مقاله پژوهشی

HSA
HERITAGE OF SOUTHWEST ASIA
میراث جنوب‌غربی آسیا
دوره ۳، شماره ۲

مستندسازی و آسیب‌شناسی نقش‌برجسته شاپور اول در نقش‌رستم و ارایه راهبردهای حفاظت اضطراری

حمید فدایی[۱] ✉، مصطفی رخشنده‌خو[۲]، مسعود انصاری[۳]، لیلا رضوی[۴]

۱. استادیار پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی ـ فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران.
۲. کارشناس ارشد حفاظت و مرمت ابنیه تاریخی، پایگاه میراث جهانی تخت‌جمشید، مرودشت، ایران.
۳. کارشناس ارشد حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی ـ فرهنگی، پایگاه میراث جهانی تخت‌جمشید، مرودشت، ایران.
۴. کارشناس حفاظت و مرمت ابنیه تاریخی، پایگاه میراث جهانی پاسارگاد، پاسارگاد، ایران.

نسخه انگلیسی این مقاله با عنوان زیر در همین شماره مجله منتشر شده است.
Documentation and Condition Assessment of the Sasanian Shapur I Rock Relief at Naqsh-e Rostam and Presentation of Emergency Conservation Strategies

چکیده: نقش‌برجسته شاپور اول در نقش رستم، یکی از برجسته‌ترین آثار سنگی دوره ساسانی، به دلیل قرارگیری در فضای باز طی قرن‌ها در معرض عوامل متعدد محیطی و ویژگی‌های ذاتی سنگ، دچار انواع هوازدگی و فرسودگی شده است. شناخت عوامل مؤثر در تخریب و تدوین راهکارهای حفاظتی مبتنی بر شواهد علمی، از الزامات حفاظت پایدار این اثر تاریخی به شمار می‌آید. هدف این پژوهش، شناسایی عوامل مؤثر در فرسایش نقش‌برجسته، ارزیابی ویژگی‌های سنگ بستر و تبیین راهبردهای حفاظت اضطراری اثر بر پایه نتایج مطالعات آسیب‌شناسی است. در این‌باره، ابتدا مستندنگاری دقیق اثر با بهره‌گیری از اسکن لیزری زمینی و فتوگرامتری دیجیتال انجام و مدل سه‌بعدی، تصاویر تخت (Orthophoto) و نقشه‌های آسیب تهیه شد. سپس با نمونه‌برداری از سنگ بستر، مطالعات پتروگرافی، آزمون‌های فیزیکی، آنالیزهای XRD و XRF و بررسی داده‌های اقلیمی منطقه انجام گرفت و نتایج در کنار آسیب‌نگاری میدانی مورد تحلیل قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد سنگ بستر از نوع آهک با ترکیب غالب کلسیت و مقدار اندکی کانی‌های رسی است که به دلیل کاهش محسوس مقاومت فشاری در شرایط اشباع، در برابر نفوذ رطوبت و فرآیندهای انحلال شیمیایی آسیب‌پذیری قابل توجهی دارد. بررسی‌های اقلیمی نیز نشان داد بارندگی، جریان رواناب، چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب، نوسانات دمایی، عوامل زیستی و آلاینده‌های محیطی مهم‌ترین عوامل مؤثر در تشدید هوازدگی نقش‌برجسته هستند. بر اساس نتایج آسیب‌شناسی، برنامه حفاظت اضطراری با رویکرد حداقل مداخله پیشنهاد شد که شامل پاکسازی سطحی، استحکام‌بخشی بخش‌های سست، تزریق آهک‌های هیدرولیک طبیعی، تثبیت ریزترک‌ها با رزین میکرواکریل و ملاط‌گذاری نواحی آسیب‌دیده است. بر پایه داده‌ها تلفیق مستندسازی رقومی، مطالعات آزمایشگاهی و آسیب‌نگاری نظام‌مند، امکان شناخت دقیق سازوکارهای تخریب و انتخاب روش‌های حفاظتی سازگار با ویژگی‌های سنگ را با هدف تثبیت بخش‌های ناپایدار و کاهش عوامل مؤثر در گسترش آسیب، فراهم ساخته و زمینه مناسبی برای پایش بلندمدت و مدیریت حفاظتی اثر فراهم می‌کند.

https://doi.org/10.22034/hsa.2026.600166.1060

کلیدواژگان:
نقش‌برجسته شاپور اول
نقش رستم
مستندسازی
پتروگرافی
مقاومت فشاری
آنالیز شیمیایی
راهبرد حفاظت

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۹/۳۰

© ۲۰۲۶/۱۴۰۵ نویسنده(گان). این مقاله یک اثر دسترسی آزاد است که تحت مجوز CC BY 4.0 منتشر شده است. استناد و انتشار مجدد این اثر با ذکر منبع درست مجاز است.

۱. مقدمه

فرسودگی سنگ یکی از مهم‌ترین چالش‌های حفاظت و مرمت آثار تاریخی و فرهنگی به‌شمار می‌رود و حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل محیطی و ویژگی‌های ذاتی سنگ است. این فرایند به‌صورت تدریجی رخ می‌دهد و شدت و نوع آن به شرایط اقلیمی، ویژگی‌های زمین‌شناختی، ترکیب کانی‌شناسی و ساختار فیزیکی سنگ وابسته است. عوامل بیرونی نظیر تغییرات دما، چرخه‌های متوالی انجماد و ذوب، میزان رطوبت، بارندگی، باد، تابش خورشید، آلودگی‌های جوی و فعالیت موجودات زنده، از مهم‌ترین عوامل مؤثر در آغاز و گسترش فرسودگی محسوب می‌شوند. در مقابل، عواملی همچون تخلخل، اندازه و نحوه قرارگیری دانه‌ها، نوع سیمان بین‌دانه‌ای، ترکیب شیمیایی و میزان مقاومت مکانیکی سنگ، میزان آسیب‌پذیری آن را

در برابر این عوامل کنترل می‌کنند. ازاین‌رو، دوام یا تخریب یک اثر سنگی تنها به شرایط محیطی وابسته نیست، بلکه ویژگی‌های ذاتی سنگ نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه واکنش آن نسبت به عوامل مخرب دارند.

بر اساس مطالعات انجام‌شده، فرسودگی سنگ را می‌توان به دو گروه اصلی هوازدگی فیزیکی و هوازدگی شیمیایی تقسیم کرد (Saba et al, 2018). هوازدگی فیزیکی شامل فرایندهایی است که بدون تغییر در ترکیب شیمیایی سنگ، موجب ایجاد ترک، شکستگی، پوسته‌شدگی، جداشدگی لایه‌ها و خردشدگی آن می‌شوند. این نوع هوازدگی عمدتاً در نتیجه تنش‌های مکانیکی ناشی از تغییرات دمایی، انجماد آب در منافذ، رشد بلورهای نمک و فشارهای مکانیکی ایجاد می‌شود. در مقابل، هوازدگی شیمیایی حاصل واکنش میان کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ و عوامل شیمیایی موجود در محیط، از جمله آب، اکسیژن، دی‌اکسیدکربن، ترکیبات گوگردی و نیتروژنی است. این واکنش‌ها می‌توانند موجب انحلال کانی‌ها، تشکیل مواد ثانویه، تغییر رنگ، کاهش انسجام ساختاری و در نهایت فروپاشی تدریجی سنگ شوند (پروین، ۱۳۷۵: ۶). در بسیاری از آثار تاریخی، این دو نوع هوازدگی به‌صورت هم‌زمان عمل کرده و با تشدید اثرات متقابل، به‌تدریج موجب کاهش انسجام ساختاری، افزایش تخلخل مؤثر و افت خواص مکانیکی سنگ می‌شود (Benavente et al., 2008).

یکی از ویژگی‌های مهم آثار سنگی، ناهمگن بودن ساختار آن‌هاست. حتی در یک قطعه سنگ که از یک معدن استخراج شده است، ممکن است تفاوت‌هایی در ترکیب کانی‌شناسی، اندازه دانه‌ها، میزان تخلخل یا وجود رگه‌ها و شکستگی‌های طبیعی مشاهده شود. این ناهمگنی سبب می‌شود بخش‌های مختلف یک اثر در برابر شرایط محیطی رفتار یکسانی نداشته باشند. در نتیجه، برخی نواحی زودتر دچار فرسودگی می‌شوند، در حالی که بخش‌های دیگر ممکن است برای مدت طولانی‌تری مقاومت خود را حفظ کنند. افزون بر این، آثار تاریخی معمولاً طی سالیان متمادی در معرض مجموعه‌ای از عوامل مخرب قرار گرفته‌اند؛ بنابراین، آسیب‌های مشاهده‌شده اغلب نتیجه عملکرد هم‌زمان چندین عامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی هستند. همین هم‌پوشانی عوامل باعث می‌شود تشخیص منشأ اصلی آسیب و تعیین سهم هر عامل در ایجاد تخریب، به یکی از پیچیده‌ترین مراحل مطالعات حفاظتی تبدیل شود.

تشخیص صحیح آسیب‌های سنگ، نخستین گام در تدوین برنامه‌های حفاظت و مرمت به‌شمار می‌رود. این مرحله صرفاً به شناسایی ظاهری آسیب‌ها محدود نمی‌شود، بلکه مستلزم شناخت دقیق ویژگی‌های سنگ، عوامل مؤثر بر تخریب، روند پیشرفت آسیب و ارتباط میان آن‌هاست. برای دستیابی به چنین شناختی، اطلاعات متنوعی از طریق بازدیدهای میدانی، مستندسازی تصویری، نقشه‌برداری آسیب‌ها، نمونه‌برداری، آزمایش‌های آزمایشگاهی و پایش مستمر وضعیت اثر گردآوری می‌شود (Fitzner, 2014). تلفیق نتایج این مطالعات امکان تحلیل علمی منشأ آسیب‌ها و ارزیابی میزان پایداری اثر را فراهم می‌کند.

هدف نهایی فرایند تشخیص، تنها ثبت وضعیت موجود نیست، بلکه تفسیر علل ایجاد آسیب، تعیین سرعت و الگوی گسترش فرسودگی و پیش‌بینی روند آینده تخریب است. این اطلاعات نقش اساسی در انتخاب روش‌های مناسب حفاظت، اولویت‌بندی اقدامات مرمتی و طراحی برنامه‌های پایش بلندمدت دارند. در واقع، هرچه شناخت دقیق‌تری از سازوکارهای فرسودگی و عوامل مؤثر بر آن حاصل شود، امکان انتخاب راهکارهای حفاظتی سازگار با ویژگی‌های اثر و جلوگیری از مداخلات نامناسب افزایش خواهد یافت. ازاین‌رو، تشخیص علمی آسیب‌ها به‌عنوان یکی از ارکان اصلی حفاظت پیشگیرانه، نقشی تعیین‌کننده در افزایش دوام و حفظ اصالت آثار سنگی تاریخی ایفا می‌کند.

با توجه به اهمیت تاریخی و هنری نقش‌برجسته شاپور اول و قرارگیری آن در معرض فرایندهای مستمر هوازدگی و فرسودگی، مستندسازی دقیق و نظام‌مند وضعیت موجود این اثر، پیش‌شرط اساسی برای شناخت و مدیریت آسیب‌های آن به‌شمار می‌رود. ویژگی‌های پیچیده و ناهمگن سطح نقش‌برجسته، وجود آسیب‌های متنوع و هم‌پوشان و همچنین تداوم فرایندهای فرسایشی، ضرورت ثبت دقیق موقعیت، گستره و شدت آسیب‌ها را دوچندان می‌کند. در این میان، مستندسازی علمی با بهره‌گیری از روش‌های تصویری، فتوگرامتری و برداشت‌های دقیق هندسی، امکان ایجاد یک مبنای قابل اعتماد برای ثبت وضعیت موجود، تهیه نقشه‌های آسیب‌شناسی، مقایسه تغییرات در دوره‌های زمانی مختلف و پایش روند گسترش آسیب‌ها را فراهم می‌سازد. ازاین‌رو، نوآوری این پژوهش را می‌توان در ارائه نخستین مستندات منتشرشده از وضعیت کالبدی و حفاظتی نقش‌برجسته شاپور اول در نقش‌رستم و انجام ارزیابی نظام‌مند آسیب‌های آن دانست. مستندسازی دقیق و آسیب‌شناسی انجام‌شده، ضمن ایجاد یک داده‌پایه مستند برای شناخت وضعیت کنونی اثر، امکان تعیین اولویت‌های حفاظتی و تدوین راهکارهای مناسب برای حفاظت، پایش و مدیریت بلندمدت آن را فراهم می‌کند.

پرسش‌های تحقیق

_ چه ارتباطی میان ویژگی‌های ذاتی سنگ بستر، شرایط محیطی و الگوی توزیع آسیب‌های نقش‌برجسته شاپور اول وجود دارد؟

ـ شناخت ارتباط فوق چگونه می‌تواند در اولویت‌بندی اقدامات حفاظت اضطراری مورد استفاده قرار گیرد؟

۲. پیشینه

۲,۱. نقش برجسته شاپور اول

شاپور اول ساسانی، پس از فراگیری فنون جنگ، کشورداری و فرمانروایی نزد پدرش اردشیر بابکان، از همان سال‌های آغازین شکل‌گیری دولت ساسانی در عرصه نظامی نقش فعالی داشت. وی در نبرد هرمزدگان در سال ۲۲۴ میلادی با شکست یکی از فرماندهان اشکانی، به یکی از سرداران اصلی اردشیر تبدیل شد و در ادامه، در لشکرکشی‌های ساسانیان مشارکت کرد. شاپور به سال ۲۴۳ میلادی در جریان جنگ‌های ایران و روم، سپاه گوردیانوس سوم، امپراتور روم را که به بین النهرین حمله کرده بود، شکست داد و او را کشت. همچنین شاپور یکم در سال ۲۶۰ میلادی شرق بین النهرین و سوریه را تصرف کرد و امپراتور والرین را با همراهانش به اسارت گرفت (دریایی، ۱۳۸۳: ۱۹–۲۰؛ Shapur Shahbazi, 1986; Huyse, 1999: 33–43; Back, 1978: 306–329). پیروزی‌های شاپور بر رومیان در چندین نقش‌برجسته در فارس بازنمایی شده است؛ از جمله در سه نمونه در بیشاپور، یک نقش‌برجسته در داراب و مهم‌ترین نمونه در نقش‌رستم، در مجاورت آرامگاه داریوش بزرگ (**شکل ۱**). در نقش‌رستم، شاپور اول سوار بر اسبی تقریباً هم‌اندازه طبیعی و با شکوه و هیبت شاهانه بر سطحی مستطیل‌شکل و نسبتاً هموار، با ابعاد تقریبی ۱۳ متر طول و ۸ متر عرض (**جدول ۱**) به تصویر کشیده شده است.

