور کلی خواص سنگ‌ها می‌توانند در پنج گروه تقسیم شوند که عبارت است از: الف) خصوصیات فیزیکی (دوام، سختی، تخلخل و غیره)؛ ب) خصوصیات مکانیکی (مقاومت، تغییر شکل‌پذیری)؛ خصوصیات

بنابراین انحلال‌پذیری یکی از نقاط ضعف ترکیب شیمیایی سنگ آهکی در برابر عوامل اسیدی محیطی (باران‌های اسیدی) است و از پارامترهای مهم در تخریب سنگ است.

هیدرولیکی (نفوذپذیری، استراتیویتی<sup>۵</sup>)؛ ویژگی‌های حرارتی (انبساط حرارتی، رسانایی) و تنش‌های وابسته به موقعیت (Amadei and Stephansson, 1997). در زیر برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی که در تخریب سنگ‌های رسوبی تأثیرگذار است و باید توجه بیشتری به آنها معطوف شود، به اختصار توضیح داده شده‌اند.

## تخلخل

تخلخل در سنگ‌های آهکی از نظر منشأ به دو دسته تقسیم می‌شوند «اصلی» و «ثانویه»، تخلخل اصلی خاصیتی ذاتی است که در زمان تشکیل سنگ ظاهر شده است و تخلخل ثانویه از تغییرات پس از تشکیل مانند درزه‌دارشدن یا حل‌شدن بعضی مواد در بافت سنگ ایجاد می‌شود. کمیت تخلخل به عوامل زیادی مانند محیط «رسوب‌گذاری»، «اندازه ذرات»، «شکل بیرونی» ذرات و غیره بستگی دارد (Goodman, 1989). یکی از عواملی که در سنگ‌های آهکی موجب تخلخل می‌شود، دولومیتیزه‌شدن<sup>۶</sup> است. در فرایند دولومیتیزه‌شدن، به‌علت کاهش حجم بلوری تخلخل حدود ۱۲-۱۳ درصد افزایش می‌یابد؛ اما باید در نظر داشت که رسوب‌گذاری‌های بعدی می‌تواند تخلخل حاصل از دولومیتیزه‌شدن را تا حدی پر کند (Flügel, 2004). به‌طور کلی منافذ و حفره‌های سنگ‌های رسوبی از نظر نحوه اتصال به دو دسته قابل تقسیم‌بندی هستند: منافذ «مجزا» که فقط از طریق خلل بین‌دانه‌ای پیوند دارند و به همین نام شناخته می‌شوند؛ منافذی که به‌طور کامل به‌هم‌پیوسته هستند. منافذ مجزا بیشتر به‌صورت خالی‌شدگی بخش‌هایی از فسیل‌ها، قالبی یا محبوسه هستند. منافذی که در گروه «به‌هم‌پیوسته»



تأثیر می‌گذارند. هرچه این منافذ کوچک‌تر و متصل‌تر باشند، ظرفیت جذب مویرگی و ظرفیت نفوذپذیری سنگ بالاتر می‌رود (Lucia, 2007). منافذ و حفره‌های مجزا تأثیری بر خواص هیدرولیکی سنگ ندارند؛ اما بر خواص حرارتی سنگ و مقاومت‌های مکانیکی آن تأثیرگذار هستند.

قرار می‌گیرند، خود از لحاظ شکل چندین شکل مختلف دارند که در چند دسته شکافی، رگه‌ای، حفره‌ای، موزاییکی و شکستگی تقسیم‌بندی شده‌اند (Lucia, 2007) (تصویر ۱). شکل منافذ و حفره‌های بهم‌پیوسته در بافت سنگ اهمیت ویژه‌ای دارند؛ زیرا بر میزان جذب آب، جذب مویرگی و نفوذپذیری سنگ

شکل منافذ و حفرات			
منافذ مجزا		منافذ بهم پیوسته	
بافت دانه ای	بافت گلی	بافت دانه ای و گلی	
نمونه‌های توصیفی		نمونه‌های توصیفی	
حفرات قالی	حفرات قالی	حفره‌ای (قاری)	شکستی
حفرات ترون فسیلی	حفرات ترون فسیلی	موزاییکی	شکستی
حفره ریز ترون دانه ای	حفره محبوسی	رگه ای	رتر شکستی حاصل باحفرات

تصویر ۱. انواع شکل منافذ و حفره‌ها از دو گروه منافذ بهم‌پیوسته و منافذ مجزا (Lucia, 2007).

دارد که پارامترهای تأثیرگذار بر این امر عبارت‌اند از: «گونه و ترکیب سنگ»، «اندازه ذرات»، «هوازدگی»، «چگالی»، «تخلخل»، «ناهمسان‌گردی»، «دما» و غیره. این تعداد زیاد پارامترها موجب می‌شود تعریف مشخصی از میزان مقاومت‌های سنگ‌های مختلف وجود نداشته باشد (Amadei, 2012; Goodman, 1989). در جدول ۳ نمونه‌هایی از خصوصیات مکانیکی سنگ‌های آهکی و ماسه‌سنگی که برای سنگ‌های ساختمانی کاربرد دارند، ارائه شده است.

انبساط حرارتی نیز به عوامل متعددی مانند «نرخ حرارت‌دهی»، «بیشترین دمای پیشین»، «ترکیب شیمیایی»، «تخلخل» اولیه سنگ، «جهت‌گیری بلورها» و «اندازه دانه‌ها» بستگی دارد. همچنین انقباض حرارتی و انبساط آن در تمام جهات سنگ یکسان نیستند، زیرا سنگ‌ها از تجمع دانه‌های معدنی با درجات مختلف انبساط حرارتی تشکیل یافته‌اند (Richter and Simmons, 1974). افزایش حرارت بر برخی خصوصیات سنگ تأثیر می‌گذارد که عبارت‌اند از: «افزایش تخلخل»، «کاهش سرعت

### نفوذپذیری (تراوایی)

نفوذپذیری یا تراوایی خاصیتی است که در بسترهای متخلخل اجازه انتقال مایعات و بخار را می‌دهد که این یک معیار حیاتی در ظرفیت انتقال است. عواملی که بر این پدیده تأثیر می‌گذارند، بسیار زیاد هستند. به‌عنوان مثال زمانی که اندازه دانه‌ها بزرگ باشد، گلوئی اتصال حفره‌های سنگ نیز بزرگ‌تر است، در نتیجه ظرفیت نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد. جالب‌توجه است که نفوذپذیری سنگ یک مقدار ثابت است؛ یعنی با دیگر مایعات و ویسکوزیته‌های مختلف تفاوتی در این ظرفیت ایجاد نمی‌شود اما در مقابل اگر ظرفیت نفوذ گاز در فشار پایین سنجیده شود، می‌تواند بیشتر از ظرفیت نفوذ حقیقی سنگ باشد (Link, 1982).

### مقاومت‌های مکانیکی

مقاومت‌های مکانیکی سنگ شامل مقاومت‌های فشاری، مقاومت تک‌محوره (نامحصور)، مقاومت کششی، مقاومت‌های الاستیسیته و پلاستیسیته و غیره هستند. به‌طور کلی، مقاومت‌های مکانیکی سنگ‌ها به ماهیت و پیوستگی ذرات سنگ بستگی

صوت»، «افزایش تغییر شکل» و «کاهش مقاومت‌ها» (Homand-Etienne and Houpert, 1988). بنابراین برای هر کدام از این ویژگی‌ها نمی‌توان تعریف مشخص

و دقیقی داشت و بهتر است هر کدام جداگانه و بسته به سنگ مدنظر بررسی شوند.

جدول ۳. میانگین برخی خواص مکانیکی دو سنگ آهکی و ماسه‌سنگی از سنگ‌های ساختمانی (Link, 1982; Winkler, 1975).

نوع سنگ	وزن مخصوص KN/m <sup>3</sup>	مدول الاستیسیته MPa×10 <sup>3</sup>	نسبت پواسون	مقاومت فشاری MPa
سنگ آهک	۲۲-۲۶	۲۱-۱۰۳	۰/۲۴ - ۰/۴۵	۳۵-۱۷۰
سنگ آهک متخلخل	-	۳-۸۳	۰/۳۵ - ۰/۴۵	۷-۳۵
ماسه‌سنگ	۲۳/۶ - ۲۲/۸	۳-۴۲	۰/۲۰ - ۰/۴۵	۲۸-۱۳۸

### عوامل تخریب در سنگ‌های رسوبی

در زمینه آسب‌های ایجاد شده در آثار سنگی، واژگان متعددی مثل «فرسایش»<sup>۸</sup>، «زوال»<sup>۹</sup>، «هوازگی»<sup>۱۰</sup> و «تخریب»<sup>۱۱</sup> به کار می‌روند اما تمام اینها معنی یکسانی ندارند. به عنوان مثال «هوازگی» در مواقعی به کار می‌رود که تخریب سنگ در نتیجه پدیده‌های جوی حاصل شود و یا «زوال» به کاهش یا اضمحلال کیفیت، ارزش و خواص آن گفته می‌شود (ورگس بلمین، ۱۳۹۰). در مقابل «تخریب» عبارت است از هرگونه تغییر شکل شیمیایی یا فیزیکی در خواص ذاتی سنگ که باعث کاهش ارزش و یا ایجاد مشکل در کاربری و استفاده از آن شود (Doehne and Price, 2010). بنابراین واژه «تخریب» بین واژگان نام‌برده شده، گستره بیشتری را در بر می‌گیرد و مناسب‌تری با آنچه مدنظر پژوهش حاضر است، دارد. واضح است که پیش از هر اقدامی از جمله حفاظت پیشگیرانه و یا حفاظت مداخله‌ای باید در ارتباط با تخریب و عوامل آن اطلاعات لازم را کسب کرد. عوامل مخرب، گستره وسیعی از پارامترها، شامل عوامل درونی و بیرونی را در بر می‌گیرند که هر کدام به دسته‌های متفاوتی تقسیم

می‌شوند (جدول ۴). در این تحقیق عواملی با عملکرد بطئی مدنظر هستند. از آنجا که بررسی تمام عوامل مخرب و پایش آنها مبحث بسیار بزرگی است، به اختصار مهم‌ترین تخریب‌ها و آنهایی که در محوطه‌های باز ایران تأثیرگذار هستند، شرح داده می‌شوند. بدین سبب تخریب‌ها به لحاظ ماهیتی بررسی شده‌اند که می‌توان انواع مختلف تخریب را به سه دسته بزرگ تخریب «فیزیکی»، «شیمیایی» و «زیستی» تقسیم‌بندی کرد (Grassegger, 1999). البته تخریب زیستی می‌تواند در هر دو دسته شیمیایی و فیزیکی قرار بگیرد؛ زیرا گاهی تخریب زیستی از نوع تخریب فیزیکی است و گاهی مانند تأثیر باکتری‌ها از طریق شیمیایی و گاهی با هم موجب تخریب می‌شوند (Perry, et al., 2004). درحقیقت این شکل‌های تخریب کمتر به شکل جداگانه مشاهده می‌شوند و در بسیاری موارد بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. به عبارت بهتر، بسیاری از عوامل مؤثر بر تخریب نقش مضاعف نیز دارند؛ برای مثال آب با یخ‌زدن و ذوب‌شدن مکرر باعث تخریب فیزیکی می‌شود و از طرف دیگر عاملی مؤثر در تسریع واکنش‌ها است و در نتیجه موجب تخریب شیمیایی نیز می‌شود.



جدول ۴. عوامل آسیب‌رسان در محوطه‌های باستانی تاریخی

عوامل آسیب‌رسان در محوطه‌های باستانی	
موقعیت نامناسب بنا در اقلیم (استقرار نادرست در محیط و ناسازگاری با شرایط اقلیمی منطقه و ...)	عوامل بنیادی و درونی
شناخت‌نداشتن از فنون عمرانی و معماری	
نداشتن شناخت و علم کافی در به‌کارگیری صحیح فنون اجرایی (پی‌سازی، سازه، پوشش و ...)	
نداشتن دانش در به‌کارگیری صحیح عناصر و اجزای معماری از جمله مصالح (سنگ، آجر، ملات و ...)	
عوامل با عملکرد آبی	
سیل، زمین‌لرزه، طوفان، آتش‌سوزی و ...	
رطوبت (صعودی، نزولی، شبنم و ...)	
عوامل فیزیکی محیطی	
حرارت (یخبندان، تابش خورشید و ...)	
سایشی (ریزگردها، بادهای موسمی و ...)	عوامل طبیعی
عوامل گیاهی (رشد ریشه‌ها، محیط مناسب برای زندگی جانوران و ...)	عوامل بیرونی
عوامل بیولوژیکی و میکروبیولوژیکی (گل‌سنگ‌ها، قارچ‌ها، مورانه و ...)	
آلودگی محیطی (آلاینده‌های جوی، فضولات حیوانات و پرندگان و ...)	
عوامل مرکب از چند عامل طبیعی	
عوامل اجتماعی	
مردمی (واندالیزم، فرهنگ‌زدایی، فرهنگ نادرست برخورد با آثار تاریخی و ...)	
مدیریتی (سوءمدیریت، قوانین غلط، مسائل ناشی از حقوق بین‌المللی و بحران مثل جنگ و ...)	

