Journal of Athar
ISSN: 2538-1830 | Volume 42 | Issue 4 | Winter 2022

Study on Decay Patterns of the Stone Reliefs of the Tāq-e Bostān Historical-Cultural Site

Atefeh Shekofteh[1]*, Sepehr Bahadori[2], Abbas-Ali Qaemimoqaddam[2], Mohsen Charesaz[2]

1. PhD, Faculty of Conservation and Restoration, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran
2. MA, Faculty of Conservation and Restoration, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran

Article Info

Original Article

Received: 2021/06/14;
Accepted: 2021/11/18;
Published Online 2022/01/15

10.30699/athar.42.4.606

Use your device to scan and read the article online

Corresponding Author
Atefeh Shekofteh
PhD, Faculty of Conservation and Restoration, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran
Email:
shekofte.as@gmail.com

ABSTRACT

The historical-cultural site of the Tāq-e Bostān is located in the Porav-Biston Mountain range. This area is attributed to the Sassanid era, which includes three main parts of stone reliefs so-called "the Great Arch", "the Small Arch" and "the Relief of Ardeshir II". Since its creation, this site has been constantly exposed to environmental factors and has rarely been studied in terms of decay. Therefore, this study was conducted to investigate the decay patterns of stone reliefs by field studies and macroscopic surveys. Studies have shown that the crusts (mainly in the Great Arch) have covered the surface of the reliefs in orange to brown and even gray tones. In particular, on the western side of the Great Arch, these crusts have distorted most of the reliefs. The small arch and the relief of Ardeshir II are less affected by surficial crust. The reason of crust formation on the reliefs of the Great Arch is mainly the outflow of water from the natural channels inside the rock, so that by sprinkling among the reliefs, it has caused transfer and then deposition of dissolved minerals. Some microorganisms and bacterial residues are observed in the Relief of the Tree of Life, the motifs of the angel, the walls on the east and west sides of the small arch, and the Reliefs of Ardeshir II. Due to lichen activity in these areas, the pitting pattern has caused distortion and roughness of the surface. Also, the restoration interventions such as cement used to fill the rock veins have caused the formation of effloresces and microcracks in the surrounding areas. Therefore, from the point of decay patterns, it became clear that the water flowing and the dissolution occurred by this phenomenon, along with the activity of microorganisms and previous incorrect interventions, are the most important factors of deterioration of the surfaces of reliefs of the Tāq-e Bostān.

Keywords: Stone reliefs, Tāq-e Bostān historical-cultural site, Decay pattern, Dissolution

Copyright © 2022. This open-access journal is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

How to Cite This Article:

Shekofte, A., Bahadori, S., Qaemi moqadam, A. A., & Charesaz, M. (2022). Study on Decay Patterns of the Stone Reliefs of the Tāq-e Bostān Historical-Cultural Site. *Athar*, *42*(4), 606-630.

مجلهٔ علمی اثر

شاپا: ۱۸۳۰-۲۵۳۸ دوره ۴۲ | شماره ۴ | زمستان ۱۴۰۰

مقالهٔ پژوهشی

مطالعهٔ الگوهای تخریبِ نقوش‌برجستهٔ سنگی در محوطهٔ تاریخی-فرهنگی تاق‌بستان

عاطفه شکفته[1*]، سپهر بهادری[2]، عباسعلی قائمی‌مقدم[2]، محسن چاره‌ساز[2]

۱. دکتری مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، گروه مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، دانشکدهٔ مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۲. کارشناس ارشد مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۷

انتشار آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵

نویسندهٔ مسئول:

عاطفه شکفته

دکتری مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، گروه مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، دانشکدهٔ مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

پست الکترونیک:

shekofte.as@gmail.com

خلاصه

محوطهٔ تاریخی-فرهنگی تاق‌بستان در دیوارهٔ رشته‌کوه‌های پرآو-بیستون قرار گرفته است. این محوطه از دوران ساسانی باقی مانده است که شامل سه بخش اصلی از نقش‌برجسته‌های سنگی با نام‌های متداول تاق بزرگ، تاق کوچک و نقش اردشیر دوم است. این آثار از زمان خلق (دورهٔ ساسانی) تا کنون دائماً در معرض عوامل محیطی بوده‌اند و تخریب‌های رخداده در سطوح آن کم‌تر بررسی شده‌اند. بدین سبب در این پژوهش با هدف بررسی الگوهای تخریبِ نقوش برجستهٔ سنگی، الگوهای تخریب از طریق مشاهده و بررسی میدانی و به روش ماکروسکوپی شناسایی شدند. در بررسی‌های انجام‌شده معلوم گشت که رسوبات سطحی به‌طور گسترده (عمدتاً در تاق بزرگ) در تنالیتهٔ رنگ‌های روشن تا نارنجی و قهوه‌ای و حتی سیاه، سطح نقوش برجسته را پوشانده‌اند، به‌طوریکه ظرافت‌های نقوش ساسانی از دید عموم مخفی مانده است.

در ضلع غربی تاق بزرگ این رسوبات سطحی باعث مخدوش شدن بخش اعظمی از نقش برجسته‌ها (خصوصاً صورت ندیمان و همراهان شاه) به شکل پوسته‌های زمخت شده‌اند. تاق کوچک و نقش اردشیر دوم، کم‌تر تحت‌تأثیر رسوبات انحلالی قرار گرفته‌اند؛ زیرا رسوبات در تاق بزرگ عمدتاً در اثر خروج آب از کانال‌های طبیعیِ موجود در زیر تاق نشأت گرفته و در اثر جاری شدن آب در بین نقوش، مواد معدنی محلول در آن به شکل پوسته‌ای رسوب کرده‌اند. در نقش درخت زندگانی، نقش فرشته و دیواره‌های ضلع شرقی و غربی تاق کوچک و نقش اردشیر دوم اثراتی از فعالیت میکروارگانیزم‌ها و بقایای باکتریایی مشاهده می‌شود. خوردگی حفره‌ای در اثر فعالیت گلسنگ در این نواحی موجب مخدوش و ناهموار شدن سطح شده است. همچنین سیمان‌های مرمتی بکاررفته جهت پُرکردن درزه‌های صخره، باعث شکل‌گیری شوره‌هایی در نواحی اطراف خود شده‌اند. بنابراین از مطالعهٔ الگوهای تخریب معلوم گشت که جریان آب در بین نقش‌برجسته‌ها و انحلال رخداده توسط این جریان در کنار فعالیت میکروارگانیزم‌ها و مداخلات نادرست پیشین، از مهم‌ترین عوامل مخدوش‌کنندهٔ سطوح نقش‌برجستهٔ سنگی تاق‌بستان هستند.

کلیدواژه‌ها: نقش‌برجستهٔ سنگی، محوطهٔ تاریخی- فرهنگی، تاق‌بستان، الگوهای تخریب، انحلال

حق کپی رایت انتشار: این نشریه ی دارای دسترسی باز، تحت قوانین گواهینامه بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 International License منتشر می‌شود که اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

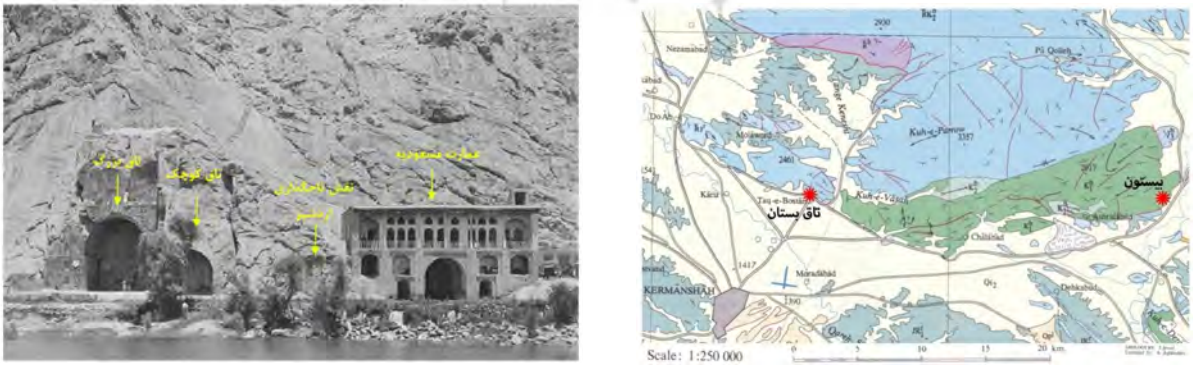
شکفته عاطفه، بهادری سپهر، قائمی مقدم عباسعلی، چاره ساز محسن. (۱۴۰۰). مطالعه الگوهای تخریبِ نقوش برجسته سنگی در محوطه تاریخی-فرهنگی تاق‌بستان. *فصلنامه علمی اثر*، ۴۲ (۴)، ۶۳۰-۶۰۶.

مقدمه

ارتفاعات تاق‌بستان واقع در شمال‌شرق شهر کرمانشاه، جزیی از رشته‌کوه‌های پرآو-بیستون است که حریم تاریخی مجموعهٔ تاق‌بستان را با مساحتی حدود ۱۱۰۰ هکتار شامل می‌شود. این اثر تاریخی، نمایش شاهکار بلوغ خلاقیت انسان است؛ زیرا با بررسی دقیق معلوم می‌شود که نوع سنگ، انتخاب مکان مناسب در ارتباط با مصالح موردنظر، قرارگیری مناسب تاق‌ها و مجموعه نقوش (خصوصاً از منظر شیوه‌های اجرایی و همچنین از منظر نشانه‌شناسی) همه گویای اثری متفاوت هستند (Khadivi et al., 2011; Mohebi, 2005; Mousavi Haji, 2008). در گذشته، بخش‌های اصلی محوطهٔ تاق‌بستان شامل چشمهٔ شرقی، عمارت مسعودیه، چشمهٔ مقابل سنگ‌نگارهٔ تاج‌ستانی، چشمهٔ مقابل تاق کوچک، چشمهٔ شمال‌غربی، چشمهٔ مرکزی، سنگ‌نگارهٔ تاج‌ستانی، تاق کوچک و تاق بزرگ بوده‌اند (شکل ۱) که در تاریخ ۱۳۱۰/۱۰/۱۵ در فهرست آثار ملی به ثبت رسید (Anonymous, 1937). «عمارت مسعودیه» یک بنای دو طبقهٔ منحصربه‌فردی بوده که احتمالاً به دستور عمادالدوله، حکمران وقت کرمانشاه، در کنار سراب تاق‌بستان و نزدیک به نقوش برجستهٔ این محوطهٔ تاریخی ساخته شده بود. این عمارت در بیست متری ایوان کوچک تاق‌بستان و احتمالاً بین سال‌های ۱۸۶۷-۱۸۵۴ میلادی، تقریباً در همان تراز و ردیف، و در دو طبقه، به‌نحوی که گویی در تلاش برای هم‌رنگی با محیط تاریخی است، ساخته شده و مصالح اصلی آن از آجر بود (Kleiss & Boehmer, 1996; Luschey, 1979). عمارت مسعودیه در سال ۱۳۴۲ شمسی توسط رومن گیرشمن و هیئت همراه وی بر پایه فرضیه‌های باستان‌شناسی و به منظور نمایان ساختن آثار باستانی و آزادسازی چشمهٔ آناهیتا تخریب شد (Luschey, 1979). اکنون سه عنصر اصلی حاضر در محوطهٔ تاق‌بستان، از شرق به غرب عبارتند از:

- نقش‌برجستهٔ تاج‌ستانی اردشیر بابکان (اردشیر دوم ساسانی)
- تاق کوچک (شامل نقش‌برجسته‌های شاپور دوم و سوم ساسانی)
- تاق بزرگ (اواخر دوران ساسانی و منسوب به خسرو پرویز ساسانی)

شاید بتوان گفت مهم‌ترین و ارزشمندترین بخش مجموعه، تاق بزرگ است، شامل نمای بیرونی (تزیینات کنگره‌ای لبه، فرشتگان و درخت زندگی)، نقش‌برجسته یا به عبارتی مجسمه‌های انتهای تاق (سوار زره‌پوش و تاج‌ستانی پادشاه)، دیواره‌های جانبی (شکارگاه گراز، شکارگاه گوزن و نقش‌برجستهٔ قاجاری) است؛ اما این سنگ‌نگاره‌ها در طول حدود دو هزار سالی که از عمر آن‌ها می‌گذرد، دائماً در فضای باز و در برابر عوامل محیطی و مخرب بوده‌اند و به‌واسطهٔ فرسودگی و تخریبی که در سنگ‌نگاره‌ها ایجاد شده در برخی نواحی دچار ازهم‌پاشیدگی و مخدوش‌شدگی نقوش شده‌اند. بنابراین، به‌جهت ارزشمند بودن این مجموعه از منظر هنری و فرهنگی، شناسایی و حذف عوامل مخرب برای این مجموعه در الویت قرار دارد. در این راستا، هدف از انجام این پژوهش شناسایی انواع تخریب رخداده در سنگ‌نگاره‌های



شکل ۱) راست: نقشه زمین‌شناسی رشته‌کوه‌های پرآو- بیستون (به رنگ سبز و آبی) در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و موقعیت قرارگیری محوطهٔ تاق‌بستان و بیستون در منطقهٔ (سازمان زمین‌شناسی کشور)؛ چپ: آثار تاق‌بستان در عهد قاجار و موقعیت نقش‌برجسته‌ها نسبت به عمارت مسعودیه (آرشیو کاخ گلستان).

تاق‌بستان با تأکید بر الگوهای تخریب است تا بدین طریق بتوان عوامل اصلی مخرب در محوطهٔ تاق‌بستان را پس از تشخیص اولیه، موردمطالعه قرار داد و در نهایت در صدد رفع مشکل، اقدامات مقتضی جهت حفاظت این اثر ارزشمند را پیشنهاد کرد. منظور از «الگوی تخریب» همانطور که برای متخصصان حوزهٔ سنگ روشن است، نمود ظاهری تخریب است. تخریب‌ها به‌واسطهٔ عوامل مخربِ متفاوت به شکل‌های متفاوتی ظاهر می‌شوند که با بررسی نمود ظاهری آن‌ها، می‌توان منشأ ایجاد آن را شناسایی کرد. گاهی نیز چند عامل به‌طور همزمان موجب شکل‌گیری یک الگوی تخریب می‌شوند و در این هنگام است که تشخیص علل تخریب می‌تواند سخت باشد و نیاز به تجربه و تخصص دارد. در سنگ‌نگاره‌های تاق‌بستان نیز چنین پدیده‌ای رخ داده است، به‌طوریکه می‌توان چندین پدیدهٔ مخرب، مانند رسوب، شوره و جدایش را همزمان در یک ناحیه مشاهده کرد. بنابراین شناسایی الگوهای تخریب و در پی آن تشخیص عوامل مخرب، از اولین و مهم‌ترین اقدامات در خصوص حفاظت از این میراث جهانی است که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود.