جدول ۱. ابعاد و اندازه نقش برجسته شاپور اول در نقش‌رستم به همراه نقش کرتیر

عرض	۷٫۶۹ متر
طول	۱۳٫۱۹ متر
عمق نقش برجسته	بین ۵ تا ۶۳ سانتی‌متر

تاج کنگره‌دار، گوی بزرگ شاهنشاهی، دیهیم با نوارهای بلند و افشان، ریش مجعد و پوشش رسمی سلطنتی از مهم‌ترین ویژگی‌های شمایل اوست. شاهنشاه با دست چپ دسته شمشیر نیام‌شده خود را گرفته و با دست راست به سوی دو پیکره رومی پیش روی خود اشاره می‌کند. اسب او نیز با زین و برگ آراسته و دم گره‌خورده، در ترکیب‌بندی نقش جایگاه مهمی دارد (**شکل ۲**). در برابر اسب، یک پیکره رومی به حالت زانو زده و با دستانی به‌سوی شاپور درازشده دیده می‌شود؛ در کنار او نیز پیکره‌ای ایستاده قرار دارد که شاپور دست وی را در دست گرفته است. لباس، شمشیر و تاج برگ‌غار این دو پیکره، هویت آنان را به‌عنوان امپراتوران روم نشان می‌دهد (شاپورشهبازی، ۱۳۹۳: ۱۳۵۷: ۱۰۸؛ لوکونین، ۱۳۵۰؛ سامی، ۱۳۸۹). هویت این دو امپراتور از دیرباز موضوع بحث و اختلاف میان پژوهشگران بوده است. تا میانه قرن بیستم، پیکره زانوزده عموماً والرین، امپراتور روم، و پیکره ایستاده سیریادس، غاصب یا مدعی قدرت در دوره والرین، شناخته می‌شد (Ker Porter, 1821: 543; Sarre & Herzfeld, 1910: 79). این دیدگاه توسط شماری از پژوهشگران، از جمله لوکونین و کریستین‌سن با تفاوت‌هایی در تفسیر جایگاه شخصیت‌ها، دنبال شد. با این حال، از دهه ۱۹۴۰ این شناسایی مورد تردید قرار گرفت. اسپرنگلینگ پیکره ایستاده را یکی از فرماندهان یا افسران رومی دانست و هرتسفلد نیز بر دشواری تعیین هویت قطعی آن تأکید کرد (Sprengling, 1953: 372; Herzfeld, 1941: 315).

تحول اساسی در این بحث با پژوهش مک‌درمات در سال ۱۹۵۴ صورت گرفت. وی با استناد به کتیبه شاپور در کعبه زرتشت، که در آن از سه امپراتور روم، یعنی گوردیانوس سوم، فیلیپوس عرب و والرین، نام برده شده است، پیشنهاد کرد که دو پیکره نقش‌رستم به والرین و فیلیپوس عرب تعلق دارند. از آنجا که شاپور در کتیبه خود تصریح می‌کند که شخصاً والرین را به اسارت گرفته است، پیکره ایستاده که دست او در دست شاپور قرار دارد، می‌تواند والرین باشد؛ در مقابل، پیکره زانوزده فیلیپوس عرب است. گوردیانوس سوم نیز، که در نبرد با شاپور کشته شد، در ترکیب‌بندی دیگری در داراب زیر پای اسب شاهنشاه نشان داده شده است (McDermot, 1954: 76–80). این تفسیر بعدها از سوی گریشمن و پورادا نیز تأیید شد (گریشمن، ۱۳۵۰: ۱۵۱). با وجود این، هینتس بار دیگر ترتیب شناسایی دو پیکره را مورد بازنگری قرار داد و با استناد به وضعیت تحقیرآمیز پیکره زانوزده، شرایط صلح میان فیلیپوس عرب و شاپور و همچنین مقایسه چهره پیکره ایستاده با تندیس فیلیپوس عرب در واتیکان، پیکره ایستاده را فیلیپوس عرب و پیکره زانوزده را والرین دانست (هینتس، ۱۳۸۵: ۲۴۳–۲۴۴). بنابراین، اگرچه تفسیر هویت پیکره‌ها همچنان در پژوهش‌های تاریخی محل بحث است، نقش‌رستم را می‌توان یکی از مهم‌ترین بیانیه‌های تصویری قدرت سیاسی ساسانی و نمایش پیروزی شاپور اول بر امپراتوری روم دانست. وجود کتیبه‌های یونانی و پهلوی در ارتباط با این نقش نیز بر اهمیت تاریخی آن افزوده است (Herzfeld, 1926: 244؛ هینتس، ۱۳۸۵: ۳۲۷–۳۲۸).

۲،۲. نقش‌برجسته و کتیبه کرتیر

در پشت نقش‌برجسته پیروزی شاپور اول بر امپراتوران روم در نقش‌رستم، نیم‌تنه‌ای از کرتیر، بزرگ موبد ساسانی همراه با کتیبه‌ای به زبان فارسی میانه در دوره بهرام دوم در دل کوه حجاری شده است. انتخاب فضای نقش‌برجسته پیروزی شاپور برای نمایش تصویر کرتیر، از جایگاه ممتاز او در ساختار سیاسی و مذهبی دولت ساسانی حکایت دارد. کرتیر در دوره بهرام دوم (۲۷۶–۲۹۳ م.) در تثبیت و گسترش نهاد دینی ـ دولتی زرتشتی نقش مهمی داشت و در دوره هفت پادشاه ساسانی حضور و نفوذ خود را حفظ کرد (هینتس، ۱۳۸۵: ۲۵۱؛ Sprengling, 1953: 248). کرتیر در این نگاره بی‌ریش و رو به راست، با کلاه بلند نیم‌استوانه‌ای و نشان ویژه‌ای بر آن، تصویر شده است؛ نشانی که هینتس آن را نماد اقتدار و قدرت تصمیم‌گیری او در مقام عالی قضایی کشور دانسته است (هینتس، ۱۳۸۵: ۲۶۲). وی با انگشت سبابه دست راست به نشانه احترام به سوی شاپور اشاره می‌کند. در زیر تصویر، کتیبه‌ای ۳۸ سطری به فارسی میانه قرار دارد که بخش‌هایی از آن، به‌ویژه سطرهای ۲۰ تا ۲۹، به‌شدت آسیب دیده و محو شده است. تاریخ ایجاد این نقش و کتیبه را حدود سال ۲۸۰ میلادی و دوره فرمانروایی بهرام دوم دانسته‌اند (شاپورشهبازی، ۱۳۵۷: ۱۱۸). کتیبه کرتیر از مهم‌ترین منابع برای شناخت ساختار دینی و سیاسی دوره ساسانی است. این متن نخستین‌بار در سده هجدهم توسط نیبور معرفی و سپس توسط سایر پژوهشگران مطالعه، آوانویسی و ترجمه شده است (نیبور، ۱۳۵۴).

۲،۳. اقدامات حفاظتی و مرمتی اثر

با توجه به ارزش تاریخی، هنری و فرهنگی نقش‌برجسته شاپور اول، این اثر طی دهه‌های گذشته موضوع اقدامات مختلف حفاظتی و مرمتی قرار گرفته است. بخش عمده این مداخلات با هدف جلوگیری از گسترش ترک‌ها، تثبیت بخش‌های آسیب‌دیده و افزایش پایداری اثر انجام شده است. با این‌حال، همانند بسیاری از آثار سنگی تاریخی، روش‌ها و مصالح مورد استفاده در هر دوره، متأثر از دانش فنی و رویکردهای رایج مرمت در همان زمان بوده است. ازاین‌رو، بررسی سوابق مرمتی این نقش‌برجسته نه تنها در شناخت روند تغییرات اثر اهمیت دارد، بلکه ارزیابی میزان موفقیت یا پیامدهای مداخلات گذشته را نیز امکان‌پذیر می‌سازد. شناخت این پیشینه، مبنایی برای انتخاب روش‌های مناسب در برنامه‌های حفاظت و مرمت آینده به شمار می‌رود.

ـ مرحله نخست: نخستین اقدام حفاظتی مستند بر روی نقش‌برجسته شاپور اول به سال ۱۳۳۲ خورشیدی و دوره مدیریت زنده‌یاد علی سامی در تخت‌جمشید بازمی‌گردد. در بخش شرقی نقش‌برجسته شکافی طولی وجود دارد که احتمالاً بر اثر فرسایش طبیعی، تنش‌های زمین‌شناختی یا گسترش شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ ایجاد شده بود. به‌منظور جلوگیری از نفوذ آب و محدود کردن پیشرفت آسیب، این شکاف در دهه ۳۰ خورشیدی با استفاده از مصالحی شامل گچ و قطعات آجر پر شد. انتخاب این مصالح را باید در چارچوب دانش و امکانات مرمتی آن دوره ارزیابی کرد. هرچند این اقدام در کوتاه‌مدت توانست تا حدی از نفوذ عوامل جوی به داخل شکاف جلوگیری کند، اما تفاوت ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این مصالح با سنگ بستر، به‌ویژه از نظر ضریب انبساط حرارتی، تخلخل و رفتار رطوبتی، موجب شد که در سال‌های بعد ضرورت بازنگری و حذف این مداخلات احساس شود.

ـ مرحله دوم: دومین مرحله از اقدامات حفاظتی در فروردین‌ماه سال ۱۳۸۶ و با تمرکز بر جبهه شرقی نقش‌برجسته آغاز شد. این عملیات با سرپرستی استاد حسن راهساز و با هدف اصلاح مداخلات پیشین، افزایش استحکام بخش‌های آسیب‌دیده و کاهش خطر گسترش ترک‌ها انجام گرفت. در این مرحله، تلاش شد تا ضمن حفظ اصالت اثر، بخش‌هایی از نقش‌برجسته که در معرض آسیب بیشتری قرار داشتند، تثبیت شوند. مهم‌ترین فعالیت‌های انجام‌شده در این دوره عبارت بودند از:

ـ برداشت مصالح و مواد مرمتی متعلق به دوره علی سامی با استفاده از ابزارهای دستی.

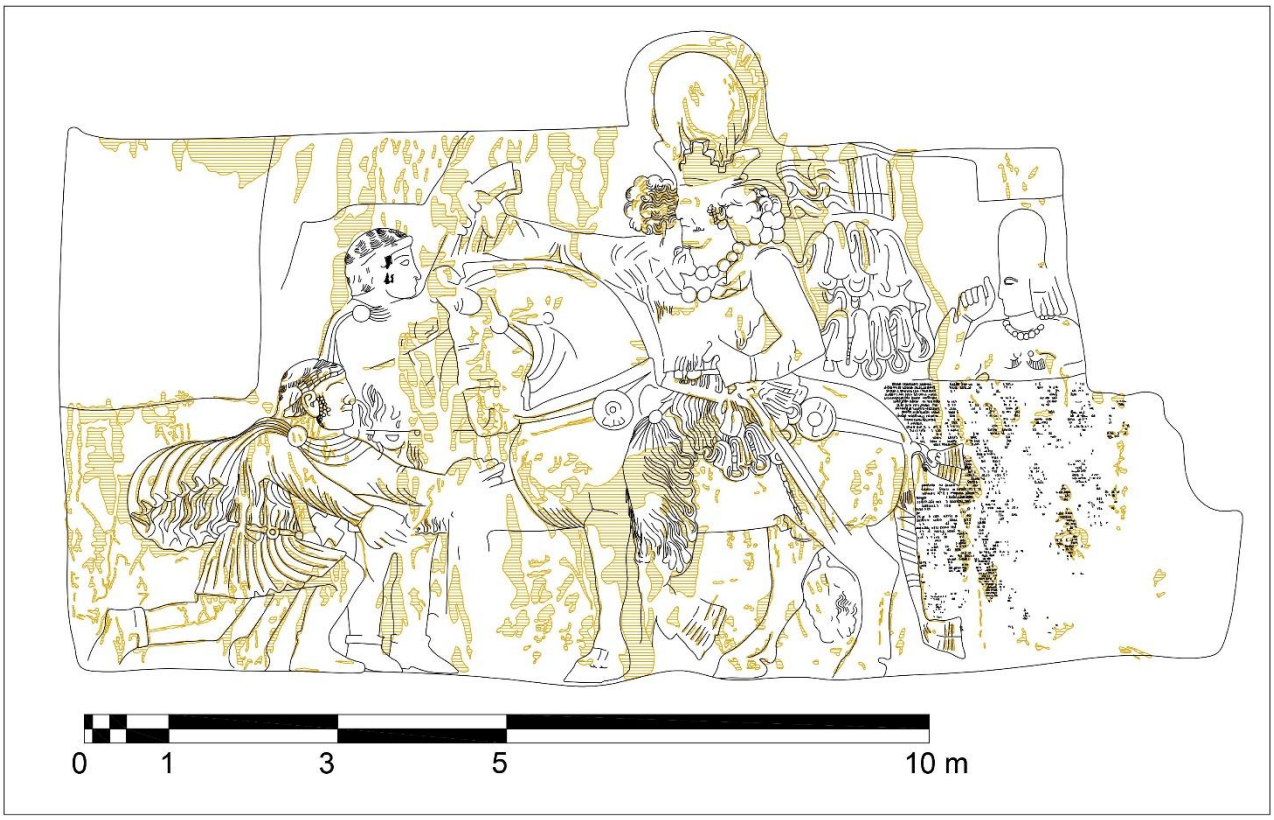
ـ پاک‌سازی شکاف موجود و پر کردن مجدد آن با ملاط ماسه – سیمان و آهک، با هدف ایجاد انسجام بیشتر و افزایش مقاومت بخش آسیب‌دیده در برابر عوامل محیطی.

ـ استحکام‌بخشی نقش‌برجسته کرتیر و کتیبه مجاور از طریق تزریق دوغاب شیره آهک و به‌کارگیری رزین پارالوئید، به‌منظور تثبیت بخش‌های سست (**شکل ۳**).

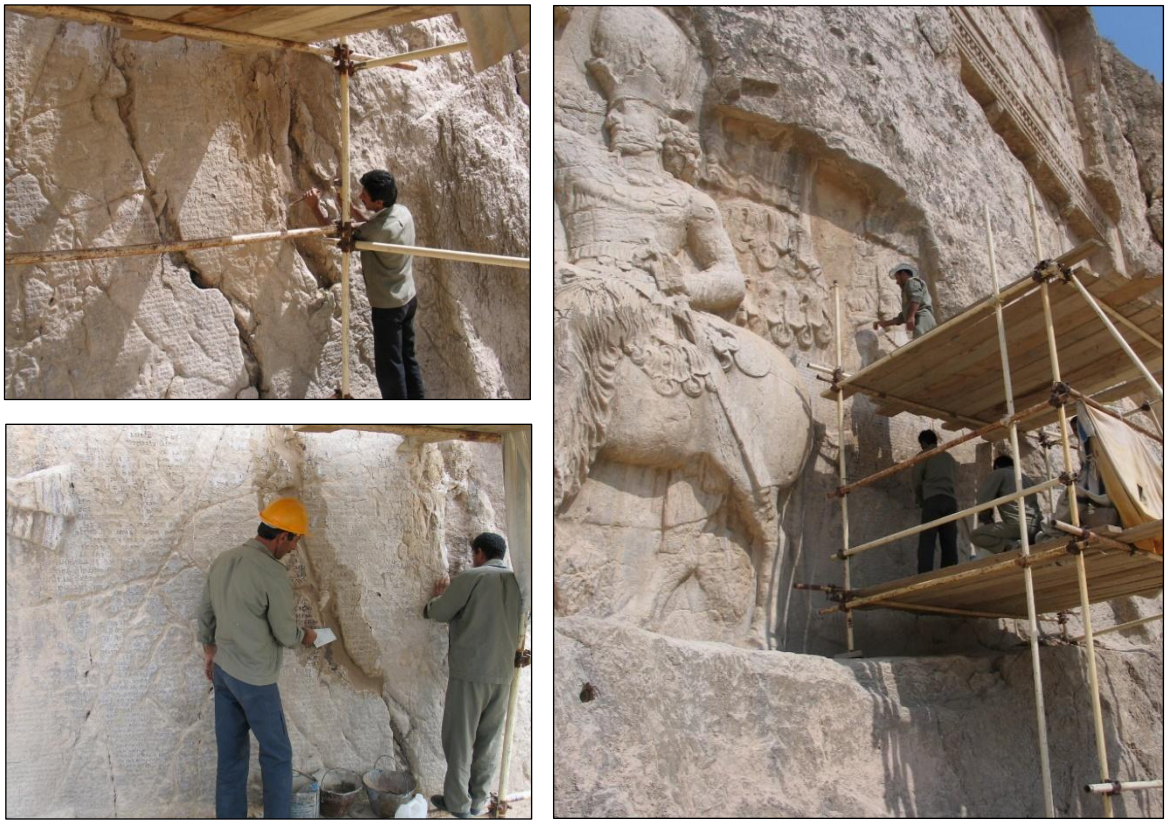


شکل ۱. تصویر هوایی مایل از محوطه نقش رستم و موقعیت نقش برجسته شاپور اول (منبع: دیلمی‌پور، ۱۳۹۷)





شکل۲. بالا: تصویر تخت (اُرتوفتو) از جزییات نقش‌برجسته پیروزی شاپور اول در نقش‌رستم به همراه نقش کرتیر (علی اقرء، ۱۳۹۹)؛ پایین: طرح خطی از جزییات نقش‌برجسته (مصطفی رخشنده‌خو، ۱۳۹۹)



شکل۳. دومین مرحله از اقدامات حفاظتی در سال ۱۳۸۶ در بخش شرقی نقش‌برجسته شاپور با هدف بازنگری و اصلاح تعمیرات پیشین و حفاظت و استحکام‌بخشی نقش کرتیر (منبع: مرکز اسناد پایگاه میراث جهانی تخت جمشید، ۱۳۸۶)

۳. مواد و روش‌ها

۳,۱. مستندسازی و آسیب نگاری اثر

نخستین مرحله پژوهش به مستندسازی دقیق نقش‌برجسته شاپور اول اختصاص یافت. این عملیات با همکاری شرکت نقشه‌برداری فرانگار پیمایش و با بهره‌گیری هم‌زمان از اسکن لیزری سه‌بعدی و فتوگرامتری دیجیتال انجام شد. استفاده هم‌زمان از این دو روش، علاوه بر افزایش دقت برداشت، امکان ثبت کامل ویژگی‌های هندسی و ظاهری اثر را فراهم کرد. داده‌های خام حاصل از برداشت میدانی با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی پردازش و یکپارچه شدند و در نتیجه، ابرنقاط (Point Cloud) سه‌بعدی و سپس مدل‌های رنگی و بافت‌دار از نقش‌برجسته تهیه شد (**شکل ۴**). در ادامه، از مدل سه‌بعدی، تصویر تخت (Orthophoto) با دقت هندسی بالا استخراج گردید که به‌عنوان مبنای هندسی و تصویری اصلی برای آسیب‌نگاری اثر مورد استفاده قرار گرفت (**شکل ۲**).