### تخریب فیزیکی

تخریب فیزیکی در کنار تأثیر مکانیکی بر سنگ موجب تغییرات فیزیکی در آنها شده و عمدتاً باعث تغییر در اندازه دانه‌ها و افزایش سطح می‌شود (پروین، ۱۳۷۵: ۱۳). تخریب فیزیکی با مکانیزم‌های مختلفی مانند تنش‌های داخلی که از طریق چرخه‌های یخ‌زدن و ذوب‌شدن، شکستگی نمک‌ها، انبساط حرارتی و یا ضربات مکانیکی توسط ریشه گیاهان و جانوران (به‌صورت بیولوژیک) باعث تخریب سنگ می‌شوند (Grassegger, 1999). آثار سنگی که در محیط باز قرار دارند نسبت به آثار موزه‌ای در معرض تخریب فیزیکی بیشتری هستند؛ بدین علت لزوم به‌کارگیری دانش در زمینه تخریب فیزیکی در راستای آثار سنگی در محوطه‌های باستانی و در نظر گرفتن آنها هنگام اتخاذ تصمیمات حفاظتی بسیار حیاتی است.

### عملکرد آب

عملکرد مکانیکی آب به دو شکل بر سنگ‌های رسوبی تأثیرگذار است: الف) تحت جریان و ضربات آب (مانند باران، تگرگ و...) ب) متأثر از تشکیل و رشد بلورها (مانند یخ‌بر شدن).

#### الف- اثر مکانیکی جریان آب

جریان‌های ناشی از ریزش باران و داغ حاصل از آنها به «میزان بارش»، «شدت جریان» آن و «سرعت وزش باد» بستگی دارد. در برخی موارد با تشکیل جریان‌های آب به‌صورت جویبارهای کوچک تشکیل شده روی سنگ تأثیر بردگی (شسته‌شدن) به‌وجود می‌آید، علاوه بر این نفوذ آب به داخل درزها و فشار خروج آن می‌تواند عامل جابه‌جایی بلوک‌های سنگی و حرکت آنها شود. این فرایند در جهت موازی با درزها در سنگ فعالیت می‌کند. وجود ریزترک‌ها و رگه در خود سنگ نیز تأثیر نفوذ آب باران را بیشتر خواهد کرد. از سوی دیگر زمان بارش تگرگ اکثراً کوتاه است، اما معمولاً شدت آن زیاد



و تأثیر آن با توجه به فرسودگی شدید سنگ‌ها چشمگیر است (آموروسو و فاسینا، ۱۳۷۰: ۳۰).

**ب- چرخه‌های متناوب یخ‌زدگی - ذوب‌شدگی**  
از آنجا که در یخ‌زدگی ابتدا سطح خارجی سنگ سرد شده و یخ می‌بندد و راه را برای انبساط و خروج آب و یخ با ادامه سرما و یخبندان می‌بندد؛ این یخ‌زدگی و فشار ناشی از افزایش حجم آن (حدود ۹ درصد) موجب ایجاد ترک و ریزترک در دیواره‌ها و حفره‌ها می‌شود که تکرار عمل یخ‌زدگی، پدیده یخ‌برشدن را در پی دارد و درنهایت به متلاشی شدن سنگ منجر می‌شود. البته گفتنی است این فشار مکرر آنقدر زیاد است که نه تنها می‌تواند ذرات کوچک را متلاشی کند؛ بلکه قطعات بزرگ با وزن‌های چندتنی نیز از آن در امان نمی‌مانند. بیشترین تأثیر یخ‌برشدن در برودت  $5^{\circ}$  تا  $15^{\circ}$ - مشاهده می‌شود (Skinner and Porter, 2013). براساس شواهد، سنگ‌هایی که تخلخل متوسط دارند، بیش از سنگ‌های کاملاً متخلخل، در برابر یخ‌برشدن تحت تأثیر قرار می‌گیرند؛ زیرا در این‌گونه سنگ‌ها با کاهش درجه حرارت، فرصتی برای خروج تمام ذرات آب از لابه‌لای حفره‌های ریز باقی نمی‌ماند (پروین، ۱۳۷۵: ۱۴). همچنین قابل ذکر است منافذ «به‌هم‌پیوسته باز» برای سنگ‌ها در شرایط یخبندان مخاطره‌آمیزتر هستند؛ زیرا آب به درون این منافذ نفوذ کرده و در شرایط یخبندان می‌تواند موجب فشار آمدن به دیواره منافذ و درنهایت تنش برشی شود. در این شرایط بسته به شکل منافذ، تخریب‌هایی که ایجاد می‌شود، الگوهای متفاوتی دارند (Martínez et al., 2013).

بنابراین میزان آسیب‌پذیری سنگ در برابر یخ‌برشدن به عوامل متعددی مثل «ماهیت سنگ»، میزان «تخلخل» و «توزیع منافذ» وابسته است (معماریان، ۱۳۸۰: ۲۲۳)، همچنین میزان تأثیر یخ‌زدگی بستگی به میزان «جابه‌جایی مایع» در بخش‌های نزدیک به سطح سنگ با توجه به «نفوذپذیری» سنگ دارد. یخ‌زدگی به شکل ترک‌های عمیق، پوسته‌شدن‌های سطحی و تراشیده‌شدن نمایان می‌شود. این آسیب در حالت شدید با اشکالی مثل ترک‌خوردگی نمود پیدا می‌کند (آموروسو و فاسینا، ۱۳۷۰: ۴۱). ترک‌خوردگی

می‌تواند سنگ را به قطعات متعدد و یا خرده‌های کوچک تبدیل کند اما یخ‌زدگی قادر به تبدیل سنگ به «پودرهای ریز» یا ایجاد «تاول» نیست. به‌طور کلی یخ‌زدگی در سنگ‌ها دو شکل کلی دارد که عبارت است از انفصال‌های بشقابی<sup>۱۲</sup> و عدسی‌سان<sup>۱۳</sup> که عموماً در سطوح فوقانی در سنگ پلاک یا چینه‌ها در وجوه خارجی سنگ‌ها اتفاق می‌افتد (Setzer, 2001؛ پروین، ۱۳۷۵). قسمت‌های جداشده در راستای ناحیه‌هایی هستند که بیشترین گرما را از دست می‌دهند.

### ج- انحلال و باز تبلور نمک‌ها

بعد از نفوذ آب حاوی نمک محلول به اشکال مختلف (موبینگی، بارندگی و...) در خلل و فرج سنگ، هنگامی که خروج محلول نمک به سمت سطوح بیرونی بسیار کندتر از تبخیرشدن آب محلول باشد، فشار حاصل از تبلور نمک‌ها بر دیواره لوله‌های موبین و شکاف‌ها باعث ترک برداشتن و یا شکستگی مکانیکی سنگ می‌شوند (آموروسو و فاسینا، ۱۳۷۰). فشار تبلور و هیدراتاسیون با «غلظت نمک» تغییر می‌کند. همچنین این فشار بسته به نوع نمک نیز تغییر خواهد کرد؛ به‌عنوان مثال تخریب ناشی از شکستگی نمکی «نیترات» کمتر از «سولفات» است (Grassegger, 1999). تغییرات درجه حرارت و رطوبت هوا بر جذب محلول نمک‌ها تأثیر می‌گذارد. با افزایش رطوبت نسبی، آب‌گیری صورت می‌پذیرد. جذب محلول بیشتر موجب افزایش حجم نمک‌ها می‌شود و به این ترتیب موجب ایجاد فشار تبلور بیشتر بر دیواره منافذ می‌شود. به‌طور کلی درجه حرارت کم و رطوبت نسبی زیاد بیشترین فشار را تولید می‌کند (Rijniers, et al., 2005). گاه نمک‌ها در داخل حفره‌ها و ترک‌ها نقش اتصال‌دهنده را ایفا می‌کنند؛ اما این امر موقت است؛ زیرا با شسته‌شدن بلورهای نمک، ترک‌ها از یکدیگر جدا می‌شوند. متداول‌ترین نمک‌ها عبارت‌اند از: سولفات‌ها، کلریدها، نیترات‌ها و کربنات‌های قلیایی (آموروسو و فاسینا، ۱۳۷۰).

دامنه و سرعت تخریب حاصل از تبلور نمک‌ها، نه فقط به «نوع نمک‌ها» موجود و فراوانی «چرخه‌های تبلور»، بلکه به میزان «مقاومت سنگ» نیز بستگی دارد. واضح است میزان کمتر فضای داخل خلل و فرج، شانس بهتری برای مقاومت در برابر فشار تبلور نمک‌ها به سنگ می‌دهد (Rijniers, et al., 2005). با





وجود این دیده شده است که برخی سنگ‌های آهکی با درصد تخلخل بالاتر (حدود ۲۸ درصد)، مقاومت بهتری نسبت به نمونه‌هایی با تخلخل ۱۶ درصد از خود نشان داده‌اند. با توجه به این امر که تخریب زمانی آغاز می‌شود که منافذ از نمک پر شوند، شاید علت این پدیده بیشتر بودن قطر منافذ در سنگ‌های نوع اول و پرنشدن کامل آنها بوده است (Doehne and Price, 2010). بنابراین احتمال تأثیر فشار تبلور، رابطه نزدیکی با «میزان باریکی» خلل و فرج دارد و می‌توان از آن با درجه اهمیت بیشتری نسبت به حجم کلی خلل و فرج در مصالح یاد کرد. تبلور نمک‌ها به دو شکل بر سنگ‌ها مشاهده می‌شوند: رشد نمک‌ها روی سطح که شکستگی (شوره) نامیده می‌شود و تبلوری که به‌طور نامحسوس در خلل و فرج روی می‌دهد و نهان‌شکستگی<sup>۱۴</sup> نامیده می‌شود. فرامین تبلور به‌طور کامل شناخته‌شده نیست؛ اما به هر روی، اگر فشار بر ساختار داخلی سنگ‌ها وارد شود، درجات مختلفی از فرسایش را پدید خواهد آورد. شکستگی به‌صورت معمولی نامحسوس و به‌خودی‌خود بی‌ضرر است. برخلاف آن، نهان‌شکستگی سبب وارد آمدن فشار بر دیواره منافذ سنگ می‌شود. شدت فشار تبلور به «نوع نمک» و همچنین «اندازه» و «نحوه چینش» خلل و فرج بستگی دارد (Ashurst and Dimes, 1998). تحقیقات نشان داده است که نهان‌شکستگی می‌تواند در فاصله بین بخش مرمت‌شده و مرمت‌نشده سنگ نیز رخ دهد و دلیل بروز آن هم «مواد مرمتی» ضدآبی هستند که برای تثبیت یا استحکام‌بخشی به کار رفته‌اند (Miquel 2001; De Witte 2001). نکته این است که تخریب می‌تواند ابتدا در مقیاسی میکروسکوپی و به‌صورتی روی دهد که کاهش جزئی در مقاومت سنگ ایجاد کند؛ اما با افزایش چرخه‌های خشک و مرطوب شدن، هرکدام از آنها می‌توانند به انحلال یا تبلور دوباره نمک‌ها و در نتیجه پودر شدن سطح سنگ بینجامند. در برخی موارد پوسته‌شدگی‌ها و انفصال‌هایی در اندازه‌های بزرگ نیز روی می‌دهند، اما اغلب این شکل فرسایش به‌صورت «پودر شدن» نمایان می‌شود (ورگس بلمین، ۱۳۹۰).

نکته‌ای مهم که کمتر به آن توجه شده است، نقش «باد» در فرسایش نمکی و یا فرسایش حفره‌ای<sup>۱۵</sup> است.

