

شناسایی ساختار شیمیایی و ارزیابی الگوهای تخریب در سنگ‌های محوطه

میراث جهانی پاسارگاد*

عاطفه شکفته** حسین احمدی*** مهدی یزدی****

چکیده

سنگ‌های به کار رفته در مجموعه میراث جهانی پاسارگاد در ظاهر به لحاظ بافت و رنگ متفاوت هستند که از نظر بافت شامل سه نوع سنگ متفاوت می‌شوند. به همین دلیل، ممکن است دارای رفتارهای متفاوت فیزیکی و شیمیایی نیز باشند. تخریب‌های سطحی صورت گرفته در این سنگ‌ها با وجود شرایط یکسان محیطی، شکل‌های متفاوتی دارند. هدف از این تحقیق تشخیص ماهیت شیمیایی سنگ‌های این محوطه از طریق آنالیزهای دستگاهی XRD و XRF و شناسایی تخریب‌های سطحی و نمک‌های احتمالی سطحی از طریق مشاهدات ریزساختاری توسط میکروسکوپ دیجیتال و آنالیز دستگاهی SEM-EDS است. نتایج، حاکی از آن هستند که سنگ‌های به کار رفته در مجموعه از نظر شیمیایی همگی نوعی سنگ آهک هستند که دو گونه آن خلوص بالاتر و ساختار فشرده‌تری دارند، اما یک گونه از سنگ‌های مجموعه که معروف به «سنگ کیود» است، ساختار ماسه‌ای و نسبتاً متخلخل دارد. در آنالیز دستگاهی XRD فاز اصلی تمامی سنگ‌ها کلسیت (CaCO_3) است که علاوه بر آن، مقدار جزئی فاز کوارتز (SiO_2) نیز گزارش شده است. در برخی از نمونه‌های سنگ کرم‌رنگ برداشت شده از بلوک‌های متفاوت، فاز دولومیت ($\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$) نیز شناسایی شده است. بر طبق تصاویر ماکروسکوپی و ریزساختاری می‌توان گفت که عمده تخریب‌های صورت گرفته در سنگ‌های سیاه و کیود به علل ضعف ماهیتی خود سنگ بوده که از جمله آن رگه‌های کلسیت ثانویه و ذرات متشکله متفاوت است و مهم‌ترین علت تخریبی سنگ کرم نیز فرسودگی زیستی است. نتایج حاصل از مشاهدات و آزمایش‌ها ثابت کردند که مهم‌ترین عوامل محیطی مخرب در محوطه میراث جهانی پاسارگاد میکروارگانیزم‌ها و اثرات جانبی آب به واسطه انحلال فاز کربناتی و نیز تورم رسی است.

کلیدواژه‌ها: محوطه میراث جهانی پاسارگاد، سنگ آهک، تخریب سنگ، انحلال، فرسودگی زیستی

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری عاطفه شکفته در رشته مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، با عنوان «روش‌شناسی استحکام‌بخشی سنگ‌های کربناته به کار رفته در محوطه تاریخی پاسارگاد» به راهنمایی دکتر حسین احمدی و دکتر مهدی یزدی در دانشگاه هنر اصفهان است.

** دانشجوی دکتری مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان. (نویسنده مسئول) shekofte.as@gmail.com

h.ahmadi@au.ac.ir

m.yazdi@sci.ui.ac.ir

*** دانشیار، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.

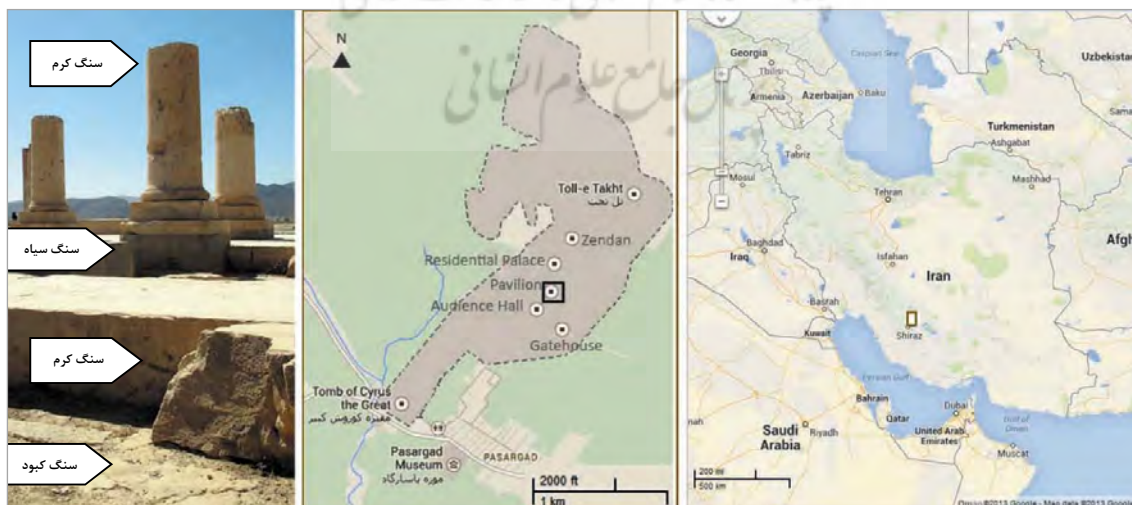
**** استاد، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان.

مقدمه

بخش اعظمی از آثار تاریخی را آثار سنگی تشکیل داده‌اند که شامل تک بناها یا محوطه‌های باستانی هستند. در ایران نیز محوطه‌های سنگی ارزشمندی وجود دارند. سنگ‌های استفاده‌شده در این مجموعه‌ها از لحاظ ماهیت شیمیایی تا حدودی ناشناخته‌اند و همچنین نوع تخریب و عوامل مخرب آنها تقریباً نامشخص هستند و مطالعات محدودی بر روی این آثار انجام شده است. در راستای حفاظت از این آثار تاریخی اقدامات گوناگونی از جمله شناسایی ماهیت فیزیکی و شیمیایی سنگ، شناسایی تخریب و شناسایی عوامل مخرب دخیل در آن مفید خواهد بود که تحقیقاتی از این دست، در زمره «مطالعات مقدماتی» جهت حفاظت آثار قرار می‌گیرند. آثار سنگی موجود در محوطه تاریخی پاسارگاد باقیمانده از دوره هخامنشیان شامل آرامگاه کوروش، کاخ دروازه، کاخ بارعام، کاخ اختصاصی، مقبره کمبوجیه (زندان سلیمان) و تل تخت هستند. نقش انسان بالدار در کاخ دروازه و نقوش درگاه‌های جنوب شرقی و شمال غربی در کاخ بارعام به لحاظ طرح و نقش از اهمیت زیادی برخوردار هستند (شهبازی، ۱۳۷۹: ۵۶-۴۸). سنگ‌های به کار رفته در آثار معماری این محوطه از نظر ظاهری و به لحاظ رنگ به سه دسته «سنگ کرم»، «سنگ کبود» و «سنگ سیاه» قابل تفکیک هستند. این سنگ‌ها در قسمت‌های مختلف بقایای معماری پاسارگاد به کار رفته‌اند. «سنگ کرم» در دیواره برخی سازه‌ها مانند تل تخت، آرامگاه کوروش، آرامگاه کمبوجیه، شالی و بدنه ستون‌ها، «سنگ سیاه» در پایه ستون‌ها و برخی سرستون‌هایی که

توسط هر تسفلد در کاخ بارعام کشف شدند و «سنگ کبود» در کف زیرین کاخ‌ها به طوری که کف به صورت دولا به (سنگ کبود و سنگ کرم) چیده شده، به کار رفته‌اند (تصویر ۱). سنگ‌های موجود در محوطه پاسارگاد دارای تخریب‌های به ظاهر متفاوتی هستند. در این بین، سنگ‌های سیاه به کار رفته در پایه ستون‌ها بیشترین تخریب را متحمل گشته‌اند به طوری که از سطح به عمق، لایه لایه شده‌اند و در برخی موارد بخش اعظمی از آن متلاشی گشته است. قابل ذکر است که سنگ‌های کبود (یا به عبارتی زرد - سبز) رنگ به کار رفته در کف زیرین نیز در شرایط فیزیکی خوبی قرار ندارند و خرد شده‌اند، حتی برخی از این گونه سنگ‌ها دچار جدایش دانه‌ای شده‌اند. به نظر می‌رسد بهترین شرایط را سنگ‌های کرم‌رنگ بکار رفته در بدنه و ستون‌ها دارند؛ هر چند آنها نیز تخریب شده‌اند، اما درجه تخریب آنها کمتر از دیگر سنگ‌ها است (تصویر ۲).