هدف از این مستندسازی، ثبت وضعیت حفاظتی نقش‌برجسته پیش از آغاز اقدامات حفاظت و مرمت و ایجاد یک وضعیت مبنا برای مطالعات و پایش‌های آینده بود. تصاویر تخت امکان تعیین دقیق موقعیت، ابعاد و گستره عوارض آسیب، مقایسه وضعیت اثر در دوره‌های مختلف و ارزیابی تغییرات و اثربخشی اقدامات حفاظتی را فراهم می‌کنند. فرآیند آسیب‌نگاری بر پایه شناسایی، طبقه‌بندی، مستندسازی و ثبت مکانی عوارض در سطح نقش‌برجسته و انتقال داده‌ها بر روی تصویر تخت انجام شد. به‌منظور تکمیل داده‌های رقومی و فراهم‌کردن دسترسی ایمن و نزدیک به تمام بخش‌های اثر، کارگاه و داربست حفاظتی متناسب با ابعاد نقش‌برجسته ایجاد شد (**شکل ۵**). بررسی نزدیک سطح سنگ امکان شناسایی عوارضی را که از سطح زمین به‌طور کامل قابل مشاهده یا تشخیص نبودند، فراهم کرد. عوارض شناسایی‌شده با تطبیق مشاهدات میدانی و شواهد موجود در تصاویر رقومی، از نظر نوع، موقعیت و گستره ثبت شدند (**شکل ۶**).

برای طبقه‌بندی آسیب‌ها از تعاریف و نظام طبقه‌بندی ارائه‌شده در دستورالعمل کمیته علمی بین‌المللی سنگ ایکوموس (ICOMOS–ISCS, 2008)، استفاده شد. بر این اساس، آسیب‌های مشاهده‌شده در پنج گروه اصلی شامل تغییر رنگ و رسوب، از دست دادن مواد، جدایش، ترک و تغییر شکل و فعالیت‌های زیستی دسته‌بندی شدند (**جدول ۲**). سپس نقشه‌های خطی از تصاویر تخت استخراج و عوارض شناسایی‌شده در محیط نرم‌افزار اتوکد (AutoCAD) بر روی آن‌ها ترسیم شد. برای هر گروه آسیب، لایه مکانی مستقلی ایجاد گردید تا امکان تفکیک، مدیریت و تحلیل داده‌ها فراهم

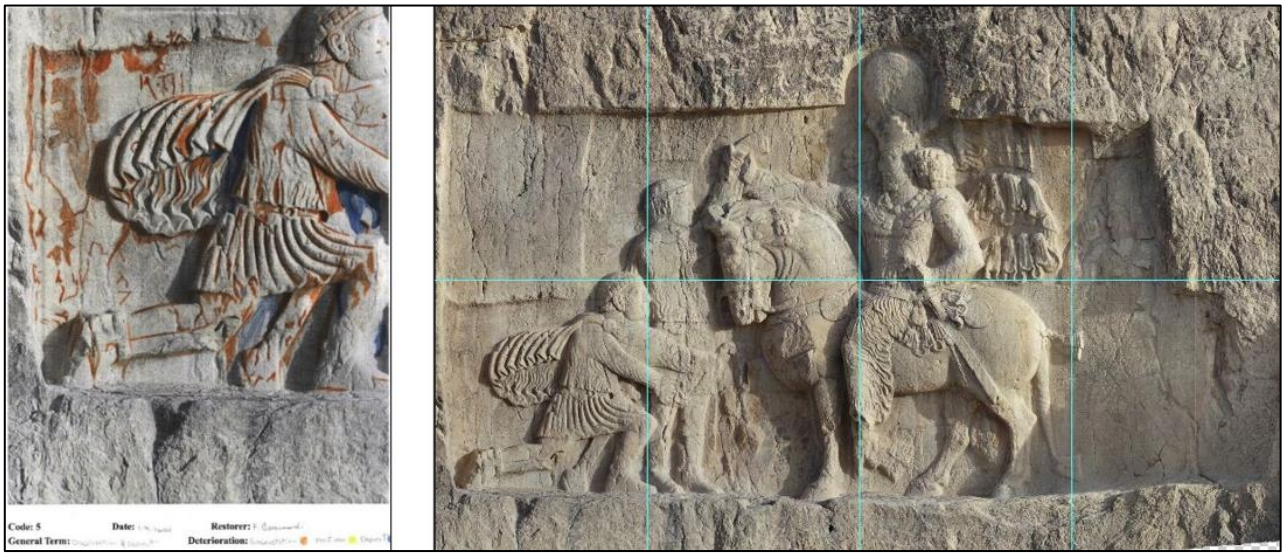
شود. در نهایت، لایه‌های موضوعی به‌صورت منفرد و تلفیقی مورد استفاده قرار گرفتند و نقشه‌های رقومی آسیب‌نگاری با قابلیت بررسی پراکنش، گستره و هم‌پوشانی عوارض تهیه شدند. بدین‌ترتیب، تلفیق مستندات فتوگرامتری و بررسی میدانی، ضمن فراهم‌کردن تصویری دقیق و قابل استناد از وضعیت حفاظتی نقش‌برجسته، یک چارچوب مستند برای تحلیل مکانی آسیب‌ها، پایش بلندمدت، شناسایی تغییرات و ارزیابی نتایج اقدامات حفاظتی ایجاد کرد.



شکل ۴. مدل ابر نقطه سه‌بعدی نقش برجسته شاپور اول بدون بافت و پس از تلفیق با بافت طبیعی (منبع: مرکز اسناد پایگاه میراث جهانی تخت جمشید، تهیه شده توسط آقای ضیاء دیلمی‌پور شرکت مهندسی فرانگار پیمایش)



شکل ۵. ایجاد کارگاه ایمن با امکان با امکان دسترسی به بخش‌های مختلف نقش‌برجسته برای معاینه دقیق سطح اثر و انجام آسیب‌نگاری



شکل ۶. استفاده از تصویر تخت در آسیب‌نگاری نقش‌برجسته شاپور اول؛ شبکه‌بندی تصویر (راست) و انتقال و ثبت محدوده آسیب‌ها بر روی تصویر (چپ)

۳,۲. نمونه‌برداری و مطالعات آزمایشگاهی

آزمایش‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، شیمیایی بر روی ۳ نمونه سنگ کوچک از بدنه صخره انجام شد. نمونه‌برداری خارج از قاب اصلی نقش و از بدنه کوه انجام شد تا از هرگونه آسیب به بخش‌های دارای ارزش هنری جلوگیری شود. مطالعات سنگ‌شناسی با استفاده از مقاطع نازک و میکروسکوپ پلاریزان نوری انجام شد تا نوع بافت، اندازه دانه‌ها، ترکیب کانی‌شناسی، میزان سیمانی‌شدن و ویژگی‌های ریزساختاری سنگ مشخص شود. این اطلاعات نقش مهمی در تبیین رفتار سنگ در برابر عوامل فرسایشی و ارزیابی مقاومت آن در برابر فرآیندهای هوازدگی ایفا می‌کنند. همچنین، آزمایش ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ بستر، در دو شرایط خشک و غرقابی، بر روی پنج نمونه سنگ با ابعاد بزرگ‌تر که در فاصله‌ای دور از نقوش و از بدنه کوه برداشت شده بودند، انجام گرفت. دانسیته نمونه‌ها بر اساس اندازه‌گیری ابعاد، حجم و وزن آن‌ها تعیین شد. مقاومت فشاری تک‌محوری نیز مطابق استاندارد ASTM C170 و با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۵ × ۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. در این آزمون، نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری محوری تا مرحله گسیختگی قرار گرفتند و مقاومت فشاری تک‌محوری بر اساس نسبت حداکثر بار اعمال‌شده به سطح مقطع اولیه نمونه محاسبه شد. برای هر یک از دو شرایط خشک و غرقابی، میانگین نتایج پنج نمونه به‌عنوان مقدار نماینده در نظر گرفته شد و مقادیر مقاومت فشاری حاصل برای ارزیابی تأثیر اشباع‌شدن سنگ بر ویژگی‌های مکانیکی آن با یکدیگر مقایسه شدند.

جدول ۲. راهنمای آسیب‌نگاری نقش برجسته شاپور اول (بر اساس الگوهای استاندارد ارایه شده توسط کمیته سنگ ایکوموس)

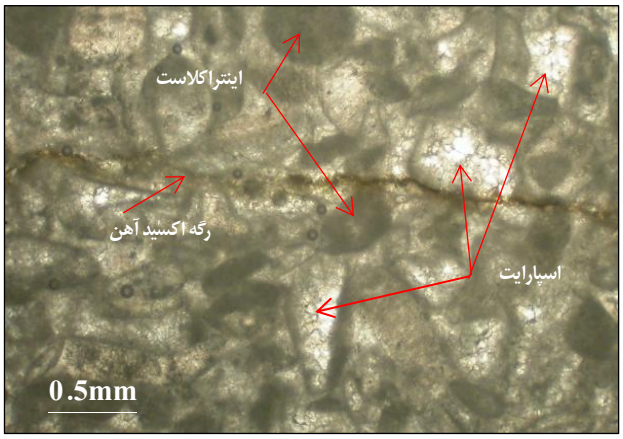
گروه آسیب	شکل آسیب	شرح آسیب	علل شکل‌گیری آسیب
تغییر رنگ و رسوب Discoloration & Deposit	پوسته‌بستن (Encrustation)	تشکیل لایه‌ای معدنی، سخت و چسبیده به سطح سنگ که معمولاً رنگ و ریخت‌شناسی متفاوتی دارد.	مواد منتقل‌شده و رسوب‌کرده توسط آب تراوشی و فرایندهای درونی اثر.
	ناحیه مرطوب (Moist area)	تیرگی سطح ناشی از رطوبت، با شکل و گستره متناسب با منشأ آن.	رطوبت صعودی، جذب رطوبت در حضور نمک‌ها و میعان.
	رسوب (Deposit)	تجمع مواد قشری با ضخامت متغیر و چسبندگی کم یا فاقد چسبندگی به سطح سنگ.	دوده و غبار، شره رنگ و ملاط، آئروسل نمکی، مواد پاشیده‌شده و فضولات پرندگان و خفاش‌ها.
از دست دادن مواد Material loss	بخش‌های مفقود (Missing part)	ایجاد فضای خالی در محل ازدست‌رفته؛ معمولاً در بخش‌های برجسته و بیرون‌زده.	فعالیت‌های انسانی و فرایندهای فیزیکی و شیمیایی تخریب سنگ.
	فرسایش نامنظم (Differential Erosion)	فرسایش ناهمگون سطح سنگ در اثر تفاوت مقاومت یا تخلخل بخش‌های مختلف.	ناهمگنی سنگ و تخریب انتخابی، ازجمله فعالیت گلسنگ‌ها.
جدایش Detachment	لایه‌لایه شدن (Delamination)	جدایش فیزیکی سنگ به یک یا چند لایه با ضخامت و شکل متغیر.	هوازدگی سنگ‌های لایه‌ای، به‌ویژه سنگ‌های رسوبی و برخی سنگ‌های دگرگونی.
	تورق یا پوست‌اندازی (Peeling)	جداشدن لایه‌های نازک و موازی با سطح سنگ که ممکن است خمیده یا تاب‌خورده باشند.	هوازدگی سنگ‌های لایه‌ای، به‌ویژه سنگ‌های رسوبی و برخی سنگ‌های دگرگونی.
	تکه‌تکه شدن (Fragmentation)	شکست کامل یا جزئی سنگ و تبدیل آن به قطعاتی با شکل و ابعاد نامنظم.	تنش‌های وارده، ناپیوستگی‌ها و ضعف ساختاری سنگ.
ترک و تغییر شکل Crack & Deformation	شکستگی (Fracture)	ترک یا گسیختگی‌ای که در سراسر قطعه سنگ امتداد می‌یابد.	هوازدگی و وجود ناپیوستگی در سنگ.
	شکافتگی (Splitting)	گسیختگی سنگ در امتداد صفحات سست، ریزترک‌ها یا لایه‌های رسی و سیلتی.	حرکات و تنش‌های وارده و ضعف در امتداد صفحات سست.
	ترک (Crack)	درز یا گسیختگی قابل مشاهده که نشان‌دهنده جدایی بخشی از سنگ است.	هوازدگی، ناپیوستگی سنگ، مشکلات ایستایی، زنگ‌زدگی بست‌های فلزی، بندکشی سخت، زمین‌لرزه، آتش و یخ‌زدگی.
فعالیت‌های زیستی Biological colonization	گلسنگ (Lichen)	رشد پوشش‌های پوسته‌ای یا کپه‌ای گلسنگ بر سطح سنگ، معمولاً با رنگ‌های خاکستری، زرد، نارنجی یا سیاه.	رطوبت پایدار و فراهم‌بودن شرایط زیستگاهی مناسب.
	گیاه آلی (Plant)	پوشش گیاهی دارای ریشه، ساقه و برگ یا بخش‌هایی از آن.	وجود رطوبت و بستر مناسب برای ریشه‌دوانی، مانند حفره‌ها و شکاف‌های سنگ.

به‌منظور تعیین ترکیب شیمیایی و شناسایی عناصر اصلی تشکیل‌دهنده سنگ، آزمون فلورسانس پرتو ایکس (XRF) انجام شد و برای شناسایی فازهای کانی‌شناسی از آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده گردید. نتایج این دو آزمون، اطلاعات ارزشمندی درباره ترکیب کانی‌ها، درصد عناصر تشکیل‌دهنده و محصولات احتمالی ناشی از فرآیندهای هوازدگی و دگرسانی در اختیار قرار داد و امکان تفسیر دقیق‌تر منشأ برخی آسیب‌های مشاهده‌شده را فراهم ساخت. آزمون XRF توسط طیف سنج فلورسانس پرتو ایکس مدل ۸۴۲۰ کمپانی ARL در پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی- فرهنگی انجام شد. از نرم افزار UniQuant برای آنالیز نمونه‌های مجهول استفاده شد. آنالیز XRD نیز در آزمایشگاه پژوهشکده یادشده با استفاده از دستگاه پراش سنج پرتو ایکس از نوع پودری مدل T2T متعلق به کمپانی SIEFERT انجام شد. آزمون با شدت جریان ۳۰ میلی‌آمپر و ولتاژ ۴۰ کیلوولت، در بازه زاویه‌ای 2θ از ۶ تا ۶۰ درجه انجام گرفت و نمونه‌ها در این محدوده اسکن شدند. آماده‌سازی نمونه‌ها در دستگاه با روش قرص پلکسی گلاس صورت گرفت.