شکل‌گیری فرسایش حفره‌ای و یا لانه‌زنبوری<sup>۱۶</sup> ظاهراً ناشی از انباشت ترجیحی نمک توسط باد در حفره‌هایی است که توسط آب باران شسته نشده‌اند. بدین ترتیب حفره‌ها محل انباشته شدن نمک‌ها می‌شوند. این پدیده طی نوسانات رطوبت و چرخه‌های تبلور نمک ایجاد ترک بیشتر در عمیق‌ترین نواحی می‌کند (Mustoe 2010; McGreevy, et al., 1983). بنابراین در نواحی بادخیز شوره‌زنی به‌علت نفوذ محلول نمک در عمق، به‌صورت نهان‌شکستگی که «مخرب‌تر» است نمایان می‌شود. محققان دریافته‌اند خشک شدن کوتاه‌مدت (زمان تبخیر سریع) باعث انباشتن نمک در سطح می‌شود، در صورتی که خشک شدن طولانی‌مدت باعث گسترده شدن حفره‌ها خواهد شد که الگوی تخریب لانه‌زنبوری را به‌همراه دارد (Kamh, 2007; Selwitz and Doehne, 1998; Rodriguez-Navarro, et al., 2002). البته دلایل دیگری از جمله «ناهمگونی» در خواص فیزیکی یا شیمیایی سنگ می‌تواند برای این نوع فرسایش وجود داشته باشد (ورگس بلمین، ۱۳۹۰: ۲۸).

علاوه بر این، نمک‌ها در تخریب سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی و افزایش «قابلیت تورم» آنها نقش دارند (Rodriguez-Navarro, et al., 1998). همچنین بر افزایش «فرسودگی زیستی» نیز تأثیر می‌گذارند؛ زیرا برخی باکتری‌های نمک‌دوست وجود دارند که تخریب فیزیکی را تسریع می‌بخشند (Laiz, et al., 2000; Papida, et al., 2000). به‌تازگی مشخص شده است نمک‌ها از طریق فشار انبساط حرارتی تفاضلی<sup>۱۷</sup> نیز باعث تخریب می‌شوند (Smith, et al., 2005).

### تنش تفاضلی

این فرایند تخریبی تأثیر چرخه‌های «خشک و تر» شدن، «تورم رسی»، «تنش رطوبتی تفاضلی»، «تنش حرارتی تفاضلی» و فشار ناشی از «میزان انبساط تفریقی مواد» در داخل منافذ سنگ (مانند نمک‌ها و مواد آلی) و بر خود سنگ را نشان می‌دهد. باور کلی این است که مواد مرمتی، نمک‌ها، لایه‌های زیستی (با یوفیلیم‌ها) و هر آنچه باعث ایجاد دو واکنش متفاوت در سطح و در داخل سنگ شوند، می‌توانند باعث تنش برشی، پخش شدن ترک‌ها و درنهایت جدایش موازی سطح (همانند فلسی شدن) شود (Doehne, et al., 2005). به‌عنوان مثال کلرید سدیم تقریباً پنج برابر



داد؛ به‌عنوان مثال مواد آلی مانند استحکام‌بخش‌های پلیمری و یا با منشأ بیولوژیکی، بسیار سریع‌تر از سنگ دچار انبساط رطوبتی می‌شوند. بنابراین در زمان انتخاب مواد باید خواص انبساطی آنها در اثر «رطوبت» و «حرارت» مشابه با بستر باشد (Tabasso and Simon, 2006).

### تخریب شیمیایی

در تخریب شیمیایی، ساختمان داخلی کانی‌ها بر اثر افزایش یا کاهش عناصر دستخوش تغییر می‌شود. در واقع در این نوع تخریب ترکیب شیمیایی سنگ‌ها به‌علت افزایش یا کاهش یا تجزیه عناصر، تغییر می‌کند. در هوازدهگی شیمیایی «آب» مهم‌ترین عامل به حساب می‌آید؛ البته فراموش نشود که «pH آب» و «مواد محول» در آن، تعیین‌کننده میزان تأثیر این عامل است (پروین، ۱۳۷۵: ۱۵؛ Skinner and Porter, 2013).

### عملکرد شیمیایی آب

اولین پدیده شیمیایی که از طریق آب در سنگ صورت می‌گیرد، انحلال است. مقدار و سرعت حل شدن کانی‌ها به چند عامل «قابلیت انحلال» کانی، مشخصات «حلال» و «شرایط اقلیمی» بستگی دارد. به‌عنوان مثال در شرایط عادی با بالا رفتن دمای محیط به‌طور کلی قابلیت انحلال کانی‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درجه اسیدی یا قلیایی بودن آب، حلالیت آن افزایش یا کاهش پیدا می‌کند (معماریان، ۱۳۸۰). از سوی دیگر، عملکرد شیمیایی آب به‌معنی تشکیل اسیدها از طریق ترکیب با آلاینده‌های جوی موجود در هوا است که سبب تخریب ترکیبات سنگ می‌شود و پس از آن با حل کردن نمک‌های محلول ته‌نشین شده در سنگ و یا حل کردن کربنات کلسیم، به‌صورت شوره بر سطح سنگ، باعث تخریب می‌شود. اغلب شوره‌های سولفاتی از شسته شدن سنگ‌آهک با بارانی که در محیط همراه آلاینده‌های جوی است به‌وجود می‌آید. به‌دنبال عملکرد شیمیایی آب و عملکرد فیزیکی و مکانیکی ناشی از تشکیل و رشد بلورها، تخریب نیز آغاز می‌شود (Rodriguez-Navarro and Sebastian, 1996). گفتنی است برای اکثر محوطه‌های تاریخی باز در ایران، مشکل آلودگی صنعتی و آلاینده‌های جوی به‌دلیل خارج از شهر بودن آنها مطرح نمی‌شود.

میزان کلسیت در دمای سطحی دچار انبساط حرارتی می‌شود؛ بنابراین تخریب ناشی از این فرایند در سنگ‌های آهکی نمونه‌ای از فشار ایجاد شده با «انبساط حرارتی تفاضلی» است (Smith et al., 2005). نمونه دیگر آن مشاهده تنش‌های انبساط حرارتی نامنظم در مرز بین کانی‌ها با رنگ متفاوت است (Molaro and McKay, 2010).

در نظر گرفتن «تنش» به‌ویژه در مواردی که یک اثر در شرایط ناهمسان است، بسیار اهمیت دارد؛ برای مثال هنگامی که بخش‌هایی از سنگ به‌خاطر قرارگیری در سایه، دچار سرد شدن‌های کوتاه‌مدت می‌شود. حتی برخی دانشمندان معتقدند قرارگیری در برابر نور شدید خورشید در طول روز و سرد شدن هنگام شب به‌دلیل انبساط در طول روز و انقباض در شب باعث آسیب‌رسیدن به سنگ می‌شود. به‌علت کندبودن هدایت گرمایی هنگام افزایش دما، دمای لایه سطحی (خارجی) بالاتر از دمای لایه زیرین (داخلی) می‌شود. لایه خارجی نسبت به لایه داخلی در حین انبساط واکنش نشان داده و موجب «خرد شدن» ضعیف سطوح موازی با سطح می‌شود. هنگام کاهش دما به‌دلیل تفاوت موجود میان دامنه انقباض اجزای مختلف سنگ، «شبکه‌ای» از ترک‌ها به‌وجود می‌آید که موجب تخریب شدید آثار تاریخی خواهد شد (Hall, 1999؛ آموروسو و فاسینا، ۱۳۷۰). با وجود آزمایش‌های دقیق صورت گرفته، هنوز صحت اینکه این تغییرات باعث اثرات فیزیکی قابل توجهی بر سنگ‌ها می‌شوند، تأیید نشده است (Skinner and Porter, 2013).

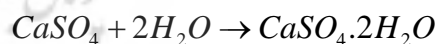
برخی از سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی بر اثر رطوبت، متورم، و با ازدست‌دادن آن منقبض می‌شوند. برای این سنگ‌ها در صورتی که خشک و مرطوب شدن به‌صورت متوالی (مانند مناطقی که سطح آب زیرزمینی در فصول مختلف تغییر می‌کند) و در پی آن انقباض و انبساط رخ دهد، موجب افزایش «درزها و ترک‌ها» می‌شود (معماریان، ۱۳۸۰). با افزایش ترک‌ها و شکاف‌ها قابلیت نفوذ آب در سنگ افزایش می‌یابد و در نهایت هوازدهگی فیزیکی و شیمیایی تشدید می‌شود (پروین، ۱۳۷۵: ۲۵). در کاربرد مواد مرمتی برای این نوع سنگ‌ها باید تنش رطوبتی را مدنظر قرار



با این حال، عملکرد شیمیایی آب در سنگ‌های کربناته به میزان گاز «دی‌اکسید کربن» موجود در محیط بستگی دارد و در حضور غلظت زیاد دی‌اکسید کربن موجب شکل‌گیری بی‌کربنات‌ها می‌شود (آموروسو و فاسینا، ۱۳۷۰)، علاوه بر آن فاکتورهای دیگری از قبیل «تکتونیک»، «چینه‌شناسی»، «سنگ‌شناسی»، «ارتفاع منطقه»، «میزان و نوع بارش»، «درجه حرارت» و «زمان بارش» بر انحلال کربنات‌ها تأثیر می‌گذارند (Skinner and Porter, 2013).

### هیدراته شدن

هیدراته‌شدن (آب‌پوشی) یکی از مهم‌ترین عوامل هوازدگی سنگ است که از طریق آب‌پوشی کریستال‌ها، اجزا را منبسط کرده و در نهایت موجب تخریب می‌شود (Doehne, 2003). این امر بستگی به میزان حلالیت نمک‌ها و میزان تبخیر آب از سطح خواهد داشت. نمک‌های محلول اصولاً در سنگ پیش از روی دادن این پدیده، وجود دارند و یا از تجزیه سنگ و یا از منابع خارجی مانند خاک و جو و باران و یا استفاده از روش‌های نامناسب تمیز کردن و نگهداری و حفاظت حاصل می‌شوند (محبعلی و وطن‌دوست، ۱۳۷۷: ۱۴۴). به‌عنوان مثال «کربنات کلسیم» با انجام واکنش با باران‌های اسیدی، «سولفات کلسیم» و یا «نیترات کلسیم» تولید می‌کند که محلول سولفات کلسیم از طریق اثر مویبندی در داخل سنگ نفوذ می‌کند و در نهایت این ترکیب به‌صورت نمک آب‌دار  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  به نام ژیبس متبلور شود (Rodriguez-Navarro, et al., 1998):

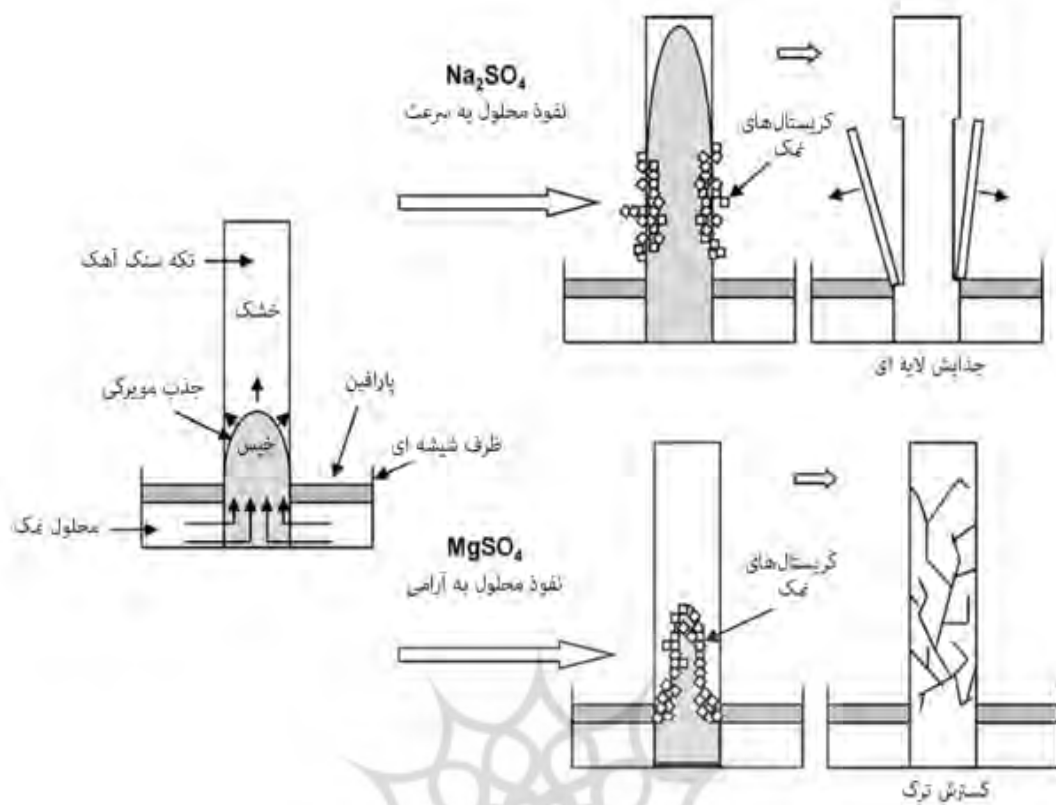


این محصول ممکن است به‌صورت نهان شکفتگی و یا در سطح حاصل شود. در شرایط نبود آب باران، نمک‌های حاصل از آلاینده‌های جوی به تجمع<sup>۱۸</sup> خود در شرایط شرجی و مه‌آلود در درجه حرارت کم ادامه می‌دهند. این اسیدها با هر سطح سنگ‌آهک تغییرنیافته‌ای که وجود داشته باشد، واکنش داده و در صورت وجود، مواد آلاینده دیگر را به سطح اضافه می‌کنند (استامبولو، ۱۳۷۴: ۳۹؛ آل‌یاسین، ۱۳۷۰: ۳۱). بنابراین این مناطق تیره‌تر شده و پوسته آنها مقاومت خود را در مقابل نفوذ بیشتر از دست می‌دهد.