در این پژوهش تمرکز بر شناسایی ماهیت شیمیایی سنگ‌های بکار رفته در مجموعه جهانی پاسارگاد و شناسایی تخریب‌های سطحی رخ داده در آنها و عوامل مخرب مؤثر بر آنها است. همان‌گونه که ذکر شد، مطالعات انجام‌شده بر روی سنگ‌های پاسارگاد نشان می‌دهد که از سه نوع سنگ آهک متفاوت از نظر ظاهری در ساخت بناهای این محوطه استفاده شده است (شکفته و همکاران، ۱۳۹۴). در راستای ساختار شناسی جنسیت سنگ‌های محوطه، فازها و عناصر تشکیل‌دهنده آنها مورد مطالعه قرار گرفتند؛ زیرا با شناخت دقیق خصوصیات نامبرده می‌توان با اطمینان بیشتری در جهت عملیات مداخله‌ای «مرمت» اقدام نمود. علاوه بر آن



تصویر ۱. تصویر سمت راست: نقشه ایران که در آن محدوده محوطه پاسارگاد با کادر مستطیل مشخص شده است، تصویر میانی: محدوده محوطه تاریخی پاسارگاد (URL: 1) و محل کاخ اختصاصی که با کادر مربع مشخص شده است؛ تصویر سمت چپ: بخشی از کاخ اختصاصی و موقعیت قرارگیری هر کدام از سه نوع سنگ (عکس: نگارندگان)

سامی، ۱۳۳۸: ۳۱؛ سعیدی، ۱۳۸۳)؛ اما معدن سنگ سیاه را ناشناخته می‌دانند که هم‌اکنون شناسایی منشأ و معادن آن توسط گروه تحقیقاتی پایگاه میراث جهانی پاسارگاد در حال انجام است. علاوه بر تحقیقات پایگاه، در قالب رساله کارشناسی و کارشناسی ارشد مطالعاتی در خصوص برخی جنبه‌های دیگر حفاظتی محوطه صورت گرفته است. به طور مثال کاربرد سیمان بهینه‌شده با میکرو سیلیس جهت بازسازی سنگ‌های محوطه پاسارگاد مورد مطالعه قرار گرفته است (شیخ‌الاسلامی، ۱۳۸۷). همچنین، سنگ‌نگاره انسان بالدار در یک رساله کارشناسی ارشد از دیدگاه فن‌شناسی و آسیب‌شناسی مورد مطالعه قرار گرفته که در این تحقیق سنگ کرم نقش انسان بالدار از نظر بافت و فازهای تشکیل دهنده با سنگ معدن سیوند یکسان معرفی شده است و هر دو را حاوی کلسیت و اندکی کوارتز گزارش کرده‌اند (عبداللهی، ۱۳۸۶: ۱۵۶). همچنین از طریق مشاهدات میدانی، به آسیب‌های وارده اشاره شده و عوامل تخریب را یخ‌بر شدن، تغییرات دمایی، انحلال، عوامل بیولوژیک و تأثیر موجودات زنده دانسته‌اند (همان: ۲۰۰). رساله کارشناسی ارشد دیگری به شناسایی سنگ‌های سیاه مجموعه پرداخته و بر اساس آنالیز پراش پرتوی ایکس بر روی یک نمونه مطالعاتی، جنسیت سنگ سیاه، کربنات کلسیم گزارش شده است. این رساله عوامل دخیل در فرسایش سنگ‌ها را به‌طور عمومی شرح داده و تنها از طریق مشاهدات میدانی به تخریب‌های رخ داده اشاره کرده است (شیروانی، ۱۳۸۷: ۸۱). همچنین در پژوهشی دیگر تأثیر علل ماهیتی در دوام و ناپایداری سنگ‌های کرم نسبت به سنگ‌های سیاه و کبود از طریق مطالعات پتروگرافی سنگ‌های محوطه و مقایسه بافت و ساختار سنگ‌ها و تخمین

تخریب‌های رخ داده در گونه‌های مختلف سنگ‌های محوطه نیز به‌طور ماکروسکوپی و ریزساختاری مورد مطالعه قرار گرفتند تا از این طریق بتوان مشکلات موجود در سنگ‌ها را در هر دو مقیاس، شناخته و در حذف عوامل مخرب و تقویت ماهیت فیزیکی و شیمیایی سنگ‌ها، در عملیات مرمت سنجیده‌تر اقدام نمود. بدین ترتیب این تحقیق بر پایه هدف شناخت دقیق انواع سنگ‌های موجود در محوطه میراث جهانی پاسارگاد و شناسایی کامل تخریب‌های رخ داده و معرفی مهم‌ترین عوامل مخرب انجام گرفته است.

پیشینه تحقیق

فعالیت‌هایی در زمینه باستان‌شناسی و حفاظت آثار از سال ۱۳۲۷ خورشیدی در مجموعه میراث جهانی پاسارگاد انجام گرفته است (رخشانی و همکاران، ۱۳۸۲)، در سال‌های اخیر در خصوص شناسایی سنگ‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی محوطه، تحقیقاتی توسط کارشناسان مجموعه انجام شده است. در این تحقیقات از طریق مطالعات پتروگرافی، بافت سنگ‌ها و سن زمین‌شناسی آنها تخمین زده شده است. گزارش‌های پایگاه میراث جهانی پاسارگاد و مقالات منتشرشده حاکی از آن هستند که سنگ سیاه موجود یک نوع سنگ‌آهک میکراتی است که میکرات^۱ آن تا حد اسپارایت^۲ رشد کرده است. سنگ کرم موجود، سنگ‌آهک اسپارایت شده است و سنگ کبود مجموعه نیز نوعی سنگ‌آهک ماسه‌ای است (شکفته و همکاران، ۱۳۹۴؛ سعیدی، ۱۳۸۳). در این گزارش‌ها اشاره‌ای به معادن مرتبط با این سنگ‌ها شده است و سنگ کرم را با معدن سیوند و سنگ کبود را با معدنی در شمال غرب روستای ابوالوردی از لحاظ بافت و جنسیت یکسان دانسته‌اند (Tilia, 1968: 68)؛



تصویر ۲. الف: سنگ کبود به کار رفته در کف زیرین کاخ اختصاصی، بخش‌هایی از آن متلاشی شده و بخش‌هایی به شکل خاک درآمده‌اند. ب: سنگ سیاه در کاخ اختصاصی، این سنگ در راستایی همسو با لایه‌های رسوب‌گذاری دچار تخریب شده است، ج: سنگ کرم‌رنگ پلکان مقبره کوروش، به نظر می‌رسد فرسایش آن بیشتر در لایه‌های سطحی بوده و همچنین بر اثر نیروهای فشاری بلوک‌های سنگی قرار گرفته در طبقه‌های فوقانی پلکان، دچار شکستگی شده است. (نگارندگان)

تخلخل آنها نیز مطالعه شده است و مشخص گشته که از لحاظ بافت و ساختار، علت اصلی لایه‌لایه شدن سنگ سیاه، حضور استیلولیت‌های پرشده با کلسیت ثانویه و درزه‌های فشاری است. همچنین تخلخل نسبتاً بالا و ذرات با جنسیت‌های متفاوت سنگ کبود در آن گزارش شده است (Shekofteh et al, 2016). بنا بر آنچه تاکنون انجام شده است، یقیناً با توجه به اهمیت تاریخی و فرهنگی این مجموعه میراث جهانی، نیاز به شناخت و بررسی دقیق و موثکافانه‌تری از طریق آنالیزهای دستگاهی در خصوص انواع سنگ‌های موجود و تخریب‌های رخ داده بر آنها احساس می‌شود.

روش تحقیق

نمونه‌های مطالعاتی برای آنالیزهای ساختار شیمیایی شامل سه نمونه سنگ کرم (B1، B2 و B3)، دو نمونه سنگ کبود (GG2 و GG1) و دو نمونه سنگ سیاه (DG2 و DG1) هستند. جهت شناسایی نمک احتمالی به عنوان عامل مخرب، ۱۶ نمونه کوچک در قسمت‌های متفاوت بناهای سنگی از سطح بخش‌های تخریب‌شده برداشت شدند. در این تحقیق از مشاهدات میدانی و آنالیزهای دستگاهی جهت شناخت سنگ‌ها و تخریب‌های موجود بهره گرفته شده است. آنالیزهای دستگاهی شامل شیوه‌های مشاهدات با بزرگ‌نمایی بالا و نیمه کمی مانند روش‌های XRD و SEM و نیز شیوه کمی از جمله آنالیز دستگاهی XRF هستند. آنالیز XRD توسط دستگاه پراش سنج Philips PW1710، شرایط آزمایشی CuK_α ، $3^\circ\theta$ تا $60^\circ\theta$ ، 40 kV ، 40 mA (گروه مینرالوژی و پترولوژی دانشگاه گرانادا، اسپانیا) انجام گرفت، همچنین آنالیز نمونه‌ها جهت شناسایی نمک‌ها XRD توسط دستگاه پراش سنج Panalytical X'pert PRO MPD (گروه مینرالوژی و پترولوژی دانشگاه گرانادا، اسپانیا) در شرایط CuK_α ، $3^\circ\theta$ تا $60^\circ\theta$ ، 45 kV ، 40 mA تهیه گردید و نتایج آنالیزها توسط نرم‌افزار X-Powder تحلیل شدند (Ramos, 2004). تصاویر ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN کشور جمهوری چک به همراه دستگاه طیف‌سنجی تفرق انرژی اشعه ایکس (EDS) مدل SAMx ساخت کشور فرانسه انجام شد. تمامی نمونه‌ها پیش از آنالیز با طلا پوشش داده شدند. آنالیزهای XRF توسط دستگاه Bruker S4 Pioneer X-ray (آزمایشگاه مرکزی دانشگاه گرانادا، اسپانیا)، در شرایط 60 kV و 150 mA انجام شدند و تصاویر ماکروسکوپی توسط میکروسکوپ دیجیتال Digital surf Leica مدل CH-9335 تهیه شدند.