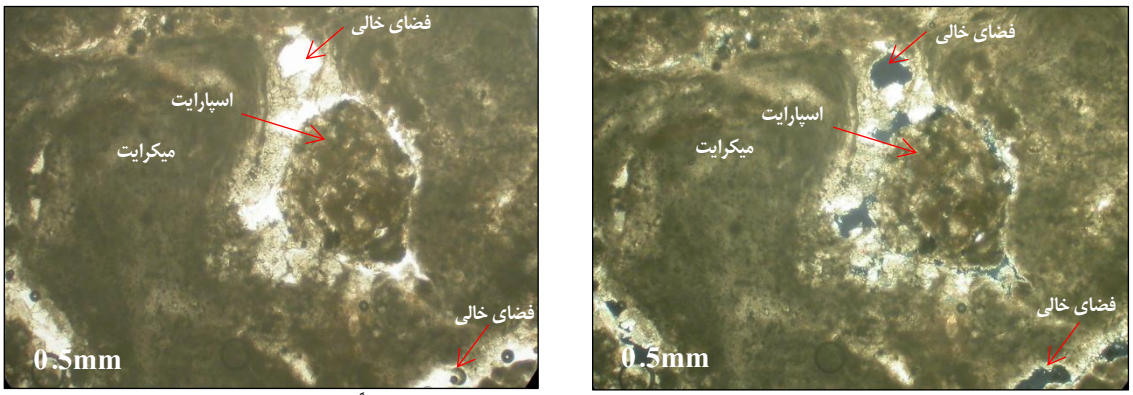
٤. یافته‌ها و بحث

٤,١. سنگ‌شناسی مقاطع نازک

مطالعات پتروگرافی و کانی‌شناسی نمونه‌های سنگ در محوطه نقش‌رستم نشان داد که نمونه‌ها از نظر ترکیب کانی‌شناسی و بافتی تقریباً مشابه‌اند. بر اساس بررسی مقاطع نازک، سنگ عمدتاً از کلسیت میکرایتی و اسپارایتی، قطعات اینتراکلاست، مقادیر اندکی بقایای فسیلی و اکسیدهای آهن و مقدار کمی دولومیت تشکیل شده است. اینتراکلاست‌ها حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد بافت سنگ را تشکیل می‌دهند و به‌وسیله سیمان اسپارایتی به یکدیگر متصل شده‌اند (**شکل ۷**). بخش قابل‌توجهی از فضاهای خالی، رگه‌ها و ریزشکستگی‌های موجود در بافت سنگ عمدتاً به‌صورت ثانویه با کلسیت پر شده‌اند. بررسی نمونه سنگ دچار انحلال در مجاورت روزنه‌های سطح صخره نشان داد که بخش عمده نمونه از گل آهکی (میکرایت) تشکیل شده و در برخی قسمت‌ها، میکرایت در اثر بازتبلور به اسپارایت تبدیل شده است (**شکل ۸**). تشکیل کلسیت ثانویه در ارتباط با نفوذ رطوبت و فرایندهای هوازدگی، از مهم‌ترین ویژگی‌های مشاهده‌شده است. همچنین، قابلیت جذب رطوبت توسط اکسیدهای آهن و انحلال‌پذیری میکرایت در آب می‌تواند در تشدید فرایندهای تخریب و تغییرات سطحی سنگ نقش داشته باشد.



شکل ۷. فتومیکروگراف در بزرگنمایی X۴؛ قطعات فراوان اینتراکلاست به رنگ کرم تیره دیده می‌شوند که در میان آن‌ها کلسیت اسپارایتی به‌صورت کانی روشن‌رنگ تشکیل شده است. اکسیدهای آهن نیز به‌صورت لکه‌ها و رگه‌های قرمز قابل مشاهده‌اند.



شکل ۸. فتومیکروگراف نمونه رسوب تشکیل‌شده در ساختار سنگ در مجاورت رطوبت، بزرگنمایی X۴؛ رسوب عمدتاً از گل آهکی (میکرایت) تشکیل شده و در بخش‌هایی بازتبلور آن به اسپارایت مشاهده می‌شود. در تصویر چپ (PPL)، فضاهای خالی روشن و در تصویر راست (XPL)، همان فضاها به رنگ تیره دیده می‌شوند.

٤,٢. مشخصات فیزیکی سنگ

به‌منظور ارزیابی رفتار مکانیکی سنگ بستر نقش‌برجسته و بررسی تأثیر رطوبت بر مقاومت آن، آزمون‌های فیزیکی شامل اندازه‌گیری دانسیته و مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های سنگی برداشت‌شده از بستر صخره‌ای کوه نقش‌رستم انجام شد. در مجموع، پنج نمونه در حالت خشک و پنج نمونه پس از اشباع کامل با آب (حالت غرقاب) مورد آزمایش قرار گرفتند (**جدول ۳**). نتایج نشان داد که دانسیته نمونه‌های غرقاب‌شده نسبت به نمونه‌های خشک اندکی افزایش یافته است.

همچنین، مقاومت مکانیکی سنگ پس از اشباع حدود ۲۹٫۵ درصد کاهش یافت. این افت قابل‌توجه مقاومت در شرایط اشباع، بیانگر حساسیت نسبی سنگ به رطوبت و تأثیر آن بر تضعیف پیوندهای میان‌دانه‌ای و کاهش انسجام سیمان کربناته است. این رفتار را می‌توان با نتایج مطالعات پتروگرافی مرتبط دانست. پیشتر بررسی مقاطع نازک نشان داد که سنگ دارای ریزشکستگی‌های متعددی است که بخش قابل‌توجهی از آن‌ها با سیمان کلسیتی ثانویه پر شده‌اند. این ناپیوستگی‌ها، با وجود ابعاد میکروسکوپی، مسیرهایی برای نفوذ آب به درون سنگ فراهم می‌کنند. نفوذ آب در این ریزناپیوستگی‌ها می‌تواند با کاهش اصطکاک میان دانه‌ها و تضعیف پیوندهای موجود، تمرکز تنش در نواحی ضعیف را افزایش داده و زمینه گسترش ریزترک‌ها و کاهش مقاومت مکانیکی را فراهم سازد.

از دیدگاه حفاظت و مرمت، کاهش مقاومت در شرایط اشباع اهمیت کنترل رطوبت در حفاظت از نقش‌برجسته شاپور اول را نشان می‌دهد؛ زیرا نفوذ آب ناشی از بارندگی، رواناب سطحی یا رطوبت موجود در توده‌سنگ، علاوه بر تضعیف مکانیکی، می‌تواند فرآیندهای هوازدگی شیمیایی، تبلور نمک و چرخه‌های تر و خشک‌شدن را تشدید کند و در نهایت احتمال گسترش ترک‌ها، جداشدگی دانه‌ها و پوسته‌شدگی سطح سنگ را افزایش دهد. بنابراین، اگرچه سنگ بستر نقش‌برجسته در شرایط خشک از مقاومت مناسبی برخوردار است، افت محسوس مقاومت در حالت اشباع، آسیب‌پذیری آن در برابر فرآیندهای وابسته به رطوبت را نشان می‌دهد و بر ضرورت مدیریت آب‌های سطحی، کنترل نفوذ رطوبت و پایش مستمر شرایط محیطی در برنامه حفاظت بلندمدت اثر تأکید دارد.

جدول ۳. آزمون دانسیته و مقاومت فشاری سنگ‌ها در محوطه تاریخی نقش رستم

نوع مصالح و شرایط آزمون	تعداد و ابعاد نمونه	دانسیته نمونه g/cm^3	مقاومت فشاری نمونه Kg/cm^2
نمونه سنگ در حالت خشک	۵ نمونه ابعاد ۵ × ۵ سانتی‌متر	۲,۵۲۱	۶۳۷,۸
سنگ در حالت اشباع (غرقاب)	۵ نمونه ابعاد ۵ × ۵ سانتی‌متر	۲,۵۷۲	۴۴۹,۶

٤,٣. ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی سنگ

به‌منظور شناسایی ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی سنگ بستر نقش‌برجسته شاپور اول، سه نمونه منتخب از بدنه صخره تحت آزمون‌های پراش پرتو ایکس (XRD) و فلورسانس پرتو ایکس (XRF) قرار گرفتند (**جدول ۴**). بر اساس نتایج سنگ بستر نقش‌برجسته شاپور اول، سنگ آهکی با غلبه بسیار زیاد کلسیت است و بیش از ۹۵ درصد ترکیب اکسیدی آن را CaO تشکیل می‌دهد. مقدار بسیار پایین Al_2O_3 ، SiO_2، SO_3، K_2O و Fe_2O_3 نشان‌دهنده سهم محدود اجزای سیلیکاته، رسی و سایر ناخالصی‌های همراه در ساختار سنگ است. مقدار نسبتاً بالاتر P_2O_5 در برخی نمونه‌ها، در مقایسه با سایر اکسیدهای فرعی، از ویژگی‌های قابل توجه ترکیب شیمیایی این نمونه‌هاست؛ بااین‌حال، در نتایج XRD فاز کانی‌شناختی مشخصی مانند آپاتیت شناسایی نشد؛ ازاین‌رو نمی‌توان فسفر را مستقیماً به یک کانی خاص نسبت داد. این عنصر می‌تواند به‌صورت جزء فرعی در فازهای کربناته یا فازهای ثانویه کم‌بلور حضور داشته باشد و با توجه به شرایط محیطی منطقه، تأثیر احتمالی آلاینده‌های جوی و فعالیت‌های کشاورزی در تجمع ثانویه آن در سطح سنگ نیز قابل طرح است (فدایی و دیگران، ۱۴۰۳). تعیین دقیق منشأ و فاز حامل فسفر، نیازمند بررسی‌های کانی‌شناختی و ریزساختاری تکمیلی است.

در مجموع، نتایج آنالیزها نشان می‌دهد که سنگ بستر نقش‌برجسته شاپور اول، با وجود حضور مقادیر اندکی از اکسیدهای فرعی، عمدتاً از کلسیت تشکیل شده و می‌توان آن را یک سنگ آهکی کلسیتی با خلوص بالا در نظر گرفت. این ویژگی از یک‌سو موجب یکنواختی نسبی ترکیب سنگ شده و از سوی دیگر، آن را در برابر فرآیندهای هوازدگی شیمیایی، به‌ویژه انحلال ناشی از باران‌های اسیدی (فدایی و دیگران، ۱۴۰۳)، آسیب‌پذیر می‌سازد.

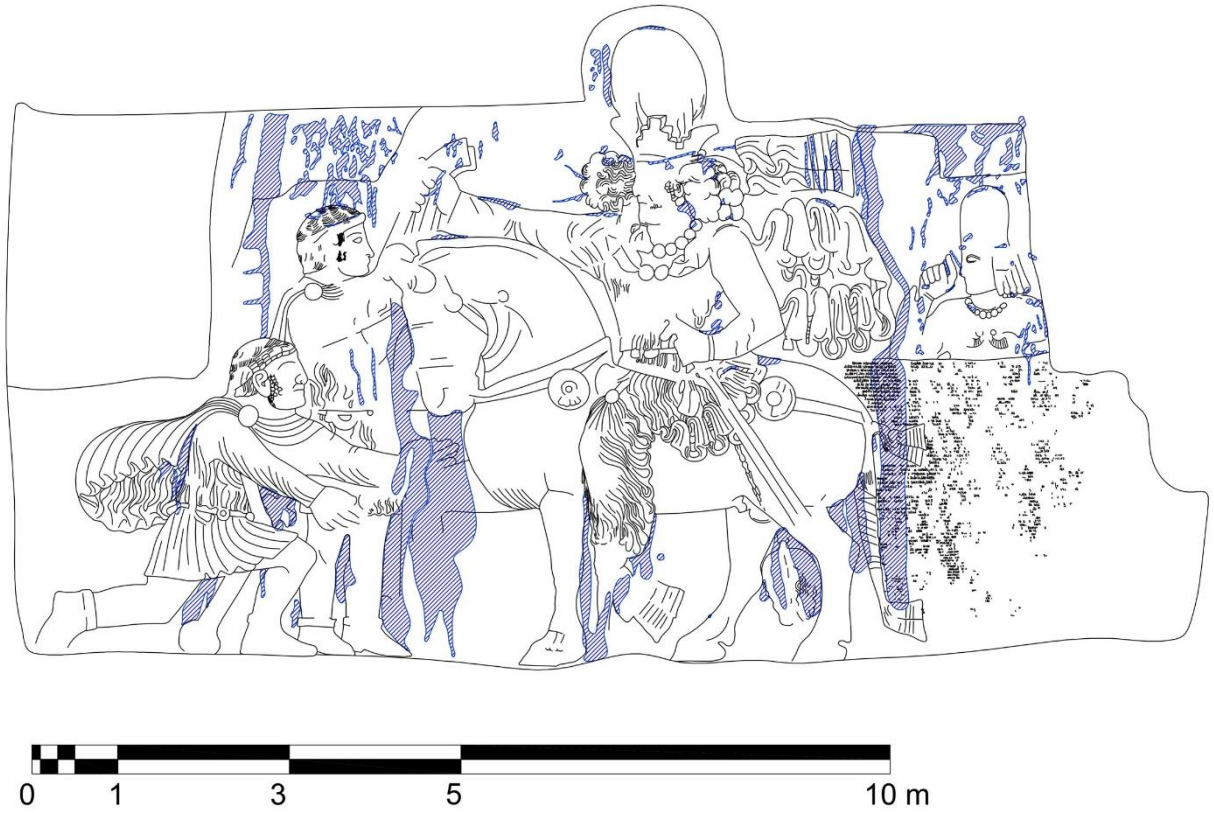
جدول ۴. نتایج شناسایی ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی نمونه‌های سنگ به روش XRF و XRD در محوطه نقش‌رستم

ردیف	مکان نمونه‌برداری	ترکیب کانی‌شناسی (XRD)	نتایج درصد ترکیب شیمیایی (XRF)							
			MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO3	K2O	CaO	Fe2O3
۱	نقش‌رستم، محدوده آرامگاه خشایار، سنگ بدنه صخره	Calcite (high), Clay Mineral (low)	–	۰,۱۵	۰,۲۶	۳,۳۰	۰,۱۷	۰,۰۲	۹۵,۸۰	۰,۲۹
۲	نقش‌رستم، محدوده آرامگاه خشایار، سنگ بدنه صخره	Calcite	–	–	–	۲,۷۰	۰,۱۳	۰,۰۲	۹۶,۷۰	۰,۲۶
۳	نقش‌رستم، نقش رستم، محدوده نقش ایلامی، سنگ بدنه صخره	Calcite	–	–	–	۰,۹۵	۰,۰۵	–	۹۸,۶۰	۰,۳۱

٤,٤. مستندسازی و آسیب‌نگاری اثر

داده‌های حاصل از مستندسازی و آسیب‌نگاری نقش‌برجسته شاپور اول، تصویری دقیق از وضعیت هندسی و حفاظتی اثر فراهم کرد. تلفیق داده‌های اسکن لیزری زمینی و فتوگرامتری دیجیتال، امکان تهیه مدل سه‌بعدی و سپس تصاویر تخت با قابلیت ثبت مکانی عوارض را فراهم ساخت. تصاویر تخت به‌عنوان مرجع هندسی، امکان تعیین موقعیت، حدود و گستره آسیب‌ها و مقایسه وضعیت بخش‌های مختلف نقش‌برجسته را فراهم کردند. همچنین، دسترسی نزدیک به سطح اثر از طریق داربست حفاظتی، امکان معاینه دقیق سطح نقش‌برجسته، شناسایی و بررسی عوارضی را که از سطح زمین قابل مشاهده یا تشخیص دقیق نبودند، فراهم کرد. این دسترسی، ارزیابی دقیق‌تر ترک‌ها، گسیختگی‌های سطحی، تغییرات بافتی و آثار فرسایش زیستی و در نهایت، دسته‌بندی صحیح و انتقال دقیق این عوارض به تصاویر تخت را امکان‌پذیر ساخت. بررسی مجموعه داده‌های حاصل نشان داد که عوارض موجود در نقش‌برجسته را می‌توان بر اساس نظام طبقه‌بندی کمیته علمی بین‌المللی سنگ ایکوموس در پنج گروه اصلی شامل تغییر رنگ و رسوب، از دست رفتن مواد، جدایش، ترک و تغییر شکل و فعالیت‌های زیستی دسته‌بندی کرد (ورگس–بلمین، ۱۳۹۰؛ ICOMOS-ISCS, 2008). نقشه‌های آسیب‌نگاری حاصل از این طبقه‌بندی، الگوی فضایی عوارض را در سطح اثر آشکار کردند و امکان بررسی هم‌زمان پراکنش و هم‌پوشانی گروه‌های مختلف آسیب را فراهم ساختند (**جدول ۲**؛ **شکل ۹**، **شکل ۱۰**، **شکل ۱۱**، **شکل ۱۲**، **شکل ۱۳**، **شکل ۱۴**).