در نواحی شهری جایی که میزان آلاینده‌ها بالا است، سطوح اغلب سیاه می‌شوند و پس از گذشت سال‌ها ظاهر سفید و سیاه (سیاه احتمالاً در مناطقی که باران نتوانسته ژیبس را بشوید) بر سنگ‌ها نمایان می‌شود. در مناطقی که به‌طور طبیعی میزان آلاینده‌ها پایین‌تر است، گاهی سطوح این چینی حتی پس از گذشت یک قرن به‌صورت قهوه‌ای تیره دیده می‌شوند (Whalley, et al., 1992). همچنین «کلریدها» بسیار محلول و رطوبت‌گیر هستند و در جریان تراکم آب از هوای مجاور، اولین نمک‌هایی هستند که حل می‌شوند. این خاصیت رطوبت‌گیری آنها باعث می‌شود رطوبت هوا را جذب کنند و آن را درون سنگ نگه دارند و حتی در محیط‌های موزه‌ای کنترل نشده موجب تخریب شوند (Rodriguez-Navarro, et al., 1998). «نیترات‌ها» که در محیط‌های حاوی مواد آلی تجزیه‌شده و یا آلودگی جوی مانند اکسیدهای ازت ایجاد می‌شوند، بر برخی سنگ‌ها مانند سنگ‌آهک اثر می‌گذارند. به‌عنوان مثال هنگامی که محلول شده و به اسید نیتریک تبدیل می‌شوند، بر کربنات کلسیم اثر کرده و «نیترات کلسیم» حاصل می‌شود (آموروسو و فاسینا، ۱۳۷۰).

یکی از مخرب‌ترین نمک‌ها «سولفات سدیم» است (تصویر ۲) که در اشکال مختلفی همچون تناردیت<sup>۱۹</sup> ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) و یا میرابیلیت<sup>۲۰</sup> ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) وجود دارد. تناردیت طی تبدیل به میرابیلیت بیش از سه برابر از دیاد حجم پیدا می‌کند و اثرات تخریبی شدیدتری به‌همراه دارد (Espinosa Marzal and Scherer 2008: 63; Grassegger, 1999). از سوی دیگر «سولفات‌ها» برخلاف از دیاد حجم تبلورشان، نسبت به دیگر نمک‌ها حلالیت و تحرک کمتری دارند و به همین خاطر فقط در فاز اولیه تشکیل (زمانی که محلول است) درون خلل و فرج حرکت می‌کنند. به همین دلیل ژیبس (سولفات کلسیم) صرف‌نظر از تغییر رنگ نما، نقش پوشش‌دهنده سطوح آهکی را ایفا کرده و سرعت حمله و واکنش‌ها را کند می‌کند (Smith, et al., 2003).





تصویر ۲. طرحی شماتیک از آزمایش مقایسه مکانیزم‌های تخریب دو نمک سولفات سدیم و سولفات منیزیم بر سنگ آهک (Ruiz-Agudo, et al., 2007)

می‌شود؛ به‌عنوان مثال در برخی سنگ‌های رسوبی که ترکیبات آهن دارند، با حضور آب و اکسیژن هوا پدیده «زنگ‌زدگی» رخ می‌دهد. در اثر این پدیده املاح آهن‌دار به‌دلیل وجود اکسیژن محلول در آب، اکسید شده و تشکیل اکسید آهن می‌دهند. آهن دو ظرفیتی موجود در سیلیکات‌ها و کربنات‌ها به این پدیده دچار می‌شود (پروین، ۱۳۷۵: ۲۱۷) و به‌صورت اکسید فلزی بر سطح می‌نشیند و لایه معدنی فشرده‌ای که سخت بر سطح سنگ چسبیده و رنگی متفاوت (در خصوص اکسید آهن رنگ قرمز) نسبت به بستر دارد، ایجاد می‌کند. این پدیده «پوسته بستن» نامیده می‌شود (ورگس‌بلمین، ۱۳۹۰: ۵۰).

نمک‌های ذکرشده در جدول ۵ به تفصیل و براساس شدت تخریب‌شان فهرست شده‌اند. این نکته قابل توجه است که مجموعه‌ای از نمک‌ها، اغلب با شدت تخریب بیشتری از یک نمک به‌تنهایی عمل می‌کنند. مثال معمول آن ترکیبی از نمک کلرید سدیم و سولفات کلسیم است که تأثیر بسیار شدیدی بر سنگ‌های نواحی مرطوب می‌گذارد (Franzen and Mirwald 2009). علاوه بر این، تخریب نمک‌ها به «غلظت نمک»، «شدت و تکرار نوسانات آب‌وهوایی»، «خواص بین‌لایه‌ای (نمگیری)» و «خاصیت انتقال رطوبت سنگ» بستگی دارد (Doehne, 2002).

علاوه بر هیدراته‌شدن، پدیده «اکسیداسیون» نیز در موارد خاص و در صورت وجود رطوبت مشاهده



جدول ۵. نمک‌های مخرب سنگ (آموروسو و فاسینا، ۱۳۷۰؛ Doehne, 2002; Grassegger, 1999)

ردیف	نوع	فرمول	منابع
۱	سولفات سدیم	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	خاک، کنش هم‌زمان آلاینده‌های جوی (اکسیدهای گوگردی یا اسید سولفوریک) بر کربنات سدیم
۲	کربنات سدیم	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ملات‌های سیمانی یا بتنی، سیمان تازه، شوینده‌ها
۳	سولفات منیزیم	MgSO <sub>4</sub>	شست‌وشوی سنگ‌آهک دولومیتی آسیب‌دیده بر اثر آلاینده‌های جوی با آب باران
۴	کربنات پتاسیم	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ملات‌های بتنی یا سیمانی، خاکستر سوخت‌ها، ملات‌های دارای خاکستر
۵	سولفات پتاسیم	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	واکنش هم‌زمان هوای آلوده بر کربنات پتاسیم
۶	کلرید سدیم	NaCl	آب دریا، خاک
۷	کلرید پتاسیم	KCl	خاک
۸	سولفات کلسیم	CaSO <sub>4</sub>	اندوده‌های ژیبس (گچی)، سنگ‌آهک، سنگ‌آهک دولومیتی متأثر از هوای آلوده، فعالیت میکروارگانیزم‌ها
۹	نیتрат سدیم	NaNO <sub>3</sub>	کودها، خاک
۱۰	نیترات پتاسیم	KNO <sub>3</sub>	کودها، خاک



### آلاینده‌های جوی

شهرهای صنعتی استان فارس است، قرار دارند. این دو اثر، اهمیت و ارزش بالایی دارند و به همین دلیل در خصوص تأثیر تخریبی آلاینده‌های جوی شرح داده می‌شوند.

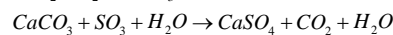
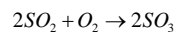
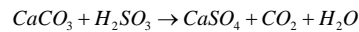
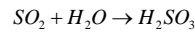
تأثیر مستقیم آلاینده‌های اسیدی بر سنگ‌های آهکی با شرایط سنگ در ارتباط است. به‌عنوان مثال اگر سنگ در شرایط روباز در هوای آزاد قرار داشته باشد و مرتباً با آب باران شسته شود، محصولات حاصل از واکنش با اسید، از سطح سنگ شسته می‌شود و به تدریج سطح سنگ پسروی می‌کند؛ اما اگر در وضعیت مسقف باشد، آلودگی هوا با ذرات آلاینده و محصولات واکنشی تجمع کرده و موجب کنیف‌شدن و لکه‌شدن<sup>۲۲</sup> نماهای سنگی و حتی تشکیل پوسته سیاه<sup>۲۳</sup> متراکم می‌شود (Doehne and Price, 2010). آلاینده‌های اسیدی دامنه وسیعی از عوامل فرساینده سنگ‌های آهکی را شامل می‌شوند. حتی در صورت فقدان آلاینده‌های صنعتی، دی‌اکسید کربن که به‌صورت طبیعی در هوا موجود است و اسیدهای سولفوری و نیتروژنی حاصل از سوخت‌وساز و یا تجزیه عوامل ارگانیک، برای فراهم‌آوردن شرایط لازم فرسایش‌هایی از این دست، در سنگ‌ها کافی هستند (جدول ۶)؛ اگرچه در این صورت سرعت تخریب به‌مراتب کمتر خواهد بود. اصلی‌ترین عامل سرعت‌دهنده تخریب‌های

سنگ‌آهک، سنگ مرمر، اندوده‌های آهکی و ماسه‌سنگ‌های کربناته بیشترین میزان آسیب‌پذیری در برابر آلودگی‌های جوی را دارند. آلودگی‌های جوی نقش مهمی در فرسایش شیمیایی سنگ ایفا می‌کنند که این نقش با توجه به اینکه موجب «تشدید انحلال»<sup>۲۱</sup> در سنگ‌ها می‌شود، خطری بسیار جدی برای سنگ فراهم می‌آورد (Doehne and Price, 2010). در بسیاری از مناطق صنعتی، هوا با ذرات بسیارریزی از کربن یا مشتقات نفت و گازهای اسیدی و سولفوری آلوده شده است. کارخانه‌ها، سیستم‌های گرمایشی و حمل‌ونقل، این آلاینده‌ها را با استفاده از سوخت‌های جامد و مواد نفتی ایجاد می‌کنند. بسیاری از فرایندهای صنعتی آلاینده‌های دیگری را نیز وارد هوا می‌سازند. این پدیده‌ها به‌همراه وسایل نقلیه، ترکیبات نیتروژنی‌ای را که موجب تولید اسیدهای نیتراتی می‌شوند، حاصل می‌کنند (Corvo, et al., 2010; Grossi, et al., 2003; Rodriguez-Navarro and Sebastian, 1996). تعداد محوطه‌های باز سنگی در ایران که در معرض چنین شرایط آلاینده‌ای باشد، انگشت‌شمار است؛ برای مثال محوطه میراث جهانی تخت‌جمشید و نقش‌برجسته‌های نقش رستم در فاصله ۱۷-۱۲ کیلومتری شهر مرودشت که از