سنگ‌شناسی

آنالیزهای شیمیایی

آنالیزهای مربوط به شناسایی فازهای تشکیل‌دهنده سنگ‌ها، بر روی سه نمونه سنگ کرم، دو نمونه سنگ سیاه و سه نمونه سنگ کبود صورت گرفت. نمونه‌ها جهت آنالیز از مجموعه باغچه‌های سنگ (سنگ‌های جدا شده از ابنیه) درون محوطه پاسارگاد بر اساس شباهت ظاهری انتخاب شدند. هر سه نوع سنگ در این باغچه‌ها موجود هستند. در ظاهر، سنگ کرم دارای دو نوع بافت با کریستال‌های ریز و درشت است و برخی از آنها دارای حفره و میکرو کارست^۲ هستند. بدین جهت سه نمونه که از لحاظ ظاهر تقریباً متفاوت به نظر می‌رسیدند و نماینده کل سنگ‌های کرم به کار رفته در محوطه بودند، انتخاب شدند. سنگ‌های کبود نیز دو نوع بافت ریز و درشت دارند و به همین لحاظ دو نمونه که نماینده هر دو بافت باشند برداشت شدند. سنگ‌های سیاه دارای دو رنگ در تنالیت‌ها خاکستری روشن و خاکستری تیره هستند، بدین لحاظ دو نمونه که نماینده کل سنگ‌های سیاه باشند، انتخاب گشتند. نتایج آنالیزهای XRD حاکی از آن هستند که هر سه نوع سنگ به کار رفته در معماری مجموعه تاریخی پاسارگاد از دسته «سنگ آهک» هستند. به عبارت دیگر همگی دارای درصد بسیار بالایی کلسیت (CaCO_3) هستند؛ به جز اینکه در یک نمونه سنگ کرم به نسبت مساوی دولومیت $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$ نیز مشاهده شده است. علاوه بر این در دو سنگ سیاه و کبود، فاز کوارتز (SiO_2) به عنوان فاز فرعی نیز گزارش شده است (جدول ۱).

بر اساس نتایج به دست آمده از آنالیز پراش پرتو ایکس و نتایج پتروگرافی حاصل از مقاطع نازک (Shekofteh et al, 2016: 135-137) می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که سنگ کرم پاسارگاد دو ترکیب دارد، یکی از آنها نوعی سنگ آهک نسبتاً خالص بایواسپاراتی است و دیگری سنگ آهک دولومیتی با کریستال‌های ریزتر است که تا حدی دگرگون شده است. سنگ سیاه آن، سنگ آهک از نوع آرژلیت^۳ میکراتی است و سنگ کبود نوعی سنگ آهک از نوع کلکرنایت^۴ با دو دانه‌بندی ریز و درشت است.

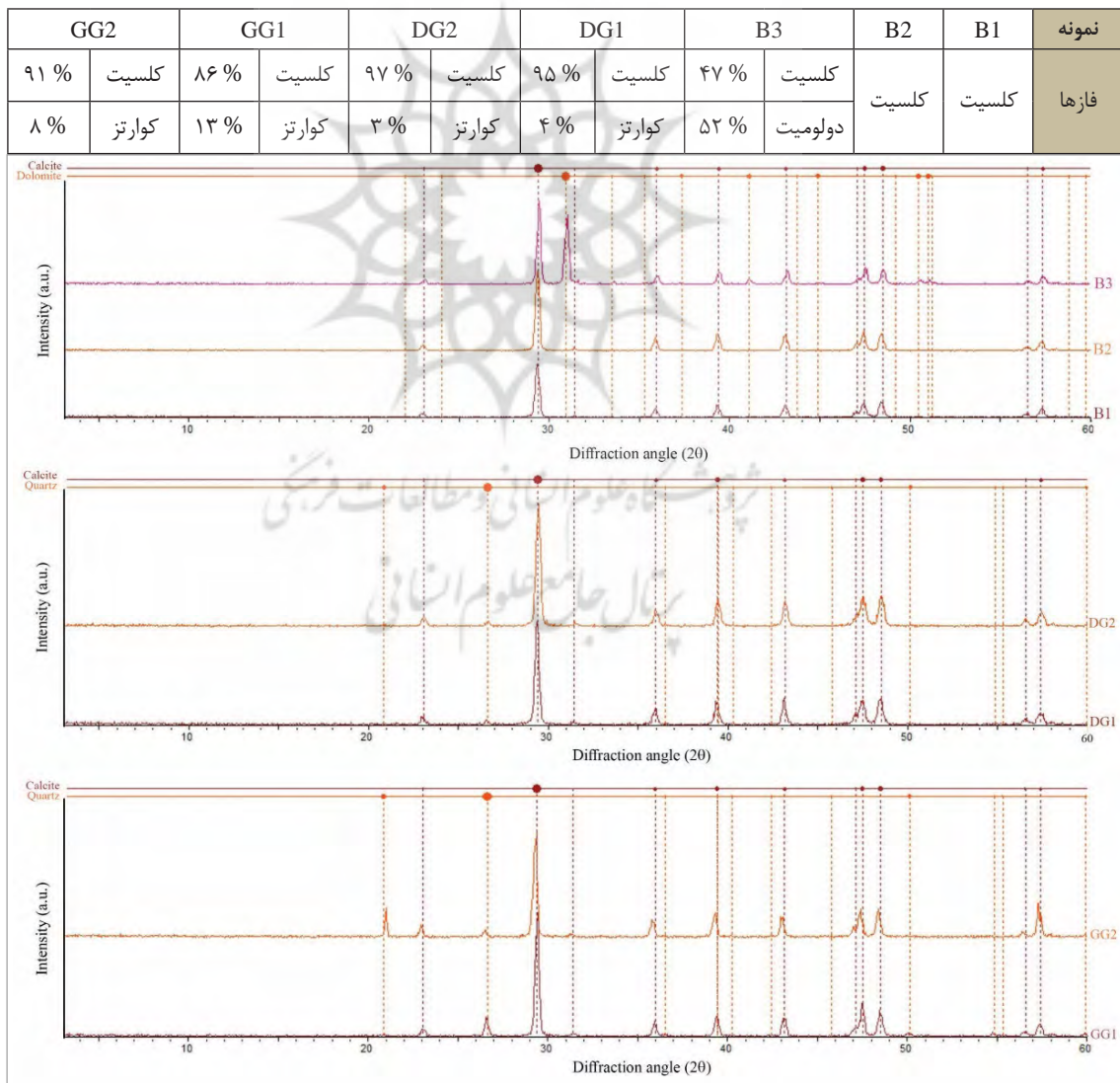
جهت آنالیز XRF سه نمونه سنگ کرم انتخاب شد که به لحاظ حضور دولومیت در یکی از نمونه‌ها، سعی شد که نمونه حاوی بافت دولومیتی نیز مورد آزمایش قرار گیرد، همچنین آنالیز بر روی همان دو نمونه از هر دو سنگ کبود و سیاه نیز انجام گرفت. نتایج آنالیز XRF (جدول ۲) نیز، نتایج حاصل از دیگر آزمایش‌ها را این‌طور تأیید می‌کند که

گردید که نمونه‌های تخریب سطحی تنها دارای سه فاز کلسیت، دولومیت و کوارتز هستند که فاز اصلی تمامی آنها مانند نتایج آنالیزهای انجام شده روی سنگ‌ها، «کلسیت» است و هیچ‌گونه فاز نمک در نتیجه آنالیزها گزارش نشده است. از نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس می‌توان نتیجه‌ای غیر مرتبط با هدف شناسایی نمک گرفت و آن این است که به طور قطع برخی نمونه‌ها (سنگ‌های کرم) تنها حاوی فاز اصلی «کلسیت» هستند که در این بین، برخی بلوک‌های کرم‌رنگ حاوی دو فاز «کلسیت» و «دولومیت» هستند که احتمالاً این تفاوت‌ها در فازهای تشکیل دهنده، ناشی از عمق‌های متفاوت استخراج سنگ از معدن سیوند است و بررسی دقیق آن نیاز به تحقیقات زمین‌شناسی مجزا به واسطه نمونه‌گیری از لایه‌های رسوبی معدن دارد. نمونه تخریب سطحی سنگ

همه سنگ‌ها جنسیت مشابهی دارند و به طور قطع سنگ آهکی هستند. سنگ‌های کرم در دودسته کربنات کلسیم و کربنات منیزیم قرار می‌گیرند، سنگ‌های کبود نیز سنگ آهکی هستند که حاوی درصدی کوارتز، عناصر خاک و مقدار ناچیزی اکسید آهن هستند. سنگ‌های سیاه نیز دارای درصد نسبتاً یکسانی سیلیس و اکسید آلومینیوم هستند که می‌تواند مربوط به رس باشد.