تحلیل نقشه‌های آسیب‌نگاری نشان می‌دهد که پراکنش عوارض در سطح نقش‌برجسته یکنواخت نیست و برخی آسیب‌ها به‌صورت متمرکز و برخی دیگر در گستره وسیع‌تری ظاهر شده‌اند. همچنین، هم‌پوشانی چند گروه آسیب در برخی نواحی نشان می‌دهد که فرسودگی سطح نقش‌برجسته حاصل عملکرد یک عامل منفرد نیست و می‌تواند از برهم‌کنش یا توالی چند فرایند آسیب‌زا ناشی شود. برای مثال، ترک‌ها و ناپیوستگی‌های سطحی می‌توانند مسیر نفوذ و تجمع آب و رطوبت را فراهم کنند و در ادامه، تداوم چرخه‌های تر و خشک‌شدن یا یخ‌زدگی به تشدید جدایش و از دست رفتن مواد منجر شود. همچنین، ناهمواری‌ها و فرورفتگی‌های سطحی می‌توانند با فراهم‌کردن شرایط مناسب برای تجمع رطوبت و رسوبات، زمینه استقرار و گسترش فعالیت‌های زیستی را افزایش دهند. ثبت مکانی این عوارض بر یک مرجع هندسی ثابت، امکان مقایسه بخش‌های مختلف اثر و شناسایی نواحی دارای تراکم یا هم‌پوشانی بیشتر آسیب را فراهم می‌کند. از این منظر، نقشه‌های آسیب‌نگاری علاوه بر ثبت وضعیت موجود، به‌عنوان داده پایه (Baseline) برای پایش‌های دوره‌ای و ارزیابی تغییرات حفاظتی قابل استفاده‌اند. الگوی فضایی عوارض نیز می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر هم‌زمان ویژگی‌های بستر سنگی، شرایط موضعی و عوامل محیطی بر فرسودگی باشد و مبنایی برای تحلیل ارتباط میان این مؤلفه‌ها و آسیب‌های مشاهده‌شده فراهم سازد. در نتیجه، این داده‌ها می‌توانند در شناسایی نواحی آسیب‌پذیر، اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و ارزیابی اثربخشی مداخلات استفاده شوند.



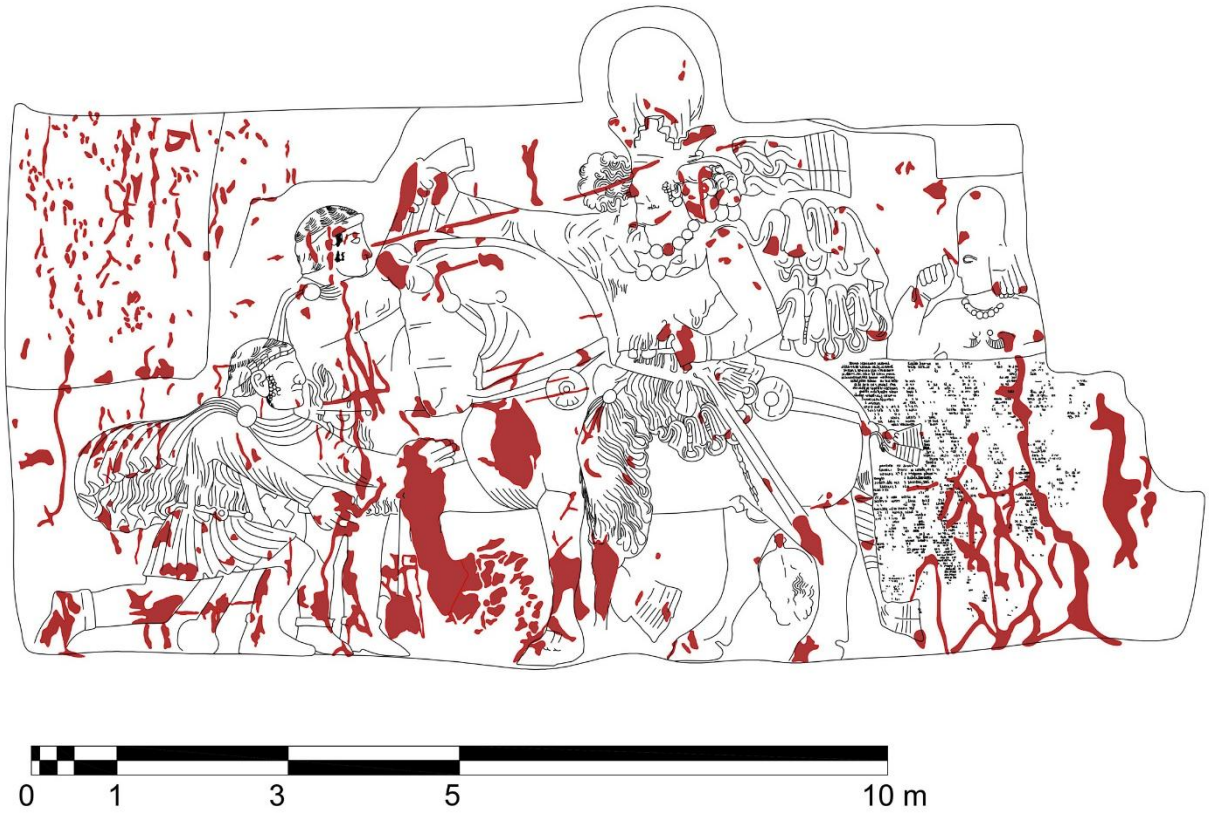
شکل ۹. مستندسازی «رسوب» در نقش‌برجسته شاپور اول، در زمره آسیب‌های «تغییر رنگ و رسوب» (شرح و عوامل ایجاد این آسیب در جدول ۲)







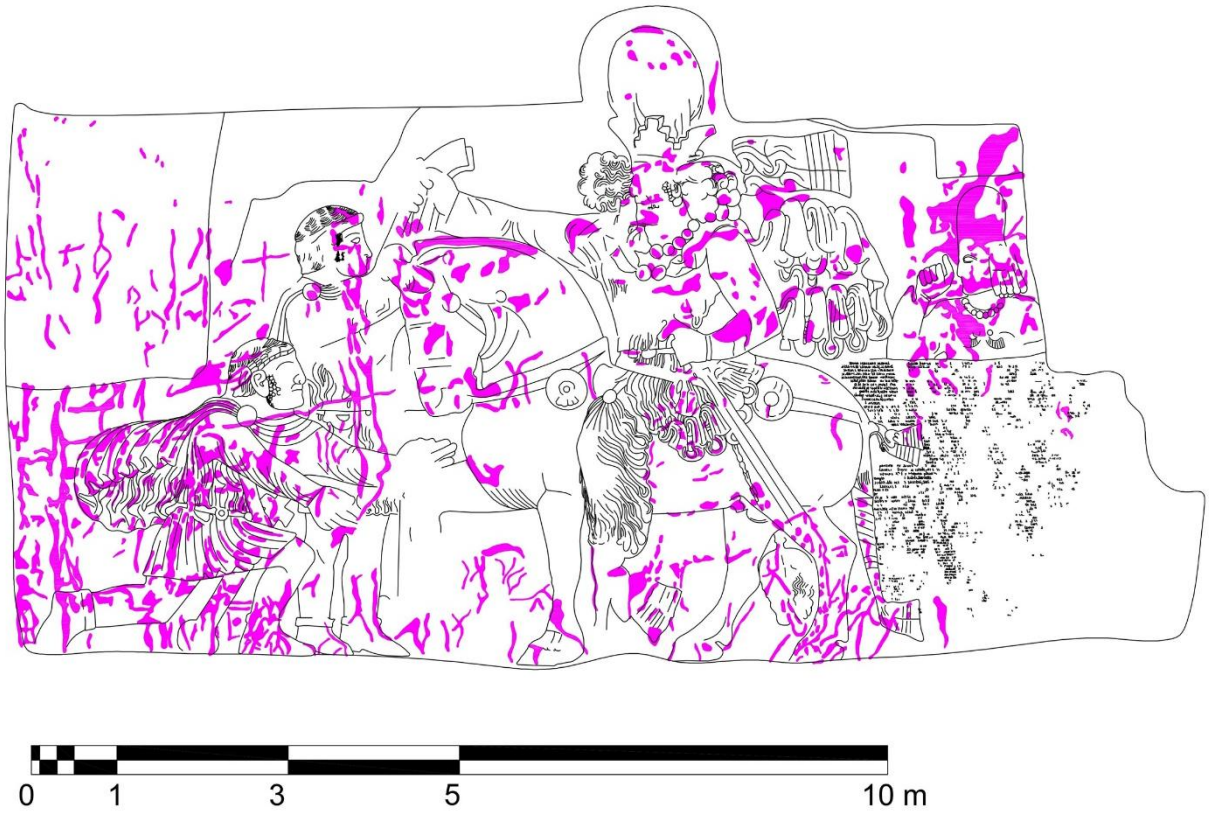
شکل ۱۰. مستندسازی «ناحیه مرطوب» در نقش‌برجسته شاپور اول، در زمره آسیب‌های «تغییر رنگ و رسوب» (شرح و عوامل ایجاد این آسیب در جدول ۲)







شکل ۱۱. مستندسازی «بخش‌های مفقود» در نقش‌برجسته شاپور اول، در زمره آسیب‌های «از دست دادن مواد» (شرح و عوامل ایجاد این آسیب در جدول ۲)

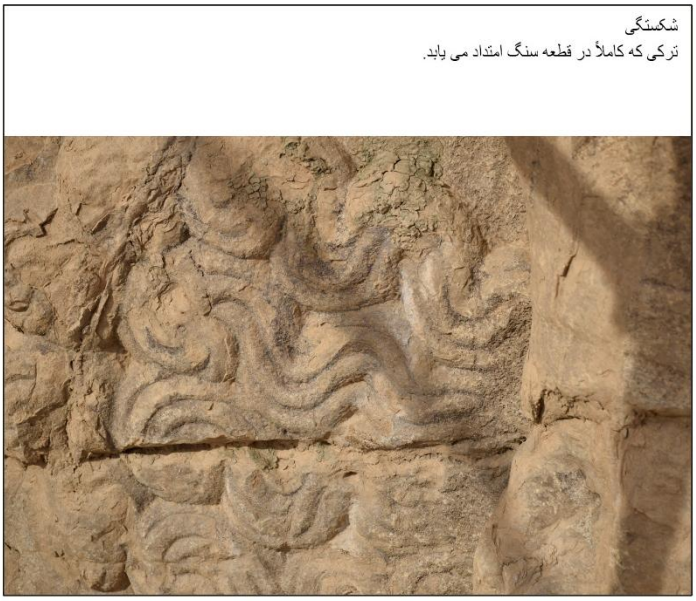






شکل ۱۲. مستندسازی «لایه‌لایه شدن» در نقش‌برجسته شاپور اول، در زمره آسیب‌های «جدایش» (شرح و عوامل ایجاد این آسیب در جدول ۲)







شکل ۱۳. مستندسازی «شکستگی» در نقش‌برجسته شاپور اول، در زمره آسیب‌های «ترک و تغییر شکل» (شرح و عوامل ایجاد این آسیب در جدول ۲)







شکل ۱۴. مستندسازی «گلسنگ» در نقش‌برجسته شاپور اول، در زمره آسیب «فعالیت‌های زیستی» (شرح و عوامل ایجاد این آسیب در جدول ۲)

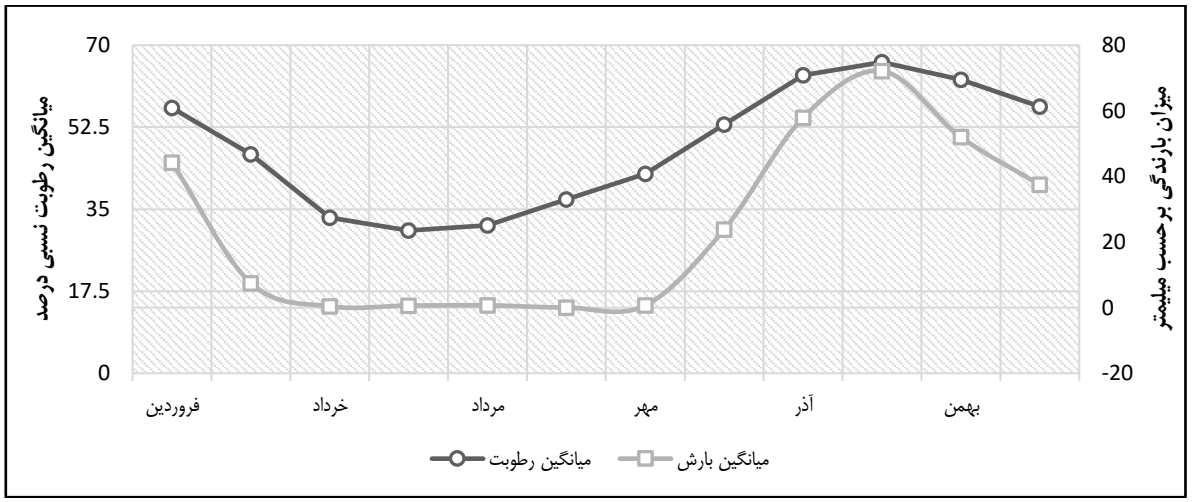
٤,٥. تحلیل مؤلفه‌های اقلیمی و تأثیر آن بر فرسایش نقش‌برجسته شاپور اول

داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک تخت‌جمشید به‌عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به محوطه نقش‌رستم، نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی منطقه نقش‌رستم با گرم و خشک بودن، نوسان قابل توجه دما، بارش فصلی، رطوبت متغیر و تبخیر بالا، زمینه مناسبی برای تداوم فرآیندهای هوازدگی و فرسایش سنگ فراهم می‌کند (**جدول ۵**). اثر این عوامل نه به‌صورت مستقل، بلکه در تعامل و توالی چرخه‌های رطوبتی، حرارتی و یخزدگی–ذوب قابل ارزیابی است.

