Damage Diagnosis of Rock Reliefs, Case Study: the Tomb of Xerxes

Anisa Shiri *[1], ***Hamid Fadaie*** [2] , ***Leila Razavi*** [3], ***Mostafa Rakhshandehkhoo*** [4], ***Mohammad Reza Alikhah*** [5], ***Zeinab Mohtasham***[6]

1*. MA of conservation and restoration of historical and cultural objects, Persepolis World Heritage Site

2. Member of the academic board of the Research Institute for the conservation and restoration of Historical-Cultural Artifacts, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism

3. BA of Conservation and Restoration of Historical Building, Persepolis World Heritage Site

4. MA of Conservation and Restoration of Historical Building, Persepolis World Heritage Site

5. BA of Conservation and Restoration of Historical and Cultural Objects, Persepolis World Heritage Site

6. MA of Archaeometry, Persepolis World Heritage Site

Abstract

Stone structures are susceptible to weathering and erosion over time, necessitating the identification and elimination of damaging factors to ensure their preservation. This research focused on diagnosing the damage to the tomb of Xerxes located at the historical site of Naqsh-e Rostam through a multidisciplinary approach encompassing library research, field observations, laboratory analyses, and geological studies. Petrographic studies revealed that the rocks comprising the tomb belong to the Seruk Formation. The sedimentary sequence within this formation exhibited thick and light-colored limestone layers. Utilizing the geophysical technique of Ground Penetrating Radar (GPR), two major fractures were identified along the boundaries of the tomb. These fractures predominantly followed north-south and east-west orientations. The intersection of these fracture sets, combined with the layering surfaces, resulted in the development of dissolution phenomena, leading to the formation of dissolution holes and cavernous porosity on the structure. Additionally, field studies investigated the presence of plants and cyanobacterial lichens on the tomb.

Keywords: Relief, Limestone, Damage Diagnosis, Tomb of Xerxes, Rock Artifact

Knowledge of Conservation and Restoration

Vol. 6(4) No.18
March 2024

https://kcr.richt.ir/

Pages: 54 to 64

Coresponding Author

Anisa Shiri

MA of conservation and restoration of historical and cultural objects, Persepolis World Heritage Site

Email
Anisa.shiri0@gmail.com

Copyright © 2020,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.

آسیب‌شناسی نقوش برجسته صخره‌ای، نمونه موردی: آرامگاه خشیارشا

آنیسا شیری[1*]، حمید فدایی[2]، لیلا رضوی[3]، مصطفی رخشنده‌خو[4]، محمدرضا علی‌خواه[5]، زینب محتشم[6]

۱*. کارشناس ارشد حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، پایگاه میراث جهانی تخت جمشید.

۲. عضو هیئت علمی پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی–فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری.

۳. کارشناس حفاظت و مرمت ابنیه تاریخی، پایگاه میراث جهانی تخت جمشید.

۴. کارشناس ارشد حفاظت و مرمت ابنیه تاریخی، پایگاه میراث جهانی تخت جمشید

۵. کارشناس حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، پایگاه میراث جهانی تخت جمشید

۶. کارشناس ارشد باستان‌سنجی آثار و مواد آلی، پایگاه میراث جهانی تخت جمشید

فصلنامه دانش حفاظت و مرمت

سال ششم، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۸
زمستان ۱۴۰۲

https://kcr.richt.ir/

صفحات: ۵۴ تا ۶۴

نویسنده مسئول

آنیسا شیری

کارشناس ارشد حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، پایگاه میراث جهانی تخت جمشید

رایانامه

Anisa.shiri0@gmail.com

چکیده

آثار سنگی از زمان ساخت، دچار هوازدگی و فرسایش می‌شوند. اولین مرحله حفاظت، شناخت آسیب‌های وارده به اثر و رفع عوامل آسیب‌رسان است. در این پژوهش، آسیب‌شناسی آرامگاه خشیارشا واقع در محوطه تاریخی نقش‌رستم، با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای، بررسی‌های میدانی، زمین‌شناسی و مطالعات آزمایشگاهی انجام شد. نتایج مطالعات پتروگرافی نشان داد که این سنگ‌ها متعلق به سازند سروک هستند. ردیف رسوبی این سازند توالی لایه‌های سنگ آهک ضخیم و به رنگ روشن را نشان می‌دهد. با انجام روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی زمین (GPR)، دو دسته شکستگی اصلی و بزرگ در محدود آرامگاه خشیارشا شناسایی شد. روند غالب این شکستگی‌ها شمالی–جنوبی و شرقی–غربی است. در محل تقاطع شکستگی‌ها، پدیده‌های انحلالی توسعه بیشتری یافته‌اند به‌طوری که حفرات انحلالی و تخلخل غاری بر روی اثر شکل گرفته‌اند. در این پژوهش حضور انواع گیاهان عالی و گلسنگ‌ها از نوع سیانوباکتری از طریق مطالعات میدانی مورد بررسی قرار گرفت

واژگان کلیدی: نقوش برجسته، سنگ آهک، آسیب‌شناسی، آرامگاه خشیارشا، آثار صخره‌ای

مقاله منتخب سیزدهمین همایش دو سالانه حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی – فرهنگی و آرایه های معماری

دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

۱- مقدمه

بناهای تاریخی ساخته شده از سنگ‌های طبیعی در برگیرنده بخش مهمی از میراث فرهنگی و میراث جهانی هستند. مطالعه، کشف و نگهداری سنگ، پدیده‌ای جهانی است که از ساخت اولین پناهگاه‌ها و ابزارهای سنگی تا ساخت خانه‌ها، زیرساخت‌ها و بناهای تاریخی مورد توجه بوده است. بنابراین سنگ در فرهنگ بشری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Freire- Lista ,2021 ,pp.1268-1228).