پیشینهٔ پژوهش

مرور پژوهش های پیشین

در خصوص تخریب‌های مجموعهٔ تاق‌بستان پیش از این مطالعات مختصری در قالب رساله‌های کارشناسی و کارشناسی‌ارشد انجام گرفته است که در آنها به‌جهت تفاوت اهداف، الگوهای تخریب به‌طور کامل بازگو نشده‌اند (Farajzadeh, 2011; Khadivi et al., 2011; Mehdi Abadi, 2004). همچنین در گزارش ساماندهی محوطهٔ تاق‌بستان به تخریب‌های رخداده در نقوش اشاره‌ای مختصر شده است (Atec Consultants Engineer, 2009). در مقاله‌ای نیز تأکیدی بر نقش کارن‌ها بر تخریب سنگ‌های تاق‌بستان شده است که در آن این نوع اشکال کارستی را برای آثار تاق‌بستان خطری بالقوه تلقی کرده است (Qobadi et al., 2013).

همچنین جاناتان کمپ گزارش حفاظتی مشروحی در خصوص طرح حفاظت مجموعه تاق‌بستان ارائه کرده است که در آن تراوش آب، انحلال، یخزدگی را از عوامل تخریب می‌داند و برای حفاظت از آن کنترل آب نزولی را ضروری می‌داند و همچنین برای بازسازی نواحی کمبود ملات پایهٔ آهکی را پیشنهاد کرده است (Kemp, 2012). حال در این پژوهش در جهت تکمیل گزارش‌های موجود، الگوهای تخریب به‌طور خاص در محوطهٔ تاریخی و فرهنگی تاق‌بستان مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

ادبیات پژوهش

صخرهٔ سنگی تاق‌بستان متشکل از سنگ رسوبی غیرآواری کربناته است، تنها یک پژوهش سنگ این محوطه را از نوع آهکی میکراته حاوی بایوکلاست شناسایی کرده است (Mehdi Abadi, 2004). همچنین اشاره شده است که این سنگ بافت ناهمگنی دارد که موجب می‌گردد آب‌های نافذ در سنگ بیشتر متوجه بلورهای درشت کلسیت شفافی بشوند که تخلخل سنگ را پر کرده‌اند. بدین سبب این نوع سنگ آهکی در معرض عوامل مخربی چون باران‌های اسیدی و یا تنش‌های محیطی بسیار آسیب‌پذیر است. مقدم بر این، آثاری از جنس سنگ که در محیط باز قرار دارند نسبت به آثار موزه‌ای بیشتر در معرض تخریب هستند، بدین علت لزوم دانش در زمینهٔ تخریب آثار سنگی در محوطه‌های باز و در نظر گرفتن نوع تخریب هنگام اتخاذ تصمیمات حفاظتی بسیار ضروری است. بنابراین پیش از هرچیز به مرور انواع تخریب و علل آن در سنگ‌های آهکی پرداخته می‌شود.

انواع تخریب در سنگ‌های آهکی

تخریب‌ها در سنگ‌ها به دو شکل فیزیکی و شیمیایی رخ می‌دهند که گاهی در اثر هر دو نوع تخریب شیمیایی و فیزیکی به‌طور همزمان، هوازدگی یا زوال[1] رخ می‌دهد. وقوع

[1] در سنگ‌شناسی، واژهٔ «هوازدگی» هنگامی که فرسایش در نتیجهٔ پدیده‌های جوی رخ دهد، بکار می‌رود و واژهٔ «زوال» هنگامی که به کاهش کیفیت و اضمحلال بیانجامد، بکار گرفته می‌شود.

یا شکل‌گیری ترک‌ها و شکستگی‌های مکانیکی، بدون تغییر در ترکیب شیمیایی سنگ را «تخریب فیزیکی» می‌گویند. تخریب فیزیکی در کنار تأثیر مکانیکی بر سنگ، موجب تغییرات فیزیکی شده و عمدتاً با تغییر در اندازهٔ دانه‌ها و افزایش سطح همراه می‌شود (Shekofteh, 2019a). عوامل مختلفی مانند تنش‌های داخلی به واسطهٔ چرخه‌های یخ زدن و ذوب‌شدگی، شکفتگی نمک‌ها، انبساط حرارتی و یا ضربات مکانیکی و حتی ریشه گیاهان و جانوران می‌توانند منجر به تخریب فیزیکی شوند (Grassegger, 1999)، اما در این بین به‌طور کلی، «آب» مهم‌ترین عامل در تخریب فیزیکی است که عملکرد مکانیکی آن به دو شکل بر سنگ‌ها تأثیرگذار است:

۱) جریان و ضربات آب مانند باران، تگرگ و...؛ جریان‌های ناشی از ریزش باران و داغ حاصل از آنها بستگی به میزان بارش، شدت جریان آن و سرعت وزش بادهای دارد. گاهی اوقات با تشکیل جریان‌های آب به صورت جویبارهای کوچک تشکیل‌شده روی سنگ، تأثیربُردگی (شسته شدن) بوجود می‌آید. رفتار سنگ آهک در مقابل عوامل فرساینده و عوامل مؤثر در انحلال آن در ارتفاعات مختلف متفاوت است (Khoshraftar et al., 2019). از نمونه‌های بارز تأثیر آب، کارست‌ها[1] هستند که می‌توانند سطحی یا زیرسطحی باشند. در خصوص الگوهای تخریب در محوطهٔ تاق‌بستان، کارست‌های سطحی اهمیت بسیار دارند. این نوع کارست‌ها بر روی سنگ‌های قابل انحلال در اثر انحلال آب مشاهده می‌شوند که می‌توانند در اندازه‌های میلی‌متری مانند میکروکارن تا چندین کیلومتر مانند دشت کارستی باشند. در میان پدیده‌های شناخته‌شده، کارستی در ناحیهٔ موردنظر که شامل سینک‌هول‌ها، کارن‌ها غارها و اووالاها[2] هستند (De Waele et al., 2009). کارن‌ها[3] عمده‌ترین اشکال کارستی را تشکیل می‌دهند که خود نیز به چندین گروه ریلن کارن، تریت کارن، رینن کارن و ... تقسیم می‌شوند.

۲) تشکیل و رشد بلورها مانند یخبر شدن و شکفتگی شوره‌ها؛ به‌عنوان مثال در مناطقی که دمای هوا به نقطهٔ یخزدگی می‌رسد، هنگام بارندگی در زمستان، آب بین خلل و فرج و لوله‌های مویین سنگ قرار می‌گیرد که در اثر یخ زدن دچار انبساطی ۹ درصدی می‌گردد (Amoroso & Fassina, 1983). ابتدا سطح خارجی سنگ سرد شده و یخ می‌بندد و راه را برای انبساط و خروج آب با ادامهٔ سرما و یخبندان می‌بندد؛ این یخزدگی و فشار ناشی از افزایش حجم آن موجب ایجاد ترک و ریز ترک در دیواره‌ها و حفرات (خصوصاً در نزدیکی سطح) می‌گردد. در اثر تکرار عمل یخزدگی، پدیده یخبر شدن رخ می‌دهد و در نهایت سنگ از سطح به عمق متلاشی خواهد شد. البته قابل ذکر است که این فشار آنقدر زیاد است که نه تنها می‌تواند ذرات کوچک را متلاشی کند، بلکه قطعات بزرگ با وزن‌های چند تُنی نیز از آن در امان نمی‌مانند. بیشترین تأثیر یخبر شدن در برودت -5° تا -15° مشاهده می‌شود (Skinner et al., 2013). شواهد حاکی از آن است که سنگ‌هایی که تخلخل متوسط دارند بیش از سنگ‌های کاملاً متخلخل در برابر یخبر شدن تحت‌تأثیر قرار می‌گیرند؛ زیرا در اینگونه سنگ‌ها با کاهش درجهٔ حرارت، فرصتی برای خروج تمامی قطرات آب از لابه‌لای حفرات ریز باقی نمی‌ماند (Parvin, 1996). ترک‌خوردگی ناشی از یخبر شدن می‌تواند، سنگ را به قطعات متعدد و یا خرده‌های کوچک تبدیل کند. در حقیقت، پدیدهٔ یخزدگی به‌صورت متلاشی شدن سطح و در مراحل پیشرفته به شکل متلاشی شدن بلوک نمود پیدا می‌کند. نمک‌ها از طریق فشار انبساط حرارتی تفاضلی باعث تخریب می‌شوند (Smith et al., 2005). دامنه و سرعت تخریب حاصل از تبلور نمک‌ها، نه تنها به نوع نمک‌های موجود و فراوانی چرخه‌های تبلور، بلکه به میزان مقاومت سنگ نیز بستگی دارد. واضح است، میزان کم‌تر فضای داخل خلل و فرج مصالح شانس بهتری برای مقاومت در برابر فشار تبلور نمک‌ها را به آن‌ها می‌دهد (Rijniers et al., 2005). تبلور نمک‌ها به دو شکل بر سنگ‌ها مشاهده می‌شود: رشد بیرونی نمک‌ها بر سطح که شکفتگی (شوره) نامیده می‌شود و تبلوری که به‌طور نامحسوس در خلل و فرج روی می‌دهد که «نهان شکفتگی» نام دارد. شوره به‌خودی‌خود بی‌ضرر است، اما بر خلاف آن، نهان‌شکفتگی سبب وارد آمدن فشار بر

[1] Karst

[2] اووالاها از اشکال کارستی هستند که در نتیجهٔ توسعهٔ شدید کارستی و به‌هم‌پیوستگی فروچاله‌های متعدد (فروچاله‌ها در اثر فعالیت انحلالی آب و فروریزش ناشی از عدم استحکام لایه‌های سطحی که منتج از ایجاد تخلخل‌های ثانویهٔ سطحی و زیرسطحی است، شکل می‌گیرند) پدید می‌آید (Shekofteh et al., 2019b).

[3] Karren

دیوارهٔ منافذ سنگ می‌شود؛ شدت فشار تبلور به نوع نمک و علاوه بر آن به اندازه و نحوهٔ چینش خلل و فرج سنگ بستگی دارد (Ashurst & Dimes, 1998). باید در نظر داشت که تخریب می‌تواند ابتدا در مقیاس میکروسکوپی و با کاهش جزئی مقاومت سنگ همراه شود، اما با تکرار چرخه‌های خشک و تر در طول فصول بارندگی، انحلال یا تبلور مجدد نمک‌ها رخ داده و در نتیجه به پودر شدن سطح سنگ می‌انجامد که اغلب این شکل فرسایش به‌صورت پودر شدن نمایان می‌شود (Shekofteh, 2019a; Vergès-Belmin, 2008).

جلبک‌ها، گلسنگ‌ها و باکتری‌ها در حوزهٔ تخریب سنگ اهمیت زیادی دارند که مطالعات انجام‌شده نیز نشان از گستردگی این عامل مخرب بر سنگ‌های محوطه باز دارد. گلسنگ‌ها از اجماع بعضی جلبک‌ها و قارچ‌ها به‌وجودآمده که به‌طور هم‌زیست به زندگی خود ادامه می‌دهند. قارچ‌هایی که قادر به زندگی مستقل نیستند در تشکیل گلسنگ شرکت می‌کنند. گلسنگ‌ها می‌توانند به‌طور فیزیکی محیط را برای رشد گیاهان بزرگ‌تر و زیان‌بارتر آماده کرده و یا با انبساط و انقباض ریسه (بخش نباتی قارچ) در شرایط تغییر رطوبت، آسیب مکانیکی ایجاد کنند و هم می‌توانند از طریق تجزیه و جذب مواد معدنی (به‌صورت شیمیایی) باعث تخریب شوند (Wilson, 2004). در حقیقت تخریب شیمیایی در این عامل جدی‌تر از تخریب فیزیکی است. بنابراین در اینجا به مرور تخریب‌های شیمیایی می‌پردازیم:

«تخریب شیمیایی» به فرآیندی گفته می‌شود که از طریق تغییر و واکنش شیمیایی موجب تجزیه و فروپاشی شیمیایی سنگ‌ها شود (Amoroso & Fassina, 1983). چگونگی عملکرد این فرایند به عوامل متعدد و پیچیده‌ای که صورت‌های گوناگون و با شدت‌های متفاوت عمل می‌کنند، بستگی دارد. در تخریب شیمیایی ساختمان داخلی کانی‌ها در اثر افزایش یا کاهش عناصر دستخوش تغییر می‌شود. در تخریب شیمیایی آب و رطوبت از مهم‌ترین عوامل مخرب به حساب می‌آیند، البته فراموش نشود که PH آب و مواد محول در آن تعیین‌کنندهٔ میزان تأثیر این عوامل هستند (Skinner et al., 2013).

اولین پدیده شیمیایی که توسط آب در سنگ صورت می‌گیرد، انحلال است که مقدار و سرعت حل شدن کانی‌ها به چند عاملِ قابلیت انحلال، نوع حلال و شرایط محیطی (از قبیل تکتونیک، چینه شناسی، سنگ شناسی، ارتفاع منطقه، میزان و نوع بارش، درجهٔ حرارت و زمان بارش) بستگی دارد (Shekofteh, 2019a; Skinner et al., 2013). از سوی دیگر، آب از طریق هیدراته شدن (آبپوشی) نیز می‌تواند کریستال‌ها را منبسط کرده و در نهایت موجب تخریب می‌شود (Doehne et al., 2003). این امر بستگی به میزان حلالیت نمک‌ها و میزان تبخیر آب از سطح خواهد داشت. در واقع، عملکرد شیمیایی آب در خصوص سنگ‌های آهکی به میزان گاز دی‌اکسید کربن موجود در محیط بستگی دارد و در حضور غلظت بالای دی‌اکسید کربن موجب شکل‌گیری بی‌کربنات‌ها می‌شود (Amoroso & Fassina, 1983).