منیزیم» به «کربنات کلسیم» به میزان درصد آن در «دولومیت» نزدیک باشد، فرسایش در «کمترین» میزان خود خواهد بود (López-Arce, et al., 2009). مانند دیگر سنگ‌های آهکی، سنگ‌های در معرض آلودگی نیز در مناطق بارانی، ظاهراً تمیز و بدون لکه به نظر می‌رسند؛ زیرا مواد محلول حاصل از انحلال ناشی از حملهٔ اسیدها، یا به سمت زمین هدایت می‌شوند و یا به وسیلهٔ بخش‌هایی از سنگ یا سایر مواد متخلخل جذب می‌شوند. زمانی که محلول جذب می‌شود سولفات کلسیم اغلب پوسته‌های گچی را تشکیل می‌دهد که با دیگر آلاینده‌ها در تخریب مشارکت می‌کند؛ مانند آنچه پوسته‌های گچ در سنگ‌آهک‌های کلسیتی انجام می‌دهند. در دولومیت‌ها، سولفات منیزیم به عمق بیشتری نفوذ می‌کند و در پشت آن پوسته، تبلور می‌شود. در بیشتر مواقع، پوستهٔ گچی تاول‌هایی را تشکیل می‌دهد که ناگهان در زیر پوسته می‌شکنند یا پودر می‌شوند (López-Arce, et al., 2009). پاک‌سازی این پودر نیازمند پاک‌سازی حفره‌های عمیق حاصل از تبلور مجدد است که به آن در اصطلاح فرسایش غارسان<sup>۲۶</sup> گفته می‌شود. تجمع آلاینده‌ها، تاول‌زدگی و هوازگی غاری در مناطق سرپوشیده در صورت نبود آب باران در شرایط تجمع رطوبت در اثر عواملی مانند مه بر سنگ نیز رخ می‌دهد (Turkington and Phillips, 2004; Turkington, 1998). دامنه و سرعت این فرایندهای فرسایش و تجمع آلاینده‌ها در مناطق غیرشهری بسیار پایین‌تر است. مقاومت سنگ‌آهک‌های دولومیتی نسبت به این آسیب‌ها متنوع است که در این میان ویژگی‌های ریزساختاری مانند ساختار «خلل و فرج» و «توزیع منافذ» از عوامل تعیین‌کننده در مقاومت نسبت به این آسیب‌ها است (López-Arce, et al., 2009; Cardell, et al., 2003:1

اسیدی، گاز دی‌اکسید گوگرد (SO<sub>2</sub>) است که می‌تواند سنگ‌آهک یا ماسه‌سنگ آهکی حاوی کربنات کلسیم (CaCO<sub>3</sub>) را مورد حمله قرار داده و آن را به سولفات کلسیم و آب تبدیل کند. متأسفانه تخریب CaSO<sub>4</sub> از طریق چرخه‌های اسیدهای سولفوری مستمر است و گسترش می‌یابد (Martínez-Arkarazo, et al., 2007; Bakaoukas, et al., 2005; Rodriguez-Navarro, et al., 2000):



سنگ‌ها با مقاومت‌های متفاوت، به شکل‌های مختلفی نسبت به آلاینده‌ها واکنش می‌دهند. در این شرایط - در سنگ‌های با مقاومت کم - پوسته‌های تاولی<sup>۲۴</sup> به تدریج شکل می‌گیرد. گاهی این پوسته‌ها بسیار مسطح هستند و حدود آنها به راحتی قابل تشخیص نیست. بیشتر اوقات، این پوسته‌ها شکل مشخصی دارند و تا زمان منفصل شدن<sup>۲۵</sup> توسعه می‌یابند. ذرات سنگ به سرعت پشت این پوسته‌های تاولی به صورت پودر یا مجموعه‌ای از پوسته‌هایی با پیوندهای بسیار ضعیف شکل می‌گیرد که در نهایت بسیاری از قطعات فرسایش‌یافته در گذر زمان، می‌افتند (Doehne, 2002). در این مورد سنگ‌ها با منافذ بزرگ در برابر فرایندهایی مانند تبلور مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. در سنگ‌آهک‌های دولومیتی، شکل فرسایش اندکی متفاوت است. در بخش‌هایی که با آب باران شسته شده است، در سنگ‌آهک‌های دولومیتی، اسیدهایی که از گازهای گوگرد موجود در هوا حاصل می‌شوند، معمولاً سطح سنگ را مورد حمله قرار داده، سولفات کلسیم و سولفات منیزیم را به وجود می‌آورند (Ruiz-Agudo, et al., 2007)؛ دامنه و شدت فرسایش از یک نوع سنگ‌آهک دولومیتی تا نوع دیگر متفاوت است و تصور می‌شود هنگامی که نسبت «کربنات

جدول ۶. مهم‌ترین آلاینده‌های مخرب سنگ (آموروسو و فاسینا، ۱۳۷۰؛ Reyes, et al., 2011)

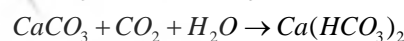
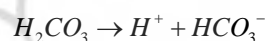
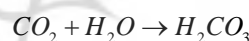
آلاینده	محصول ثانویه	منابع آلودگی
CO <sub>2</sub>	اسید کربنیک	کارخانجات، خودروها، آتش‌سوزی‌ها، گیاهان
NO <sub>x</sub>	اسید نیتریک، نیترات کلسیم، نیترات سدیم	کودهای اژته، فعل و انفعالات فتوشیمیایی، فعالیت باکتری‌های خاک و گل‌سنگ‌ها



آلاینده	محصول ثانویه	منابع آلودگی
SO <sub>x</sub>	دی‌اکسید گوگرد، اسید سولفوریک، سولفات آمونیوم	فرایندهای پالایش، آتش‌سوزی‌ها
H <sub>2</sub> S	اسید سولفوریک	باتلاق‌ها، زمین‌های آبگیر، باکتری‌ها، گازهای حاصل از آتش‌فشان‌ها
NH <sub>3</sub>	سولفات آمونیوم	فعالیت باکتری‌های خاک، فضولات حیوانی، فرایندهای احتراق
Cl	اسید کلریدریک	کارخانجات، فرایندهای احتراق
HF	اسید فلئوریدریک، فلوریت	عملیات صنعتی، کودهای فسفاته، محصولی فرعی از احتراق زغال

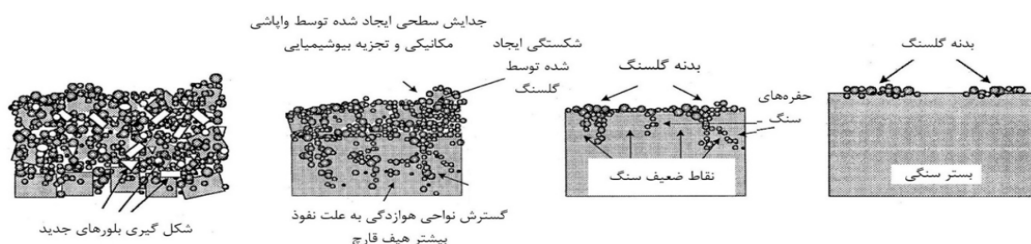
### تخریب زیستی

تخریب زیستی یکی از فرایندهای هوازدگی است که به تولید خاک منجر می‌شود و می‌تواند به دو شکل «فیزیکی» و «شیمیایی» بر سنگ‌ها تأثیر بگذارد. باکتری‌ها، قارچ‌ها، ریشه گیاهان، خزها، گل‌سنگ‌ها، پیچک‌ها، موش‌ها، مورچه‌ها و کرم‌ها از جمله عوامل بیولوژیکی و میکروبیولوژیکی هستند که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر سنگ تأثیر می‌گذارند. به‌عنوان مثال دی‌اکسید کربن حاصل از تنفس گیاهان در صورت فراوانی باعث تأمین «دی‌اکسید» لازم برای تجزیه سنگ‌های کربناته در حضور رطوبت و تبدیل به «بی‌کربنات‌ها» می‌شود که قابلیت انحلال بالاتری دارند (Grassegger, 1999; Reyes, et al., 2011).



بیشترین حجم مطالعات انجام‌شده در این حوزه بر جلبک‌ها، گل‌سنگ‌ها و باکتری‌ها متمرکز شده است. گل‌سنگ‌ها از هم‌زیستی نهادهای اتوتروفی<sup>۲۷</sup> تشکیل شده است که به مقداری رطوبت و میزان ناچیزی غذا نیاز دارند (Clair and Seaward, 2004: 181). این هم‌زیستی که به همامه قارچ‌ها تعبیر می‌شود، معمولاً متشکل از یک قارچ و یک یا چند فتوسنتزکننده (معمولاً جلبک سبز یا سیانوباکتری)

است (Garcia-Rowe & Saiz-Jimenez, 1991). در تمام گل‌سنگ‌ها، قارچ‌ها ریشه‌ها<sup>۲۸</sup> را شکل می‌دهند و سنگ را به‌عنوان بستر زندگی اشغال می‌کنند. رطوبت و نور، فاکتورهای مهم در توزیع گل‌سنگ است. گل‌سنگ از میکروارگانیسم‌هایی است که در برابر خشک‌شدن مقاومت می‌کند و می‌تواند در برابر نور خورشید و محیط خشک نیز سکنی گزیند و خود را با محیط تطبیق دهد (Ariño & Saiz-Jimenez, 1996). گل‌سنگ‌ها علاوه بر جو از تکیه‌گاه خود نیز استفاده غذایی می‌کنند و قادر به جذب مواد کربن‌دار از بستر هستند (Warscheid & Braams, 2000). همچنین گل‌سنگ‌ها می‌توانند به‌طور فیزیکی محیط را برای رشد گیاهان بزرگ‌تر و زیان‌بارتر آماده کرده و در شرایط تغییر رطوبت، «آسیب مکانیکی» ایجاد کنند و توانایی آن را دارند که از طریق تجزیه و جذب مواد معدنی (به‌صورت شیمیایی) باعث تخریب شوند (Wilson, 2004). اثر آسیب فیزیکی گل‌سنگ، بدین ترتیب است که هیف<sup>۲۹</sup> قارچ به داخل حفره‌های سنگ نفوذ می‌کند و در اثر تغییرات رطوبت منبسط و منقبض می‌شود که این پدیده موجب فشار به دیواره‌ها و تکرار آن به تخریب مکانیکی منجر می‌شود. همچنین تورم نمک‌های آلی حاصل از واکنش‌های گل‌سنگ نیز می‌تواند موجب فشار به دیواره خلل و فرج سنگ شود (Bjelland et al. 2002) (تصویر ۳).



تصویر ۳. از راست به چپ: طرح شماتیک نفوذ و توسعه گل‌سنگ در سنگ و نحوه فروپاشی آن از طریق شکل‌گیری بلورهای جدید

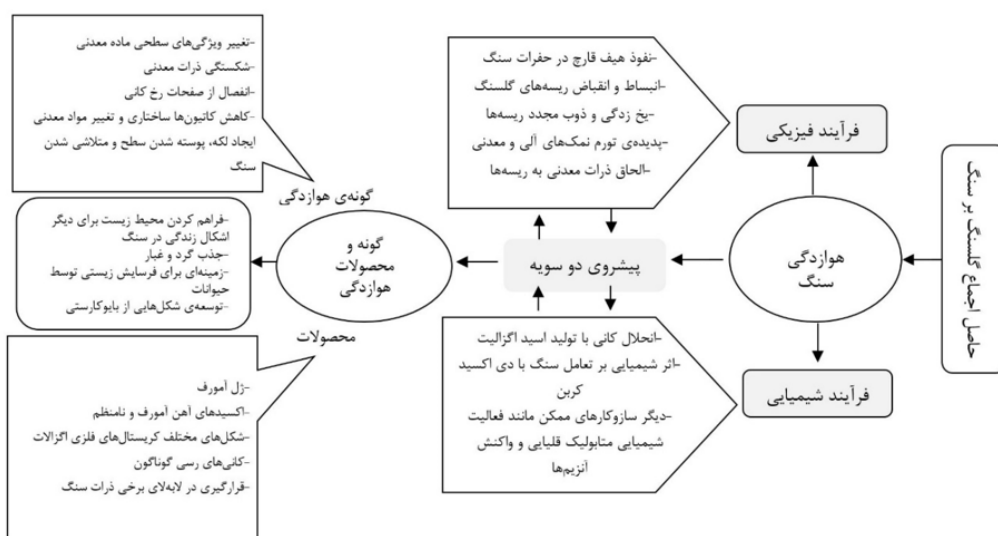
تخریب شیمیایی آنها از تخریب فیزیکی شان جدی تر است و از سه طریق ایجاد می شود: ترشح «اسید اگزالیک»، تولید «اسید کربنیک» و تولید اسیدهای دیگری که قابلیت ایجاد یون های کی لیت ساز<sup>۳۰</sup> همچون کلسیم را دارند. گل سنگ با ترشح اسید اگزالیک و واکنش با سنگ های آهکی به تولید «اگزالات کلسیم» منجر می شود که بخشی از لایه چسبنده محافظ تحت عنوان شالباتورا<sup>۳۱</sup> یا همان پاتین را تشکیل می دهد. البته برخی محققان معتقدند که تنها عامل ایجاد پاتین اگزالاتی گل سنگ نیست و ثابت شده است که در برخی موارد الگوی توزیع اگزالات در تعارض با الگوی توزیع گل سنگ بوده است (Moore, et al., 2000). در برخی نمونه ها نیز معلوم شده است فساد یک پوشش آلی (مانند اکریلیک ها) می تواند به تشکیل و یا مشارکت در تشکیل اگزالات کلسیم منجر شود (Casoli & Palla 2002; Cariati, et al., 2000). مطالعات در زمینه پاتین نشان می دهد برخی پاتین های سطحی همچون یک لایه حفاظتی طبیعی برای سنگ های کربناته عمل می کنند؛ در حالی که برخی لایه های زیستی به ویژه در شرایط آلوده آسیب رسان هستند (Wendler & Prasartset, 1999; Adamo & Violante 2000; Scheerer, et al., 2009; Shekofteh, et al, 2018). با این حال، رسیدن به دیدگاهی روشن در این خصوص به تحقیقات بیشتری نیاز دارد. تنها مسلم است که زندگی گل سنگ ها روی سنگ ها باعث آسیب هایی مانند «تخلخل حفره ای» در اثر تغذیه و تولید اسید می شود و همچنین از آنجا که فرایند خشک شدن سنگ را پس از بارش کاهش می دهد، احتمال وقوع تخریب های ناشی از «یخ زدگی» را تشدید می کند (Scheerer, et al., 2009) (تصویر ۴). از عوامل مخرب زیستی دیگر، «نیترات» حاصل از فضولات پرندگان است که به صورت شیمیایی تولید اسید نیتریک باعث تخریب سطوح کربناتی می شود. علاوه بر آن مواد آلی در فضولات باعث فعال شدن باکتری ها و در نتیجه تولید اسید آلی «آمینواسیدها» می شود که حالت اسیدی آب باران را بر سنگ تشدید می کند (Jacobson & Wu, 2009).