بناهای تاریخی سنگی به دلیل تأثیرات محیطی یا اقلیمی، تخریب بیولوژیکی یا مکانیکی، عدم نگهداری مناسب، دچار تخریب تدریجی و غیرقابل توقف می‌شوند. نفوذ آب، انجماد و ذوب‌شدن، کربناته شدن، فرسایش بادی، باران اسیدی و وندالیسم مسائل کلیدی «محیط‌زیستی» هستند که به شدت بر میراث فرهنگی تأثیر می‌گذارند. بنابراین ضروری‌ست عوامل آسیب‌رسان را محدود و از آن جلوگیری کرد. این فعل و انفعال منجر به وقوع پدیده‌های مختلفی از جمله فرسایش و اضمحلال سنگ می‌شود. نکته قابل توجه این است که اغلب سنگ‌ها ممکن است با چشم غیرمسلح کاملاً سالم به نظر برسند، اما در زیر سطح، انسجام خود را از دست داده باشند. بنابراین، حفاظت کارآمد از بسترهای سنگی و رفع عوامل آسیب‌رسان برای طولانی‌تر کردن عمر اثر ضروری است.

با وجود دوام بسیار بالا، سنگ‌ها مواد «زنده‌ای» هستند که به طور قابل توجهی با محیط اطرافشان تعامل دارند، پس در اثر فعل و انفعالاتی که صورت می‌گیرد، امکان تغییر تدریجی خواص فیزیکی و شیمیایی است که در نهایت منجر به آسیب و متلاشی شدن سنگ می‌شود. میزان تخریب کاملاً وابسته به ترکیب شیمیایی، ویژگی‌های کانی‌شناسی و ویژگی‌های ریزساختاری مواد سنگی است (Mariani & Malucelli ,2023 ,p.2300053).

بسیاری از شهرهای باستانی مستقیماً بر روی معادن سنگ ساخته شده‌اند، این امر باعث ایجاد هماهنگی بین چشم‌انداز و محیط مسکونی شده است (Freire- Lista ,2021 ,pp.1268-1228). از جمله این آثار آرامگاه خشیارشا واقع در نقش رستم است. منطقه تاریخی نقش رستم در فاصله ۵۵ کیلومتری شمال‌شرق شهر شیراز و ۶ کیلومتری منطقه تاریخی تخت جمشید قرار دارد. این منطقه دارای رخنمون‌های سنگی از سازند آهکی سروک با روند شمال‌غرب–جنوب‌شرق است که تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی، درز و شکاف‌های فراوانی در آن ایجاد کرده است (پایگاه میراث جهانی تخت جمشید، ۱۳۹۸، ص. ۱۱).

بر اساس مطالعات پتروگرافی سنگ معدن کوه حاجی‌آباد (حسین‌آباد) متعلق به سازند سروک است. ردیف رسوبی این سازند توالی لایه‌های سنگ آهک ضخیم تا توده‌ای و به رنگ روشن را نشان می‌دهد. این دسته از سنگ‌ها متشکل از قطعات آلوکم پلت و خرده فسیل در یک سیمان اسپارایتی است که بر اساس دسته‌بندی انجام شده با نام بایوپل اسپارایت و رخساره گرینستون شناخته می‌شود (بهشتی، ۱۴۰۱، ص. ۷). فرسایش سطحی معمولاً مستلزم تخلخل گسترده‌ای است که در سطح سنگ وجود دارد. وقوع این پدیده معمولاً در سنگ‌های رسوبی یعنی سنگ‌های آهکی و ماسه‌سنگ‌ها بیشتر دیده می‌شود. نرمی سنگ آهک، استخراج آن را ساده می‌کند. اما این سنگ به‌خصوص در مقابل عوامل جوی آسیب‌پذیر است. آلودگی، میزان اسیدها را در هوا و آب بالا می‌برد و کلسیم و منیزیم موجود در سنگ آهک را به ترکیب‌های حل‌شدنی تبدیل می‌کند (کروچی، ۱۳۹۵، ص. ۱۰۴). اگرچه سنگ آهک به‌طور گسترده در بناها و آثار تاریخی مورد استفاده بوده است، اما با گذشت زمان و قرار گرفتن در معرض عوامل محیطی دچار تخریب می‌شود. تشخیص زود هنگام چنین فرآیندهای پاتولوژیکی، امکان اتخاذ اقدامات اصلاحی را فراهم می‌سازد و آسیب به عناصر سنگ آهک را محدود می‌کند (Ruiz-Agudo et al.,2024 ,p.134591). ترکیب کانی و بافت دو ویژگی مهم سنگ‌ها هستند. رفتار حرارتی مواد سنگی به‌ویژه برای سنگ‌های کربناته به‌شدت به ترکیب کانی و بافت وابسته است (Ugur et al.,2014 ,pp.1336-1332).

فرآیند انحلال سنگ‌های کربناته (آهک) در محدوده تاریخی نقش رستم، سنگ‌نبشته‌ها و آرامگاه‌های موجود در آن را مورد تهدید جدی قرار داده است.

استفاده از شاخص‌های آسیب، تشخیص آسیب سنگ را بهبود می‌بخشد و برای تعیین روش‌های حفاظتی لازم و همچنین بررسی و نگهداری طولانی‌مدت آثار سنگی بسیار مناسب است (Sanz-Arauz ,2024 ,p.178).

مطالعه آسیب‌های موجود بر روی هر اثر و رفع عوامل آسیب‌رسان علاوه‌بر افزایش طول عمر، باعث انتقال میراث

به نسل آینده می‌شود. با توجه به این که گروه آسیب‌های موجود بر روی آرامگاه خشیارشا بر اساس عوامل آسیب‌رسان با یکدیگر هم‌پوشانی دارند، در این پژوهش به آسیب‌های عمده و مهم‌تر پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

به‌منظور شناسایی و درک بهتر نحوه گسترش شکستگی‌ها و حفرات انحلالی درون توده سنگ در محدوده‌ی آرامگاه خشیارشا در منطقه تاریخی نقش‌رستم، مطالعات رادار نفوذی زمین (GPR) انجام گرفت. در این مطالعه از دو دستگاه GPR با آنتن ۱۰۰ و ۲۵۰ مگاهرتز با عمق نفوذ تقریبی ۸ و ۳۰ متر استفاده شد. برداشت اطلاعات زیرسطحی براساس ۲۱ مقطع عمودی و افقی در محدوده مورد مطالعه انجام شد. جهت انجام آنالیز پتروگرافی، تعداد ۱۰ نمونه سنگ از آرامگاه خشیارشا و محدوده کوه حسین برداشته و با میکروسکوپ پلاریزان مدل Canada Smart Tech عکس‌برداری شدند. همچنین تعداد ۵ نمونه از طریق آنالیز XRD و XRF مورد بررسی قرار گرفتند. علاوه بر آنالیزهای دستگاهی در این پژوهش، بخش عمده مطالعات آسیب‌شناسی به‌صورت بررسی‌های میدانی انجام شد.