با وجود عدم مشاهده بلورهای نمک در بررسی‌های میدانی، برای اطمینان از حضور یا عدم حضور عامل مخربی مانند نمک‌های محلول، بخشی از نمونه‌های برداشت شده از محوطه شامل لایه‌ها و پوسته‌های سطحی به همراه ذرات قرار گرفته در زیر پوسته‌ها، توسط روش آنالیز کیفی XRD آزمایش شدند (جدول ۳).^۶ در نتایج به دست آمده از آنالیزها مشخص

جدول ۱. نتایج حاصل از آنالیز نیمه کمی XRD، درصد نسبت وزنی فازها به همراه گراف‌های آنها



(نگارندگان)

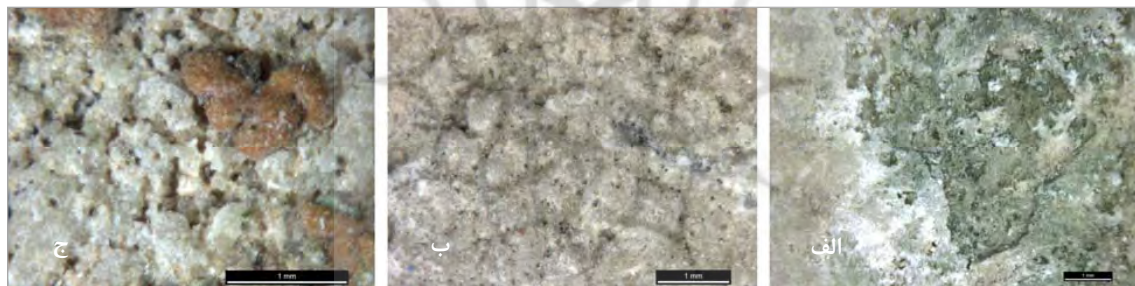
سیاه به‌طور میانگین دارای ۵ درصد از نسبت وزنی فاز کوارتز است و سنگ کبود نیز به‌طور میانگین دارای ۱۰ درصد فاز کوارتز است.

مشاهدات ماکروسکوپی و میکروسکوپی

تصاویر ماکروسکوپی تهیه‌شده توسط میکروسکوپ دیجیتال حاکی از این هستند که اکثراً سنگ‌های کرم، در سطح دچار پوسته‌شدگی و خصوصاً تحت تأثیر میکروارگانیزم‌ها دچار خوردگی حفره‌ای شده‌اند. برخی از این حفرات می‌تواند ناشی از تقسیم سلولی یا باردهی گلسنگ باشند. به طوری که در برخی از این حفرات، هنوز سلول در درون حفره حضور دارد؛ اما اکثر حفره‌های دیگر خالی هستند (تصویر ۳). در تصویر ۲ مشخص است که گلسنگ نه تنها به صورت برون‌سنگی رشد کرده است بلکه حفره‌های حاصل از نفوذ ریشه آن در درون بستر سنگی نشان‌دهنده رشد درون‌سنگی آن نیز هست. در تصاویر ماکروسکوپی سنگ‌های سیاه، شکستگی‌ها و رگه‌هایی مشاهده می‌شوند که توسط کلسیت ثانویه یا

اکسید آهن ثانویه پر شده‌اند. برخی از این رگه‌ها در جهت رسوب‌گذاری سنگ قرار دارند و برخی دیگر با زاویه‌ای متفاوت نسبت به رسوب‌گذاری سنگ ایجاد شده‌اند که احتمالاً نشان از درزه‌های فشاری در هنگام سنگ‌شدگی دارد (تصویر ۴). سؤال مهم این است که این درزه‌ها توسط چه فازی پر شده‌اند و آیا می‌توانند عامل ضعف سنگ باشند؛ زیرا فراوانی و نوع رگه‌های پر شده بر خواص تکنولوژیکی سنگ کرناته از جمله سختی، استحکام، شکست، کاهش دوام و هوازدگی آن نیز تأثیر می‌گذارد (Flügel, 2004: 226). آنالیز عنصری این رگه‌ها (تصویر ۱۰) نشان می‌دهد که عناصر Ca و C به ترتیب عمده‌ترین عناصر در این رگه و فاز اصلی CaCO_3 پرکننده این رگه‌ها هستند؛ بنابراین ممکن است این تفاوت رنگ و بافت رگه‌ها در اثر تغییر سایز یا جهت بلورهای ریز کلسیتی (میکریت) ایجاد شده باشد.

تصاویر ماکروسکوپی سنگ کبود، ترک‌ها و ریزترک‌هایی را نمایان ساخت که به نظر می‌رسد در اثر انفصال بین‌دانه‌ای

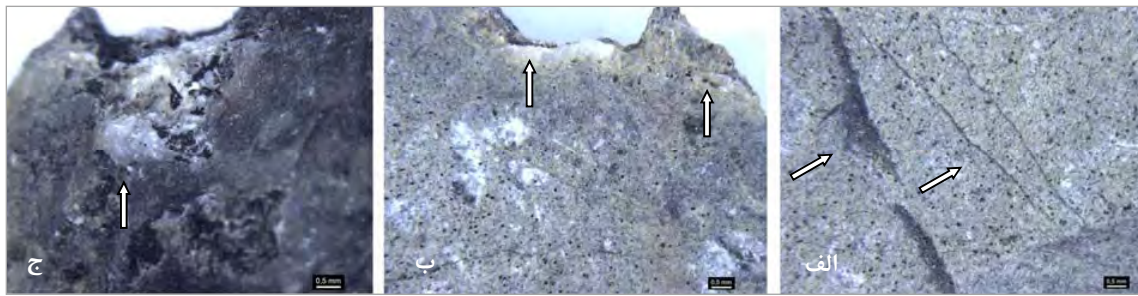


تصویر ۳. تصاویر ماکروسکوپی از آسیب‌های بیولوژیکی سنگ کرم تصویر «الف»: اثرات ظاهری تخریب بیولوژیکی مانند سبز شدگی سطح سنگ که می‌تواند ناشی از حضور جلبک‌های سنگی باشد، تصویر «ب»: حفره‌های ریز ایجاد شده توسط اندام باردهی گلسنگ، تصویر «ج»: جسم نارنجی‌رنگ باقی‌مانده از گلسنگ بر روی سطح سنگ؛ برخی حفره‌هایی که توسط ریشه گلسنگ ایجاد شده خالی از سلول و برخی دیگر حاوی سلول هستند. (نگارندگان)

جدول ۲. نتایج حاصل از آنالیز کمی XRF بر پایه درصد وزنی

نمونه	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Zr (ppm)	LOI (%)	مجموع
B1	۰/۰۲	<LLD	۰/۰۱	<LLD	۰/۱۵	۵۶/۴۳	۰/۰۲	<LLD	<LLD	۰/۰۱	<LLD	۴۲/۹۷	۹۹/۶۱
B2	۰/۰۱	<LLD	۰/۰۱	<LLD	۰/۱۱	۵۶/۴۶	۰/۰۳	<LLD	<LLD	۰/۰۱	<LLD	۴۲/۶۶	۹۹/۲۹
B3	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۲	<LLD	۴/۸۰	۵۰/۶۶	۰/۰۳	۰/۰۱	<LLD	۰/۰۲	<LLD	۴۳/۹۲	۹۹/۵۴
GG1	۱۲/۴۶	۰/۶۵	۰/۵۸	۰/۰۲	۰/۵۲	۴۷/۵۵	۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۸/۷	۳۷/۵۲	۹۹/۴۹
GG2	۷/۵۶	۰/۵۳	۱/۰۳	۰/۰۳	۰/۴۴	۵۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۴	۳/۷	۳۹/۶۵	۹۹/۴۳
DG1	۴/۰۶	۱/۲۸	۰/۳۶	۰/۰۱	۰/۴۹	۵۱/۵۲	۰/۰۳	۰/۲۱	۰/۰۵	۰/۰۳	۱۰/۱	۴۱/۴۰	۹۹/۴۴
DG2	۵/۰۱	۱/۵۴	۰/۳۹	<LLD	۰/۵۲	۵۰/۵۲	۰/۰۵	۰/۲۸	۰/۰۶	۰/۰۴	۹	۴۱/۴۲	۹۹/۸۳