آلاینده‌های صنعتی دامنهٔ وسیعی از عوامل فرساینده سنگ‌های آهک‌دار را شامل می‌شوند. حتی در صورت فقدان آلاینده‌های صنعتی، آلاینده‌های جوی موجود در هوا مانند دی‌اکسید کربن نیز در تماس با آب تشکیل اسید می‌دهند. علاوه بر آن، اسیدهای سولفوری و نیتروژنی (حاصل از سوخت‌وساز و یا تجزیهٔ عوامل ارگانیک)، با حل کردن نمک‌های محلول ته‌نشین‌شده در سنگ و یا حل کردن کربنات کلسیم ($CaCO_3$)، در اولین مرحله به‌صورت شوره بر سطح سنگ تشکیل شده و موجب تخریب می‌شوند، با این تفاوت که سرعت تخریب به‌مراتب کم خواهد بود. در واقع اصلی‌ترین عامل سرعت‌دهندهٔ تخریب‌های اسیدی، گاز دی‌اکسید گوگرد (SO_2) است. اغلب شوره‌های سولفاتی از شسته شدن سنگ آهک با بارانی که با آلاینده‌های جوی همراه است، به وجود می‌آید که می‌تواند در تماس با سنگ آهک، کربنات کلسیم را مورد حمله قرار داده و آن را به سولفات کلسیم و آب تبدیل کند. متأسفانه تخریب $CaSO_4$ چرخه‌ای مستمر بوده و قابلیت گسترش دارد (Bakaoukas et al., 2005; Martínez-Arkarazo et al., 2007; Rodriguez-Navarro et al., 2000; Rodriguez-Navarro & Sebastian, 1996).

علاوه بر موارد اشاره‌شده، واندالیزم[1] و مداخلات نادرست نیز می‌توانند، چه به‌صورت فیزیکی و چه به‌صورت شیمیایی

[1] Vandalism واندالیسم به معنای وارد آوردن آسیب و خسارت عمدی به اموال عمومی و با ارزش است.

موجب تخریب آثار سنگی موجود در محوطه‌های باز شوند. یکی از آن‌ها که عمدتاً به مسائل فرهنگی باز می‌گردد، واندالیزم است. دیگری که عمدتاً به مداخلات نادرست تعبیر می‌شود، شامل دخل‌وتصرف در اثر، حفاظت‌های غلط و مرمت‌های نسنجیده است. یکی از مهم‌ترین مداخلاتی که طی چند دههٔ اخیر در آثار سنگی ایران رخ داده است، مرمت و بازسازی آثار سنگی با استفاده از ملات سیمانی است که در ادامه، جهت روشن شدن مشکل به اختصار شرح داده می‌شود:

سیمان پرتلند مخلوط پودری بسیار نرم با قابلیت جذب آب است که پس از گیرش، موجب به هم چسباندن ذرات می‌شود. ماده نهایی این فراورده‌های ساختگی سیلیکات کلسیم است که در انواع بسیاری تهیه و تولید می‌شود. سیمان بر اساس مقاومت، خواص فیزیکی و شیمیایی به ۵ دستهٔ مختلف تقسیم می‌شود: سیمان معمولی (تیپ یک)، سیمان ممتاز یا اصلاح‌شده (تیپ دو)، سیمان زودگیر (تیپ سه)، سیمان دیرگیر (پرتلند کم‌حرارت) و سیمان ضدسولفات. علاوه بر آن، با توجه به نوع واکنش سخت‌شوندگی، سیمان به دو دستهٔ مختلف شامل «هیدرولیک» و «غیرهیدرولیک» تقسیم می‌شود. سیمان‌های هیدرولیکی در اثر واکنش با آب سفت و سخت می‌شوند که به این عمل هیدراتاسیون می‌گویند. سیمان غیرهیدرولیک سیمانی است که برای گیرش خود نیازی به حضور آب ندارد. این نوع سیمان به‌طور عمده، دو نوع آهکی و گچی دارد (Foroutani, 2009).

فازهای اصلی تشکیل‌دهندهٔ سیمان عبارتند از تری‌کلسیم سیلیکات ($3CaO.SiO_2$) ۵۰ درصد وزنی؛ دی‌کلسیم سیلیکات ($2CaO.SiO_2$) ۲۵ درصد وزنی و تری‌کلسیم آلومینات ($3CaO.Al_2O_3$) ۱۲ درصد وزنی به همراه افزودنی‌هایی چون تتراکلسیم آلومینوفریت ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) ۸ درصد وزنی و ژیپس ($CaSO_4.H_2O$) ۳/۵ درصد وزنی است (Strenchock, 2009). برای منظم کردن گیرش سیمان، سنگ گچ یا انیدریت را با کلینکر آسیاب می‌کنند. همچنین برای افزایش مرغوبیت سیمان‌های پرتلند و پایدار کردن آنها در برابر اثرات نامطلوب CaO آزاد و Na و غیره، هنگام آسیاب کردن کلینکر، به‌غیر از سنگ گچ، خرده‌سنگ تراس، یا پوزولان و یا ماسه آهن‌گدازی اضافه می‌کنند (Hami & et al., 2006). پس از افزودن آب، گیرش سیمان شروع و سپس سخت می‌شود. دلیل هیدراتاسیون و هیدرولیز سه ترکیب اصلی نام برده در بالا هستند که به‌عنوان یک چسب عمل می‌کنند. اگر چه سیمان برای معماری مدرن بسیار کاربردی است؛ اما در هنگام استفاده از سیمان پرتلند به‌عنوان مادهٔ بازسازی بایستی از چند جهت مورد توجه قرار گیرد:

الف- انتقال آب و حبس رطوبت: سیمان به‌جهت تخلخل بیش‌تری که نسبت به برخی مصالح، مانند سنگ و آجر دارد، آب بیش‌تری را جذب می‌کند و دفع در آن نیز کندتر صورت می‌پذیرد و بدین جهت محیط مستعدی برای شکل‌گیری و رشد نمک‌های محلول و همچنین پدیده‌های یخبر شدن ایجاد می‌کند، به‌علاوه این خاصیت موجب ایجاد فضای مناسب و مرطوب برای رشد میکرو ارگانیزم‌ها نیز می‌گردد.

ب- فرآیندهای شیمیایی: از ابتدای قرن بیستم میلادی که سیمان به‌عنوان مادهٔ مرمتی مورداستفاده قرار گرفته، گزارش‌هایی از تشکیل ترکیبات ثانویه‌ای به‌موجب واکنش محصولات هیدراتاسیون C_3S، C_2S و C_3A سیمان با ترکیبات موجود در محیط یا بستر (همچون نمک‌های سولفاته) ارائه شده است (Esponda Cascajares, 2004)؛ به عبارت دیگر سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینات موجود در ترکیبات سیمان با ذرات سولفاتی محیط واکنش نشان می‌دهند که این پدیده یکی از مهم‌ترین دلایل مردود شدن سیمان به‌عنوان مادهٔ مرمتی است. منشأ سولفات‌ها که موجب شکل‌گیری شوره یا حتی در مواردی تخریب سیمان می‌شوند، متنوع هستند که مهم‌ترین آنها عبارتند از (Borsoi et al., 2000; Collepardi, 1990).

- مصالح ساختمانی اطراف ملات سیمانی، مانند ملات‌ها آهکی و گچی که در بنا استفاده شده؛
- واکنش سولفات سدیم یا سولفات منیزیم موجود در آجر با آهک یا C-S-H موجود در ملات؛
- مواد مورد استفاده در مرمت‌های قبلی؛
- سولفات‌های محلول در آب (آب‌های زیرزمینی)، خاک و یا سولفات‌هایی که از طریق باد در مناطق دریایی به محیط حمل می‌شوند؛
- واکنش SO_2 با اکسیژن، آب و کلسیت در سطح بستر که عموماً در محیط‌های صنعتی یا در اثر آلودگی محیطی ایجاد می‌شود؛

- علاوه بر همهٔ این‌ها، خود ملات سیمانی می‌تواند، بسته به مواد تشکیل‌دهنده و ناخالصی‌هایی که دارد، منبع نمک‌های سولفاته باشد.

بنابراین از جملهٔ نمک‌های مخرب سیمان، سولفید کلسیم است (Farokhzad et al., 2016; Griswold & Uricheck, 1998) که رطوبت نقش اصلی را در واکنش بین سیمان با سنگ‌های آهکی-دولومیتی و تولید آن ایفا می‌کند (Harati Ardestani, 2005). هرچند حضور این نمک چهرهٔ اثر را مخدوش کرده و شرایط را نامطلوب می‌کند، اما این را نیز باید اشاره کرد که ژیپس از جملهٔ نمک‌های مرتبط با سیمان است که نسبتاً پایدار با عملکرد شیمیایی پایین است؛ به‌طوری که ژیپس تمایل کمی به جذب آب (تنها تحت شرایط رطوب ۹۹ ٪ در درمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) دارد (Henriques, 2003) و تنها در صورتی که این ژیپس به دیگر فازها تبدیل شود خطرناک خواهد بود. در این واکنش‌ها علاوه بر ژیپس، فازهای دیگر سولفاتی چون اترینگایت[1] (Ca6Al2(SO4)3(OH) 12·26H2O) یا تائوماسیت[2] (Ca3Si(OH)6(CO3)) (SO4)·12H2O) نیز می‌توانند تشکیل شوند. در حقیقت، تشکیل آلومینات کلسیم هیدراته و سیلیکات کلسیم هیدراته در سیمان در حضور سولفات کلسیم و رطوبت می‌تواند موجب شکل‌گیری اترینگایت و تائوماسیت شود. شرایط ایجاد اترینگایت به چند عامل بستگی دارد: حضور سولفات در محیط، حضور آلومینات کلسیم و حضور رطوبت. شرایط تشکیل تائوماسیت نیز به سه عامل بستگی دارد: حضور سولفات در محیط، حضور سیلیکات کلسیم و حضور رطوبت. رشد این دو می‌تواند موجب افزایش فرسایش ملات سیمانی یا بستر شود، خصوصاً اگر ملات سیمانی برای تزریق در حفرات و درزه‌ها به کار رفته باشد، موجب ایجاد نیروهای فشاری گسترده در اثر تورم و در نهایت موجب پایین آوردن استقامت آن ناحیه می‌شود (Farokhzad et al., 2016; Strenchock, 2009). تائوماسیت تورم زیادی ندارد، اما در هنگام تشکیل به توده‌ای از هم گسیخته تبدیل می‌شود که بسته به دما و شرایط رطوبتی می‌تواند به اترینگایت تبدیل شود، به‌طوری که در دمای پایین امکان شکل‌گیری هر دو فاز است اما در سرما و حضور ناخالصی‌های آلومینا، تشکیل تائوماسیت خیلی سرعت می‌یابد. اترینگایت بسیار تحت‌تأثیر کاهش و افزایش رطوبت و دما تغییر ماهیت می‌دهد و تائوماسیت نیز به‌طور گسترده تحت‌تأثیر افزایش دما تغییر کرده و نیاز به زمان زیادی دارد تا از لحاظ ساختاری به حالت قبل بازگردد (*Virginia Lime Works Information Bulliten*, 2009). طبق آنچه که گفته شد، استفاده از سیمان به‌عنوان ماده مرمتی بسیار بحرانی و مسئله‌ساز خواهد بود و در مواجه با آن بایستی محتاط عمل کرد.

اکنون با در نظر گرفتن ادبیات بالا در خصوص انواع تخریب در سنگ‌های آهکی و دلایل آن‌ها، حال به معرفی الگوهای تخریب در محوطهٔ سنگی تاریخی و فرهنگی تاق‌بستان پرداخته می‌شود:

روش بررسی

در این پژوهش از طریق مطالعات کتابخانه‌ای، مشاهدات میدانی، مطالعات ماکروسکوپی در محل (توسط دینو Dino-Lite Edge مدل AM4115ZT – EDGE) الگوهای تخریب شناسایی‌شده و سپس چگونگی شکل‌گیری و عوامل ایجاد هر کدام از الگوهای تخریب از طریق مقایسه با نمونه‌های شناسایی‌شده در دیگر مطالعات و بررسی میدانی تاق‌بستان تشخیص داده شدند. پس از شناسایی عامل شکل‌گیری هر کدام از این الگوها بر اساس شدت تخریب و سرعت پیش‌روی، دسته‌بندی شده و به‌ترتیب از کم‌خطر تا پرخطرترین تعیین موقعیت شده‌اند. بدین ترتیب در این پژوهش، الگوها و عواملی که بیش‌ترین مشکل را در پیش دارند، برای مداخلات حفاظتی تعیین و معرفی می‌گردند.

یافته ها و بحث

مشاهدات میدانی (الگوهای تخریب) در محوطهٔ تاق‌بستان

تأثیر مکانیکی و انحلالی آب

در طی مشاهدات میدانی از سنگ‌نگاره‌های تاق‌بستان چه با چشم غیرمسلح و چه به‌صورت ماکروسکوپی، می‌توان تأثیر مکانیکی مانند یخبر شدن و تأثیر شیمیایی مانند انحلال را (به شکل‌های مختلف همچون شیارهای آب در بین نقش برجسته‌ها) مشاهده کرد. در حقیقت تخریب ناشی از اثرات آب، از گستردگی بسیاری نسبت به سایر آسیب‌ها برخوردار است که در ادامه شرح داده می‌شوند.

[1] Ettringite

[2] Thaumasite

اشکال کارستی سطحی

همانطور که در بخش ادبیات پژوهش اشاره شده، کارن‌ها از زیرگروه‌های کارست‌های سطحی هستند. کارن‌ها به‌طور خطی در امتداد درزه‌ها و شکاف‌های ریز در اثر جریان آب توسعه پیدا می‌کنند و به هنگام توسعهٔ بیش‌تر در عمق، دریافت‌کننده و زهکش، بخش‌های سطحی‌تر هستند. از عوامل محیطی مؤثر در تشکیل کارن‌های منطقهٔ تاق‌بستان، می‌توان به آب و هوا (دوره‌های متناوب خشک و تر شدن)، بارش و ارتفاع ناهمواری‌ها اشاره کرد. در حقیقت کارستی شدن در مناطقی که دارای دوره‌های متناوب خشک و تر هستند، به حداکثر خود می‌رسد و از آنجایی که منطقهٔ موردنظر دارای تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد و نسبتاً پربارش است (جدول ۱)، مستعد کارستی شدن بوده است. علاوه بر آن، سنگ آهک مورد نظر با درجه خلوص بالا، پتانسیل بالایی جهت انحلال داشته است (Shekofteh et al., 2019b)؛ بنابراین توسعهٔ کارن‌ها نشان‌دهندهٔ توسعه اپی کارست شدید و تغذیهٔ بالای آب‌های زیرزمینی است (Khoshraftar et al., 2019). اکثر کارن‌های منطقه، در ارتفاعات ۲۲۰۰ تا ۲۵۰۰ متری تشکیل شده است که این امر با توجه به میزان بارش منطقه قابل توجیه است؛ زیرا حداقل میزان بارش برای ایجاد کارست ۳۰۰ میلی‌متر در سال است (Chorley, 1962). کارن‌ها از نظر مورفولوژی در منطقهٔ مذکور به چند شکل یافت شدند.