۳- آسیب‌شناسی

اضمحلال آثار سنگی به خواص سنگ و شرایط محیطی بستگی دارد. فرسایش سنگ می‌تواند توسط عوامل شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیکی و اغلب به‌دلیل ترکیب کانی‌ها ایجاد شود. رطوبت به‌عنوان یک عامل اصلی و یا عامل کمکی نقش مهمی در تخریب آثار سنگی ایفا می‌کند. به‌دلیل حلالیت ذاتی سنگ در آب، اجزا و مواد تشکیل‌دهنده سنگ مانند کربنات‌کلسیم یا گچ می‌تواند در اثر رطوبت حل شده و از بین برود. علاوه‌بر این، آب می‌تواند نمک‌ها یا آلاینده‌های NOx، SOx و غیره را روی سطح سنگ یا درون ساختار متخلخل آن انتقال دهد و به فرآیند و واکنش‌های فیزیکی که منجر به تخریب می‌شوند، کمک کند. همچنین آب باعث پوسیدگی بیولوژیکی نیز می‌شود. آرامگاه خشیارشا به‌دلیل اتصال به بستر کوه و موقعیت قرارگیری، همواره در معرض رطوبت محبوس ناشی از بارندگی قرار دارد. از این جهت رطوبت عامل عمده آسیب‌های وارده بر این اثر است. با توجه به هم‌پوشانی بخشی از آسیب‌ها، در پژوهش پیش‌رو به مهم‌ترین و عمده‌ترین آسیب‌ها پرداخته شده است.

۳-۱- تجمع زیستی

۳-۱-۱- گلسنگ

تخریب زیستی مواد سنگی توسط ارگانیسم‌ها ایجاد می‌شود. فعالیت ارگانیسم‌ها بر روی آثار تاریخی به ساختار، ترکیب، مورفولوژی ماده میزبان، تخلخل و نفوذپذیری، pH و شرایط حفاظتی بستگی دارد. علاوه‌بر این، چندین عامل زیستی که معمولاً به‌عنوان میکروارگانیسم‌ها، جانوران میکرو و گیاهان عالی طبقه‌بندی می‌شوند، می‌توانند در فرآیندهای تخریب سنگ دخیل باشند. به‌دلیل زوال زیستی، اثرات متفاوتی بر روی بستر سنگ مشاهده می‌شود که به‌شدت به نوع ماده

شکل ۱. تشکیل گلسنگ از نوع Cyanolichens

شکل ۲. رشد گیاهان آلی بر روی آرامگاه خشیارشا

تخریب کننده مربوط است. به‌طور کلی، تخریب زیستی توسط میکروارگانیسم‌ها می‌تواند باعث تشکیل بیوفیلم، تغییر رنگ، تغییرات شیمیایی و پدیده‌های انحلال و تبلور مجدد شود (Zhao et al.,2023 ,p.12487). پژوهش‌ها نشان داده که تأثیر گلسنگ‌ها هم فیزیکی و هم شیمیایی است. نفوذ هیف در سنگ و انبساط و انقباض ریسه (بخش نباتی قارچ) در شرایط تغییر رطوبت باعث آسیب مکانیکی می‌شود. با این حال تغییر شیمیایی مهم‌تر است و ممکن است با ترشح اسیدهای اگزالیک، کربنیک و اسیدهای دیگری که قابلیت ایجاد یون‌های کیلیت‌ساز همچون کلسیم را دارند، ایجاد شود. ترشح اسید اگزالیک بر روی سنگ‌های آهکی منجر به تولید اگزالات کلسیم می‌شود (رازانی و زندکریمی، ۱۳۹۴، ص. ۵۲). بر اساس بررسی و مطالعات میدانی، گلسنگ‌های فعال بر روی آرامگاه خشیارشا از گروه Cyanolichens و معمولاً به رنگ سیاه–سبز هستند و باعث پوسته شدن و در نهایت پودری شدن سنگ می‌شوند (شکل ۱).

۲-۱-۳-گیاهان عالی

بر خلاف میکروارگانیسم‌ها، گیاهان عالی معمولاً با پیامدهای فیزیکی، از جمله پدیده‌های فرسایش و فشار مکانیکی مثل ایجاد حفره و شکاف در بستر سنگ همراهستند. ریشه گیاهان به درون بندها، ترک‌ها و شکستگی‌های سنگ گسترش می‌یابند. رشد ریشه‌ها می‌تواند این بندها را باز کرده و باعث ترک و شکستگی سنگ گردد. همچنین ممکن است آن‌ها باعث حفظ رطوبت مناطق مرطوب گردند که در نتیجه فرآیندهای دیگری نظیر تخریب نمکی را تشدید می‌کند (وطن‌خواه، رازانی، ۱۳۹۰، ص. ۷۴). به‌علاوه ریشه گیاهان با ترشح اسید باعث انحلال سنگ‌های آهکی می‌شوند. انواع درختچه‌های روییده شده بر روی آرامگاه خشیارشا شامل انجیر، بادام کوهی، تنگز و پسته کوهی است. علاوه‌بر درختچه، انواع بوته‌های فصلی از جمله مریم‌گلی، آویشن، کمر آویز، پرسیاوشان و کنگر بر روی صخره و نقوش برجسته آرامگاه می‌رویند (شکل ۲).