(نگارندگان)



تصویر ۴. تصاویر ماکروسکوپی از سطح هوازده و سالم سنگ سیاه
تصویر «الف»: خطوط سیاه رنگ ظریف تر در تصویر، انفصال‌ها در جهت رسوب‌گذاری هستند و خط سیاه قطورتر نشان از تغییر سایز یا تغییر جهت میکرایت‌ها دارند، تصویر «ب»: رگه کلسیتی در لبه شکستگی سطح هوازده سنگ مشخص است، تصویر «ج»: نمایی نزدیک‌تر از رگه کلسیتی در پشت سنگ (رویه سالم سنگ). (نگارندگان)

جدول ۳. نتایج حاصل از آنالیز نیمه کمی XRD از نمونه‌های سطح تخریب شده

نتایج		محل	نام نمونه
کلسیت		جبهه جنوب غربی مقبره کوروش	B.K.1
کلسیت		جبهه جنوب شرقی مقبره کوروش	B.K.2
کلسیت % ۷۲	دولومیت % ۲۷	جبهه شمال شرقی مقبره کوروش	B.K.3
کلسیت		جبهه شمال غربی مقبره کوروش	B.K.4
کلسیت		جبهه شمال غربی از کف سکوی اول مقبره	B.K.5
کلسیت % ۵۸	دولومیت % ۴۱	نقش انسان بالدار کاخ دروازه	B.KD.1
کلسیت		بلوک گل‌سنگ‌دار کاخ دروازه	B.KD.2
کلسیت		جبهه شمال شرقی تل تخت	B.TT.2
کلسیت		گوشه شمال غربی تل تخت	B.TT.3
کلسیت		جبهه غربی زندان سلیمان	B.ZS.1
کلسیت % ۹۵	کوارتز % ۵	سنگ سیاه کف کاخ اختصاصی	D.G.1
کلسیت % ۹۵	کوارتز % ۴	دروازه ضلع جنوبی کاخ بار عام	D.G.2
کلسیت % ۹۴	کوارتز % ۶	سنگ سیاه برداشت شده از کاخ بار عام به رنگ روشن	D.G.102
کلسیت % ۸۴	کوارتز % ۱۶	کف زیرین کاخ اختصاصی	G.G.07
کلسیت % ۸۲	کوارتز % ۱۸	سنگ کبود برداشت شده از کف	G.G.08
کلسیت % ۸۴	کوارتز % ۱۶	سنگ کبود برداشت شده از کف	G.G.16

(نگارندگان)

سنگ ایجاد شده باشند. در بزرگ‌نمایی این سنگ برخی ذرات و دانه‌های کلسیتی و کوارتز مشاهده می‌شوند، تخریب از نوع «ماسه‌ای» شدن در تمامی نمونه‌ها مشاهده می‌شود که از عوامل مهم آن می‌تواند وجود ذرات با جنسیت‌های متفاوت در حضور کانی‌های رسی باشد. همچنین آثار زندگی بیولوژیکی مانند قارچ و گلسنگ در سطح سنگ‌ها نیز مشاهده می‌شود. دانه‌های ریز سیاه‌رنگ، اجماع قارچ‌ها را در کنار اندام گلسنگ تأیید می‌کند. در تصویر ۴ حاشیه اندام باقی‌مانده از گلسنگ محصولات سفیدرنگ شبیه به نمک مشاهده می‌شود که احتمالاً مربوط به فعالیت‌های زیستی قارچ‌ها معروف به «بایوکانی‌زایی»^۷ است (تصویر ۵).

برای دستیابی جامع‌تر به خصوصیات و تخریب‌های صورت گرفته، نمونه‌هایی جهت مطالعات میکروسکوپی از نواحی مختلف برداشت شدند. بدین ترتیب، سه نمونه سنگ کرم‌رنگ از سه جهت مقبره کوروش، به لحاظ اینکه در شرایط تخریبی متفاوتی قرار دارند انتخاب شدند. برای مشاهده اثر یخ‌زدگی بر سنگ، یک نمونه از جبهه‌ای که مدت‌زمان بیشتری در سایه قرار دارد انتخاب شد. همچنین یک نمونه از جبهه‌ای که مدت‌زمان بیشتری در طول روز در معرض آفتاب قرار می‌گیرد نیز انتخاب گردید. از جبهه‌ای هم که دچار هوازدگی متفاوتی در سطح (شبیه به تخریب حبایی) شده، نمونه‌ای انتخاب شد تا بدین ترتیب از طریق جمع‌آوری شرایط تخریبی متفاوت و مشاهدات ریزساختاری آنها بتوان به اطلاعات جامع‌تری در خصوص تخریب‌های رخ داده در شرایط متفاوت دست پیدا کرد (تصویر ۶).

از دیگر سنگ‌های محوطه مانند سنگ کبود و سنگ سیاه تنها یک نمونه در نظر گرفته شد؛ زیرا طی مشاهدات میدانی مشخص شد که موقعیت قرارگیری هر بلوک، تأثیر مشهودی بر چگونگی تخریب ندارد؛ بلکه به نظر می‌رسد شرایط تخریبی هر بلوک متفاوت است؛ زیرا برخی از آنها در ظاهر بسیار مستحکم و سالم هستند و در مقابل برخی از آنها با وجود اینکه در یک مکان و در شرایط یکسان قرار دارند، کاملاً تخریب شده‌اند. بدین جهت از بلوک‌های تخریب‌شده دو سنگ کبود و سیاه، دو نمونه برداشت شدند. نکته قابل توجه در نقش برجسته انسان بالدار این است که این نقش دارای لایه‌ای نارنجی‌رنگ شبیه به پاتین بر سطح است، بدین جهت از پشت بلوک نقش‌دار از سطحی که دارای لایه پاتین است، یک نمونه برداشته شد. همچنین بلوک‌های دیواره تل تخت دارای پاتینی یک‌دست شبیه به پاتین نقش انسان بالدار اما کمی تیره‌تر هستند که برای مقایسه این دو پاتین یک نمونه از بلوک قرار گرفته در گوشه شمال غرب آن نیز برداشته شد (جدول ۴).

در تصاویر میکروسکوپ الکترونی سنگ کرم برداشت‌شده از سکوی اول در ضلع شمال غربی مقبره کوروش، حفره‌هایی بر سطح مشاهده شد که برخی از این حفره‌ها مسدود و برخی دیگر خالی بودند. همچنین نواحی کبودی مشاهده شد که توسط رشته‌هایی پوشانده شده‌اند. بر خلاف انتظاری که از این نمونه در معرض یخ‌زدگی می‌رفت، اثری از ترک و ریز ترک و یا انفصال‌های پوسته‌ای مشاهده نشد. در نمونه برداشت‌شده از جبهه شمالی مقبره کوروش، تأثیرات انحلال بلورها و همچنین تنش از طریق خردشدگی کریستال‌ها و برخی ریز ترک‌ها مشاهده گردید (تصویر ۷).

نمونه ضلع شمال غربی مقبره بر خلاف تصور، بیشتر تحت تأثیر تخریب گلسنگ قرار گرفته است. در تصویر ۸ الف و ب فرسایش زیستی شدیدی شامل هیف‌های رشته‌ای قارچ‌ها و حفره‌هایی که توسط این هیف‌ها در سنگ ایجاد شده‌اند، دیده شد. انتظار می‌رفت در نمونه‌های این ناحیه تأثیرات پدیده یخ‌زدگی خصوصاً از هم پاشیدگی و خردشدگی بلورها رؤیت شود، اما در مقایسه با فرسودگی زیستی، این دسته از تخریب‌ها در سنگ کرم بسیار ناچیز بودند. در تصاویر میکروسکوپی ضلع جنوب غربی مقبره کوروش که دچار هوازدگی حبایی شکل شده، فرسودگی زیستی از علل حفره‌ای شدن سطح این بلوک‌ها است. همچنین انحلال شدید کریستال‌های کلسیت نیز رؤیت شد. به نظر می‌رسد که سنگ، بافت نسبتاً متراکمی دارد و همان‌طور که در مشاهدات میدانی واضح است؛ انحلال‌ها بیشتر در سطح رخ داده‌اند (تصویر ۸).