جدول ۵. خلاصه داده‌های اقلیمی منطقه نقش‌رستم (ایستگاه سینوپتیک تخت‌جمشید دوره آماری ۱۳۵۲–۱۳۹۶)

جمع تعداد روزهای بارانی	۳۸ روز
حداکثر بارش روزانه	۲/۷۶ میلی‌متر
جمع تعداد روزهای یخبندان	۵۴ روز
میانگین حداقل دما	۹ درجه سانتی گراد
میانگین حداکثر دما	۶/۲۵ درجه سانتی‌گراد
میانگین دما	۱۷/۳ درجه سانتیگراد
میانگین رطوبت نسبی	۴۹ درصد
میانگین بارندگی سالانه	۳۰۲/۶ میلیمتر
میانگین ساعات آفتابی روزانه	۹/۴ ساعت
میانگین تبخیر روزانه	۵/۴ میلیمتر

آمار وضعیت بارش سالانه که از ایستگاه هواشناسی تخت‌جمشید استنتاج شده است، نشان می‌دهد که تعداد روزهای بارانی ۳۸ روز و بخش عمده بارش‌ها در ماه‌های سرد سال (در ماه‌های آذر، دی و بهمن) متمرکز است. (**شکل ۱۵**). در این دوره، رواناب حاصل از بارندگی در بخش‌های بالایی نقش‌برجسته و سطوح مجاور آن مشاهده می‌شود که می‌تواند با آب‌شستگی سطحی، نفوذ آب در ترک‌ها و ناپیوستگی‌ها و افزایش رطوبت سنگ همراه باشد. ازاین‌رو، اگرچه میزان سالانه بارش چندان زیاد نیست، شدت و تمرکز زمانی بارندگی و مسیر جریان آب بر روی سطوح سنگی اهمیت بیشتری دارد.

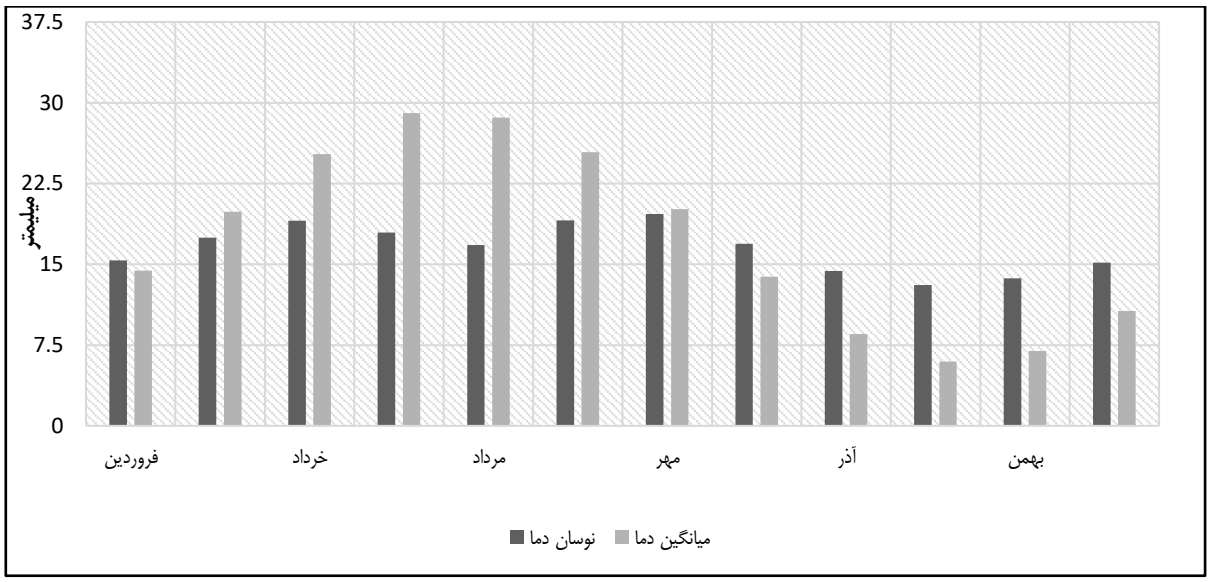


شکل ۱۵. نمودار بلندمدت رطوبت و بارش در ایستگاه سینوپتیک تخت‌جمشید، طی دوره آماری ۱۳۵۲–۱۳۹۶ (فدایی و حسینی، ۱۳۹۶)

نفوذ آب در منافذ و سپس خشک‌شدن آن، چرخه‌های متناوب خیس‌شدن–خشک‌شدن ایجاد می‌کند که در درازمدت می‌تواند به گسترش ریزترک‌ها و کاهش انسجام سطحی سنگ منجر شود. از سویی سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی در برابر تغییرات رطوبتی و حرارتی حساس‌اند. نفوذ آب به منافذ موجب تورم رس‌ها و ایجاد فشار در ساختار سنگ می‌شود. تکرار چرخه‌های تر و خشک می‌تواند به تشکیل و گسترش ترک‌ها و تشدید تخریب منجر شود. میزان این تورم به واکنش‌پذیری کانی‌های رسی و برهم‌کنش آن‌ها با سایر اجزای سنگ نیز وابسته است (Delgado Rodrigues, 2001; Veniale et al., 2001). تمرکز بارش‌ها در ماه‌های سرد سال، هم‌زمان با افزایش رطوبت نسبی هوا، شرایط مناسبی برای تداوم و تشدید فرآیندهای

هوازدگی شیمیایی فراهم می‌کند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزایش آلاینده‌های جوی، به‌ویژه در پی پدیده وارونگی دما (Temperature Inversion) در فصول سرد، در منطقه نقش‌رستم می‌تواند موجب افزایش غلظت گازهای فعال در مجاورت سطح سنگ شود. در چنین شرایطی، بارندگی و رطوبت با فراهم‌کردن محیط مناسب برای واکنش این گازها با سطح سنگ، فرآیند انحلال و تغییرات شیمیایی کانی‌های سطحی را تسهیل و تشدید می‌کنند (فدایی و دیگران، ۱۴۰۳). همچنین شرایط مرطوب زمستانی، در صورت نفوذ آب به منافذ سنگ، خطر آسیب ناشی از یخبندان را تشدید می‌کند.

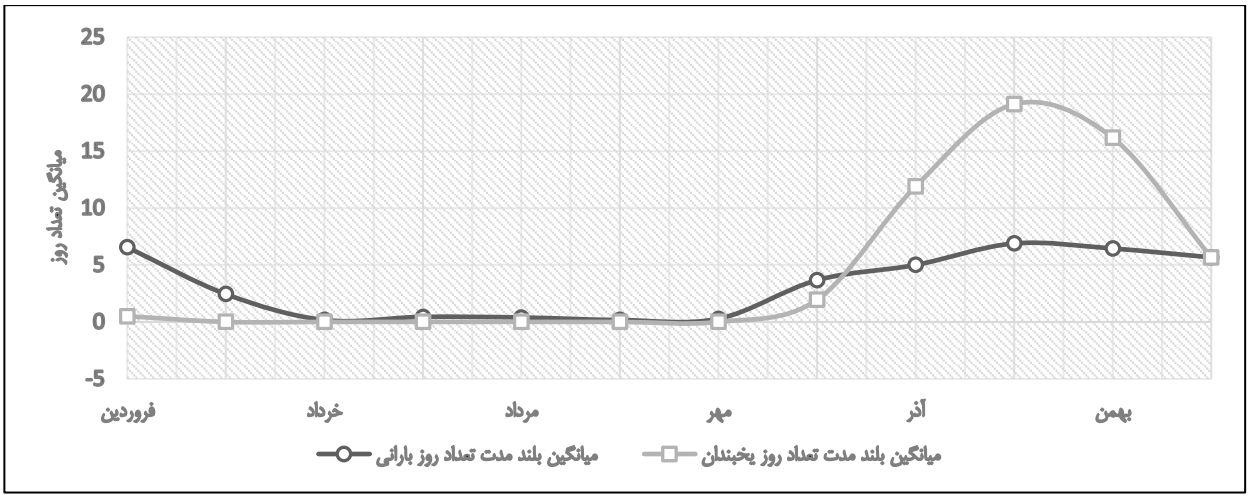
تغییرات دمایی نیز از عوامل مهم هوازدگی فیزیکی سنگ به شمار می‌رود. بر اساس داده‌های اقلیمی، سردترین ماه در طول دوره آماری دی‌ماه با میانگین دمای ۰/۵ -درجه سانتی‌گراد و گرم‌ترین ماه تیرماه با میانگین دمای ۳۸ درجه سانتی‌گراد است. بیشترین دامنه نوسان دمایی هوا در فصل تابستان مشاهده می‌شود و در برخی ماه‌ها به حدود ۱۹ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (**شکل ۱۶**). این نوسانات دمایی هوا می‌تواند، به‌ویژه در سطوح سنگی که مستقیماً در معرض تابش خورشید قرار دارند، با تغییرات دمای سطح سنگ همراه باشد و موجب گرم و سرد شدن متفاوت لایه‌های سطحی و بخش‌های داخلی سنگ شود. از آنجا که سنگ ساختاری ناهمگن دارد (Ündül et al., 2016) و ویژگی‌های حرارتی و سنگ‌شناسی آن در بخش‌های مختلف یکسان نیست، لذا تنش‌های حرارتی تکرار چرخه‌های انبساط و انقباض می‌تواند به ایجاد و گسترش ریزگسستگی‌ها و ترک، تضعیف پیوستگی و کاهش مقاومت سطحی و در نهایت پوسته‌شدن و جداشدگی ذرات سنگ منجر شود (Waqas et al., 2020; Weiss et al., 2004).



شکل ۱۶. نمودار بلند مدت نوسان دما و میانگین دما در ایستگاه سینوپتیک تخت‌جمشید طی دوره آماری ۱۳۵۲–۱۳۹۶ (فدایی و حسینی، ۱۳۹۶)

افزون‌براین، عموماً نوسانات دمایی در فرآیند تبلور نمک‌ها و ایجاد فشارهای ناشی از هیدراسیون نیز مؤثر است؛ به‌گونه‌ای که تغییرات دما می‌تواند بر میزان تبخیر، جابه‌جایی محلول‌های نمکی و تغییرات حجمی برخی نمک‌ها اثر گذاشته و روند تخریب سنگ را تشدید کند (Rodriguez-Navarro and Doehne, 1999; Ruedrich et al, 2007). تبخیر آب در سنگ می‌تواند موجب تغلیظ نمک‌های محلول در منافذ و سطح آن شود؛ در پی آن، تبلور مکرر نمک و فشار حاصل از آن، با ایجاد تنش‌های داخلی، به تدریج موجب تضعیف و تخریب ساختار سنگ می‌شود؛ ازاین‌رو، چرخه ورود آب، تبخیر و تبلور نمک را می‌توان از سازوکارهای بالقوه فرسایش آثار سنگی دانست (Buj and Gisbert, 2010; Coussy, 2006).

ثبت ۵۴ روز یخبندان، به‌ویژه تمرکز آن در ماه‌های سرد و هم‌زمانی با افزایش بارش و رطوبت، اهمیت چرخه یخزدگی–ذوب را افزایش می‌دهد. بر اساس داده های ایستگاه سینوپتیک تخت جمشید بیشترین تعداد روزهای یخبندان در دی‌ماه است که به طور میانگین برابر با ۱۹ روز در ماه است. این مسئله بسیار حائز اهمیت است چراکه در این ماه بیشترین بارش، تعداد روزهای بارانی و رطوبت نسبی مشاهده می‌شود (**شکل ۱۷**). آب نفوذکرده در منافذ و ریزترک‌ها در هنگام انجماد منبسط شده و با تکرار این چرخه می‌تواند موجب گسترش ناپیوستگی‌ها و جداشدگی ذرات و قطعات سطحی شود (Ruedrich et al., 2011; Bayram, 2012). در مجموع، چرخه‌های خیس‌شدن–خشک‌شدن، نوسانات حرارتی، تبخیر و تبلور نمک و یخزدگی–ذوب مهم‌ترین سازوکارهای اقلیمی مؤثر بر فرسایش نقش‌برجسته شاپور اول هستند؛ هرچند شدت اثرگذاری آن‌ها به تخلخل، ریزساختار، ترک‌ها و درزه‌های موجود و وضعیت پیشین آسیب سنگ نیز وابسته است.



شکل ۱۷. نمودار بلندمدت تعداد روز بارانی و تعداد روز یخبندان در ایستگاه سینوپتیک تخت‌جمشید طی دوره آماری ۱۳۵۲-۱۳۹۶(فدایی و حسینی، ۱۳۹۶)

٤,٦. عوامل درون‌ساختی سنگ

در تحلیل فرآیندهای فرسودگی نقش‌برجسته شاپور اول، بررسی عوامل اقلیمی به تنهایی برای تبیین الگوی تخریب کافی نیست، بلکه شناخت ویژگی‌های ذاتی سنگ بستر نیز اهمیت اساسی دارد. رفتار سنگ در برابر عوامل محیطی تا حد زیادی تابع خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و ریزساختاری آن است؛ به‌گونه‌ای که عواملی نظیر بافت، ترکیب کانی‌شناسی، میزان تخلخل، نوع و نحوه توزیع ریزشکستگی‌ها، مقاومت مکانیکی و ویژگی‌های سیمان بین‌دانه‌ای، میزان پایداری سنگ را در برابر فرآیندهای هوازدگی کنترل می‌کنند (Amoroso & Fassina, 1983; Moropoulou et al., 2003). ازاین‌رو، ارزیابی هم‌زمان عوامل بیرونی و درون‌ساختی، امکان شناخت دقیق‌تر سازوکارهای فرسودگی و تفسیر صحیح الگوی آسیب‌های مشاهده‌شده را فراهم می‌کند.

نتایج مطالعات پتروگرافی نشان داد که سنگ بستر نقش‌برجسته از نوع آهکی و عمدتاً متشکل از کلسیت است و در جریان فرآیندهای دیاژنزی، از جمله سیمانی‌شدن، میکرایتی‌شدن، فشردگی و ایجاد ریزشکستگی‌ها، تغییر یافته است. اگرچه سیمان کلسیتی موجب افزایش نسبی انسجام سنگ می‌شود، اما وجود ریزترک‌ها و ناپیوستگی‌های میکروسکوپی مسیر مناسبی برای نفوذ آب و انتقال محلول‌های شیمیایی فراهم کرده و حساسیت سنگ را در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن، یخزدگی و انحلال شیمیایی افزایش خواهد داد که در نهایت با بروز آسیب‌های قابل مشاهده در مقیاس ماکروسکوپی و ایجاد گسیختگی در ساختار سنگ همراه می‌شود (Liu et al., 2021). نتایج آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری نیز این وضعیت را تأیید می‌کند؛ به‌طوری‌که اشباع نمونه‌ها موجب کاهش حدود ۳۰ درصدی مقاومت فشاری نسبت به حالت خشک شده است. ورود آب به ریزتخلخل‌ها و شکستگی‌ها با کاهش انسجام داخلی، مقاومت سنگ را کاهش داده و آسیب‌پذیری آن را در برابر تنش‌های مکانیکی و هوازدگی افزایش می‌دهد.

آب با انتقال املاح، گسترش ترک‌ها و فراهم‌کردن شرایط تبلور نمک، فرآیند فرسایش را تشدید می‌کند. افزایش تخلخل و قابلیت جذب آب نیز در ماندگاری رطوبت و انتقال محلول‌های نمکی مؤثر است و می‌تواند سرعت تخریب را افزایش دهد. مطالعات کانی‌شناسی و شیمیایی نشان داد که سنگ تقریباً به‌طور کامل از کلسیت تشکیل شده است. خلوص بالای کلسیت، اگرچه موجب یکنواختی ترکیب سنگ می‌شود، آن را در برابر هوازدگی شیمیایی آسیب‌پذیر می‌کند. کلسیت در تماس با آب حاوی دی‌اکسیدکربن یا بارندگی‌های اسیدی به‌تدریج حل شده و در بلندمدت موجب افزایش تخلخل، گسترش منافذ، کاهش استحکام و ایجاد اشکال مختلف هوازدگی سطحی می‌شود (Amoroso & Fassina, 1983). شواهد میدانی در محوطه نقش رستم، از جمله وجود منافذ، حفرات انحلالی و مجاری خروج رطوبت در بدنه صخره و مجاورت نقش‌برجسته‌ها، نشان می‌دهد که آب از طریق شبکه ناپیوستگی‌های طبیعی در سنگ حرکت کرده و ضمن انحلال تدریجی کلسیت، مسیرهای جدیدی برای نفوذ ایجاد می‌کند. این فرآیند علاوه بر افزایش رطوبت، زمینه تمرکز تنش‌های مکانیکی و توسعه آسیب‌های فیزیکی را فراهم می‌سازد.