۲-۳- ترک و شکستگی

عوامل طبیعی از جمله تغییرات دما، باد و آب می‌توانند پدیده‌های تخریب فیزیکی را در هر ماده سنگی ترویج دهند. اثرات ترکیبی عوامل طبیعی ذکر شده، باعث بروز فرسایش سطحی و حذف تدریجی لایه‌های سنگ می‌شود. فرآیند تخریب بدین صورت است که در فصول سرد (همراه با افت دما) نفوذ آب‌های ناشی از بارندگی و غیره در منافذ آثار سنگی منجر به پدیده یخ‌بر شدن می‌شود. این مکانیسم یخ‌زدگی و ذوب پی‌درپی با تورم و چروکیدگی مداوم سنگ همراه است که در نهایت باعث تشکیل ترک‌ها و شکستگی‌ها می‌گردد (Zhao et al.,2023 ,p.12487). «تنش تفریقی یا تنش فشاری» یک فرایند تخریبی است که تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن، تورم رسی، تنش رطوبتی تفریقی، تنش حرارتی تفریقی و فشار ناشی از میزان تفریقی مواد در داخل منافذ سنگ و در خود سنگ را بررسی می‌کند. باور کلی بر آن است که مواد مرمتی، نمک‌ها، لایه‌های آبی، لایه‌های زیستی یا هر آنچه باعث ایجاد دو واکنش متفاوت در سطح و در داخل سنگ

شکل ۳. شبکه‌ای از ترک و ریز ترک بر روی آرامگاه خشیارشا

شکل۴. شکستگی‌های ایجاد شده بر روی آرامگاه خشیارشا

شوند، می‌تواند باعث تنش برشی پخش شدن ترک‌ها و در نهایت جدایش موازی سطح شود (رازانی، زندکریمی، ۱۳۹۴، ص. ۵۶).

پردازش تصاویر رادارگرام‌های حاصل از برداشت زیر سطحی در آرامگاه خشیارشا با دستگاه GPR نشان داد که دو دسته شکستگی غالب با راستای شمال–جنوب و شرق–غرب توسعه یافته است. برخی از این شکستگی‌ها با عمق نفوذ زیاد از سطح زمین (بام آرامگاه) تا درون آرامگاه گسترش یافته‌اند. در برخی نقاط در طول مسیر برداشت اطلاعات زیر سطحی مناطقی با احتمال وجود حفرات و زون اشباع از آب شناسایی شد. انطباق حفرات و زون‌های اشباع با شکستگی‌های شناسایی شده در محدود مورد مطالعه نشان دهنده نقش عوامل تکتونیکی در شکل‌گیری و توسعه پدیده‌های انحلالی کارست است. وجود این اشکال انحلالی حاکی از توسعه مجاری انتقال آب به درون توده سنگ و محدود آرامگاه است (پایگاه میراث جهانی تخت‌جمشید، ۱۳۹۸، ص. ۱۲). بر اثر عملکرد فرآیندهای تکتونیکی، درزها و شکاف‌ها در جهت‌های عمودی، افقی و مایل در توده‌های سنگی ایجاد می‌شوند و گسترش می‌یابند. درزها و شکاف‌هایی که به صورت یک شبکه گسترش می‌یابند، در شکل‌گیری و تشکیل اشکال زیرزمینی مانند مجاری به‌هم پیوسته و تشکیل آب‌خوان‌های کارستی نقش بسیار مهمی بازی می‌کنند (همان، ۲۰). این گروه از آسیب‌ها در آرامگاه خشیارشا شامل ترک، ریزترک، شکستگی و شکافتگی است (شکل‌های ۳ و ۴).

۳-۳- جدایش

۱-۳-۳- پوسته و لایه لایه شدن

تبلور نمک یک مکانیسم هوازدگی تهاجمی است که بر مصالح ساختمانی متخلخل تأثیر می‌گذارد. تبلور نمک‌ها، به‌دلیل افزایش حجم نمک‌های محلول در آب منجر به تخریب فیزیکی آثار سنگی می‌شود. از جمله عوامل تشدید کننده این دسته از آسیب‌ها رویدادهای انسانی (مانند فعالیت‌های کشاورزی)، مهاجرت یون‌های خاک بر روی مواد سنگی، خاصیت مویینگی سنگ، ترکیب مواد تشکیل دهنده سنگ و رطوبت نسبی (RH) هستند. افزایش RH، نمک‌های متبلور را هیدراته می‌کند. در نتیجه تکرار فرآیندهای تبلور و آب‌رسانی مجدد، باعث ایجاد تنش‌های مکانیکی در سنگ شده و آسیب پوسته و لایه‌لایه شدن را به همراه دارد (Zhao et al., 2023, p.12487). مکانیسم تخریب نمک‌های محلول در آب بدین صورت است که تعدیل کننده‌های کریستالیزاسیون می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر عبور مویرگی محلول‌های رقیق و غلیظ کلرید سدیم و سولفات سدیم در سنگ‌های آهکی تأثیر بگذارند. رفتار مخرب سولفات سدیم با نفوذ و حرکت محلول رقیق نمکی به‌صورت یک لایه نازک آغاز می‌گردد که از ۱ یا ۲ میلی‌متری سطح به سمت داخل گسترش می‌یابد. سپس در داخل این لایه سطحی باریک، در شرایطی با رطوبت نسبی و تبخیر مناسب، نمک محلول در حالت فوق اشباع، آب را از دست می‌دهد و باعث رسوب کریستال نمک در لایه زیرین یا سطح سنگ می‌شود و سنگ را در این ناحیه می‌شکند (216-