در تصاویر میکروسکوپی دو نمونه برداشت‌شده از نقش انسان بالدار و دیواره تل تخت، همان‌طور که با چشم غیر مسلح مشهود است، لایه‌ای سطح را پوشانده است. در نقطه‌ای که بخشی از لایه از بین رفته است می‌توان دندان‌های Δ شکل حاصل از انحلال کلیست را به وضوح مشاهده کرد (تصویر ۹). لایه پاتین در نقش انسان بالدار نسبت به لایه پاتین برداشت‌شده از تل تخت، منسجم‌تر و سالم‌تر به نظر می‌رسد. این لایه پاتین سخت معمولاً متشکل از کلسیم اگزالات است که مسلماً این سطح، تأثیر عوامل هوازدگی را کاهش می‌دهد و بدین ترتیب مانند یک محافظ در برابر باران و تهنشست‌های اتمسفری عمل می‌کند (Salvadori et al, 2016). در تصویر ۹ ج در اطراف بلوری که دچار از هم گسیختگی شده است، صفحات شش‌ضلعی دیده می‌شود که در ابتدا با پترلندیت $\text{Ca}(\text{OH})_2$ اشتباه گرفته شد؛ اما آنالیز EDS آن عناصری چون S, Ca, و O را نشان می‌دهد و اثبات می‌کند که این صفحات، بلورهای سولفات کلسیم CaSO_4 هستند. گمان می‌رود وجود سولفات کلسیم در اثر

بحث

مجموعه آزمایش‌ها و مشاهدات ماکروسکوپی و میکروسکوپی اطلاعات مفیدی را در اختیار قرار دادند. هر سه نوع سنگ از لحاظ ریزساختاری متفاوت هستند و در شرایط متفاوتی قرار دارند. به عنوان مثال در مشاهدات میدانی و ریزساختاری سنگ کرم مشخص گردید که چند نوع تخریب شیمیایی (انحلال) و فرسایش زیستی (خوردگی حفره‌ای و بایوکانی‌زایی) در این گونه رخ داده است. در اثرات تخریبی حاصل از گلسنگ‌ها، سنگ کرم بیش از دیگر سنگ‌ها آسیب دیده است که این اجتماع بیولوژیکی در سطح سنگ‌ها می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله ترکیب مواد معدنی، بافت، تخلخل، نفوذپذیری و پارامترهای محیطی و حتی زبری سطح نیز مرتبط باشد (Miller et al, 2012). به نظر می‌رسد سنگ سیاه محوطه بستر مناسبی برای گلسنگ‌ها نبوده است چرا که تنها در نواحی که پیش از این، از مواد آلی برای اتصال قطعات شکسته استفاده شده، رشد گلسنگ مشاهده می‌گردد و در مقایسه با دیگر انواع سنگ‌ها، رشد گلسنگ بر آن ناچیز است و از آنجا که مواد آلی، خود بستر مناسبی برای رشد میکروارگانیسم‌ها هستند (Cappitelli

ترشح اسید غیر آلی سولفوریک توسط قارچ‌ها و واکنش آن با بستر کلسیتی باشد (Scheerer et al, 2009).

مشاهدات ریزساختاری سنگ سیاه، همان‌طور که با چشم غیر مسلح مشخص است، انفصال‌های لایه‌ای را نشان می‌دهد. در بین ذرات ریز تشکیل‌دهنده بافت سنگ، مانند آنچه در تصاویر ماکروسکوپی پیش از این مشاهده شده، ردیفی از بلورهای درشت وجود دارند. آنالیز EDS، عناصر Ca و C را شناسایی کرد که اثبات می‌کند این ردیف بلورهای درشت‌تر، چیزی جز کلسیت نیستند. علاوه بر این در بزرگ‌نمایی بیشتر، ذرات رس نیز در لابه‌لای دانه‌های کلسیت مشاهده می‌شوند (تصویر ۱۰). در تصویر ۱۱، تصاویر ریزساختاری سنگ‌های کبود، جدایش دانه‌های این نوع سنگ را مشخص می‌کنند، علاوه بر این در تصویر ۱۱ برخی نقاط خصوصاً محل اتصال ذرات کانال‌های حاصل از انحلال مشاهده می‌شود و در کنار این کانال‌های انحلال، می‌توان آگیری مجدد کلسیت را مشاهده کرد. جالب است که در این میان، برخی از بلورهای کلسیت با دندانه‌های منتج از انحلال نیز وجود دارند که نشان از رخ دادن پدیده‌های انحلال و آگیری مجدد در کنار یکدیگر دارد.

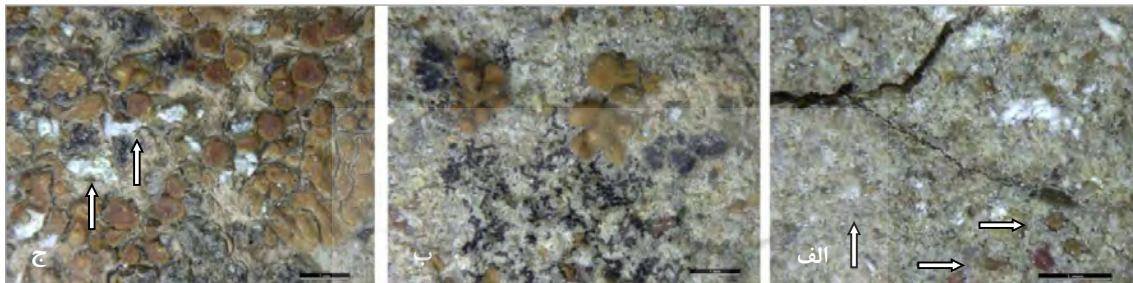
جدول ۴. محل نمونه‌برداری سطحی جهت آنالیز SEM

کد نمونه	محل برداشت	توضیحات
۱۰۱	کاخ اختصاصی، کف زیرین	سنگ‌های استفاده‌شده در کف زیرین همان سنگ کبود هستند که کف زیرین کاخ اختصاصی کاملاً با آنها پوشیده شده است.
۱۰۲	مقبره کوروش، جبهه شمال غربی، کف سکوی اول	به لحاظ اینکه جبهه شمال غربی تماماً در سایه قرار دارد، احتمال پدیده یخ‌زدگی در آن بیشتر است.
۱۰۳	مقبره کوروش، جبهه شمال شرقی، حفره بدنه سکو	این جبهه تقریباً نصف روز در سایه قرار دارد و در نتیجه پدیده حاصل از تغییرات دمایی در آن بسیار محتمل است.
۱۰۴	مقبره کوروش، جبهه جنوب غربی	سطح بلوک‌های این جبهه دارای پستی‌ها و بلندی‌هایی شبیه به هوازگی حبابی است.
۱۰۵	کاخ بار عام، ضلع جنوبی	دروازه‌هایی از نوع سنگ سیاه که با ملات سیمان بازسازی شده‌اند.
۱۰۶	پشت بلوک سنگی نقش انسان بالدار	این نمونه به لحاظ اینکه دارای نقش برجسته است از اهمیت خاصی برخوردار است و از طرفی دارای پاتین نارنجی‌رنگی نیز هست. به علاوه اثراتی از تخریب بیولوژیکی در زیر نواحی پوسته‌شده مشاهده شد.
۱۰۷	تل تخت، گوشه شمال غرب	تقریباً تمامی سنگ‌های تل تخت پوشیده از پاتین نارنجی‌رنگ هستند و چون در شرایط فیزیکی بهتری قرار دارند، بدین جهت برای مشاهده ریزساختاری انتخاب شدند.

(نگارندگان)

یا چند فتوسنتز کننده (معمولاً جلبک سبز یا سیانوباکتری) است (Carcia-Rowe et al, 1991). در تمامی گلسنگ‌ها، قارچ‌ها، ریشه‌ها^{۱۱} را شکل می‌دهند و سنگ را به عنوان بستر زندگی اشغال می‌کنند. رطوبت و نور، فاکتورهای مهم در توزیع گلسنگ است. گلسنگ از نوع میکروارگانیزم‌هایی است که در برابر خشک شدن مقاومت می‌کند و می‌تواند در برابر نور خورشید و محیط خشک نیز سکنی گزیند و خود را با محیط تطبیق دهد (Arino et al, 1996)، بدین جهت این نوع میکروارگانیزم‌ها با وجود درجه حرارت بالا (میانگین ۳۹ درجه سانتی‌گراد طی ۲۰ سال اخیر)^{۱۲} در طی تابستان