ترکیب شیمیایی بارندگی نیز می‌تواند سرعت این فرآیند را افزایش دهد. واکنش دی‌اکسیدکربن اتمسفر با آب باران موجب تشکیل اسید کربنیک ضعیف می‌شود و در مناطق صنعتی، اکسیدهای گوگرد و نیتروژن می‌توانند با کاهش pH بارندگی، هوازدگی سنگ‌های کربناته را تشدید کنند. در محوطه نقش رستم، مجاورت با مجتمع پتروشیمی مرودشت، فعالیت‌های صنعتی، تردد وسایل نقلیه، مصرف کودها و علف‌کش‌های شیمیایی در اراضی کشاورزی و سوزاندن بقایای مزارع از منابع مهم آلاینده به شمار می‌روند (فدایی، ۱۴۰۳). این آلاینده‌ها در کنار رطوبت و بارندگی، احتمال تشکیل بارش‌های اسیدی ضعیف و انحلال کلسیت را افزایش داده و می‌توانند در بلندمدت موجب کاهش مقاومت، گسترش ریزحفرات، تشدید فرسایش سطحی و افت کیفیت هنری نقش‌برجسته شوند. در مجموع، الگوی فرسودگی نقش‌برجسته شاپور اول حاصل برهم‌کنش ویژگی‌های ذاتی سنگ با

عوامل محیطی است. ترکیب تقریباً خالص کلسیتی، وجود ریزشکستگی‌ها، کاهش مقاومت در حضور رطوبت و حساسیت به انحلال شیمیایی، در کنار شرایط اقلیمی و منابع آلاینده منطقه، مجموعه‌ای از عوامل هم‌افزا را ایجاد کرده‌اند که روند هوازدگی و تخریب اثر را تسریع می‌کنند.

۵. طرح حفاظت اضطراری نقش‌برجسته شاپور اول

بر اساس نتایج مطالعات مستندنگاری، آسیب‌شناسی و بررسی عوامل مؤثر بر فرسودگی نقش‌برجسته شاپور اول، طرح حفاظت اضطراری با هدف کنترل و کاهش روند پیشرفت آسیب‌ها، تثبیت بخش‌های ناپایدار و پیشگیری از جداشدگی و ریزش بخش‌های اصیل نقش‌برجسته تدوین شد. مهم‌ترین ضرورت اجرای این طرح، وجود نواحی‌ای از نقش‌برجسته بود که در اثر کاهش انسجام سنگ، ایجاد ترک و ریزترک، تورق، فرسایش دانه‌ای، پودرشدگی و جداشدگی موضعی، در معرض خطر جدایی و ریزش قرار داشتند. ازاین‌رو، مداخلات اضطراری باید در درجه نخست بر تثبیت وضعیت موجود و کاهش مخاطرات فوری متمرکز باشد و از بازسازی بخش‌های از دست‌رفته یا مداخله غیرضروری در ماده تاریخی اجتناب شود. مبنای طرح، اصول حفاظت حداقلی، حفظ اصالت، سازگاری مصالح و قابلیت برگشت‌پذیری نسبی مداخلات خواهد بود؛ رویکردهایی که ریشه در مباحث نظری حفاظت و مرمت دارند. به‌ویژه آنکه در حوزه میراث فرهنگی، مفاهیم اصالت و حفاظت همواره در مرکز توجه نظریه‌ها و رویکردهای مرمتی قرار داشته‌اند (نظارتی‌زاده، ۱۴۰۳).

بر این اساس، بخش‌های فاقد ماده تاریخی یا قطعاتی که در گذشته از بین رفته‌اند، بازسازی نخواهند شد و تنها در مواردی که پرکردن یک کمبود یا حفره برای تأمین پایداری، جلوگیری از نفوذ آب یا حفاظت از لبه‌های تاریخی ضرورت داشته باشد، مداخله محدود و حفاظتی پیش‌بینی خواهد شد. بنابراین برنامه مداخله شامل مراحل زیر خواهد بود: پاکسازی کنترل‌شده سطوح آسیب‌دیده و محل مداخلات، تثبیت و استحکام‌بخشی نواحی سست و هوازده، اتصال مجدد لایه‌های نیمه‌جداشده، تثبیت ترک‌ها و شکستگی‌های مؤثر بر پایداری و پرکردن محدود حفرات و کمبودهای ضروری.

انتخاب مصالح مورد استفاده در عملیات حفاظت و مرمت باید با توجه به ویژگی‌های سنگ آهکی نقش‌برجسته و بر مبنای سازگاری فیزیکی و شیمیایی، نفوذپذیری مناسب، امکان تبادل بخار آب، دوام در شرایط محیطی و اصل حداقل مداخله انجام شود. با توجه به این ملاحظات، استفاده از ملاط‌های پایه آهک هیدرولیک فرآوری‌شده موسوم به «لِدان» پیشنهاد می‌شود؛ این مصالح پیش‌تر نیز در پروژه‌های متعدد حفاظتی و مرمت در محوطه‌های پاسارگاد و تخت جمشید به کار رفته و تجربه استفاده از آن در حفاظت از آثار سنگی منطقه وجود دارد (فدایی و پروسپری‌پورتا، ۱۴۰۳؛ رخشنده‌خو و دیگران، ۱۴۰۲). لِدان در گونه‌های مختلفی از جمله C30، MTX، TA1 و غیره تولید می‌شود و متناسب با میزان سختی، رنگ و بافت مورد نظر می‌توان آن را با پرکننده‌هایی نظیر پوزولان، پودر سنگ ، ماسه نرم و پودر آجر ترکیب کرد. از مهم‌ترین مزایای این ترکیبات، امکان تنظیم ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ملاط متناسب با شرایط بستر است. این ملاط‌ها به منظور پرکردن و تثبیت ترک‌ها استفاده می‌شوند و همچنین قابلیت تزریق در فضای پشت بخش‌های شکسته و جداشده از بستر سنگ را دارند. هدف از تزریق برقراری پیوند شیمیایی و مکانیکی میان دو سطح ترک است به گونه‌ای که تا حد امکان یکپارچگی و استحکام ساختاری سنگ تقویت شود (Vintzileou, 2006).

برای تثبیت و اتصال مجدد لایه‌های نیمه‌جداشده در نقش برجسته شاپور اول، استفاده از ملاط تزریقی آهکی هیدرولیک طبیعی Ledan TA1 پیشنهاد می‌شود که پس از اختلاط با آب قابلیت تزریق در ترک‌ها، حفرات و فضاهای خالی را خواهد داشت. این ملاط تزریقی با پایه کلسیمی و قابلیت روان‌شوندگی مناسب، برای تحکیم عمقی ترک‌هایی با حداکثر عرض ۵ میلی‌متر به کار می‌رود. همچنین به منظور تثبیت و استحکام‌بخشی در نواحی دارای ریزترک و لایه‌لایه‌شدگی سطحی نیز می‌توان از رزین میکرواکریل (Microacril CV40) با غلظت حدود ۵ تا ۱۰ درصد، استفاده کرد. این رزین یک میکروامولسیون اکریلیک در آب است که به‌عنوان ماده تثبیت‌کننده برای مصالح معدنی متخلخل و جاذب به کار می‌رود. اندازه کوچک ذرات این محصول، امکان نفوذ مناسب آن در بسترهای متخلخل و تثبیت لایه‌های سطحیِ پودرشونده را فراهم می‌کند (I.M.A.R. Italia, n.d.).

لدان C30 ماده‌ای بر پایه کائولین و آهک سفید خالص است و در فرایند ساخت با افزودن پوزولان، مواد روان‌ساز و تثبیت‌کننده، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن بهبود می‌یابد. برای پرکردن شکستگی‌ها، حفرات و کمبودهای موضعی، استفاده از Ledan C30 و Ledan MTX به همراه پرکننده‌های معدنی سازگار با بستر اثر پیشنهاد می‌شود (فدایی و ناصری، ۱۴۰۱). پودر سنگ سفید مجدآباد و ماسه سیوند می‌توانند به‌عنوان پرکننده در ترکیب ملاط مورد استفاده قرار گیرند و نسبت اختلاط پرکننده به آهک هیدرولیک، پس از انجام آزمایش‌های مقدماتی از نظر رنگ، بافت، مقاومت و قابلیت اجرا، تعیین شود. در صورت نیاز به افزایش انسجام ملاط در شکستگی‌های عمیق، افزودن حدود ۵ درصد رزین میکرواکریل به آب اختلاط نیز قابل بررسی خواهد بود.

در طراحی ملاط‌های مرمتی، استفاده از پرکننده‌های معدنی سازگار از جمله پودر سنگ سفید مجدآباد و ماسه سیوند پیش‌بینی می‌شود تا ویژگی‌های رنگی، بافتی و فیزیکی ملاط به سنگ بستر نزدیک شود. نسبت و ترکیب نهایی ملاط باید پیش از اجرا از طریق آزمون‌های مقدماتی از نظر رنگ، بافت، مقاومت و قابلیت اجرا تعیین شود. پیش از اجرای ملاط‌گذاری، آماده‌سازی دقیق سطوح آسیب‌دیده، حذف رسوبات و ذرات سست و پاک‌سازی پوشش‌های زیستی ضروری خواهد بود. اجرای ملاط باید به‌صورت موضعی و با ابزار دستی انجام شود و پرداخت نهایی آن به‌گونه‌ای باشد که ضمن حفظ خوانایی نقش، از ایجاد تفاوت محسوس با سنگ تاریخی پیرامون جلوگیری شود. همچنین پس از اجرا، شرایط عمل‌آوری ملاط باید تحت کنترل

قرار گیرد تا از خشک‌شدن سریع، جمع‌شدگی و ایجاد ترک‌های ثانویه جلوگیری شود. **جدول ۶** ارتباط میان گروه‌های اصلی آسیب شناسایی‌شده، اولویت حفاظتی و شیوه مداخله پیشنهادی برای هر یک را نشان می‌دهد. در مجموع، طرح حفاظت اضطراری باید به‌عنوان مداخله‌ای محدود و هدفمند، صرفاً با هدف تثبیت ماده تاریخی، کمک به خوانایی اثر، جلوگیری از ریزش قطعات اصیل و کاهش سرعت فرسودگی اجرا شود و از هرگونه بازسازی شکلی یا تکمیل بخش‌های ازدست‌رفته پرهیز گردد. اجرای طرح می‌تواند پس از تصویب مستندات فنی، نقشه‌های آسیب‌نگاری و جزئیات مداخلات در مرجع فنی ذی‌صلاح انجام شود و تهیه مستندات کامل از اقدامات، برای پایش و برنامه‌ریزی حفاظت بلندمدت نقش برجسته ضروری خواهد بود.

جدول ۶. راهبردها در طرح حفاظت اضطراری نقش‌برجسته شاپور اول

گروه آسیب	راهبرد حفاظت و درمان پیشنهادی در طرح حفاظت اضطراری
تغییر رنگ و رسوب	در مورد پوسته‌بستن، با توجه به فعال نبودن این آسیب اولویت با حفظ شرایط موجود و جلوگیری از تشدید آسیب خواهد بود. در نواحی مرطوب نیز ابتدا عامل ایجاد رطوبت شناسایی و حذف یا کنترل شود و از مداخله مستقیم بر سطح تا رفع عامل آسیب‌رسان اجتناب گردد. در نواحی دارای رسوب فعال، هرگونه پاکسازی باید پس از بررسی میزان چسبندگی رسوب و تأثیر احتمالی آن بر سطح تاریخی سنگ صورت گیرد. در مورد آلودگی‌های قابل حذف، پاکسازی باید به‌صورت کنترل‌شده و با روش‌های کم‌خطر، از جمله استفاده از آب مقطر و الکل انجام شود.
از دست رفتن مواد	در بخش‌های مفقود و کمبودهای موضعی، اصل بر عدم بازسازی و تکمیل فرم ازدست‌رفته خواهد بود. تنها در مواردی که وجود حفره، شکستگی یا کمبود موجب ناپایداری، تسهیل نفوذ آب یا تشدید فرسایش شود، پرکردن حفاظتی با ملاط آهکی سازگار و پس از بررسی شرایط محل پیشنهاد می‌شود. برای این منظور می‌توان از Ledan C30 و Ledan MTX همراه با پرکننده‌های معدنی سازگار استفاده کرد. در فرسایش‌های نامنظم نیز مداخله صرفاً در بخش‌هایی انجام شود که تثبیت آن برای حفاظت از ماده تاریخی ضرورت داشته باشد و از بازسازی سطح یا فرم اصلی پرهیز شود.
جدایش	در لایه‌لایه‌شدن و تورق، هدف اصلی اتصال مجدد و تثبیت لایه‌های ناپایدار و جلوگیری از جداشدگی بیشتر خواهد بود و استفاده از رزین میکرواکریل پیشنهاد می‌شود. برای فضاهای خالی و گسستگی‌های پشت لایه‌ها، تزریق ملاط آهکی نفوذپذیر، به‌ویژه استفاده از ملاط Ledan TA1 پیشنهاد می‌شود. در موارد تکه‌تکه‌شدگی و قطعات نیمه‌جداشده نیز با توجه به میزان و عمق فضای خالی، ترکیبی از تزریق میکرواکریل و ملاط تزریقی TA1 برای تثبیت و اتصال مجدد قطعات پیشنهاد می‌شود.
ترک و تغییر شکل	در شکستگی‌ها، شکافتگی‌ها و ترک‌ها، ابتدا باید میزان فعال‌بودن، عمق و تأثیر آن‌ها بر پایداری نقش‌برجسته ارزیابی شود. سپس ترک‌ها و شکستگی‌های مؤثر بر پایداری با ملاط‌های آهکی سازگار و دانه‌بندی متناسب با عمق و ابعاد آسیب تثبیت و پر شوند. در شکستگی‌ها و شکافتگی استفاده از ملاط با دانه‌بندی درشت‌تر در بخش داخلی و ملاط ریزدانه‌تر در قسمت نزدیک به سطح پیشنهاد می‌شود؛ برای ترک‌ها نیز ملاط با دانه‌بندی ریز به کار رود. هدف از این مداخلات، تثبیت قطعات اصیل، کاهش مسیر نفوذ آب و جلوگیری از گسترش شکستگی‌ها خواهد بود، نه بازسازی شکل ازدست‌رفته.
فعالیت‌های زیستی	در مورد گلسنگ‌ها، پس از ارزیابی شرایط سطح، پاک‌سازی کنترل‌شده پوشش زیستی با استفاده از ابزار مکانیکی (ترجیحاً چوبی) پیشنهاد می‌شود؛ عملیات باید به‌گونه‌ای انجام گیرد که به سطح تاریخی سنگ آسیب وارد نکند. همچنین به منظور ممانعت از پراکنده شدن گلسنگ‌های جداشده در محیط از ابزار مکشی (جاروبرقی کوچک) به هنگام پاکسازی استفاده شود. در مورد گیاهان، ابتدا حذف فیزیکی گیاه و سپس پاکسازی و پرکردن حفره یا فضای ایجادشده در محل رشد، پیش‌بینی می‌شود. پس از حذف پوشش زیستی، پایش دوره‌ای برای جلوگیری از رویش مجدد ضروری خواهد بود.