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

شکل ۵. آسیب لایه‌لایه شدن سنگ بر روی آرامگاه خشیارشا

شکل ۶. آسیب تورق لایه سنگ بر روی آرامگاه خشیارشا

Selwitz & Doehne ,2002 ,pp.205). نقش نمک‌ها در فرآیندهای تخریب عمدتاً به دلیل توانایی آب در انتقال یون‌ها و نمک‌های محلول است که روی سطح رسوب می‌کنند. پس از تبخیر آب، نمک متبلور می‌شود و حجم آن همانند فرآیند هیدراتاسیون فازهای شور افزایش می‌یابد و منجر به فرآیندهای تخریب مانند پوسته شدن، جابجایی و تجزیه می‌شود. به همین دلیل نمک یکی از مضرترین عوامل برای سنگ‌های یادمانی است (Ruiz-Agudo et al.,2024 ,p. 134591). به‌علاوه عامل ایجاد پدیده‌های تخریب سطحی مانند پوسته‌پوسته شدن (جدا شدن لایه‌های سطحی با ضخامتی به اندازه میلی‌متر تا سانتی‌متر، در جهت لایه‌های سنگ)، لایه‌لایه شدن (جدا شدن چندین لایه نازک سنگ به موازات سطح) و پدیده یخبر شدن است (Zhao., 2023, (16)15, 12487 et al). پوسته شدن محل مناسبی برای فعالیت دیگر عوامل هوازدگی ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است که در نتیجه عواملی از جمله فعل و انفعال گلسنگ بر روی آثار سنگی نیز، عارضه پوسته شدن رخ داده و گاه دیده می‌شود که سنگ‌ها شکسته و به خاک تبدیل می‌گردد (بصیری، ۱۳۹۲: ۱۴۲). این گروه از آسیب‌ها به لایه‌لایه شدن (توالی لایه)، تورق (پوست انداختن) و تکه‌تکه شدن سنگ دسته‌بندی می‌شود. در آرامگاه خشیارشا تورق و لایه‌لایه شدن نسبت به دیگر آسیب‌های این گروه بیشتر نمایان است (شکل‌های ۵ و ۶).

٤-۳-تخلخل غاری

در بسیاری از سنگ‌های طبیعی حجم خاصی از فضاهای خالی به‌شکل منفذ، ترک و حفره با اشکال و اندازه‌های مختلف وجود دارد. این فضاهای خالی از عوامل آسیب‌رسان سنگ‌اند، زیرا میزان تراکم، حجم و اندازه منافذ، تحت تأثیر عوامل تهاجمی محیطی از جمله باران‌های اسیدی و تبلور نم‌های محلول در آب بر انحلال سنگ اثرگذارند. بنابراین ترکیب کانی و بافت دو ویژگی مهم سنگ‌ها هستند (Ugur et al.,2014,pp.1336-1332).

نوعی دیگر از تخلخل مرتبط با شکستگی‌ها، تخلخل غاری نامیده میشود. این نوع تخلخل، شامل حفرهایی در سنگ‌های آهکی است که بزرگتر از قد انسان بوده و به‌صورت کانال یا حفره‌ای است. این نوع تخلخل اغلب حاصل انحلال بوده و محصول فرآیند کارستی شدن سنگ‌های آهکی است. تخلخل غاری به‌ویژه در سطوح فرسایشی قدیمی و در مناطق تکتونیکی مشاهده می‌شود و حاصل انحلال آهک در امتداد درزه‌ها، شکستگی‌ها و گسل‌هاست. لازم به ذکر است فضاهای خالی و درز و شکاف‌ها و به دنبال آن نفوذپذیری از عوامل مهم در افزایش قابلیت انحلال توده‌های سنگی و ایجاد کارست است. فضاهای خالی و درز و شکاف‌های ایجاد شده در سنگ‌های کربناتی عامل اصلی نفوذپذیری است و امکان ورود و جریان آب را میسر می‌سازد (پایگاه میراث جهانی تخت جمشید، ۱۳۹۸، ص. ۲۰). پوکی در اثر انحلال بخشی از سنگ شکل می‌گیرد. در صورتی که این پوکی بسیار بزرگ باشد به آن «پوکی غاری» می‌گویند. این گونه پوکی اغلب در سنگ‌هایی با قابلیت انحلال زیاد مثل سنگ‌های کربناته رخ می‌دهد (شکل ۷)، که در نهایت با انحلال آهک و رسوبات

شکل۷. ایجاد پوکی غاری بر روی آرامگاه خشیارشا

شکل ۸. ایجاد تخلخل غاری(opening) بر روی آرامگاه خشیارشا

شکل ۹. فرسایش و از دست دادن بخشی از اثر بر روی آرامگاه خشیارشا

شکل ۱۰. فرسایش نامنظم بر روی آرامگاه خشیارشا

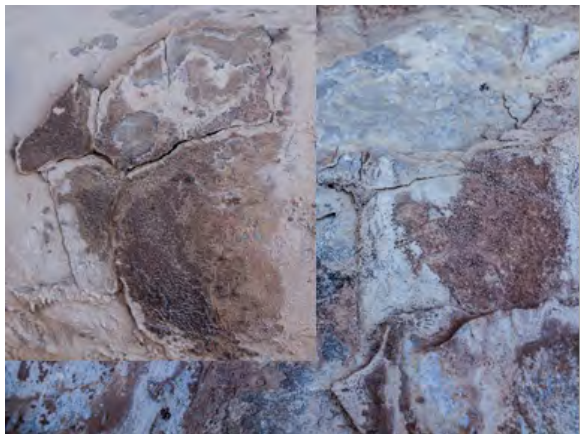
تبخیری حفره‌ها و مجاری قابل عبور مواد سیال را فراهم می‌سازد (بصیری، ۱۳۹۲، ص. ۱۴۸). یکی از آسیب‌های جنبی تخلخل غاری در آرامگاه خشیارشا، تخریب زیستی است؛ چرا که در فصول بارندگی، نواحی خروج آب همیشه مرطوب بوده و بستر مناسبی برای رشد گیاهان عالی و میکروارگانیسم‌هاست (شکل ۸). به‌علاوه انحلال بافت سنگی باعث از بین رفتن بخشی از نقوش برجسته آرامگاه شده است.