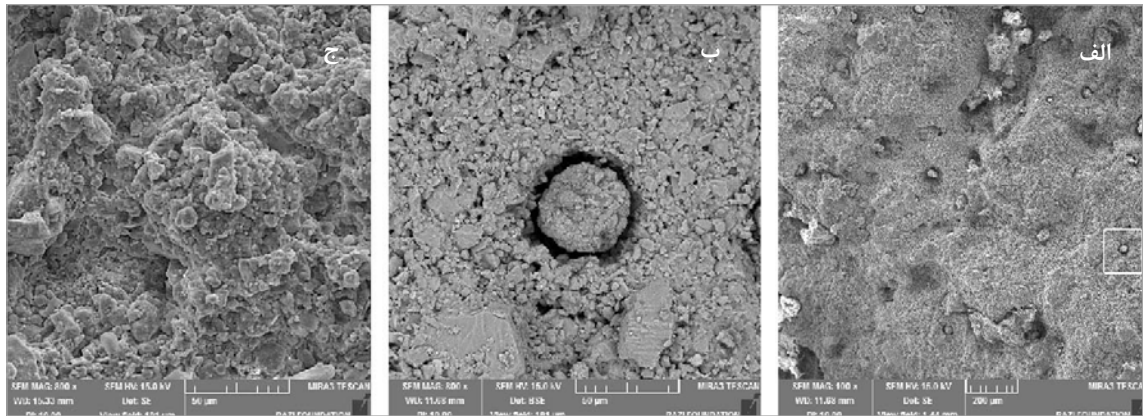
(et al, 2008). احتمالاً رزینی که برای اتصال استفاده شده، موجب تجمع و رشد گلسنگ در این گونه سنگ شده است و به نظر می‌رسد در صورت عدم استفاده از مواد پلیمری، خود سنگ ماهیتاً بستر مناسبی برای رشد گلسنگ نبوده است. سنگ‌های کبود نیز مورد حمله گلسنگ قرار گرفته‌اند اما نه به وسعت سنگ کرم. تأثیر تخریب گلسنگ‌ها در این نوع از گونه ظاهری است. گلسنگ‌ها از همزیستی نهادهای اتوتروفی^{۱۰} تشکیل شده‌اند که به مقداری رطوبت و میزان ناچیزی غذا نیاز دارند (Clair et al, 2004: 181). این همزیستی که به هاله قارچ‌ها تعبیر می‌شود، معمولاً متشکل از یک قارچ و یک



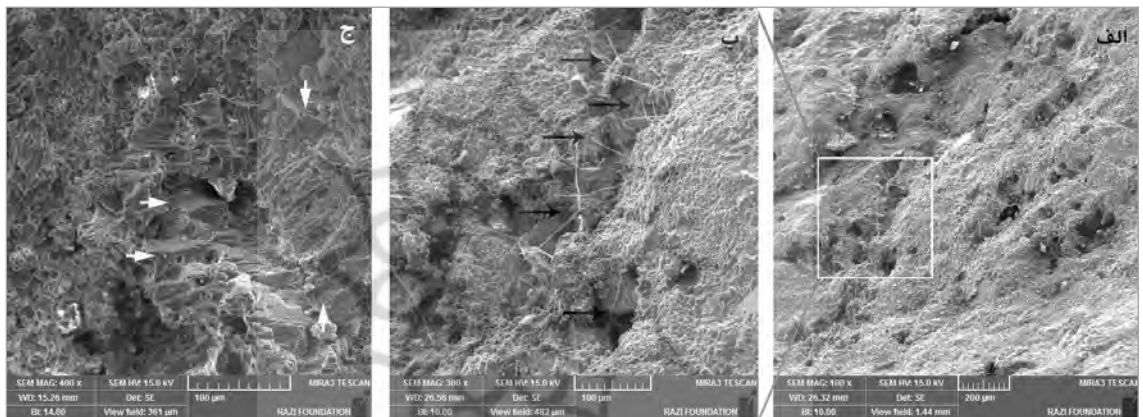
تصویر ۵. تصاویر ماکروسکوپی از سطح سنگ کبود
تصویر «الف»: ترک‌ها و ریزترک‌های نمایان در سطح سنگ نشان می‌دهند که انفصال‌ها بیشتر در مرز دانه‌ها رخ داده است. این نوع سنگ از ذرات و دانه‌هایی با جنسیت‌های متفاوت (پیکان‌های سفید) تشکیل شده است. تصویر «ب»: بخش‌های باقی‌مانده از اندام گلسنگ و شاخه‌ای از سلول‌ها به رنگ سیاه در لابه‌لای اجتماع کوچک قارچی (دانه‌های سیاه‌رنگ) مشاهده می‌شود، تصویر «ج» برخی از سطوح که کاملاً توسط گلسنگ پوشیده شده و محصولات سفیدرنگ در حاشیه اندام‌های گلسنگ دیده می‌شود. (نگارندگان)



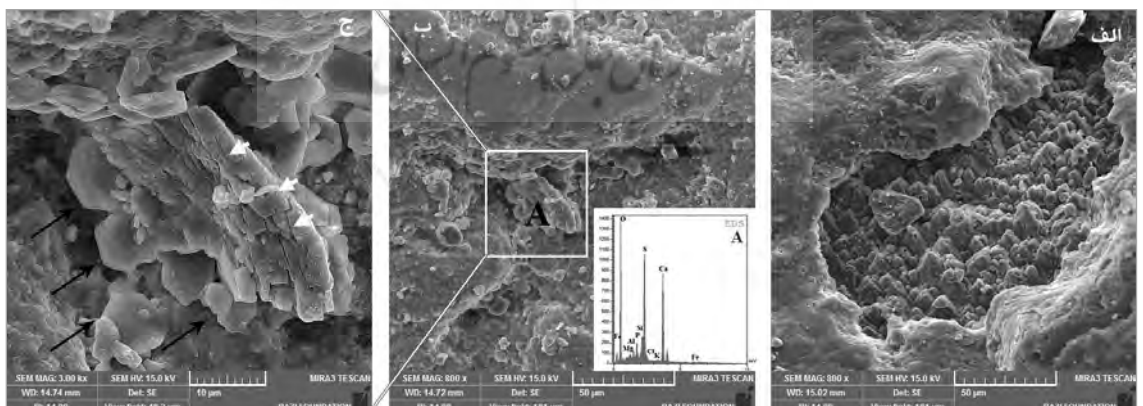
تصویر ۶. تصویر هوایی محوطه تاریخی پاسارگاد، محل نمونه‌برداری سطحی جهت آنالیزهای SEM و XRD در تک‌بناهای محوطه (URL: 2)



تصویر ۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ کرم ۱۰۲ و ۱۰۳
تصویر «الف»: جبهه شمال غربی مقبره کوروش، حفره‌های ایجاد شده توسط گلسنگ بر سطح نسبتاً متراکم سنگ، تصویر «ب»: نمایی نزدیک از کادر مستطیل شکل در تصویر الف؛ حفره پر شده توسط کانی‌های ثانویه حاصل از زندگی گلسنگ، تصویر «ج»: جبهه شمال شرقی مقبره کوروش، بافت فشرده بلورهای کلسیت و دولومیت که دچار پدیده انحلال و خوردشدگی شده‌اند.



تصویر ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ کرم ۱۰۲ و ۱۰۴
تصویر «الف»: جبهه شمال غربی مقبره کوروش، این بخش از نمونه، حاوی مقدار بسیار کمی از بقایای گلسنگ است، تصویر «ب»: نمایی نزدیک از کادر مستطیل شکل در تصویر الف، حفره‌ها و خوردگی‌های ایجاد شده حاصل از فعالیت گلسنگ، حتی هیف قارچ (خطوط روشن) در این تصویر به خوبی نمایان است. تصویر «ج»: جبهه جنوب غربی مقبره کوروش؛ پیکان‌های سفید، انحلال شدید بلورهای کلسیت را نشان می‌دهند.



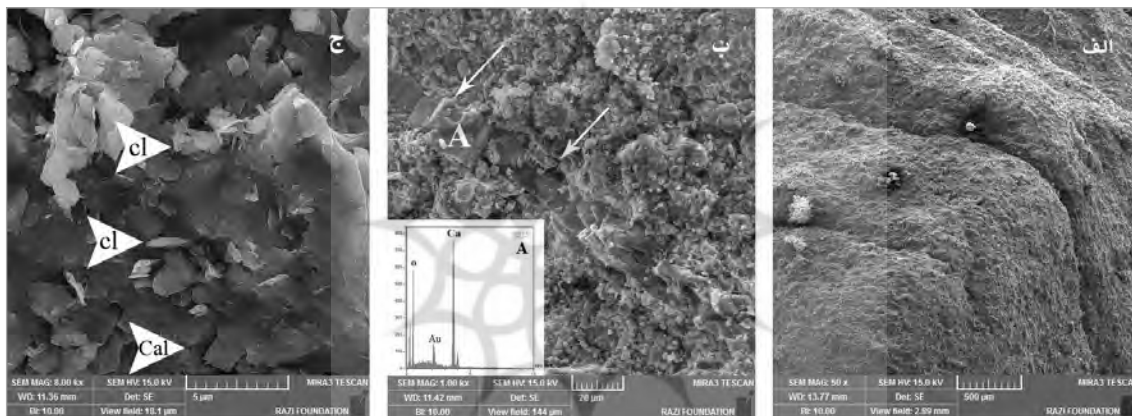
تصویر ۹. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ کرم ۱۰۶ و ۱۰۷
تصویر «الف»: نقش انسان بالدار، لایه قرار گرفته در سطح رویی متعلق به لایه پاتین تشکیل شده بر روی سطح اصلی سنگ و دندان‌های حاصل از انحلال کلسیت در زیر لایه پاتین مشهود است. تصویر «ب»: ضلع شمال غربی تل تخت، لایه یک‌دستی روی سطح را پوشانده و در برخی نقاط دچار از هم گسیختگی شده است، آنالیز نقطه A وجود بلورهای سولفات کلسیم را اثبات می‌کند. تصویر «ج»: در بزرگ‌نمایی تصویر «ب»، پیکان‌های سفید بلور کلسیتی را نشان می‌دهد که دچار شکستگی و از هم گسیختگی شده است و پیکان‌های سیاه، بلورهای سولفات کلسیم را مشخص کرده‌اند.