الف- ریلن کارن (شیار انحلالی)[1]

اینگونه الگوی تخریبی در نقش‌برجسته‌ها به‌طور مشخص مشاهده نشد، اما در ساختار صخرهٔ پرآو-بیستون در اطراف نقش‌برجسته‌ها، این الگو وجود دارد (شکل ۲). این نوع کارن‌ها در حقیقت شیارهای کوچکی هستند که در جهت شیب گسترش می‌یابند و مقطع آنها V شکل است. این کارن‌ها در بخش‌های بالایی شیب‌ها ایجاد می‌شوند و انتهای آن‌ها به‌علت اشباع سریع آب جاری روی سنگ، بسته است. در حقیقت الگوی ساده‌ای دارند که ممکن است به‌صورت مئاندری، شاخه‌شاخه یا متصل به یکدیگر باشند. طول ریلن کارن‌ها به مقدار بارش، دمای محیط و زاویهٔ شیب بستگی دارد؛ به‌طوری‌که طول آن‌ها با افزایش دما، بارش و زاویهٔ شیب افزایش پیدا می‌کند (Bögli, 1980).

ب- تریت کارن (کارن پله‌ای/ اثرات پاشنه‌ای)[2]

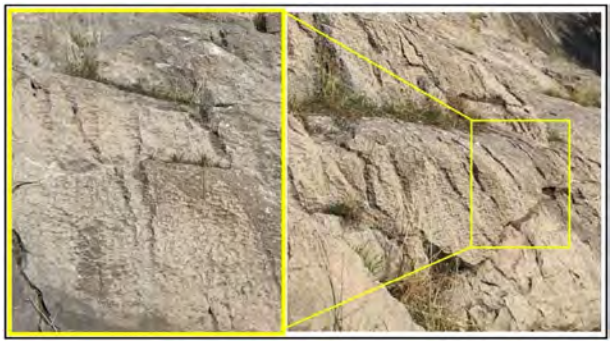
این نوع کارن از سه قسمت خیز (موجدار)، کف (مسطح و افقی) و پیشانی تشکیل می‌شود. تریت کارن در تاق‌بستان بر دیوار اطراف نقش تاج‌گذاری اردشیر دوم و دیوارهٔ سنگی پشت تاق‌کوچک مشاهده می‌شود (شکل ۳) که نشان از قرارگیری آن‌ها در مسیر جریان آب‌های جاری سطحی دارد. این نوع کارن به‌صورت گروهی روی پشته‌های شیب در مکان‌های که شدت انحلال زیاد و جریان آب سطحی باشد، گسترش می‌یابند. محققان به‌طور کلی معتقدند که این نوع کارن‌ها توسط انحلال و به‌وسیلهٔ جریان آب ورقه‌ای آشفته در اثر ذوب برف تغذیه می‌شوند (Trudgill, 1985; Vincent, 1983). مشکل اصلی وجود این نوع کارن‌ها، حفره‌هایی است که در سطح ایجاد کرده که از این طریق، زمینه را برای فرسایش سنگ فراهم می‌کنند، همچنین جریان‌های آب سطحی را هدایت کرده و با تمرکز آب‌های سطحی، زمینه را برای نفوذ آب به درون خلخل و فرج ایجاد می‌کنند. بنابراین لزوم ایجاد کانال‌های انحراف آب در بالادست نقش‌برجسته‌ها، امری حیاتی است تا از تمرکز آب روی نقش‌برجسته‌ها و عوامل ناشی از حضور آن‌ها (مانند تجمع آب در خلل و فرج) و همچنین از شکل‌گیری رسوبات جانبی حاصل از این جریان جلوگیری شود.

جدول ۱. میانگین بیش ترین و کم ترین دما و بارش طی بیست سال اخیر در شهر کرمانشاه (ادارهٔ هواشناسی استان کرمانشاه)

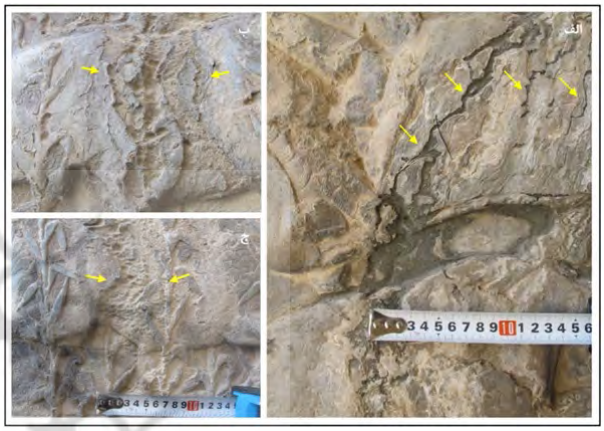
بیش‌ترین دما در تابستان (°C)	کم‌ترین دما در زمستان (°C)	روزهای یخبندان در فصل زمستان	روزهای بارانی در فصل زمستان	حداکثر بارندگی در فصل زمستان (mm)	بارش سالیانه (mm)
۴۱/۲۵	-۸/۲۳	۱۸	۹	۲۱/۱۶	۵۷۵/۸

[1] Rillenkarren/Solution Grooving

[2] Trittkarren/ Step Karren/ Heelprintkarren



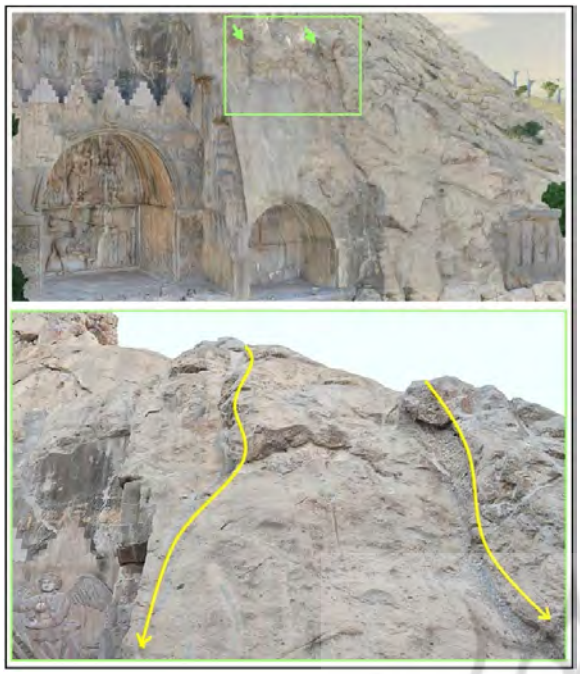
شکل ۲) اثرات جریان آب به شکل ریلن کارن در ضلع غربی صخرهٔ تاق



شکل ۴. اثرات جریان آب به شکل ریزرینن‌کارن در درون تاق بزرگ: الف) خطوط باریک موازی اثر شسته‌شدگی توسط آب که به‌علت ترکیبات محلول و یا میکروارگانیزم‌ها موجب تیرگی سطح انحلال‌یافته شده است؛ ب) خطوط موازی شسته‌شدگی رینن کارن بر بدنهٔ گراز تاق بزرگ؛ ج) پهنای شسته‌شدگی روی بدنهٔ گراز که حدوداً ۶ سانتی‌متر است.

ج- رینن کارن (رانل)[1]

شواهد وجود رینن‌کارن‌های ثانویه در درون نقش برجسته‌های طاق بزرگ قابل مشاهده است که امکان وجود کانال‌های انحلالی در پشت دیوارهٔ نقش‌برجسته را تأیید می‌کنند (شکل ۴). این کانال‌های انحلالی به موازات هم ایجاد شده و جهت آن‌ها منطبق بر شیب دامنهٔ سنگی است. رینن کارن‌ها بر شیب‌های ۳۰ تا ۹۰ درجه ایجاد می‌شوند. این نوع کارن می‌تواند چندین دسی‌متر، عرض و عمق داشته و بسته به ارتفاع، چندین متر درازا داشته باشد. این نمود از کارن روی دامنه‌های پرشیب معمولاً به‌صورت موازی هستند، اما روی شیب‌های آرام‌تر به‌صورت کانال‌های اصلی و فرعی متصل به هم ایجاد می‌شوند.



شکل ۳. راست: نمایی از نقش‌برجسته‌های تاق‌بستان (عکس: فرشاد صالحی). پیکان‌های سبزرنگ و کادر سبز، محل تریت‌کارن را نشان می‌دهد؛ چپ: بزرگ‌نمایی کادر سبز، اثرات جریان آب به شکل تریت کارن بالای طاق کوچک، مسیر آب با خطوط زردرنگ مشخص شده‌اند.

د- کارن حفره‌ای[2]

کارن‌های حفره‌ای در اثر نشت آب شکل می‌گیرند و عمدتاً نامنظم هستند. نحوهٔ تشکیل آن‌ها بدین شکل است که ابتدا نشت آب موجب ایجاد یک شبکه ریزترک شده و سپس با افزایش جریانات آبی این ریز ترک‌ها به حفرات تبدیل شده و ممکن است در اثر انحلال بزرگ‌تر نیز شوند (Veress, 2000). این پدیده در ابعاد کوچک و به شکل حفره‌های ریز متغیر از ۱ سانتی‌متر تا ۱۵ سانتی‌متر در سقف تاق بزرگ و تاق کوچک وجود دارد. همچنین چندین حفره در تاق بزگ در ضلع غربی، ضلع شمالی در سمت ستون غربی و همچنین ضلع شرقی قابل مشاهده هستند. آب جریان‌یافته از درون این حفره‌ها در برخی نواحی، موجب تیره شدن سطح شده است که ناشی از ترکیبات مواد انحلال‌یافته است. در باقی موارد آب باعث انحلال سطحی و

[1] Rinnenkarren/ Runnel

[2] Karren cavity

افزایش تخلخل سطح عبوری شده و سطح صیقلی را تبدیل به سطحی ناهموار و جزیره‌مانند کرده است که خود موجب مستعد شدن محیط برای زندگی میکروارگانیزم‌ها و حتی لارو حشرات شده است (شکل ۵).

شکل ۵. الف- ریزکارن‌های حفره‌ای در بالای نقش قاجاری تاق‌بزرگ؛ ب-دو ریزکارن حفره‌ای در ضلع غربی تاق بزرگ که احتمالا مواد آلی را به همراه داشته و اثر تیره‌رنگ بر سطح به جا گذاشته است؛ ج- ریزکارن حفره‌ای روی نقش شکار گراز که به‌علت وجود مواد آلی در خود، موجب مخدوش شدن اثر شده است

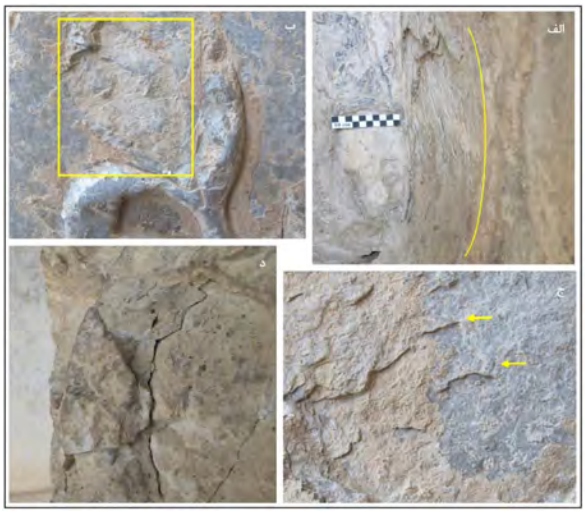
پدیدهٔ یخ‌بر شدن

در سال‌هایی که سطح آب چشمه‌های تاق‌بستان نسبت به قبل در اثر مداخلات نادرست بالاتر از حد معمول آمده بود، اثرات مخربی را در پی داشت که یکی از این اثرات مخرب در تماس بودن ناحیهٔ تحتانی نقش‌برجسته‌ها با آب است. حتی در زمانی که کف تاق‌ها از آب مملو نبوده، سنگ‌ها با لوله‌های مویین خود می‌توانستند (به‌علت تماس نزدیک با آب)، میزان آب بیش‌تری جذب کنند که این عامل در نهایت در فصول سرد سال موجب چرخه‌های متناوب یخزدگی و ذوب شدن آب شده است. اثرات این رخدادها را می‌توان در لایه پایینی نقش‌برجسته‌های تاق بزرگ مشاهده کرد (شکل ۶). در بین نقوش برجسته و شبه‌مجسمه تاق بزرگ مشکل خروج آب از اهمیت بیش‌تری برخوردار است؛ زیرا آب خارج‌شده از حفره‌ها و کانال‌ها در دیواره و سقف روی نقوش برجسته جاری می‌شود و در برخی نواحی توسط خلخل و فرج جذب شده و یا روی سطح باقی می‌ماند. در دمای انجماد این آب یخزده و به‌مرور موجب یخ‌بر شدن می‌گردد (شکل ۷).