۵-۳- فرسایش

واکنش‌های شیمیایی عامل اصلی تجزیه شیمیایی مواد سنگی هستند. در سنگی آهکی، تبدیل شیمیایی $CaCO_3$ به $Ca(HCO_3)_2$ به اصطلاح اثر کارست است. حلالیت بالای بی‌کربنات در آب باران باعث حذف تدریجی لایه‌های سطحی سنگ می‌شود. اثر کارست در محیط‌های بسیار آلوده که غلظت دی‌اکسیدکربن در هوا به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالا است، بیشتر تشدید می‌شود. در واقع، انحلال $CaCO_3$ همیشه با افزایش pH همراه است که باعث تشکیل H_2CO_3 شده و در نهایت CO_2 را در جو آزاد می‌کند (Mariani,,2023,p.2300053 Malucelli). یکی دیگر از اشکال رایج تخریب شیمیایی سنگ مربوط به سولفات‌ها است. سنگ‌ها به‌طور طبیعی حاوی مقادیر کمی سولفات هستند اما اکثر سولفات‌ها از جذب مستقیم گازهای SOx و NOx ها، توسط سنگ حاصل می‌شود. این گازها در اثر ترکیب با آب، محلول‌های نمکی تشکیل می‌دهند. تبلور نمک پیوند ذرات سنگ را سست کرده و منجر به تضعیف استحکام سنگ و در نتیجه فرسایش می‌شود (pp. 12831, Hong et al.,2023).

فرسایش بادی (یا خوردگی بادی) یکی از مهم‌ترین علل هوازدگی و تخریب فیزیکی است که سطوح آثار سنگی را تحت تأثیر قرار داده است. این تأثیر به قدرت باد، ذرات منتقل شده و اندازه آن‌ها و ویژگی‌های سطوح سنگ بستگی دارد. این نوع فرسایش در بناهای تاریخی ساخته شده از سنگ آهک بسیار رایج است. مکانیسم تخریب بدین صورت است که ذرات شن و ماسه توسط باد حمل می‌شود و با برخورد به سطوح سنگی، سطح اثر را تحت فشار قرار می‌دهد و به تدریج باعث ترک‌های ریز و از دست دادن مواد می‌شود. این پدیده که به‌عنوان خوردگی بادی شناخته می‌شود، تحت تأثیر بسیاری از عوامل از جمله شرایط بیرونی مانند گونه‌شناسی ذرات (اندازه، شکل و سختی)، سرعت و جهت باد و ویژگی‌های ذاتی سنگ، مانند ترکیب کانی و مواد سطحی، مقاومت مکانیکی و جنبه مورفولوژیکی است. باید در نظر داشت که رطوبت از مهم‌ترین عواملی است که در این نوع آسیب نقش بسزایی دارد. زیرا در نیروهای سطحی الکتروشیمیایی و کاهش نیروی چسبندگی بین ذرات سنگ دخالت دارد. در نتیجه خوردگی بادی به همراه جذب رطوبت اثر، تهاجمی‌تر عمل می‌کند (p.e.01501, Striani et al., 2022). یکی از اثرات خوردگی بادی بر روی آرامگاه خشیارشا، فرسایش نامنظم است. بیشترین بخش فرسایش منظم در بازوی پایین چلیپا مشاهده می‌شود (شکل‌های ۹ و ۱۰).

شکل ۱۱. رسوب اگزالاتی بر روی آرامگاه خشیارشا



شکل ۱۲. رسوب کبره سیاه بر روی آرامگاه خشیارشا

۶-۳- رسوب

۶-۳-۱- رسوب اگزالاتی

رسوبات نارنجی یا قهوه‌ای رنگ روی آثار سنگی که عامل آسیب پوسیدگی، لایه‌لایه شدن و سوراخ شدن هستند، حضور اگزالات‌های کلسیم را نشان می‌دهد. این نوع رسوب احتمالاً به‌طور طبیعی یا در اثر حمله شیمیایی آلاینده‌های جوی یا فعالیت باکتری‌ها تشکیل شده است. رسوبات اگزالات کلسیم اغلب روی سنگ آهک و مرمر در بناهای باستانی دیده می‌شود (Ding et al., 2021 ,pp. 1-11).

اگزالات کلسیم به‌طور طبیعی بی‌رنگ است و گاهی ظاهری شیری‌رنگ و درخشان دارد. در محیط معتدل، مونوهیدرات اگزالات کلسیم پایدارترین فاز است. بر اساس پژوهش‌ها، pH محیط تنها عاملی است که پایداری فیلم به آن بستگی دارد. رسوب اگزالات کلسیم دارای دو نوع کانی وولیت(Whewellite) و ودلیت(Weddelite) است. همچنین گزارش شده است که ودلیت در دمای اتاق بیشترین پایداری را دارد که با هیدراتاسیون، در یک مرحله به وولیت تبدیل می‌شود. یک مطالعه نشان می‌دهد که پایداری فازهای کلسیم اگزالات به مولکول‌های آب داخلی بستگی دارد، در حالی که مولکول‌های آب خارجی منجر به تبدیل ودلیت به وولیت می‌شود (Singh, Yadav 2023,pp. 5374-5392)

۶-۳-۲-پوسته سیاه

آلاینده‌های جوی (مانند گازها و ذرات معلق) با مواد سنگی برهمکنش دارند و انواع مختلفی از پوسیدگی ایجاد می‌کنند. در این میان می‌توانیم مواردی از جمله تبلور نمک را فهرست کنیم که می‌تواند منجر به شوک فیزیکی یا کثیفی سطحی گردد و در صورت وجود رطوبت و عدم وجود فرآیندهای تخلیه آب، ممکن است به پوسته‌های سیاه تبدیل شود. پوسته‌های سیاه از خطرناک‌ترین شکل‌های دگرسانی سنگ‌ها در میراث معماری در سراسر جهان محسوب می‌شوند. در واقع، پوسته‌های سیاه، دوام و ظاهر زیبایی بناها و آثار تاریخی را به خطر می‌اندازند. به‌طور کلی، بین ترکیب شیمیایی پوسته سیاه و آلودگی هوا رابطه مستقیم وجود دارد. ترکیب رسوبات سطحی روی سنگ (گرد و غبار، BCs) می‌تواند باعث پوسیدگی فیزیکی-شیمیایی آثار سنگی شود و همچنین عاملی برای تجمع آلاینده‌ها در سطح گردد (Comite ,2020 ,p. 105121).