علاوه بر آن محققان تعدادی میکروب را در سنگ های متخلخل شناسایی کرده اند که به شکل «درون سنگی»، کلونی تشکیل می دهند. این

میکروب ها از نور، رطوبت و فضای درون سنگ استفاده کرده و باعث تغییراتی در اطراف خود نیز می شوند. البته شناخت دقیق از نوع واکنش و نقش آنها در تخریب سنگ به بررسی های بیشتری نیاز دارد. در حال حاضر بر سر مضر بودن یا نبودن باکتری ها مناقشه وجود دارد. باکتری های مخرب سنگ به دو دسته تقسیم می شوند: باکتری های اوتوتروفیک<sup>۳۲</sup> که کربن مورد نیاز خود را از دی اکسید کربن، و انرژی خود را از نور و یا واکنش اکسیداسیون می گیرند. دسته دیگر باکتری های هتروتروفیک<sup>۳۳</sup> که از «ترکیبات آلی» روی سنگ برای به دست آوردن کربن مورد نیاز خود استفاده می کنند. باکتری های اوتوتروفیک آنهایی هستند که توانایی اکسید کردن ترکیبات گوگرد و نیتروژن و تولید اسیدسولفوریک و اسیدنیتریک را دارند. نقش دیگر آنها تبدیل آلاینده های هوا از قبیل دی اکسید سولفور و اکسید نیتروژن به «سولفات» و «نیترات» است (Doehne & Price, 2010). این مسأله دشواری تفکیک عوامل مجزای تخریب سنگ را بیان می کند. به این ترتیب نقش این باکتری ها در تخریب سنگ حدومرز مشخصی ندارد و به بررسی های بیشتری به ویژه هنگام استفاده از مواد به منظور استحکام بخشی و آفت کشی نیاز دارد. از سوی دیگر، واضح است که باکتری ها، لجن و یا مواد پلیمری برون سلولی<sup>۳۴</sup> تولید می کنند که باعث تغییر «سرعت انحلال» و تغییر «ریخت شناسی انحلال حفره ای» بر نمونه های سنگ آهک می شوند (Perry, et al., 2004; Doehne & Price, 2010). محققان دریافته اند که سیانوباکتری ها، جلبک ها (هتروتروف ها) و شبکه های باکتری هتروتروفیک، از طریق محصولات متابولیکی باعث «انحلال زیستی» و تغییرات مکانیکی همچون «پوسته شدن» و افزایش تخریب سنگ می شوند (Canaveras, et al., 2001).







تصویر ۴. فرایندهای فیزیکی و شیمیایی حاصل از فعالیت گل‌سنگ بر سنگ و محصولات ناشی از آن (Chen, et al., 2002: 390).

### الگوهای تخریب

فرساینده اتفاق نمی‌افتد و از مجموع دو یا چند نمونه از عواملی که در بالا شرح داده شد، ایجاد می‌شود؛ اما به‌صورت یک نوع الگوی فرسایش یا تخریب مشاهده می‌شود و نتایج آن شامل مجموعه‌ای از اشکال مختلف تخریب است. اشکال و عوامل برجسته فرساینده سنگ در جدول ۷ به اختصار آمده است.

یکی از مسائل پیچیده در زمینه تخریب سنگ، واژگان و تعاریفی است که برای یک الگوی تخریب به کار می‌رود؛ زیرا الگوی تخریب ممکن است از سوی عوامل مختلفی روی سنگ‌های گوناگون ایجاد شده باشد. به‌طور معمول، تخریب سنگ فقط از طریق یک عامل

جدول ۷. ریخت‌شناسی الگوهای تخریب سنگ (ورگس بلمین، ۱۳۹۰؛ Ferrero, et al., 2009)

الگو	ریخت‌شناسی	توضیحات
ترک و شیار	شکستگی	این پدیده ممکن است بر اثر هوازگی، ناپیوستگی در سنگ، مشکلات ایستایی، خوردگی بست‌ها، لرزش‌ها، آتش، انجماد و در نهایت فرایندهای انحلال جزئی و یا انتخابی رخ دهد.
	ترک ستاره‌ای	
	ترک مویی	
	ترک شبکه‌ای	
جدایش	ریزشیار	درحقیقت ریزترک‌ها براساس عامل ایجاد آنها به دو دسته تنش فیزیکی (تنش‌های حرارتی و رطوبتی) و تنش رسی تقسیم می‌شوند که ریزترک‌های حاصل از انقباض و انبساط رس اثرات شدیدتری بر تخریب سنگ دارند و به همین دلیل در دوام سنگ اهمیت بیشتری دارند (Rodriguez-Navarro, et al., 1998).
	شکافتگی	
	تاول‌زدن	
فروپاشی	ترکیدگی	تاول ممکن است بر اثر نمک‌های محلول رخ دهد. اما ترکیدگی به چند طریق ترک ستاره‌ای، افزایش حجم ناخالصی‌های معدنی، خوردگی تقویت‌کننده‌های فلزی ایجاد شود. تورق در سنگ‌های رسوبی رخ می‌دهد که علت آن می‌تواند هر دو عوامل فیزیکی و شیمیایی باشد. پوسته‌شدن لب برجسته (کانتور) در برخی سطوح مسطح ممکن است ورآمدن پوسته نیز نامیده شود. این پدیده ممکن است مربوط به یک فیلم یا پوشش قبلاً به‌کاررفته روی سطح بوده و یا اینکه با فعالیت‌های میکروارگانیسم مرتبط باشد (Clair & Seaward, 2004).
	پوسته‌شدن (فلسی / لب برجسته)	
	تورق	
شکری شدن سطح	گسستگی دانه‌ای	عوامل مختلف از جمله ماهیت سنگ، عوامل محیطی، تنش‌های حرارتی و نمک‌ها موجب چنین پدیده‌هایی می‌شوند. هرکدام از این پدیده‌ها در سنگ‌های متفاوتی متداول هستند. به‌عنوان مثال گسستگی دانه‌ای در سنگ‌های رسوبی دانه‌ای (ماسه‌سنگ) و بلور دانه (گرانیت) دیده می‌شود و یا شکری شدن برای مرمر بلوری سفید به کار می‌رود.
	پودرشدگی	
	خردشدگی	
	ماسه‌ای شدن	



الگو	ریخت‌شناسی	توضیحات
رسوب	پوسته (کبره سیاه/نمکی)	پوسته سیاه از تجمع ذرات جوی در زمینه گچی حاصل می‌شود. پوسته نمکی ترکیبی از نمک‌های محلول است. رسوب تجمع قشری با ضخامت‌های متغییر است که به سطح چسبندگی ندارد؛ به‌عنوان مثال فضولات پرندگان در این دسته قرار می‌گیرند. شوره در نتیجه تبخیر محلول نمک شکل می‌گیرد. پوسته بستن به پوسته‌های معدنی فشرده شامل رسوباتی از مواد جابه‌جاشده از آب تراوشی هستند.
	رسوب	
	شوره	
حفره‌دار شدن	پوسته‌بستن	نوعی هوازدگی نامنظم و احتمالاً ناشی از ناهمگونی در خواص فیزیکی و شیمیایی سنگ است. پدیده حفره‌ای شدن الگوهای تخریبی متنوعی دارد؛ اما از بین این الگوها فقط دو الگوی کارستی و کرموشدگی به معنای حفره‌ای شدن‌های (ریز میلیمتری و کوچک‌تر) از طریق میکروارگانیزم است (Fitzner & Heinrichs, 2001).
	لانزه‌نبوری	
	استخوانی	
پاتین	توخوردگی	پاتین غنی از آهن به لایه نازک سیاه یا قهوه‌ای غنی از کانی‌های آهنی/رسی می‌گویند که روی ماسه‌سنگ حاوی آهن یافت می‌شود. پاتین اگزالاتی به لایه نازک نارنجی تا قهوه‌ای غنی از اگزالات‌های کلسیم گفته می‌شود. گفتنی است تمام پاتین‌ها ترکیبات اگزالات (ویولیت) نیستند و بسته به نوع میکروارگانیزم، شرایط محیطی و بستر سنگی ممکن است مسکویت و یا حتی آپاتیت باشند (Bjelland, et al., 2002).
	پاتین غنی از آهن	
سوراخ	کرموشدگی	کرموشدگی به سوراخ‌ها و حفره‌های ریز میلی‌متری به‌ویژه در سنگ‌های کربناته گفته می‌شود که می‌تواند با منشأ بیولوژیکی و یا تکرار پوسته‌های سیاه سطحی و یا تمیزکاری سایشی نادرست صورت پذیرد. اما سوراخ‌های ناشی از اثرات صدف و فسیل معمولاً بزرگ‌تر و به شکل موجود اصلی هستند.
	اثر شسته‌شدن صدف‌ها	
مکانیکی	ضربه	آسیب‌هایی را که به جداسازی یا از بین رفتن بخشی از سنگ منجر می‌شود، در بر می‌گیرد. این‌گونه آسیب‌ها را جانداران و یا غفلت انسانی ایجاد می‌کند. در اغلب موارد منشأ آسیب مکانیکی ناشی از عملکرد انسان است.
	برش	
	خرایش	
	سایش	
تجمع زیستی	تیشه‌کاری	اصطلاح تجمع زیستی هنگامی که مخلوطی از انواع ارگانیزم‌ها روی سنگ وجود داشته باشند به کار می‌رود. تجمع زیستی شامل جلبک، گل‌سنگ، خز، کپک، گیاه و لانه و آشیانه‌ها است. این تجمع به شکل‌ها و رنگ‌های مختلف نمایان می‌شود.
	تغییر رنگ نامنظم	
	مخملی شدن سطح	
تغییر رنگ	کپکی و کرکی شدن	تغییر رنگ اغلب به‌واسطه نمک‌ها، خوردگی فلزات، میکروارگانیزم‌ها و در معرض آتش قرار گرفتن صورت می‌گیرد. نواحی تیره‌شده در اثر رطوبت با شکل و گستردگی متناسب با منشأ اصلی ایجاد می‌شوند. برخی الگوهای تغییر رنگ رایج شامل زرد، نارنجی، قهوه‌ای و سیاه را قارچ‌ها و باکتری‌ها ایجاد می‌کند.
	پوشش گیاهی	
	رنگی شدن (تغییر در فام)	
تغییر شکل	سفیدشدگی (رنگ پریدگی)	این الگوی تخریب در تخته‌سنگ‌های مرمری بلوری به‌علت تغییرات حرارتی روی سطح داخلی و خارجی تخته در کنار رطوبت رخ می‌دهد.
	داغ رطوبت	
	لک‌شدگی	
	شکم دادن	محدب یا مقعر شدن
	خم شدن	





همان‌طور که در جدول ۷ مشخص است، این امکان وجود دارد که یک الگوی تخریب بر اثر یک یا چند عامل ایجاد شده باشد که این مسئله تشخیص علت اصلی را دشوار می‌کند. در برخی نمونه‌ها، علت اصلی تخریب تا حدودی قابل تشخیص است؛ به‌عنوان مثال زمانی که با «پوسته‌های سطحی» در سنگ‌های کم‌تخلخل روبه‌رو شوید، با در نظر گرفتن اقلیم منطقه می‌توان تشخیص یخ‌بر شدن را داد. مسلماً اگر با پدیده پودرشدن به‌جای پوسته‌شدن روبه‌رو باشید، چنین تشخیصی داده نمی‌شود. با این حال، اکثر اوقات برای شناخت دقیق عوامل مخرب، نیاز به شناسایی (مطالعات آزمایشگاهی و دستگاهی) فاکتورهایی مانند «مشخصات ذاتی» و «محیط و اقلیم» سنگ در کنار مشاهدات ماکروسکوپی و میکروسکوپی الگوهای تخریب سنگ‌های به‌کاررفته در محوطه‌های تاریخی است.