٦. نتیجه‌گیری

نقش‌برجسته شاپور اول در نقش‌رستم، به دلیل قرارگیری در فضای باز و مواجهه مستقیم با عوامل محیطی، طی قرن‌ها تحت تأثیر فرآیندهای پیچیده هوازدگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی قرار گرفته است. نتایج پژوهش نشان داد که الگوی فرسودگی اثر حاصل عملکرد یک عامل منفرد نیست، بلکه از برهم‌کنش شرایط اقلیمی، ویژگی‌های ذاتی سنگ و عوامل انسان‌زاد شکل گرفته است. تمرکز بارندگی در فصل سرد، وقوع دوره‌های یخبندان، نوسانات دمایی و تغییرات رطوبت نسبی از مهم‌ترین عوامل طبیعی مؤثر در تشدید هوازدگی هستند. به‌ویژه، هم‌زمانی بارندگی‌های زمستانه با افت دما تا زیر صفر، شرایط مناسبی برای تکرار چرخه‌های یخزدگی و ذوب در منافذ و ریزترک‌های سنگ فراهم می‌کند و می‌تواند در توسعه شکستگی‌ها، تورق و کاهش مقاومت مکانیکی سنگ نقش داشته باشد (Benavente et al., 2008). همچنین، قرارگیری نقش‌برجسته در بخش غربی صخره و مسیر رواناب‌های ناشی از بارندگی، احتمال تمرکز جریان آب و افزایش زمان تماس رطوبت با سطح سنگ را افزایش می‌دهد.

مطالعات سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و شیمیایی نشان داد که سنگ بستر نقش‌برجسته یک سنگ آهکی با ترکیب غالب کلسیتی است. وجود ریزشکستگی‌های دیاژنزی و کاهش حدود ۲۹٫۵ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌ها در حالت اشباع، حساسیت سنگ به نفوذ رطوبت و نقش آب در کاهش مقاومت مکانیکی آن را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، مجاورت محوطه با منابع بالقوه آلاینده، از جمله فعالیت‌های صنعتی، محورهای ارتباطی و اراضی کشاورزی، می‌تواند در تشدید فرآیندهای هوازدگی شیمیایی و تغییرات اسیدیته بارش‌ها مؤثر باشد (فدایی و دیگران، ۱۴۰۳؛ فدایی، ۱۴۰۳). مستندسازی رقومی با استفاده از اسکن لیزری زمینی و فتوگرامتری دیجیتال، امکان تهیه مدل‌های دقیق، تصاویر تخت و نقشه‌های آسیب را فراهم کرد و زمینه مناسبی برای شناسایی و طبقه‌بندی آسیب‌ها بر اساس استانداردهای کمیته سنگ ایکوموس به وجود آورد. این مستندات علاوه بر پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های حفاظتی، می‌تواند برای پایش تغییرات و ارزیابی روند فرسودگی در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

بر اساس نتایج آسیب‌شناسی، برنامه حفاظت اضطراری با تأکید بر حداقل مداخله و حفظ اصالت اثر تدوین شد. این برنامه بر تثبیت نواحی ناپایدار، استحکام‌بخشی بخش‌های سست و کنترل عوامل مؤثر بر گسترش آسیب متمرکز است و در آن از بازسازی بخش‌های ازدست‌رفته پرهیز شده است. استفاده از آهک‌های هیدرولیک طبیعی (Ledan) در عملیات تزریق و ملاط‌گذاری و به‌کارگیری رزین میکرواکریل در تثبیت ریزترک‌ها و لایه‌های در حال تورق، در چارچوب مداخلات هدفمند، به افزایش انسجام بخش‌های آسیب‌دیده کمک خواهد نمود. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که حفاظت مؤثر از آثار سنگی در فضای باز مستلزم شناخت هم‌زمان ویژگی‌های سنگ، شرایط محیطی و الگوی آسیب‌هاست و تلفیق مطالعات آزمایشگاهی، مستندسازی رقومی، آسیب‌نگاری و مداخلات حفاظتی هدفمند می‌تواند مبنایی علمی برای کنترل مخاطرات، پایش بلندمدت و مدیریت حفاظتی اثر فراهم سازد.

سپاسگزاری

نگارندگان از آقایان ضیاء دیلمی‌پور، بنیامین احمدی و علی اقرء بابت همکاری در عملیات نقشه‌برداری و تهیه مستندات فتوگرامتری نقش‌برجسته شاپور اول، و از آقای سید ایرج بهشتی بابت انجام مطالعات پتروگرافی نمونه‌های سنگ صمیمانه قدردانی می‌کنند. همچنین، از خانم زهره‌سادات حسینی برای همکاری در زمینه آمار اقلیمی منطقه و از آقایان محمد زارع (حافظ) و علیرضا برومندی برای همکاری در برپایی کارگاه اجرایی و فراهم‌سازی دسترسی ایمن به نقش‌برجسته به‌منظور انجام مستندسازی و آسیب‌نگاری، سپاسگزاری می‌شود.

حمایت مالی

این پژوهش در قالب برنامه حفاظت و مرمت نقش‌برجسته شاپور اول در پایگاه میراث جهانی تخت جمشید انجام شده و هزینه‌های اجرای عملیات مطالعه و آسیب‌نگاری اثر در سال ۱۴۰۰ توسط پایگاه میراث جهانی تخت جمشید تأمین شده است. همچنین، مستندسازی رقومی محوطه نقش رستم طی سال‌های ۱۳۹۶–۱۳۹۷ با حمایت مالی همین پایگاه، توسط شرکت فرانگار پیمایش و با همکاری فنی شرکت Ingenieurbüro GILAN اجرا شده است.

تعارض منافع

این مقاله فاقد هرگونه تعارض منافع است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش با درخواست مخاطبان از نویسنده مسئول قابل دریافت است.

منابع

پروین، حسین. (۱۳۷۵). *سنگ‌شناسی رسوبی*. دانشگاه پیام نور.

دریایی، تورج. (۱۳۸۳). *شاهنشاهی ساسانی* (مرتضی ثاقب‌فر، مترجم؛ چاپ اول). تهران: انتشارات ققنوس.

رخشنده‌خو، مصطفی؛ فدایی، حمید؛ انصاری، مسعود؛ و رضوی، لیلا. (۱۴۰۲). طرح مطالعه، مستندسازی، حفاظت و مرمت نقش‌برجسته ساسانی بهرام دوم در نقش‌رستم. *دانش حفاظت و مرمت*، ۶(۱)، ۲–۲۵. http://journal.richt.ir/kcr/article-1-77-fa.html .

سامی، علی. (۱۳۸۹). *تمدن ساسانی* (جلدهای ۱ و ۲). مؤسسه فرهنگی انتشاراتی پازینه.

شاپورشهبازی، علیرضا. (۱۳۹۳). *راهنمای مستند نقش‌رستم*. سفیران.

شاپورشهبازی، علیرضا. (۱۳۵۷). *شرح مصور نقش‌رستم*. بنیاد تحقیقات هخامنشی.

فدایی، حمید. (۱۴۰۳). مهم‌ترین آلاینده‌های هوا و منابع آن در فرسایش مصالح سنگی در محوطه‌های میراث فرهنگی دشت مرودشت. *دانش حفاظت و مرمت*، ۷(۴)، ۱۹–۴۵. http://journal.richt.ir/kcr/article-1-229-fa.html .

فدایی، حمید؛ و حسینی، سیده زهره. (۱۳۹۶). *گزارش طرح پژوهشی پایش و آسیب‌شناسی تخریب آثار صخره‌ای و تدوین سند راهبردی حفاظت: نقوش برجسته صخره‌ای و سنگ‌نبشته‌ها در محوطه نقش‌رستم فارس، نقوش برجسته صخره‌ای و سنگ‌نبشته‌ها در محوطه نقش‌رجب، نقوش صخره‌ای تخت‌جمشید، سنگ‌نبشته چشمه عبدالله مرودشت، سنگ‌نبشته تنگ‌خشک و سنگ‌نبشته‌های حاجی‌آباد نقش‌رستم* (گزارش پژوهشی منتشرنشده). پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری.

فدایی، حمید؛ امامی، سیدمحمدامین؛ کریمی‌جشنی، ایوب؛ و اسماعیل‌زاده، امیر. (۱۴۰۳). شناسایی و اندازه‌گیری آلاینده‌های هوا در محوطه تاریخی نقش‌رستم فارس. *پژوهه باستان‌سنجی*، ۱۰ (۲)، ۱۶۳–۱۸۶. https://doi.org/10.61882/jra.10.2.421

فدایی، حمید؛ پروسپری پورتا، کلودیو؛ و ماریا فازیو، جوزپا. (۱۴۰۳). همکاری مشترک هیئت ایران–ایتالیا در زمینه مطالعه و حفاظت از محوطه میراث جهانی پاسارگاد (طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ خورشیدی). در رسول وطن‌دوست (ویراستار)، *درباره مرمت، جلد ۲: نوشته‌هایی درباره پژوهش و اجرا در حفاظت و مرمت میراث فرهنگی* (صص. ۳۶۸–۳۹۹). انتشارات دادکین.

فدایی، حمید؛ و ناصری، فردین. (۱۴۰۱). حفاظت و مرمت پایه‌ستون هخامنشی متعلق به کاخ صدستون در محوطه میراث جهانی تخت‌جمشید. *دانش حفاظت و مرمت*، ۵(۱)، ۱۳–۳۴. http://journal.richt.ir/kcr/article-1-109-fa.html .

گریشمن، رومن. (۱۳۵۰). *هنر ایران در دوران پارتی و ساسانی* (بهرام فره‌وشی، مترجم). بنگاه ترجمه و نشر کتاب.

لوکونین، ولادیمیر گریگوریویچ. (۱۳۵۰). *تمدن ایران ساسانی*. بنگاه ترجمه و نشر کتاب.

نظارتی‌زاده، منصوره. (۱۴۰۳). بازشناخت اصالت و حفاظت از منظر حکمت فلسفه ایران باستان (آئین زرتشت). *میراث جنوب غربی آسیا*. (e2).۱(۲)، e2 . https://doi.org/10.22034/hsaj.2025.549404.1006

نیبور، کارستن. (۱۳۵۴). *سفرنامه‌ی کارستن نیبور* (پرویز رجبی، مترجم). تهران: توکا.

هینتس، والتر. (۱۳۸۵). *یافته‌های تازه از ایران باستان* (رویز رجبی، مترجم). ققنوس.

ورگس بلمین، ورونیک (سر ویراستار). (۱۳۹۰). *فرهنگ مصور الگوهای تخریب سنگ: کمیته علمی بین‌المللی سنگ ایکوموس* (غلامرضا وطنخواه و مهدی رازانی، مترجمان). سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی.

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

Back, M. (1978). Die sassanidischen Staatsinschriften: Studien zur Orthographie und Phonologie des Mittelpersischen der Inschriften zusammen mit einem etymologischen Index des mittelpersischen Wortgutes und einem Textcorpus der behandelten Inschriften. E. J. Brill.

Bayram, F. (2012). Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze–thaw in cold regions. *Cold Regions Science and Technology, 83–84*, 98–102.

Benavente, D., Cultrone, G., & Gómez-Heras, M. (2008). The combined influence of mineralogical, hygric, and thermal properties on the durability of porous building stones. *European Journal of Mineralogy*, 673–685.

Buj, O., & Gisbert, J. (2010). Influence of pore morphology on the durability of sedimentary building stones from Aragon (Spain) subjected to standard salt decay tests. *Environmental Earth Sciences, 61*(7), 1327–1336.

Coussy, O. (2006). Deformation and stress from in-pore drying-induced crystallization of salt. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 54*, 1517–1547.

Delgado Rodrigues, J. (2001). Swelling behaviour of stones and its interest in conservation: An appraisal. *Materiales de Construcción*, 183–195.

Fitzner, B. (2014). Diagnosis of Weathering Damage on Stone Monuments. Macla 18: Workshop Mineralogía Aplicada. Sevilla: Universidad de Sevilla, 21-28.

Herzfeld, E. (1926). Reisebericht. *Zeitschrift der Deutschen Morgenländischen Gesellschaft, 80*(4), 225–284.

Herzfeld, E. (1941). *Iran in the ancient East*. Oxford University Press.

Huyse, P. (1999). Die dreisprachige Inschrift Šābuhrs I. an der Kaʿba-i Zardušt (ŠKZ) (Vols. 1–2). School of Oriental and African Studies.

I.M.A.R. Italia. (n.d.). Microacril CV 40: Consolidante per materiali minerali da costruzione [Technical data sheet]. https://www.chemspecsrl.com/restauro-monumentale

ICOMOS - ISCS (2008). Illustrated glossary on stone deterioration patterns. Paris: ICOMOS-ISCS. Pdf format available in the ICMOS website a form the date 08.10.30 at: http://www.international.icomos.org/publications/stoneglossary.pdf.

Ker Porter, R. (1822). *Travels in Georgia, Persia, Armenia, ancient Babylonia, &c. &c.: During the years 1817, 1818, 1819, and 1820* (Vol. 2). Longman, Hurst, Rees, Orme, and Brown.

Liu, G., Chen, Y., Du, X., Xiao, P., Liao, S., & Azzam, R. (2021). Investigation of microcrack propagation and energy evolution in brittle rocks based on the Voronoi model. *Materials, 14*(9), 2108.

McDermot, B. C. (1954). Roman emperors in the Sassanian reliefs of Shapur I. *The Journal of Roman Studies, 44*, 76–80.

Moropoulou, A., Kouloumbi, N., Haralampopoulos, G., Konstanti, A., & Michailidis, P. (2003). Criteria and methodology for the evaluation of conservation interventions on treated porous stone susceptible to salt decay. *Progress in Organic Coatings, 48*, 259–270.

Rodriguez-Navarro, C., & Doehne, E. (1999). Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms, 24*, 191–209.

Ruedrich, J., Kirchner, D., & Siegesmund, S. (2011). Physical weathering of building stones induced by freeze-thaw action: A laboratory long-term study. *Environmental Earth Sciences, 63*, 1573–1586.

Ruedrich, J., Seidel, M., Rothert, E., & Siegesmund, S. (2007). Length changes of sandstones caused by salt crystallisation. In R. Prikryl & B. J. Smith (Eds.), *Building stone decay: From diagnosis to conservation* (Geological Society, London, Special Publications, 271, pp. 199–209).

Saba, M., Quiñones-Bolaños, E. E., Barbosa López, A. L. (2018). A review of the mathematical models used for simulation of calcareous stone deterioration in historical buildings. Atmospheric Environment, 180, 156. Doi: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.02.043.

Sarre, F., & Herzfeld, E. (1910). *Iranische Felsreliefs*.

Shapur Shahbazi, A. (1986). Shapur I. In E. Yarshater (Ed.), Encyclopaedia Iranica (Vol. IV, Fasc. 6, pp. 514–522). Routledge & Kegan Paul.

Sprengling, M. (1953). *Third century Iran: Sapor and Kartir*.

Ündül, Ö., Aysal, N., & Çobanoğlu, B. C. (2016). Strength, deformation and cracking characteristics of limestones. In H. Gercek, R. Ulusay, M. A. Hindistan, E. Tuncay, & Ö. Aydan (Eds.), *Rock mechanics and rock engineering: From the past to the future* (pp. 181–186). CRC Press/Balkema.

Veniale, F., Setti, M., Rodriguez-Navarro, C., & Lodola, S. (2001). Procesos de alteración asociados al contenido de minerales arcillosos en materiales pétreos (Role of clay constituents in stone decay processes). *Materiales de Construcción*, 163–182.

Vintzileou, E. (2006). Grouting of three-leaf stone masonry: Types of grouts, mechanical properties of masonry before and after grouting. In *Structural analysis of historical constructions* (pp. 41–58). New Delhi.

Waqas, U., Ahmed, M. F., & Arshad, M. (2020). Classification of intact carbonate and silicate rocks based on their degree of thermal cracking using discriminant analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79*, 2607–2619.

Weiss, T., Siegesmund, S., Kirchner, D., & Sippel, J. (2004). Insolation weathering and hygric dilatation: Two competitive factors in stone degradation. *Environmental Geology, 46*, 402–413.

فدایی، حمید، رخشنده‌خو، مصطفی، انصاری، مسعود، رضوی، لیلا (۱۴۰۵). مستندسازی و آسیب‌شناسی نقش‌برجسته شاپور اول در نقش‌رستم و ارایه راهبردهای حفاظت اضطراری. میراث جنوب غربی آسیا، ۳(۲)، کد۱.

https://doi.org/10.22034/hsa.2026.600166.1060