به نظر می‌رسد پوسته‌های سیاه به‌طور محکم بر بستر آثار سنگی‌ای تشکیل می‌شوند که در معرض آب و رطوبت قرار دارند. این پوسته‌ها از ماتریکسی تشکیل شده‌اندکه عمدتاً از گچ ($CaSO_4,2H_2O$) و یا سایر سولفات‌های کلسیم مانند انیدریت ($CaSO_4$) یا باسانیت ($CaSO_4.1.2H_2O$) ساخته شده است (Pozo Antonio et al., 2022 ,pp. 1-17). عمده رسوبات تشکیل شده بر روی آرامگاه خشیارشا رسوبات اگزالات کلسیم و پوسته سیاه (کبره) است. علاوه بر چرک‌شدگی سطحی سنگ، رسوباتی همچون رسوبات نمکی و پوسته بستن بر روی اثر مشاهده می‌شود (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).

٤- نتیجه‌گیری

حفاظت از میراث به جای مانده از گذشتگان از اهمیت بسزایی برخوردار است. چراکه توجه و تأمل در این آثار در شناخت شرایط زندگی و نحوه تشکیل و تکامل فرهنگ گذشتگان نقش شایانی دارد. آثار تاریخی به‌خصوص سایت موزه‌ها،با توجه به شرایط محیطی، همواره در معرض مخاطرات و عوامل آسیب‌رسان هستند. منطقه تاریخی نقش‌رستم واقع در کوه حاجی‌آباد (کوه حسین) و در ۶ کیلومتری تخت‌جمشید از جاذبه‌های گردشگری ایران محسوب می‌شود که سهم بالایی در جذب گردشگر دارد. از آثار مهم و ارزشمند در این منطقه آرامگاه خشیارشا است که پروژه حفاظت و مرمت آن در سال ۱۳۹۶ آغاز شد. آسیب‌شناسی و آسیب‌نگاری یکی از ارکان مهم در این پروژه بود که به‌روش مطالعه کتابخانه‌ای، بررسی میدانی و آنالیز دستگاهی انجام شد. بر اساس مطالعه پتروگرافی، این سنگ‌ها متعلق به سازند سروک است. ردیف رسوبی این سازند توالی لایه‌های سنگ آهک ضخیم تا توده‌ای و به رنگ روشن را نشان می‌دهد. همچنین این دسته از سنگ‌ها متشکل از قطعات آلوکم‌پلت و خرده فسیل در یک سیمان اسپارایتی است که بر اساس دسته‌بندی انجام شده با نام بایوپل اسپارایت و رخساره گرینستون شناخته می‌شود.

به‌منظور شناخت نقش شکستگی‌ها در ایجاد و توسعه کارست و نفوذ آب از روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی زمین (GPR) استفاده و دو دسته شکستگی اصلی و بزرگ در محدود آرامگاه خشیارشا شناسایی شد. روند غالب این شکست‌ها شمالی–جنوبی و شرقی–غربی است. در محل تقاطع این دو دسته از شکستگی‌ها پدیده‌های انحلالی توسعه بیشتری یافته‌اند، به‌طوری که حفرات انحلالی و تخلخل غاری بر روی اثر شکل گرفته است. نمونه‌هایی از این حفرات انحلالی در بخش‌هایی از نقوش برجسته و در مجاورت آرامگاه قابل مشاهده است. به‌علاوه با توجه به فراوانی شکستگی‌ها در محدوده مورد مطالعه، ارتباط نزدیکی بین شکستگی‌ها و فراوانی پدیده‌های کارستی وجود دارد، به‌گونه‌ای که در فواصل نزدیک به شکستگی‌ها تعداد این پدیده‌ها بیشتر و با فاصله گرفتن از شکستگی‌ها تعداد و فراوانی پدیده انحلال و فرسایش در آهک کمتر می‌شود. نتایج حاصل از GPR نشان داد که شکستگی‌ها عمدتاً گسترش عمقی زیاد دارند به‌گونه‌ای که از سطح زمین (بام آرامگاه) تا درون آرامگاه توسعه یافته‌اند. بر اساس اطلاعات موجود در این رادار گرام‌ها حفرات انحلالی مشاهده شده نیز در راستای شکستگی‌ها قرار گرفته‌اند که خود نشان‌دهنده نقش شکستگی‌ها در توسعه انحلال، ایجاد حفرات زیر سطحی و ترک‌ها است.

بررسی‌های میدانی نشان داد که تخریب زیستی شامل میکروارگانیسم‌ها و گیاهان عالی است. میکروارگانیسم‌ها از نوع سیانولایکن است که معمولاً به رنگ سیاه–سبز دیده می‌شود و باعث پوسته شدن و در نهایت پودری شدن سنگ می‌گردد. انواع درختچه‌های روییده شده بر روی آرامگاه خشیارشا شامل انجیر، بادام کوهی، تنگز، پسته کوهی است. علاوه‌بر درختچه، انواع بوته‌های فصلی از جمله مریم‌گلی، آویشن، کمر آویز، پرسیاوشان و کنگر بر روی صخره و نقوش برجسته آرامگاه می‌رویندکه رشد ریشه درختان می–تواند آسیب‌هایی همچون ترک، شکستگی، تخریب نمکی به وجود آورد و با ترشح اسید باعث انحلال سنگ‌های آهکی شود.

از عوامل آسیب‌رسان به آثار تاریخی، تبلور نمک است. تبلور نمک یک مکانیسم هوازدگی تهاجمی است که بر مصالح ساختمانی متخلخل تأثیر می‌گذارد. تبلور نمک‌ها، به‌دلیل افزایش حجم نمک‌های محلول در آب منجر به ایجاد تنش‌های مکانیکی و تخریب فیزیکی آثار سنگی می‌شود. تنش‌های مکانیکی در سنگ عامل آسیب پوسته و لایه‌لایه شدن هستند. تبلور نمک ناشی از هوازدگی در نتیجه جذب مستقیم گازهای SOx و NOx ها، توسط سنگ است.