### نتیجه‌گیری

براساس تحقیقات انجام‌شده، اصلی‌ترین عیوب ذاتی سنگ‌های کربناته که در تخریب آن تأثیرگذارند عبارت است از: «کانی‌های رسی»، «انحلال‌پذیری» برخی کانی‌ها مانند کلسیت ثانویه و مهم‌تر از همه «تخلخل» که گونه و توزیع آن بر بسیاری از خواص سنگ مانند «میزان جذب آب»، «جذب مویرگی آب» و «نفوذپذیری آب» تأثیر می‌گذارد. بین عوامل بیرونی، «یخ‌بر شدن» از جمله عواملی است که بسیار تحت تأثیر تخلخل است و بایستی در محوطه‌های سنگی باز ایران مدنظر قرار گیرد. تبلور نمک از جمله عوامل دیگری است که بسته به «گونه نمک»، «غلظت» و باریکی خلل و فرج سنگ می‌تواند عوارض فاجعه‌باری ایجاد کند. در سنگ‌های رسوبی کربناته الگوی تخریبی نمک به شکل «پودری شدن» و «پوک شدن» سنگ خود را نشان می‌دهد که در بین نمک‌ها، نمک سولفات سدیم به‌خاطر ازدیاد حجم حداکثری خود خطرناک‌تر است و باید در صورت وجود این نمک نسبت به زدودن آن و جلوگیری از تخریب فیزیکی اقدام جدی کرد. با وجود این تحقیقات ثابت کرده است که تخریب شیمیایی اثرات مخرب بیشتری نسبت به تخریب فیزیکی دارد؛ از این نظر که تخریب فیزیکی نسبت به تخریب شیمیایی سرعت پایین‌تری دارد. سنگ‌های کربناته در

برابر محلول‌های اسیدی ضعیف عمل می‌کنند که بسته به «دمای محلول» و میزان انحلال آن تغییر می‌کند. در بین آلاینده‌های صنعتی گاز دی‌اکسید گوگرد عامل اصلی تخریب‌های اسیدی در سنگ‌های رسوبی کربناته است. محققان معتقدند که دولوسنگ‌ها نسبت به سنگ‌های آهکی مقاومت بیشتری نسبت به محلول‌های اسیدی دارند و در شرایطی که در سنگ آهکی نسبت کربنات منیزیم به کربنات کلسیم بیشتر باشد، فرسایش در کمترین میزان خود خواهد بود. بنابراین از بین سنگ‌های کربناته، سنگ‌های آهکی از لحاظ ماهیت مواد تشکیل‌دهنده، در برابر محیط‌های اسیدی آسیب‌پذیرترند و به پایش بیشتری نیاز دارند.

### پی‌نوشت‌ها

1. Sedimentry Rocks
2. Sedimentum
3. Matrix زمینه یا خمیره سنگ که می‌تواند بلورها و دانه‌های درشت‌تر را به همراه دانه‌های ریز در خود جای دهد، ابعاد مطلق و یا دلخواهی مابین دانه‌ها و زمینه وجود ندارد (مدنی و دیگران، ۱۳۸۰).
4. Cementation
5. Storativity
6. Dolomitization
7. آنیزوتروپی ویژگی مهمی در سنگ‌های رسوبی است که به ناهمسان‌گردی معروف است، این پدیده موجب تغییرات پارامترهای مقاومتی مدول سنگ در زوایای جهت‌دار مختلف می‌شود، به‌طوری که این‌گونه سنگ‌ها بیشترین مقاومت فشاری را در جهت عمود بر سطح لایه‌بندی و کم‌ترین آن را در امتداد سطح لایه‌بندی دارند (Nasseri, et al., 2003)
8. Degradation
9. Deterioration
10. Weathering
11. Decay
12. Wafer like
13. Lens like
14. Crypto-florescence
15. Alveolar weathering/ Honeycomb
16. Honeycomb
17. Differential Thermal Expansion
18. Condensation



پروین، ح. (۱۳۷۵). سنگ‌شناسی رسوبی. تهران: دانشگاه پیام نور.

دوئن، اریک فرگوسن و کلیفورد، پرایس ا. (۱۳۹۴). حفاظت سنگ؛ مروری بر آخرین پژوهش‌های علمی. ترجمه مهدی رازانی و هادی زند کریمی. تهران: مؤسسه علمی و فرهنگی فضا.

سحابی، فریدون. (۱۳۸۱). سنگ‌شناسی رسوبی. تهران: دانشگاه تهران.

شیخ‌الاسلامی، رضا. (۱۳۸۷). بررسی و امکان‌سنجی استفاده از سیمان‌های بهینه‌شده با میکروسیلیس در مرمت آثار سنگی مجموعه جهانی پارسه - پاسارگاد. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد رشته مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.

شیروانی، مریم. (۱۳۸۷). آسیب‌شناسی و حفاظت از سنگ‌های تاریخی. شیراز: تخت جمشید.

فیض‌نیا، سادات. (۱۳۷۷). سنگ‌های رسوبی کربناته. مشهد: آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا.

مدنی، حسن و شفیقی، سیروس. (۱۳۸۰). زمین‌شناسی عمومی. تهران: مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

محبعلی، شهریار و وطن‌دوست، رسول. (۱۳۷۷). علل شوره‌زنی سنگ‌های آهکی در بناهای تاریخی. مجموعه مقالات پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی- فرهنگی و تزیینات وابسته به معماری.

معماریان، حسین. (۱۳۸۰). زمین‌شناسی برای مهندسين. چ پنجم. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

موسوی‌حرمی، رضا. (۱۳۹۱). رسوب‌شناسی. چ چهاردهم. مشهد: مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی - به نشر.

نیازی، فتح‌اله (۱۳۸۳). آسیب‌شناسی و بررسی راه‌حل‌های حفاظتی و مرمت پیکره سنگی هرکول در بیستون. پایان‌نامه کارشناسی رشته مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.

ورگس بلمین، و. (۱۳۹۰). فرهنگ مصور الگوهای تخریب سنگ. ترجمه غلامرضا وطن‌خواه و مهدی رازانی. تهران: سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی.

19. Thenardite

20. Mirabilite

۲۱. رج. کنید به بخش «عملکرد شیمیایی آب» در مقاله حاضر

22. Tarring process

23. Black crust

24. Blister

25. Burst

26. Cavernous decay

27. Autotrophic Symbiotic

28. Thallus

29. Hyphae

30. Chelating ion

31. Scialbatura

32. Autotrophic

33. Heterotrophic

34. Extracellular Polymeric Substances

## سپاسگزاری

از تمام عزیزانی که ما را در انجام این پژوهش یاری کردند، سپاسگزاریم.

## تعارض منافع

بین نویسندگان تعارض منافع گزارش نشده است.

## فهرست منابع

استامبولو، تی. و جی. آر. جوان اسپرن‌دی‌بوئر. (۱۳۷۴). اضمحلال و حفاظت مواد ساختمانی متخلخل در بناهای تاریخی. ترجمه شهلا ذبیحی، اصفهان: مولانا.

آموروسو، ج.ج. و فاسینا، و. (۱۳۷۰). فرسودگی سنگ و حفاظت از آن؛ آلودگی جوی، تمیز کردن، استحکام‌بخشی و حفاظت. ترجمه رسول وطن‌دوست. تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.

انصاری، مسعود. (۱۳۹۴). کیفیت‌سنجی مواد مرمتی و روش‌های استفاده‌شده در معبد آناهیتا کنگاور. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد رشته مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.

آلیاسین، م. و حقدین، آ. (۱۳۷۰). اثرهای باران اسیدی روی بناهای سنگی تاریخی. فصلنامه سنگ‌های تزیینی ایران، انتشارات وزارت معادن و فلزات، س اول، ش ۱.

- in western Norway. *The Lichenologist*, 34(5), 429-440.
- Canaveras, J. C., S. Sanchez-Moral, V. Soler, & C. Saiz-Jimenez. (2001). Microorganisms and microbially induced fabrics in cave walls. *Geomicrobiology Journal*, 18 (3), 223 - 240.
- Casoli, A., & Palla, G. (2002). Presence and racemisation of amino acids in calcium oxalate patinas. A case study from the Baptistery in Parma, Italy. *Annali di chimica*, 92(11- 12), 1057 - 1065.
- Cardell, C., Rivas, T., Mosquera, M. J., Birginie, J. M., Moropoulou, A., Prieto, B.,... & Van Grieken, R. (2003). Patterns of damage in igneous and sedimentary rocks under conditions simulating sea-salt weathering. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 28(1), 1 - 14.
- Cariati, F., Rampazzi, L., Toniolo, L., & Pozzi, A. (2000). Calcium oxalate films on stone surfaces: experimental assessment of the chemical formation. *Studies in conservation*, 45(3), 180 - 188.
- Chen, J., Blume, H. P., & Beyer, L. (2000). Weathering of rocks induced by lichen colonization—a review. *Catena*, 39(2), 121-146.
- Seaward, M. (2004). *Biodeterioration of stone surfaces: lichens and biofilms as weathering agents of rocks and cultural heritage*. Springer Science & Business Media.
- De Witte, E., Vergès Belmin, V., De Clercq, H., Van Hees, R., Miquel, A., Bromblet, P., & Baronio, G. (2001). Salt Compatibility of Surface Treatments (SCOST): Final Report. *European Contract ENV4-CT98.0710-Brussels: KIK-IRPA*.
- Doehne Eric, E., & Price, C. A. (2010). *Stone* هراتی اردستانی، ناهید. (۱۳۸۴). بررسی تأثیرات مخرب ملات ماسه سیمان در مرمت‌های آثار سنگی محوطه میراث جهانی تخت جمشید و ارائه نتایج کاربرد مواد جایگزین سیمان در دیگر سایت‌های سنگی دنیا. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.
- Adamo, P., & Violante, P. (2000). Weathering of rocks and neogenesis of minerals associated with lichen activity. *Applied Clay Science*, 16(5 - 6), 229 - 256.
- Amadei, B., & Stephansson, O. (1997). *Rock stress and its measurement*. Netherland: Springer.
- Amadei, B. (2012). *Rock anisotropy and the theory of stress measurements (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media.
- Askari Chaverdi, A., Callieri, P., Laurenzi Tabasso, M., & Lazzarini, L. (2016). The Archaeological Site of Persepolis (Iran): Study of the Finishing Technique of the Bas-Reliefs and Architectural Surfaces. *Archaeometry*, 58(1), 17 - 34.
- Ashurst, J., & Dimes, F. G. (1998). *Conservation of Building and Decorative Stone*, Routledge.
- Ariño, X. & Saiz-Jimenez, C. (1996). Factors affecting the colonization and distribution of cyanobacteria, algae and lichens in ancient mortars. In *Proceedings of the eighth international Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, (2), 725 - 731.
- Bakaoukas, N., Kapolos, J., Koliadima, A., & Karaiskakis, G. (2005). New gas chromatographic instrumentation for studying the action of sulfur dioxide on marbles. *Journal of Chromatography A*. 1087(1), 169 - 176.
- Bjelland, T., Sæbø, L., & Thorseth, I. H. (2002). The occurrence of biomineralization products in four lichen species growing on sandstone