یخزدگی به چند شکل ترک‌های عمیق، پوسته‌شدن‌های سطحی و تراشیدگی نمایان می‌شود. این آسیب در حالت شدید با اشکالی مثل ترک‌خوردگی نمود پیدا می‌کند (Amoroso & Fassina, 1983). ترک خوردگی در اثر یخ‌بر شدن می‌تواند سنگ را به قطعات متعدد و یا خرده‌های کوچک تبدیل کند؛ اما قادر به تبدیل سنگ به پودرهای ریز یا بلیستر نیست. به‌طور کلی یخزدگی در سنگ‌ها دارای دو شکل کلی است که عبارتند از انفصال‌ها بشقابی[1] و عدسی‌سان[2] که عموماً در سطوح فوقانی در سنگ پلاک یا چینه‌ها در وجوه خارجی سنگ‌ها اتفاق می‌افتد (Parvin, 1996; Setzer, 2001). قسمت‌های جداشده در جهت نواحی‌ای هستند که بیش‌ترین گرما را از دست می‌دهند، برخی اوقات این جداشدگی به حدی است که ممکن است سطح را مقعر کند و می‌توان یخ را در میان اجزای جدا شده

[1] Wafer like

[2] Lens like



شکل۶. الف- انحنای دیوارهٔ شمال‌شرقی تاق بزرگ که در اثر چرخه‌های متناوب یخزدگی- ذوب ایجاد شده است؛ ب- بخش‌های منفصل‌شدهٔ نقوش برجسته در اثر چرخه‌های یخزدگی؛ ج- پوسته‌شدگی سطح تحتانی ضلع غربی تاق بزرگ در اثر یخزدگی؛ د- بزرگنمایی ترک‌ها و انفصال‌های ایجادشده در اثر پدیده یخزدگی بالای کلاه‌خود خسرو پرویز.

شکل ۷. الف- محل‌های جاری شدن آب در تاق بزرگ هنگام بارندگی (۱۳۹۸، عکس: محمد فیض‌آقایی)؛ ب- نواحی قندیل‌بسته در نقش تاجستانی تاق بزرگ که در آن آب جاری دفع‌شده از طریق حفرات داخل تاق در اثر سرمای زمستان یخ زده است (منبع: آرشیو پایگاه تاریخی تاق‌بستان)؛ ج- بزرگنمایی بخش از شکل الف که در آن قندیل‌ها مشخص هستند، مسلماً سطح سنگ نیز یخزده و تحت‌تأثیر این پدیده تضعیف شده است؛ د- محل جاری شدن آب در تاق کوچک هنگام بارندگی؛ و- محل جاری شدن آب هنگام بارندگی بر نقش اردشیر دوم.

مشاهده کرد. الگوی یخبر شدن در آثار سنگی تاق‌بستان عموماً به شکل خردشدگی‌ها در سطح خود را نشان می‌دهند که این خردشدگی‌ها به‌صورت لایه‌لایه از سطح به عمق قرار دارند.

از آنجایی که تاق کوچک در ناحیهٔ تحتانی خود فاقد نقش‌برجسته است، از این منظر مشکل حادی برای آن وجود نداشته، خصوصاً اینکه تخته‌سنگ‌های تحتانی تاق در دههٔ ۷۰ شمسی تعویض شده است. علاوه بر نکتهٔ اشاره‌شده در خصوص بالا رفتن سطح آب، میزان بارش در فصول سرد سال و خروج آب‌ها از کانال‌ها و حفره‌های موجود همانطور که اشاره شد در درون تاق کوچک نیز بی‌تأثیر نیستند؛ زیرا آبی که از طریق این حفره‌ها به درون تاق راه می‌یابد، توسط خلل و فرج سنگ و خصوصاً سطح متخلخلی که انحلال‌یافته است جذب و گاهی در نواحی فرورفتگی‌ها محبوس می‌شود و در فصل سرد سال، روی سطوح نقوش باقی مانده و در نهایت، هنگام شب با پایین آمدن دما به زیر صفر انجماد یافته و به دیواره‌های منافذ سنگ فشار وارد می‌آورد. در نهایت در طی چرخه‌های متناوب یخزدگی- ذوب شدگی متلاشی شدن سطح را به همراه خواهد داشت (شکل ۷). این پدیده در خصوص نقش اردشیر دوم نیز صدق می‌کند، هرچند این نقش‌برجسته در درون خود حفرهٔ خروج آب ندارد؛ اما آبچکان آن به خوبی آب را به خارج از نقش هدایت نمی‌کند.

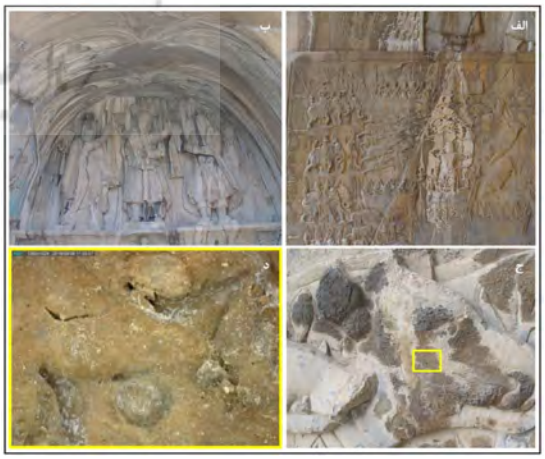
شوره‌ها (واکنش آب پوشی)

نمک‌های محلول اصولاً در سنگ، پیش از روی دادن پدیده‌های شیمیایی وجود دارند و یا از تجزیهٔ سنگ و یا از

منابع خارجی مانند خاک، جو و باران و یا استفاده از روش‌های نامناسب تمیز کردن و نگهداری و حفاظت حاصل می‌شود (Moheb-Ali & Vatandoost, 1998) که بسته به جنسیت خود با تنالیته‌های رنگی از سفید تا تیره مشاهده می‌شوند. درست است که کرمانشاه جز مناطق پر بارش نیست، اما با این وجود در شرایط عدم حضور آب باران، نمک‌ها به تجمع[1] خود در شرایط شرجی و رطوبت بالا در درجهٔ حرارت کم ادامه می‌دهند و گاهی تولید اسید می‌کنند، این اسیدها با هر سطح سنگ آهکی تغییرنیافته‌ای که وجود داشته باشد، واکنش داده و مواد آلاینده دیگر را به سطح اضافه می‌کنند (Ale-yasin & Haqdin, 1991; Stambolov & De Boer, 1967)؛ بنابراین این مناطق تیره‌تر شده و سطح مقاومت خود در مقابل نفوذ را بیش‌تر و بیش‌تر از دست می‌دهد. نمونه مشابه‌ای از پوسته‌های سیاهِ سخت موسوم به رسوب سولفاته را می‌توان در زیر سقف تاق بزرگ (محل درزه‌ها) و مسیر شُره آب را در ضلع غربی تاق از بالا تا ناحیهٔ تحتانی نقش گراز مشاهده کرد (شکل ۸).

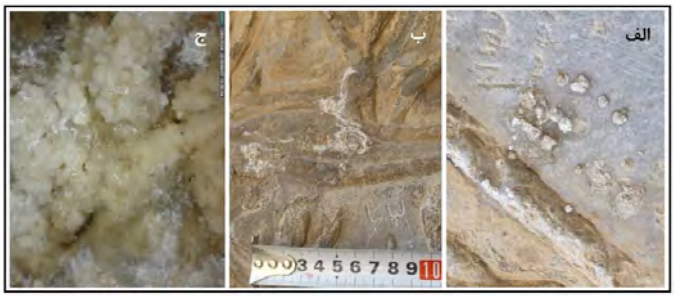
در نواحی شهری جایی که میزان آلاینده‌ها بالا است، سطوح اغلب سیاه می‌شوند و پس از گذشت سال‌ها ظاهر سفید و سیاه (سیاه احتمالاً در مناطقی که باران نتوانسته ژیپسِ ناشی از آلودگی محیطی یا موجود در ترکیب سنگ را بشوید) بر سنگ‌ها نمایان می‌گردد. نکتهٔ جالب توجه این است که چنین ظاهر سیاه و سفید در تاق بزرگ تاق‌بستان نیز مشاهده می‌شود که احتمال حضور ژیپس را تأیید می‌کند (شکل ۸). علاوه بر آن، گزارش شده که در مناطق روستایی که به‌طور طبیعی میزان آلاینده‌ها پایین‌تر است، گاهی چنین سطوحی حتی پس از گذشت یک قرن به رنگ قهوه‌ای تیره دیده می‌شوند (Whalley et al., 1992) که چنین رسوب‌های قهوه‌ای‌رنگ نیز به شکل پراکنده روی نقوش برجستهٔ تاق‌بستان وجود دارند.

بر نقش‌برجسته‌های تاق بزرگ تاق‌بستان، تأثیرات گسترده‌ای از تبلور نمک مشاهده نمی‌شود. شوره‌زدگی‌هایی به‌صورت نقطه‌ای در ناحیهٔ تحتانی نقش‌برجسته‌ها قابل مشاهده هستند (شکل‌های ۹ و ۱۰). همچنین شوره‌هایی در کنار درزه‌هایی که با سیمان پر شده‌اند وجود دارند که در اثر انحلال نمک‌های درون سیمان مصرفی در تماس با آب و یا رطوبت، و خروج آن‌ها به سمت سطح، ایجاد شده‌اند.بیش‌ترین حجم شوره‌زدگی‌ها را می‌توان در ضلع شمالی تاق کوچک مشاهده کرد. این شوره‌ها به‌طور مشخص در طی چند دههٔ اخیر (از دههٔ ۷۰ شمسی) پس از عملیات جایگزینی سنگ‌های جدید بر سطح اثر هویدا شدند. این عملیات باعث پایداری دیوارهٔ شمالی تاق کوچک شد، اما نکتهٔ قابل‌توجه شوره‌هایی است که هر ساله با خروج آب از پشت این تاق در محل اتصال سنگ‌های جدید و سنگ‌های قدیمی متبلور می‌شوند.



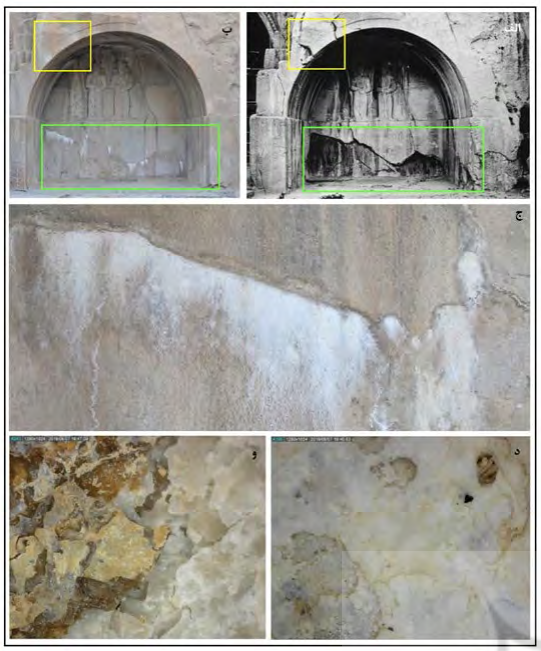
شکل ۸. الف- نمایی از نقش شکار گراز، در سمت راست رسوبات نارنجی- قهوه ای است و رسوبات تیره رنگ در کنار درزه اریب مشخص است؛ ب- ظاهر سیاه و سفید سقف و نقش‌برجسته های تاق بزرگ که در اثر خروج و شُره کردن آب باران به همراه مواد محلول ایجاد شده است؛ ج- بزرگ نمایی نقش گراز که در آن از رسوبات نازک خاکی تا رسوبات ضخیم تیره‌رنگ وجود دارد؛ د- کادر زردرنگ، محل این رسوبات تیره و بزرگ نمایی X۵۰ آن را نشان می دهد.

[1] Condensation



شکل ۹) الف- بازتبلور نمک به‌صورت موضعی بر سطح اثر در تاق بزرگ؛ ب- شوره‌زدگی های اطراف رسوبات در تاق بزرگ؛ ج- بزرگنمایی X۵۰ از شوره های تشکیل‌شده در کنار درزه های سیمانی

شکل ۱۱. الف- ناحیه دارای رسوب تیره در ضلع شمالی تاق بزرگ؛ ب- بزرگنمایی X۵۰ از نواحی سبزرنگ بر دیوارهٔ شمالی تاق بزرگ که رشد ارگانیزم را نشان می‌دهد



شکل ۱۰. الف- تصویر تاق کوچک (توسط هیئت ژاپنی در سال ۱۳۴۴)؛ ب- تصویر در سال ۱۳۹۸ که بخش‌های مرمت‌شده و شوره محل اتصال در آن مشخص است؛ ج- بازتبلور نمک‌های محلول در تاق کوچک که از محل اتصال سنگ‌های جایگزین بیرون زده است؛ د- بزرگنمایی X۵۰ از سطح سفید در تاق کوچک؛ و- بزرگنمایی محل تلاقی نمک‌ها و سطح اصلی که

آلاینده‌های جوی

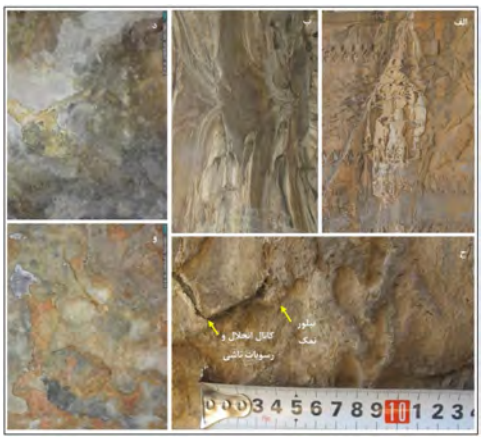
تأثیر مستقیم آلاینده‌های اسیدی روی سنگ‌های آهکی با شرایط سنگ در ارتباط مستقیم است. به‌عنوان مثال اگر سنگ در شرایط روباز در هوای آزاد قرار داشته باشد که مرتباً با آب باران شسته می‌شود، محصولات واکنش شسته شده و به‌تدریج سطح سنگ پسروی می‌کند، اما اگر در وضعیت مسقف باشد، آلودگی هوا با ذرات آلاینده و محصولات واکنشی تجمع کرده و موجب کثیف شدن و لکه شدن[1] نماهای سنگی و حتی تجمع پوسته سیاه[2] متراکم می‌شود (Price & Doehne, 2011) (شکل ۱۱).

در خصوص رسوبات لجنی رنگ موجود در تاق بزرگ تاق‌بستان فرض بر این می‌رفت که این نوع از رسوبات سیاه رنگ به نوعی پوسته سولفاته تیره‌رنگ حاصل از این آلاینده‌ها باشند، اما در طی برداشت نمونه و مشاهدات اولیه، معلوم گشت که اینگونه رسوب سیاه‌رنگ تشکیل‌شده در محل خروج آب، از نوع رسوبات سولفاته سخت نیستند، بلکه سطحی بسیار نرم و قابل‌زدایش دارند که حکایت از آلی بودن مواد تیره‌رنگ داخل آن دارد. با این حال نیاز به آزمایشات مرتبط متفاوتی است تا جنسیت و منشأ این ماده تیره‌رنگ مشخص گردد (شکل ۱۱).