باران‌های اسیدی با انجام واکنش شیمیایی در سنگ عامل اصلی تجزیه شیمیایی مواد سنگی هستند. حلالیت بالای بی‌کربنات در آب باران باعث حذف تدریجی لایه‌های سطحی سنگ می‌شود و در محیط‌های بسیار آلوده که غلظت دی‌اکسیدکربن در هوا به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاست، تشدید می‌شود. انحلال $CaCO_3$ همیشه با افزایش pH همراه است که باعث تشکیل H_2CO_3 شده و در نهایت CO_2 را در جو آزاد می‌کند.

فرسایش بادی (یا خوردگی بادی) از مهم‌ترین تخریب‌های فیزیکی است که سطوح آثار سنگی را تحت تأثیر قرار داده است. این تأثیر به قدرت باد، ذرات منتقل شده و اندازه آنها و ویژگی‌های سطوح سنگی بستگی دارد. این نوع فرسایش در بناهای تاریخی ساخته شده ازسنگ آهک بسیار رایج است.

منابع

– بصیری، سمیه (۱۳۹۲). زندگی دوباره سنگ‌ها. اصفهان: معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان.

– بهشتی، ایرج و امین الله کمالی (۱۴۰۱).گزارش بررسی میکروسکوپی معادن سنگ محوطه تاریخی نقش‌رستم. پایگاه میراث جهانی تخت‌جمشید.

– پایگاه میراث جهانی تخت‌جمشید (۱۳۹۸). مطالعه هندسه شکستگی‌ها در منطقه تاریخی نقش‌رستم به عنوان ابزاری پایه برای شناخت عوامل زمین‌شناسی موثر در تخریب تدریجی کتیبه‌ها. طرح پژوهشی، دانشگاه شیراز.

– دوئن، اریک، و کلیفورد ا.پراس (۱۳۹۴). حفاظت سنگ. ترجمه مهدی رازانی و هادی زند کریمی. تهرانک نشر فضا.

– کروچی، جورجی (۱۳۹۵). حفاظت و مرمت سازه‌ای میراث معماری. ترجمه باقر ایت الله زاده شیرازی و مهرداد حجازی. تهران: دفتر پژوهش‌های فرهنگی.

– کمیته علمی بین‌المللی سنگ ایکوموس (۱۳۹۰). فرهنگ مصور الگوهای تخریب سنگ. ترجمه غلامرضا وطن‌خواه و مهدی رازانی. تهران: سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی.

- Comite, V., Pozo-Antonio, J. S., Cardell, C., Randazzo, L., La Russa, M. F., & Fermo, P. (2020). A multi-analytical approach for the characterization of black crusts on the facade of an historical cathedral. Microchemical Journal, 105121 ,158.

- Ding, Y., Redol, P., Angelini, E., Mirźo, J., & Schiavon, N. (2021). Surface orange patinas on the limestone of the Batalha Monastery (Portugal): characterization and decay patterns. Environmental Science and Pollution Research, 11-1.

- Freire-Lista, D. M. (2021). The forerunners on heritage stones investigation: Historical synthesis and evolution. Heritage, 1268-1228 ,(3)4.

- Hong, J., Zhu, Y., Zhang, Y., Huang, J., & Peng, N. (2023). Differentiation Study of the Damage Characteristics of Rock Cultural Heritage Sites Due to the Sulfate Weathering Process. Applied Sciences, 12831 ,(23)13.

- Mariani, A., & Malucelli, G. (2023). Consolidation of Stone Materials by Organic and Hybrid Polymers: An Overview. Macromolecular Chemistry and Physics, 2300053.

- Pozo-Antonio, J. S., Cardell, C., Comite, V., & Fermo, P. (2022). Characterization of black crusts developed on historic stones with diverse mineralogy under different air quality environments. Environmental Science and Pollution Research, 17-1.

- Ruiz-Agudo, E., Ibaūez-Velasco, A., Ruiz-Agudo, C., Bonilla-Correa, S., Elert, K., & Rodrśguez-Navarro, C. (2024). Damage of porous building stone by sodium carbonate crystallization and the effect of crystallization modifiers. Construction and Building Materials, 134591 ,411.

- Sanz-Arauz, D., Rodrśguez-Escalante, M., del Rśo-Calleja, B., & Lúpez-Andrřs, S. (2024). Characterization, Analysis, and Investigation of the Provenance of the Stone Construction Materials of the Vera Cruz Church (Segovia, Spain). Minerals, 178 ,(2)14.

- Selwitz, C., & Doehne, E. (2002). The evaluation of crystallization modifiers for controlling salt damage to limestone. Journal of cultural heritage, 216-205 ,(3)3.

- Singh, M. R., & Yadav, R. (2023). Formation of Calcium Oxalate Patinas as Protective Layer on Basaltic Stone surfaces of 17th Century Raigad Hill Fort, India. Heritage, 5392-5374 ,(7)6.

- Striani, R., Cappai, M., Casnedi, L., Corcione, C. E., & Pia, G. (2022). Coating›s influence on wind erosion of porous stones used in the Cultural Heritage of Southern Italy: Surface characterisation and resistance. Case Studies in Construction Materials, 17, e01501.

- Ugur, I., Sengun, N., Demirdag, S., & Altindag, R. (2014). Analysis of the alterations in porosity features of some natural stones due to thermal effect. Ultrasonics, 1336-1332 ,(5)54.

- Zhao, D., Liu, C., Zhang, X., Zhai, X., Deng, Y., Chen, H., ... & Luo, P. (3 .(2023D Digital Modeling as a Sustainable Conservation and Revitalization Path for the Cultural Heritage of Han Dynasty Stone Reliefs. Sustainability, 12487 ,(16)15.