- Grassegger, G. (1999). Decay mechanisms of natural building stones on monuments-A review of the latest theories. En: *Große, C.(ed): Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, Hamburgo, Libri BOD*, 54 - 81.
- García-Rowe, J., & Sáiz-Jiménez, C. (1991). Lichens and bryophytes as agents of deterioration of building materials in Spanish cathedrals. *International biodeterioration*, 28(1 - 4), 151 - 163.
- Grossi, C. M., Brimblecombe, P., Esbert, R. M., & Alonso, F. J. (2007). Color changes in architectural limestones from pollution and cleaning. *Color Research & Application*, 32(4), 320-331. <https://doi.org/10.1002/COL.20322>
- Hall, K. (1999). The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions. *Geomorphology*, 31(1 - 4), 47 - 63.
- Homand-Etienne, F. and Houpert, R. (1988). Données récentes sur le comportement des roches en fonction de la température, in *La Thermomecanique des Roches. BRGM Manuels et Methods*, No.16, 304 - 312.
- Kamh, G. M. E. (2007). Environmental impact on construction limestone at humid regions with an emphasis on salt weathering, Alhambra islamic archaeological site, Granada City, Spain: case study. *Environmental Geology*, 52(8), 1539 - 1547.
- Jacobson, A. D., & Wu, L. (2009). Microbial dissolution of calcite at T= 28° C and ambient pCO<sub>2</sub>. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(8), 2314 - 2331.
- Jiménez-González, I., Rodríguez-Navarro, C., & Scherer, G. W. (2008). Role of clay minerals in the physicommechanical deterioration of sandstone. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F2).
- conservation: an overview of current research*. Los Angeles: Getty Publications.
- Doehne, E., Simon, S., Mueller, U., Carson, D., & Ormsbee, A. (2005). Characterization of carved rhyolite tuff-the hieroglyphic stairway of Copan, Honduras. *Restoration of Buildings and Monuments*, 11(4), 247 - 254.
- Siegesmund, S. (2003). *Building material decay and salt weathering: A selected bibliography. In Supplement to Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*, edited by S. Siegesmund, T. Weiss, and A. Vollbrecht. London: Geological Society of London.
- Marzal, R. M. E., & Scherer, G. W. (2008). Crystallization of sodium sulfate salts in limestone. *Environmental Geology*, 56(3 - 4), 605 - 621.
- Fitzner, B., & Heinrichs, K. (2001). Damage diagnosis at stone monuments-weathering forms, damage categories and damage indices. *Acta-Universitatis Carolinae Geologica*, (1), 12 - 13.
- Ferrero, A. M., Migliazza, M., & Spagnoli, A. (2009). Theoretical modelling of bowing in cracked marble slabs under cyclic thermal loading. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2151 - 2159.
- Flügel, E., Munnecke, A. (2010). *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*. Berlin: Springer-Verlag.
- Franzen, C., & Mirwald, P. W. (2009). Moisture sorption behaviour of salt mixtures in porous stone. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 69(1), 91 - 98.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*, Wiley, 2nd.Ed.



- observations from South Belfast. *Ulster Journal of Archaeology*, 46, 167 - 171.
- Matteini, M., Rescic, S., Fratini, F., & Botticelli, G. (2011). Ammonium phosphates as consolidating agents for carbonatic stone materials used in architecture and cultural heritage: preliminary research. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(6), 717-736.
- Miquel, A., P. Bromblet, V. Verges-Belmin, L. Binda, G. Baronio, E. De Witte, H. De Clercq, R. Van Hees, & H. Brocken. (2001). Experiments on the compatibility of a polysiloxane treatment with substrates loaded with sodium sulphate: Influence of the physical properties of substrates on the salt content limit. In *Surface Technology with Water Repellent Agents: Proceedings of Hydrophobe III: Third International Conference on Surface Technology with Water Repellent Agents, University of Hannover, Germany*, edited by K. Littmann and A. E. Charola, September 25 and 26, 2001, 203-17. Freiburg: Aedificatio Verlag.
- Molaro, J. L., & McKay, C. P. (2010). Processes controlling rapid temperature variations on rock surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 35(5), 501 - 507.
- Moore, S., M. J. Beazley, M. R. McCallum, & J. Russ. (2000). Can calcium oxalate residues from lichen activity reflect past climate change? Preprints of Extended Abstracts Presented at the 20th ACS National Meeting, Washington, DC, August 20-24, 2000, edited by M. L. Trehy, 4-5. 1Preprints of Extended Abstracts, 40 (2), [United States]: American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry.
- Mustoe, G. E. (2010). Biogenic origin of Gonzalez, I. J., & Scherer, G. W. (2004). Effect of swelling inhibitors on the swelling and stress relaxation of clay bearing stones. *Environmental Geology*, 46(3 - 4), 364 - 377.
- Laiz, L., D. Recio, B. Hermosin, and C. Saiz-Jimenez. (2000). Microbial communities in salt efflorescences. *Of Microbes and Art: The Role of Microbial Communities in the Degradation and Protection of Cultural Heritage*, edited by O. Ciferri, P. Tiano, and G. Mastromei, 77-88. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Link, P. K. 1982. Basic petroleum geology.
- López-Arce, P., García-Guinea, J., Benavente, D., Tormo, L., & Doehne, E. (2009). Deterioration of dolostone by magnesium sulphate salt: an example of incompatible building materials at Bonaval Monastery, 1Spain. *Construction and Building Materials*, 23(2), 846 - 855.
- Lucia, F. J. (2007). *Carbonate reservoir characterization: An integrated approach*. Springer Science & Business Media.
- Martínez-Arkarazo, I., Angulo, M., Bartolomé, L., Etxebarria, N., Olazabal, M. A., & Madariaga, J. M. (2007). An integrated analytical approach to diagnose the conservation state of building materials of a palace house in the metropolitan Bilbao (Basque Country, North of Spain). *Analytica chimica acta*, 584(2), 350 - 359.
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., Gomez-Heras, M., Marco-Castaño, L., & García-del-Cura, M. Á. (2013). Non-linear decay of building stones during freeze-thaw weathering processes. *Construction and Building Materials*, 38, 443 - 454.
- McGreevy, J. P., Smith, B. J., & McAlister, J. (1983). Stone decay in an urban environment:





- Sebastian, E. (2000). How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials. *Cement and concrete research*, 30(10), 1527 - 1534.
- Rodriguez-Navarro, C., Sebastian, E., Doehne, E., & Ginell, W. S. (1998). The role of sepiolite-palygorskite in the decay of ancient Egyptian limestone sculptures. *Clays and clay minerals*, 46(4), 414 - 422.
- Rodriguez-Navarro, C., & Sebastian, E. (1996). Role of particulate matter from vehicle exhaust on porous building stones (limestone) sulfation. *Science of the Total Environment*, 187(2), 7991-.
- 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(2), 269-281.
- Sebastián, E., Cultrone, G., Benavente, D., Fernandez, L. L., Elert, K., & Rodriguez-Navarro, C. (2008). Swelling damage in clay-rich sandstones used in the church of San Mateo in Tarifa (Spain). *Journal of cultural heritage*, 9(1), 66 - 76.
- Setzer, M. J. (2001). Micro-ice-lens formation in porous solid. *Journal of colloid and interface science*, 243(1), 193 - 201.
- Scheerer, S., Ortega-Morales, O., & Gaylarde, C. (2009). Microbial deterioration of stone monuments—an updated overview. *Advances in applied microbiology*, 66, 97 - 139.
- Shekofteh, A., Cultrone, G., Arizzi, A., Ahmadi, H., Yazdi M. & E. Molina Piernas, (2016). Identification of stones composition used in Pasargadae World Heritage site, Achaemenid period, South of Iran, presented at 41st International Symposium on Archaeometry coastal honeycomb weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(4), 424 - 434.
- Nasseri, M. H. B., Rao, K. S., & Ramamurthy, T. (2003). Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(1), 3 - 23.
- Papida, S., Murphy, W., & May, E. (2000). Enhancement of physical weathering of building stones by microbial populations. *International biodeterioration & biodegradation*, 46(4), 305317-.
- Perry IV, T. D., Duckworth, O. W., McNamara, C. J., Martin, S. T., & Mitchell, R. (2004). Effects of the biologically produced polymer alginic acid on macroscopic and microscopic calcite dissolution rates. *Environmental science & technology*, 38(11), 3040 - 3046.
- Reyes, J., Corvo, F., Espinosa-Morales, Y., Dzul, B., Perez, T., Valdes, C., Aguilar, D. & Quintana, P. (2011). *Influence of Air Pollution on Degradation of Historic Buildings at the Urban Tropical Atmosphere of San Francisco de Campeche City, México, Monitoring, Control and Effects of Air Pollution*, edited by Prof. Andrzej G. Chmielewski, IntechOpen DOI: 10.577218739/.
- Richter, D. & Simmons, G. (1974). Thermal expansion behavior of igneous rocks. *In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 11(10), 403- 411.
- Rijniers, L. A., Pel, L., Huinink, H. P., & Kopinga, K. (2005). Salt crystallization as damage mechanism in porous building materials—a nuclear magnetic resonance study. *Magnetic resonance imaging*, 23(2), 273 - 276.
- Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E., &

- Wendler, E., & Prasartset, C. (1999). Lichen growth on old Khmer-style sandstone monuments in Thailand: Damage factor or shelter?. In *Triennial meeting (12th), Lyon, 29 August-3 September 1999: preprints*, Vol. 2, pp. 750 - 754.
- Whalley, B., Smith, B., & Magee, R. (1992). Effects of particular air pollutants on materials: investigation of surface crust formation. In *Stone cleaning and the nature, soiling and decay mechanisms of stone: proceedings of the international conference held in Edinburgh, UK, 1416- April 1992*, 227- 234.
- Warscheid, T., & Braams, J. (2000). Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 46(4), 343368-.
- Wendler, E., & Prasartset, C. (1999). Lichen growth on old Khmer-style sandstone monuments in Thailand: Damage factor or shelter?. In *Triennial meeting (12th), Lyon, 29 August-3 September 1999: preprints*, 2, 750-754.
- Wilson, M. J. (2004). Weathering of rocks by lichens with special reference to stonework: A review. *Stone Deterioration in Polluted Urban Environments*, ed. D. J. Mitchell and D. E. Searle, 51-60. Land Reconstruction and Management Series3. Enfield, NH: Science Publishers.
- Winkler, E. M. (1975). *Stone: Properties, Durability in Man's Environment* (2nd revised). Springer Science & Business Media.
- [http://periodic-table-of-elements.org/SOLUBILITY/magnesium\\_carbonate](http://periodic-table-of-elements.org/SOLUBILITY/magnesium_carbonate) (date of access: 22017/17/).
- <http://ion.chemusuedu/~sbialkow/4Class/s/3600/Alpha/alpha3.html> (date of access: 22017/17/).
- 2016, Kalamata, Greece.
- Shekofteh, A., Molina, E., Arizzi, A., Cultrone, G., Ahmadi, H., & Yazdi, M. (2018). Characterization and damage assessment of stones used in the Pasargadae World Heritage Site, Achaemenian 1period. *International Journal of Architectural Heritage*, 1 - 16. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15583058.2018.1436728/>.
- Skinner, B. J., Porter, S. C., & Park, J. (2013). *Dynamic Earth, an introduction to physical geology*. Wiley.
- Selwitz, C., & Doehne, E. (2002). The evaluation of crystallization modifiers for controlling salt damage to limestone. *Journal of cultural heritage*, 3(3), 205 - 216.
- Smith, B. J., Warke, P. A., McGreevy, J. P., & Kane, H. L. (2005). Salt-weathering simulations under hot desert conditions: agents of enlightenment or perpetrators of preconceptions?. *Geomorphology*, 67(1 - 2), 211 - 227.
- Tabasso, M. L., & Simon, S. (2006). Testing methods and criteria for the selection/ evaluation of products for the conservation of porous building materials. *Studies in Conservation*, 51(1), 67 - 82.
- Turkington, A. V. (1998). Cavernous weathering in sandstone: lessons to be learned from natural exposure. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 31(4), 375- 383.
- Turkington, A. V., & Phillips, J. D. (2004). Cavernous weathering, dynamical instability and self-organization. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 665 - 675.
- Wang, L., & G. H. Nancollas. (2008). Calcium orthophosphates: Crystallization and dissolution. *Chemical Reviews* 108(11), 4628-44669.