در رابطه با رسوبات روشن‌تر تجمع‌یافته در سقف تاق بزرگ و در تاق کوچک، به نظر می‌رسد که این رسوبات شامل ترکیبات کلسیم و سولفات باشند؛ زیرا از شواهد معلوم است، در اثر انحلال سنگ و تداخل عوامل آلاینده محیطی ایجاد شده‌اند. در حقیقت، مواد محلول حاصل از انحلال ناشی از حمله اسیدها به سمت زمین هدایت شده‌اند (شکل ۱۲) و یا به‌وسیلهٔ بخش‌هایی از سنگ یا سایر مواد متخلخل، جذب گشته‌اند و به همین علت جدایش مکانیکی آنها بسیار سخت است.

[1] Tarring process

[2] Black crust



شکل ۱۲. تأثیر آلاینده‌های محیطی بر سطح نقوش تاق بزرگ، الف- رسوبات ناشی از ترکیباتی چون ژیپس و کلسیت بر سطح؛ ب- رسوبات ناشی از جاری شدن آب روی سقف تاق بزرگ؛ ج- بزرگ‌نمایی از سطح رسوبی که در آن آثار باز تبلور نمک و کانال‌های ناشی از انحلال که در اطراف از رسوب نمکی پر شده است، مشخص است؛ د- بزرگ‌نمایی X۵۰ نواحی که از لایهٔ سفید پوشانده‌شده که در آن بر اثر شکستگی می‌توان لایه‌های زیرین را به رنگ تیره‌تر مشاهده کرد؛ و- بزرگ‌نمایی

طی پژوهشی که در سال ۱۳۷۹ شمسی در خصوص آلاینده‌ها محیطی محوطه‌های بیستون و تاق‌بستان انجام گرفته، مشخص شد، که دو شهرک صنعتی مهم تحت عناوین شهرک صنعتی درود فرامان (جادهٔ کرمانشاه-بیستون) و شهرک صنعتی کرمانشاه (جادهٔ سنندج-کرمانشاه) در اطراف محوطه‌های بیستون و تاق‌بستان وجود دارند. در میان کارخانه‌های این دو شهرک چندین کارخانه از منظر تولید آلاینده نقش بسزایی در تولید آلودگی مخرب برای محیط زیست و آثار تاریخی دارند. به‌منظور شناسایی میزان آلاینده‌های خروجی از این کارخانه‌ها[1] از روش استک سمپلر (با استفاده از دستگاه‌های آنالیزور الکترونیک-مکانیکی TesTo350) شامل آنالیزورهای گازی، روی ذرات گاز مکش‌شده از دودکش کارخانه‌ها، استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه، معلوم ساخت که درصد قابل‌توجهی از واحدهای موردمطالعه، دارای ذرات خروجی مطابق استانداردها نبودند و اغلب چندین برابر استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست خروجی دارند. در بین این کارخانه‌ها، کارخانه سیمان غرب به‌دلیل مجاورت با شهر کرمانشاه و نزدیکی به محوطهٔ تاق‌بستان از عمده‌ترین واحدهای آلاینده از نظر ذرات خروجی[2] به شمار می‌رود. با این حال، گازهای خروجی این کارخانه‌ها شرایط نسبتاً استانداردی داشتند، اما نیروگاه حرارتی بیستون، آلاینده‌هایی نظیر SO_2، NO، NOx و CO داشته که خارج از استاندارد مصوب محیط زیست است. همچنین آلودگی ناشی از کوره‌های آجر و آهک‌پزی عمدتاً از نوع SO_2 بوده که خود نیز قابل‌تأمل است. با این حال مهم‌ترین نکتهٔ راهیابی این آلودگی‌ها به محوطهٔ تاق‌بستان است. بدین علت، میزان آلاینده‌های گازی و ذرات معلق در محوطهٔ تاق‌بستان در سال ۱۳۸۳ شمسی طی ۲۴ ساعت با استفاده از دستگاه‌های سنجش آلودگی هوا و روش آب اکسیژنه اندازه‌گیری شدند. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری مشخص کرد که میزان گاز دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژون به ترتیب ۰/۱۰ و ۰/۱۲۵ بر حسب ppm در یک ۲۴ ساعت در محیط است (Mehdi Abadi, 2004). طبق این نتایج و مقایسهٔ آن‌ها با استاندارد اینگونه استنباط می‌شود که آلاینده‌های گازی در محوطهٔ کم‌تر از استاندارد مجاز است که خود نویدبخش بوده و احتمال بارش باران‌های اسیدی را به صفر نزدیک می‌کند، هرچند برای اطمینان از عدم رشد اینگونه آلاینده‌ها در محیط بایستی این آزمایش مجدداً بعد از گذشت حدود ۱۵ سال انجام گیرد. این نکته قابل‌تأمل است که میزان کل ذرات معلق در هوا ۱۵۰ میکروگرم در متر مکعب گزارش شده و این میزان بیش از استاندارد محیط زیست است که علت آن را می‌توان احتراق

[1] واحدهای تولید آسفالت در محورهای سنندج، بیستون و روانسر؛ کارخانه سیمان غرب؛ کوره‌های هوفمن آجرپزی کنگاور؛ کارخانهٔ مومیایی غرب؛ کوره‌های سنتی پل کهنه (ضلع شرقی شهرستان کرمانشاه) و نیروگاه حرارتی بیستون. در خصوص محوطهٔ تاق‌بستان، واحدهای تولیدی آسفالت در محدودهٔ شهرک صنعتی کرمانشاه و پالایشگاه نفت (به‌علت اکسید گوگرد ناشی از فرآیندهای پالایش نفت) حایز اهمیت است.

[2] Dust

ناقص سوخت کارخانه‌ها و خروجی کارخانه‌هایی نظیر کارخانه سیمان غرب دانست.

میکروارگانیزم‌ها

در مطالعات میدانی انجام‌شده در تاق‌بستان، اثری از زندگی فعال گلسنگ‌ها و یا حضور گستردهٔ آن‌ها در میان نقش‌برجسته‌ها مشاهده نشد که بسیار نویدبخش است؛ اما شواهدی از زندگی پیشین این میکروارگانیزم‌ها روی دو نقش شرق و غرب درخت زندگانی از تاق بزرگ، نواحی بیرونی دیوارهٔ شرقی و غربی از تاق کوچک و نواحی از نقش اردشیر دوم می‌توان یافت. در این نواحی آثاری از خوردگی سطح سنگ، انحلال‌های حفره‌ای موسوم به Bio pitting، بقایای بیولوژیکی و پوسته بستن سطح نقوش بر اثر فعالیت‌های گلسنگی مشاهده می‌شود (شکل ۱۳). شواهد هر دو هوازدگی فیزیکی و شیمیایی در اثر فعالیت‌های گلسنگ‌ها روی سنگ‌ها وجود دارد؛ اما امروزه اینگونه میکروگانیزم‌ها به شکل فعال در محیط قرار ندارند.

شکل ۱۳. الف- سطح متخلخل خاکی‌رنگ درخت زندگانی در ضلع غربی تاق بزرگ که نشان از فعالیت گلسنگ دارد؛ ب- بزرگ‌نمایی تجمع لایه‌های خاک ناشی از فعالیت گلسنگ‌ها ؛ ج- سطح خورده‌شده سنگ که لکه‌های سیاه روی آن ناشی از حضور قارچ‌ها است؛ د- سطح متخلخل سیمانی‌شده ناشی از فعالیت گلسنگ (سمت راست) روی نقش‌برجسته درخت زندگانی در ضلع شرقی تاق بزرگ؛ و- بزرگ‌نمایی از سطح متخلخل انحلال حفره‌ای درخت زندگانی ضلع غربی؛ هـ- بزرگ‌نمایی از الگوی تخریبی انحلال حفره‌ای (bio pitting) در ضلع غربی تاق کوچک؛ ز- بزرگ‌نمایی X۵۰ از نواحی رسوب خاکی‌رنگ ناشی از فعالیت گلسنگ‌ها؛ ح- بزرگ‌نمایی X۵۰ از بقایای بیولوژیکی در سطح نقش اردشیر دوم

علاوه بر گلسنگ، دیگر ارگانیزم‌ها مانند سیانوباکتری‌ها، جلبک‌ها (هتروتروف‌ها) و شبکه‌های باکتری هتروتروفیک، می‌توانند از طریق محصولات متابولیکی باعث انحلال زیستی و تغییرات مکانیکی همچون پوسته شدن و افزایش تخریب سنگ شوند (C. Cañveras et al., 2001). چنین الگوی تخریبی را می‌توان در نواحی حضور لایهٔ تیره‌رنگ شبیه به جلبک مشاهده کرد که احتمالاً با نفوذ به زیر لایه سنگ و واکنش با عناصر موجود در سنگ موجب انحلال و سست شدن لایهٔ سطحی سنگ شده است، به‌طوریکه با فشار حداقلی می‌توان بخشی از لایهٔ سبزرنگ‌شده را جدا کرده و آن را خرد کرد. علاوه بر این، می‌توان بازتبلورهایی مشاهده کرد که بی‌شباهت به نمک‌های حاصل از فعالیت این میکروارگانیزم‌ها نیست. بدین ترتیب در تاق‌بستان حضور جلبک در لایهٔ بیرونی سنگ (اصطلاحاً برون سنگی [1])

[1] Epilithic

در نواحی تراوش آب وجود دارد و جلبک درون لایهٔ سنگی (درون سنگی[1]) نیز در نواحی که کارن حفره‌ای دارد، مشاهده شد (شکل ۱۴). اینگونه جلبک‌ها بیش‌تر در نواحی که ملات سیمانی وجود دارند مشاهده می‌شود، این پدیده حاکی از این است که خود سنگ به‌تنهایی، محیط مناسبی برای رشد اینگونه‌ی جلبک نیست، بلکه مواد معدنی موجود در سیمان و یا حتی منافذ بزرگتر ملات سیمانی محیط مناسبی را برای رشد ایجاد کرده اند.

حشرات

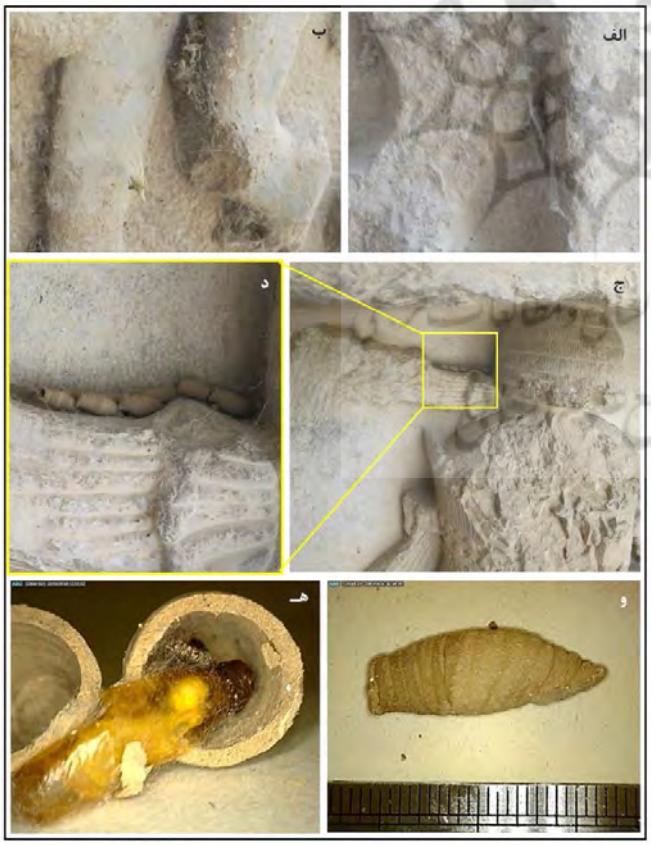
از دیگر موارد قابل‌تأمل در نقش‌برجسته‌های تاق‌بستان، حشرات هستند که نقش‌برجسته‌ها و خلخل و فرج ناشی از انحلال آب را محل مناسبی برای لانه یافته‌اند. در این میان زنبورهایی هستند که به‌صورت منفرد زندگی کرده و برای آشیانه خود حفره‌ای ایجاد یا انتخاب کرده و آن را به محل مناسبی برای زندگی خود تبدیل می‌کنند. این زنبورها به زنبورهای شنی[2] و حفار[3] معروف هستند. این زنبورها آشیانه مخصوص به خود را دارند که ممکن است در چوب یا زمین یا سنگ و یا هر چیزی که شبیه به تونل هستند را لانه کنند. این حشرات برای ایجاد جداسازی بین سلول‌های مختلف و بستن ورودی‌های لانهٔ خود از مواد گوناگونی استفاده می‌کنند. این مواد شامل گل، مواد گیاهی جویده‌شده، شاخ و برگ‌های بریده یا ماده‌ای مانند سلفون[4] که توسط خود زنبورهایی به اسم سلفون تولید می‌شود (Sundberg, 2017). بعدها این موادی که برای بستن لانه استفاده شده، از دهانه ریزش کرده و ممکن است در محل مشاهده شود که شواهد حضور این زنبورها و لانه‌هایی که در دل سنگ در نقش‌برجسته‌های تاق‌بستان انتخاب کرده‌اند، مشهود است (شکل ۱۵). در خصوص اینکه این زنبورها می‌توانند آنزیم‌هایی تولید کنند که موجب تخریب و انحلال سنگ کربناته شود، اطلاع درستی در دست نیست علاوه بر این، عنکبوت‌ها در لابه‌لای نقش‌برجسته‌ها بسیار فراوان هستند که این عنکبوت‌ها خود اصلی‌ترین علت حضور اینگونه زنبورها و گونهٔ دیگری از زنبورها به نام زنبور گِل‌دوست یا سفالگر[5] هستند. همهٔ گونه‌های شناخته‌شده این گونه از زنبور زندگی انفرادی دارند و به‌ندرت نیز زندگی اجتماعی در این گونه مشاهده شده است. این نوع زنبور به‌ندرت انسان را نیش می‌زند؛ اما در صورت نیش زدن، محل نیش آن نیز بسیار دردناک است (*Vase-cell Mud-Dauber wasp - Sceliphron formosum*, 2019). این زنبور به‌صورت شکارچی زندگی می‌کند و گونه‌های لارو سوسک یا کرم و عنکبوت را شکار و تغذیه می‌کند. چرخهٔ زندگی جاندار از چند هفته تا بیش از یک سال پس از تخم‌گذاری به طول می‌کشد.

این زنبور پس از ساخت لانه و تخم‌گذاری، امنیت فرزندان خود را به‌وسیلهٔ لانهٔ گِلی، تأمین می‌کند، هم‌چنین آن‌ها از برخی از این لانه‌ها به‌عنوان تله برای حبس کردن بدن نیمه‌جان حشراتی چون عنکبوت و ذخیره جهت تغذیه تخم‌ها استفاده می‌کنند. در حقیقت این زنبور با ترکیب صمغ کاج، الیاف گیاهان و گل، آشیانهٔ خود را به شکل کوزه و سفال می‌سازد به همین دلیل به زنبور معمار نیز معروف است. ابتدا فقط حضور این نوع زنبور در محوطه تاق‌ها مشاهده شد؛ اما پس از کنکاش در محوطه و بازدیدهای مختلف، لانه‌های گِلی این زنبور به‌طور مشخص روی شال سوار زره‌پوش در یک ردیف ۷ عددی نیز قرار داشتند (شکل ۱۶). لانه‌های گلی بر نقش‌برجسته در حدود ۶ سانتی‌متر درازا داشتند که پس از برش بقایای حشرات و بقایای لارو حشره در آن مشخص گردید.

[1] Endolith
[2] Sand wasps
[3] Digger wasps
[4] Cellophane bees
[5] Mud Dauber wasps

شکل ۱۴. الف- الگوی تخریب جلبک در ناحیهٔ تراوش آب در درون تاق بزرگ؛ ب- بزرگ‌نمایی از تکهٔ منفصل‌شده از ناحیهٔ سبزرنگ که حکایت از رشد درون سنگی جلبک دارد؛ ج- بزرگ‌نمایی X۵۰ از جلبک رشد کرده به‌صورت زیر سطحی

شکل ۱۵. الف- بزرگ‌نمایی سوسکی که در درون حفره‌ای در بدنهٔ تاق بزرگ پناه گرفته است؛ ب- لانهٔ تونل‌مانند زنبور حفار روی پایهٔ نقش شاه در تاق بزرگ، پودر ریخته‌شده در پایین بدنه می‌تواند، ناشی از ریخته شدن مادهٔ پوشاننده‌ای که به‌عنوان درپوش استفاده کرده است باشد؛ ج) تصویری از زنبوری که در درون حفره‌های سنگ تاق بزرگ پناه گرفته است.



شکل ۱۶) الف- تار عنکبوت‌های موجود در لابه لای نقش برجسته‌های ضلع شمالی تاق بزرگ؛ ب- تجمع حشرات مرده بر تار عنکبوت در ضلع شرقی تاق بزرگ؛ ج) شال سوار زره پوش که بر روی آن زنبور سفالگر لانه کرده است؛ د- بزرگنمایی محل قرارگیری لانه‌های زنبور سفالگر بر روی شال سوار زره پوش؛ و- لانه گلی یافت شده (حدودا ۶ سانتیمتر)؛ هـ-داخل لانه که بقایای حشرات و لارو در آن وجود دارد

تخریب‌های انسانی

- واندالیسم

واندالیسم از منظر میراث‌فرهنگی، عبارت است از تخریب کنترل‌نشده در حوزهٔ آثار تاریخی و فرهنگی. در عصر حاضر، واندالیسم پدیده‌ای نوظهور به شمار می‌رود؛ اما با نگاهی به دیوارهٔ نقش‌برجسته‌های تاق‌بستان، می‌توان به قدمت این ناهنجاری اجتماعی پی برد. در نقش برجسته‌های تاق‌بستان تخریب‌های مکانیکی چون ضربه، برش، سایش و خصوصاً خراش‌های بسیاری در اثر یادگارنویسی از دوره‌های مختلف و به زبان‌های فارسی، انگلیسی، عربی، هندی و عبری یافت می‌شود که با وجود اینکه نوعی تخریب واندالیزم به حساب می‌آیند؛ اما خود به‌لحاظ قدمتی که دارند دارای ارزش هستند (شکل ۱۷). بعضاً برخی از آنها طرح و نقش حکاکی‌شده یا کتیبه‌ای به خط نسخ یا نستعلیق هستند و چند مورد مشابه نیز با رنگ سیاه نوشته شده است. موارد از این دست خصوصاً در تاق بزرگ بسیار هستند و مناسب است که در این خصوص تحقیق جامعی انجام گیرد. علاوه بر آن، بر کف تاق بزرگ می‌توان خراش‌های برای بازی یافت. یکی از این بازی‌ها «دوز» است که در کنار اسب شبدیز بر کف حک شده است.

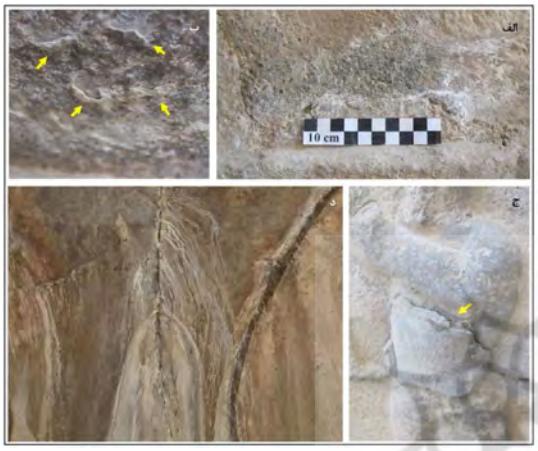
شکل ۱۷. الف- یادگارنویسی به خط نسخ "محرم فی سنه ۱۲۳۷" بر لباس آناهیتا؛ ب- نقش اسلامی با کتیبه: عمل ابوسعید" در ضلع شرقی تاق بزرگ؛ ج) یادگاری به رنگ مشکی در کنار نقش اهورامزدا و آناهیتا، تاق بزرگ؛ د- یادگاری فارسی به خط نسخ "یادگار از صناعت فرهاد محمد زرگر طوسی به تاریخ پنجم ... فی سنه عشر سبعمائه" در ضلع غربی تاق بزرگ؛ هـ- بازی «دوز» حک‌شده در کف تاق بزرگ؛ و- یادگاری به خط نستعلیق؛ ز- یادگاری به خط عبری در ضلع غربی تاق بزرگ؛ ح- یادگاری به خط انگلیسی در ضلع شمالی تاق بزرگ (۱۹۱۷ م)

به غیر از یادگاری‌نویسی‌ها، تخریب‌ها و شکستگی‌های واندالیسمی عمدتاً شامل تخریب صورت و سیمای پادشاهان یا افراد مقدس در نقش‌برجسته‌ها می‌شود که از نقش پادشاه و ایزد آب در نقش‌برجسته شاپور دوم گرفته تا نقش محمدعلی میرزا دولتشاه و پسرش امامقلی میرزا از دورهٔ قاجار در تاق بزرگ، به‌طور کلی اینگونه تخریب‌ها عمدتاً مربوط به تغییر پادشاهان و دوران‌های تاریخی می‌شود.

- مرمت‌های نادرست پیشین

طبق اطلاعات موجود، قدیمی‌ترین دخالت‌ها در محوطهٔ تاق‌بستان از دورهٔ قاجار در محوطهٔ تاق‌بستان رخ داده است.

شکل ۱۸. الف- عکسی از جبههٔ غربی تاق بزرگ در سال ۱۲۸۶ شمسی که در آن رسوب روشن در میانهٔ نقش‌برجسته (کادر زرد رنگ) وجود ندارد (Grothe, 1907)؛ ب- جبههٔ غربی تاق بزرگ در سال ۱۳۹۸ شمسی که در آن رسوب روشن (حمل‌شده توسط آب) احتمالاً ناشی از سیمان مرمتی. در میانهٔ تصویر دیده می‌شود.



شکل ۱۹. الف- شوره‌های اطراف ملات سیمانی در ضلع شرقی تاق بزرگ؛ ب- تبله‌های ناشی از تبلور نمک در زیر سطح سنگ در ضلع شمالی تاق بزرگ؛ ج- جدایش ملات سیمانی از ناحیهٔ مرز مشترک سنگ و ملات ناشی از تنش تفاضلی؛ د- بخشی از شوره‌های ناشی از خروج آب در سقف تاق بزرگ

زمانی که دو پل سراب شرقی برای احداث عمارت مسعودیه، تخریب شدند و خصوصاً زمانی که یک سکوی سراسری در مقابل تاق‌ها و نقش اردشیر دوم در تراز ارازه تاق‌ها ساخته شد. این مداخله هنگام بارش باعث بالا آمدن سطح آب و تجمع آب در درون تاق‌ها شد. از دیگر مداخلات در سال ۱۳۱۳ شمسی، مرمت جبههٔ غربی تاق بزرگ و کنگره‌های آن توسط آجر، پرکردن شکاف بزرگ تاق با ملات ماسه و سیمان و پرکردن شکاف‌های داخلی با سیمان است که در سال ۱۳۵۴ شکاف‌های پشت تاق دوباره بتن ریزی شدند و در نهایت در دههٔ ۷۰ شمسی که تعمیرات زیادی با ملات سیمانی انجام شدند، مانند بازسازی نقش فرشته با ملات سیمانی و همسان‌سازی رنگی آن با زمینه، علاوه بر آن تعویض سنگ‌های ازارهٔ تاق کوچک نیز بدون مطالعات اولیه انجام شده است.

قابل ذکر است تمامی مرمت‌های انجام‌شده توسط ملات سیمانی مداخلهٔ نادرست نیستند، به‌عنوان مثال ملات‌هایی که برای پرکردن درزه‌های مجزای صخره سنگی به کار رفته‌اند (آن‌هایی که راهی به نقوش برجسته ندارد)، اثرات جانبی و مخرب کمی به همراه داشته‌اند؛ اما ملات سیمان پرتلند استفاده شده به‌عنوان مادهٔ مرمتی در درزه‌های و نواحی کمبود در بین نقوش تاق‌بستان، امروزه از معضلات نقش‌برجسته‌ها است و چهرهٔ اثر را به‌طور ناخواسته (با بازتبلور نمک‌ها و یا شره کردن ملات و رنگ‌های همسان‌سازی) مخدوش کرده است (شکل ۱۸). به هر حال، نمی‌توان به مرمتگران آن زمان خرده گرفت، زیرا ماده مناسب جهت بازسازی غیر از سیمان وجود نداشته و علاوه بر آن افراد متخصص از پیامدهای ناشی از قرار گرفتن آن در محیط باز و در کنار سنگ آگاه نبودند.

الف- سیمان پرتلند

تخریب پس از استفاده از ملات سیمانی در تاق‌بستان زمانی آغاز شد که نمک‌های محلول موجود در محیط و ملات ماسه سیمان، در اثر تبخیر تدریجی آب بر سطح نمایان شدند و شوره‌های حاصل از آن باعث فشار کریستال‌های نمک در سطح زیرین ملات و محل اتصال آن با سنگ گشت که در نهایت با نهان شکفتگی موجب شکستن و جدا شدن ملات از سنگ شد. علاوه بر آن، این نمک‌ها از طریق مرز مشترک سنگ و ملات وارد منافذ سنگ شده و در آن نفوذ کردند (شکل ۱۹). رسوب این نمک‌ها در درون خلل و فرج سنگ در چرخه‌های تر و

خشک شدن کاملاً فعال هستند و به‌مرور زمان تأثیرات مخرب شدیدی به همراه خواهند داشت، زیرا فشار ناشی از تبلور در حفرات اشباع‌شده از نمک می‌تواند موجب متلاشی شدن سنگ گردد. در تاق کوچک به‌طور مشهود می‌توان تأثیرات استفاده از ملات سیمانی را مشاهده کرد، به‌طوری‌که باز تبلور احتمالی ناشی از تماس رطوبت و آب با ملات سیمانی به‌طور واضح در سطح اثر معلوم است (شکل‌های ۱۰ و ۱۹) و در طی گذشت کم‌تر از ۳ دهه، چهرهٔ اثر را مخدوش کرده است. علاوه بر آن، شواهد زیادی از بازتبلور سفید رنگ در نواحی اطراف سیمان‌های مرمتی تاق بزرگ مشاهده می‌شود. هرچند که بافت شوره‌ها در تاق کوچک متفاوت از شوره‌های داخل تاق بزرگ است و نیاز به آزمایشات دستگاهی برای تشخیص دقیق دارد. نقش اردشیر دوم از منظر تبلور نمک، کم‌تر آسیب دیده است که یک علت آن می‌تواند شسته شدن شوره‌ها از سطح باشد، زیرا این نقش در تماس مستقیم با نزولات جوی است.

سیمان موجود در نقش‌برجسته‌های تاق‌بستان علاوه بر تشکیل نمک، مشکلات دیگری را نیز به همراه دارد. از جمله این مشکلات، تشدید رشد مواد بیولوژیک است، زیرا این ملات تخلخل بیش‌تری نسبت به سنگ (تخلخل ۱/۱۴ درصد) دارد. بدین ترتیب، موجب حبس آب در مدت‌زمان بیش‌تری می‌شود و بدین سبب محیط مرطوب و مناسبی برای رشد عوامل بیولوژیکی فراهم می‌کند. به‌علاوه، از دیگر مشکلات ملات سیمانی، کندانسه کردن رطوبت است. هنگامی که رطوبت نسبی بالا و دما پایین باشد، درجهٔ حرارت داخل منافذ سنگ است که میزان کندانسه شدن بخار آب را در صورت داشتن درجهٔ حرارت بالاتر از محیط، افزایش می‌دهد. حال ملات ماسه- سیمان نیز به جهت اینکه تنش تفاضلی حرارتی نسبت به سنگ دارد، موجب کندانسه شدن آب می‌گردد. در حقیقت از همان ابتدا که ملات سیمان آماده می‌شود و برای نواحی

شکل ۲۰. الف- جدایش مرز مشترک بین ملات سیمانی و سنگ در ضلع شمالی تاق بزرگ؛ ب- شسته شدن ملات سیمانی در بین درز سنگ و شوره‌های سطحی در زیر شکم اسب شبدیز که با بقایای زیستی و تبلور نمک‌ها توأم شده است؛ ج-محل جایگزینی کمبود با سنگ و ملات سیمانی در بالای نقش درخت زندگانی، در محل اتصال وصله شوره‌زدگی مشاهده می‌شود؛ د- شوره‌زدگی در فصل مشترک ملات سیمانی و سنگ در سقف تاق کوچک

شکل ۲۱. الگوهای تخریب در محوطهٔ تاریخی- فرهنگی تاق‌بستان به‌ترتیب از کم‌خطر تا پرخطر.

کمبود بکار می‌رود مشکلاتی به همراه دارد، زیرا واکنش هیدراتاسیون در زمان گیرش سیمان فرایندی گرمازا است که این واکنش سبب تسریع تبادلات یونی و واکنش‌های مخرب شیمیایی بین سنگ و ملات طی مدت زمان گیرش می‌شود و در همان ابتدای امر موجب ایجاد تنش و بروز ریزترک ناشی از آن می‌گردد. این ترک‌ها و انقباضات ناشی از گیرش موجب افزایش نفوذپذیری آب و سایر آلاینده‌ها در وجه مشترک سنگ و ملات سیمانی می‌شود (شکل ۲۰).

بر اساس موارد اشاره‌شده و مطالعات میدانی انجام‌شده، تمامی الگوهای تخریبی به‌ترتیب از کم‌خطرترین تا پرخطر-ترین آن‌ها در شکل ۲۱ به نمایش داده شده‌اند.

نتیجه‌گیری

الگوهای تخریب متنوعی در نقوش برجسته تاق‌بستان قابل مشاهده هستند که برخی از آن‌ها همچون پوسته‌شدگی و تاول‌ها به شکلی جزئی بر سطح نقوش، تحت‌تأثیر تبلور نمک‌ها ایجاد شده‌اند؛ اما برخی دیگر مانند رسوبات ناشی از انحلال‌ها و بازتبلورها، به‌طور گسترده روی سطح، نمایی چندرنگ (تنالیته‌های سفید تا خاکستری تیره) ایجاد کرده که در اثر ریزش و شره آب شکل گرفته‌اند. اینگونه رسوبات بسته به خصوصیات شیمیایی خود در طی چرخه‌های تر و خشک از طریق انحلال و بازتبلور می‌توانند موجب ازهم‌پاشیدن یا پوسته شدن سطح (در حالت نهان شکفتگی) شوند. علاوه بر این‌ها، الگوهای تخریبی دیگری چون خردشدگی و جدایش‌هایی در نواحی تحتانی در هر دو تاق بزرگ و کوچک و همچنین در نواحی اطراف کانال‌های خروج آب در بین نقوش برجستهٔ تاق بزرگ مشاهده شده که همگی به‌علت حضور آب و در اثر چرخه‌های یخزدگی ایجاد شده‌اند. به‌علاوه، الگوهای تخریبی دیگری در اثر تجمع زیستی، به شکل تغییر رنگ نامنظم سنگ (از نارنجی تا قهوه‌ای تیره) و در برخی موارد لکه‌های میکروسکوپی تیره‌رنگ قارچ بر سطح و خصوصاً در میان خلل و فرج سنگ مشاهده می‌شوند. این نوع تخریب در برخی نواحی مانند نقش درخت زندگانی و دیواره‌های شرقی-غربی تاق کوچک موجب شکل‌گیری الگوی تخریبی به نام «انحلال حفره‌ای» ناشی از فعالیت میکروارگانیزم‌ها (احتمالاً از نوع گلسنگ) شده‌اند. اینگونه انحلال حفره‌ای علاوه بر مخدوش و ناهموار کردن سطح، محیط را برای تجمع آب در درون حفرات و دیگر تجمعات زیستی فراهم می‌آورد. بدین ترتیب پرخطرترین الگوهای تخریبی در تاق‌بستان به‌ترتیب شوره‌ها، انفصال‌ها و شکستگی‌ها و در نهایت درزه‌ها و کارست‌ها هستند. به‌طور کلی، بیش‌ترین حجم تخریب را رسوبات به خود اختصاص داده‌اند که موجب مخدوش شدن

سطح نقش‌ها و بدخوانی آن‌ها شده‌اند و در راستای اقدامات ضروری حفاظتی، حذف برخی از آن‌ها و خوانش مجدد نقش‌ها از الزامات است. از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عوامل مخرب می‌توان آب و رطوبت را به دو دلیل عمده نام برد، اولاً آب‌های نزولی موجب شسته شدن مواد محلول و حمل آن‌ها به درون تاق‌ها می‌شوند که وجود ملات مرمتی سیمان نیز مزید بر علت در تشکیل رسوبات و شوره‌های سطحی شده است. دوماً تجمع آب نزولی و کندانسه شدن رطوبت روی نقوش برجسته یا جذب مویرگی آب‌های جاری اطراف توسط صخرهٔ سنگی، در زمستان طی چرخه‌های متعدد انجماد-ذوب در گذر سالیان سال، موجب رخ دادن پدیده یخزدگی و در نهایت متلاشی شدن از سطح به عمق (مانند آنچه در ناحیه تحتانی تاق بزرگ رخ داده است) می‌گردد. از طرف دیگر تجمع رطوبت خود نیز می‌تواند، محیط مناسبی را برای رشد میکروارگانیزم‌ها فراهم آورد. بنابراین، به‌طور قطع، تجمع آب و عدم کنترل و هدایت آن، یکی از مهم‌ترین علل مخرب برای نقوش برجستهٔ صخرهٔ سنگی تاق‌بستان است.

سپاسگزاری

نویسندگان از دوستان و همکاران سرکارخانم مهندس الهام افکاری، مهندس‌فرشاد صالحی، مهندس‌فرید ساعدی، مهندس‌صامت اجرایی، مهندس وحید برنوس و آقای فیض آقایی، کمال تشکر را به‌جهت یاری و همکاری با این پروژه دارند.

منابع مالی

این مقاله برگرفته از پروژهٔ «مطالعهٔ ساختاری، آسیب‌شناسی و طرح حفاظت از نقش‌برجسته‌های سنگی تاق‌بستان» است که توسط ادارهٔ کل میراث‌فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی استان کرمانشاه حمایت شده است.

تعارض منافع

تعارض در منافع برای نویسندگان این مقاله وجود ندارد.

References

Ale-yasin, M., & Haqdin, A. (1991). Effects of Acid Rain on Historic Stone Buildings. *Journal of Decorative Stones of Iran, Ministry of Mines and Metals Publications*, *1*.

Amoroso, G. G., & Fassina, V. (1983). *Stone decay and conservation: atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection*.

Anonymous. (1937). *Taq Bostan and Bistoun, Ministry of Education*. Archaeological Office.

Ashurst, J., & Dimes, F. G. (1998). *Conservation of Building and Decorative Stone. Butterworth-Heinemann Series in Conservation and Museology*. Taylor & Francis.

Atec Consultants Engineer. (2009). *Collection of reports of the plan to organize the historical, cultural, natural and tourism complex of Taq bostan* unpublished.

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*(1-2), 169-176.

Bögli, A. (1980). *Karst hydrology and physical speleology*. Springer, Berlin.

Borsoi, A., Collepardi, S., Coppola, L., Troli, R., & Collepardi, M. (2000). Sulfate attack on blended Portland cements. *ACI SPECIAL PUBLICATIONS*, *192*, 417-432.

C. Cañveras, S., Sanchez-Moral, V., Sloer, C., & Saiz-Jimenez, J. (2001). Microorganisms and microbially induced fabrics in cave walls. *Geomicrobiology journal*, *18*(3), 223-240.

Chorley, R. J. (1962). Geomorphology and general systems theory.

Collepardi, M. (1990). Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings. *Materials and structures*, *23*(2), 81-102.

De Waele, J., Plan, L., & Audra, P. (2009). Recent developments in surface and subsurface karst

geomorphology: An introduction. In (Vol. 106, pp. 1-8): Elsevier.

Doehne, E., Siegesmund, S., Vollbrecht, A., & Weiss, T. (2003). Building material decay and salt weathering. A selected bibliography. *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. Geological Society, London, Special Publications, 205*, 51-64.

Esponda Cascajares, M. (2004). *Evolución de los criterios de intervención con hormigón armado en la restauración de edificios históricos en España y en México*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Farajzadeh, S. (2011). *Study of technology, decay and proposing a conservation plan for colored Qajar stone reliefs in Tagh-e bostan* Art university of Isfahan]. Faculty of conservation, department of conservation.

Farokhzad, R., Yaseri, S., Entezarian, M. H., & Yavari, A. (2016). Investigating Effects of Sulfates on Compressive Strength of Different Types of Pozzolan Concrete and Measuring Penetration Rate by Ultrasound Tests at Different Ages. *Concrete Research, 9*(1), 113-130.

Foroutani, S. (2009). *Materials and buildings*. Tehran: Rozaneh Publications.

Grassegger, G. (1999). Decay mechanisms of natural building stones on monuments-A review of the latest theories. *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, Hamburgo, Libri BOD*, 54-81.

Griswold, J., & Uricheck, S. (1998). Loss compensation methods for stone. *Journal of the American Institute for conservation, 37*(1), 89-110.

Grothe, H. (1907). http://www.deutschefotothek.de/documents/obj/71666628/df_pos-igg_0000437

Hami, A., & et al. (2006). *Building Materials "Memoirs of Professor Ahmad Hami"*. Tehran: University of Tehran Press.

Harati Ardestani, N. (2005). *Investigating the destructive effects of cement in the restoration of stone monuments in Persepolis World Heritage Site and presenting the results of using cement substitutes in other stone sites in the world, Master thesis in Conservation of Cultural and Historical Objects* Arts University of Isfahan].

Henriques, F. M. A. (2003, 2003). Higroscopic phenomenon due to the presence of soluble salts.

Kemp, J. (2012). Sassanid monuments of Taq-e Bostan, Kermanshah, Western Iran, summary of a conservation report. *J Iran Archaeol, 3*(3), 47-63.

Khadivi, S., Mehdi Abadi, M., & A, A. S. (2011). *Analysis of Taq-e Bostan from the aspects of architecture and construction* Proceedings of the Second International Architecture and Structural Conference.

Khoshraftar, R., Jafari, G. H., Feyzolahpour, M., Arian, T. H., & Moradi, P. (2019). Evaluation of the correlation of faults with karstic springs in the mountain range of Prav Bisotun-Kermanshah. *19*(54), 1-22.

Kleiss, W., & Boehmer, R. M. (1996). *Bisutun: Ausgrabungen und Forschungen in den Jahren 1963-1967*. Mann.

Luschey, H. (1979). Das Qadjarische palais am Taq-i-Bostan. *Athar*, (33-34), 68-88.

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.

Mehdi Abadi, M. (2004). *Investigation of the destructive effects of pollutants on the rocks of Biston and Taq bestan, Master's thesis in conservation of cultural and historical objects* Arts University of Isfahan.

Moheb-Ali, S., & Vatandoost, R. (1998). *Causes of efflorescence of limestone in historical monuments. Collection of articles of the Research Institute for the Preservation and Restoration of Historical-Cultural Monuments and Architectural Decorations.*

Mohebi, H. R. (2005). Signs in the Great Arch of Taq-e Bostan. *Honar-ha-ye Ziba*, (23), 87-96. https://jhz.ut.ac.ir/article_10718.html

Mousavi Haji, S. R. (2008). Another Reflection to Determine the True Identity and Historic Content of the Rock Reliefs of Taq – i Bustan.

Honar-ha-ye Ziba, (35), 85-92. https://jhz.ut.ac.ir/article_27124.html

Parvin, H. (1996). *Sedimentary lithology*. Tehran: Payame Noor University Press.

Price, C. A., & Doehne, E. (2011). Stone conservation: an overview of current research.

Qobadi, M., Torabi Kave, M., & Miri, M. (2013). Role of karrens in deterioration of Taq-e Bostan reliefs. *Journal of Geotechnical Geology*, *9*(3), 241-252.

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., & 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. (1996). Role of particulate matter from vehicle exhaust on porous building stones (limestone) sulfation. *Science of the total environment*, *187*(2), 79-91.

Setzer, M. J. (2001). Micro-ice-lens formation in porous solid. *Journal of colloid and interface science*, *243*(1), 193-201.

Shekofteh, A. (2019a). *Study on chemical composition and decay for conservation plan of Tāq-e Bostān stone reliefs, ICHTO of Kermanshah*. unpublished.

Shekofteh, A., Ahmadi, H., & Yazdi, M. (2019b). Decay factors and patterns of stones in open-air historical sites built of carbonate sedimentary stones. *DANESH-e-HEFAZAT va MAREMMAT*, *2*(1), 48-73.

Skinner, B. J., Porter, S. C., & Park, J. (2013). *Dynamic Earth, an introduction to physical geology*. Wiley.

Smith, B. J., Warke, P. A., McGreevy, J. P., & Kane, H. L. (2005). Salt-weathering simulations under hot desert conditions: agents of enlightenment or perpetuators of preconceptions? *Geomorphology*, *67*(1-2), 211-227.

Stambolov, T., & De Boer, J. V. A. (1967). *The deterioration and conservation of porous building materials in monuments*. Brussels: ICOM Committee for Museum Laboratories.

Strenchock, L. (2009). *Research on the restoration of heritage structures: Portland cement and concrete repair applications and repercussions, Master's thesis in advanced masters in structural analysis of monuments and historical constructions* Technical University of Catalonia, Spain.

Sundberg, M. (2017). https://www.ecolandscaping.org/12/landscaping-for-wildlife/beneficialspollinators/protecting-providing-nesting-native-bees-wasps/

Trudgill, S. T. (1985). *Limestone geomorphology*. Longman, New York.

Vase-cell Mud-Dauber wasp - Sceliphron formosum. (2019). http://www.brisbaneinsects.com/brisbane_apoidwasps/VaseCellMudDauber.htm

Veress, M. (2000). The main types of karren development of limestone surface without soil covering–Karsztfejlődés IV. *BDF Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely*, 7-30.

Vergès-Belmin, V. (2008). *Illustrated glossary on stone deterioration patterns.* Icomos.

Vincent, P. J. (1983). The morphology and morphometry of some arctic trittkarren. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 205-222.

Virginia Lime Works Information Bulliten. (2009). www.limeworks.com

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,

Wilson, M. J. (2004). *Weathering of rocks by lichens with special reference to stone work: A review. Stone Deterioration in Polluted Urban Environments, Land Reconstruction and Management Series3. Enfield* (D. J. M. a. D. E. Searle, Ed.). NH: Science Publishers.