منطقه دشت مرغاب و تابش شدید نور خورشید همچنان به زیست خود ادامه داده‌اند.

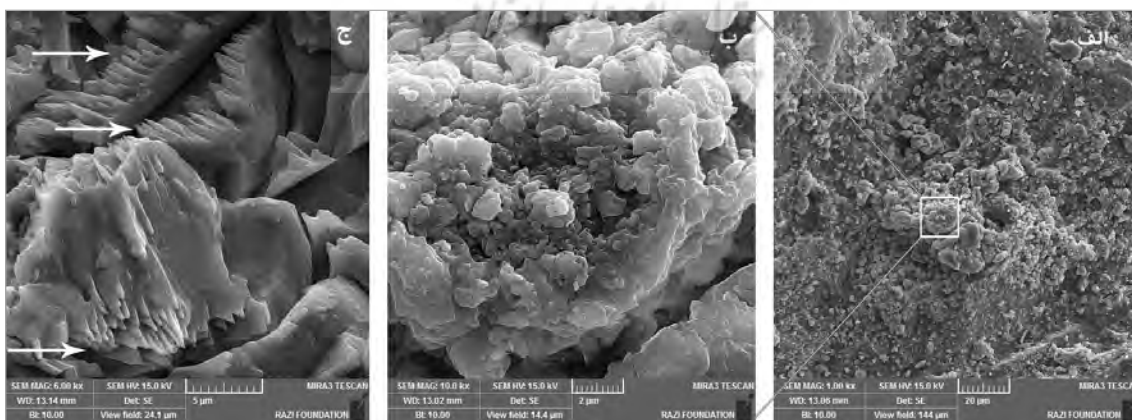
مطالعات انجام‌شده بر روی اثرات گلسنگ بر آثار سنگی این موضوع را ثابت کرده است که اثرات تخریبی بیولوژیک صد تا هزار مرتبه بیشتر از اثرات دیگر انواع هوازگی‌ها است. علاوه بر این، گلسنگ‌ها نه تنها به صورت شیمیایی سنگ را تخریب می‌کنند، بلکه اثرات تخریبی فیزیکی نیز دارند (Aghamiri et al, 2002). تخریب با یوشیمیایی گلسنگ‌ها عموماً از خوردگی کانی‌های سنگ، فرونشست و تولید ترکیبات ثانویه حاصل از آن ایجاد می‌شود که این خوردگی می‌تواند از سه طریق آزادسازی اسید اگزالیت، ایجاد اسید کربنیک و همچنین با تولید دیگر اسیدهای مستعد حاصل از یون‌های فلزی کی‌لیت^{۱۳} ساز مانند آهن^{۲+} Fe و منیزیم^{۲+} Mn، موجب

تخریب بستر سنگی شود (Crispim et al, 2005; Adamo et al, 2000; Lee et al, 1999) (تصویر ۱۲).

اثر تخریب فیزیکی گلسنگ، بدین شکل است که هیف قارچ به داخل حفره‌های سنگ نفوذ کرده و در اثر تغییرات رطوبت منبسط و منقبض می‌شود که این پدیده موجب فشار به دیواره‌ها می‌شود و در نهایت، تکرار این عمل منجر به تخریب مکانیکی می‌گردد. همچنین تورم نمک‌های آلی حاصل از واکنش‌های گلسنگ خود نیز می‌تواند موجب فشار به دیواره خلل و فرج سنگ شود (Bjelland et al, 2002). (تصویر ۱۳). نفوذ هیف قارچ در بافت سنگ به وضوح در تصاویر میکروسکوپ الکترونی دیده می‌شود. قارچ‌ها موجب تخریب حفره‌ای و کانالی سطح اثر شده‌اند و در درون برخی از حفره‌ها اندام باردهی آن نیز موجود است؛ علاوه بر آن



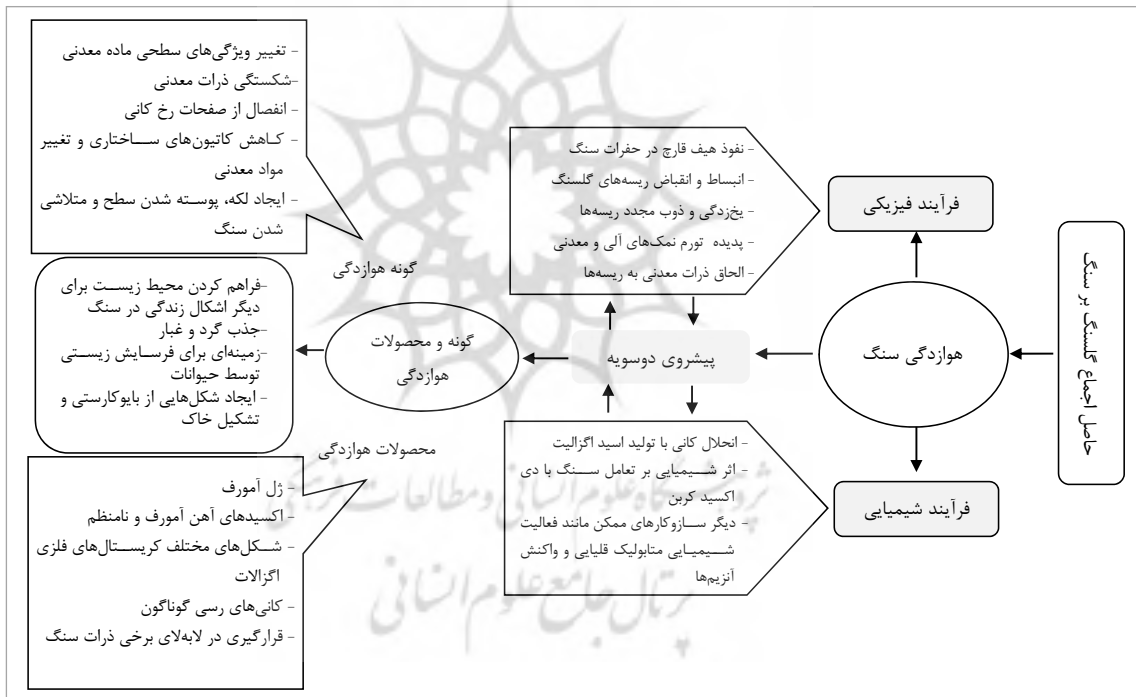
تصویر ۱۰. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه ۱۰۵ سنگ سیاه که دچار تخریب لایه‌ای شده است. تصویر «الف»: بافت ریز و متراکم این نوع سنگ و انفصال لایه‌ای آن قابل مشاهده است (با چشم غیر مسلح نیز دیده می‌شود). تصویر «ب»: ردیفی از بلورهای درشت‌تر کلسیت ثانویه توسط پیکان‌های سفید رنگ مشخص شده‌اند. تصویر «ج»: در بزرگ‌نمایی بالاتر، حضور ذرات رس در کنار بلورهای کلسیت مشهود است.



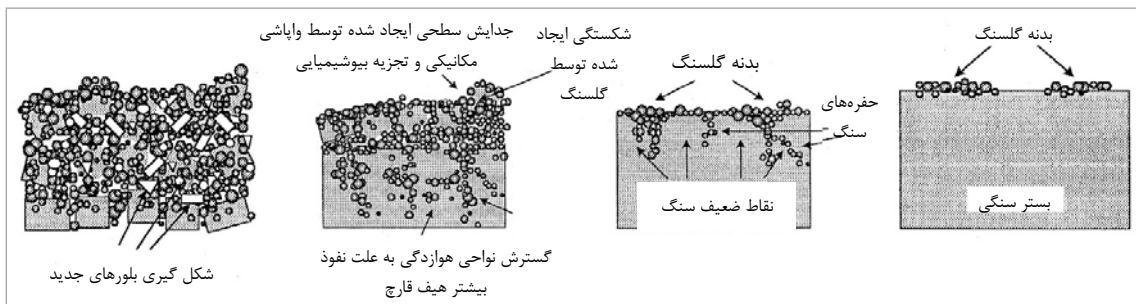
تصویر ۱۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ کبود تصویر «الف»: پدیده ماسه‌ای شدن و جدایش دانه‌های نمایان است. تصویر «ب»: تصویری بزرگ‌نمایی شده از کادر مستطیل سفید رنگ در تصویر الف است؛ حفره‌ها و کانال‌های ایجاد شده توسط انحلال و از طرفی حضور کلسیت‌هایی که آگیری کرده‌اند مشهود است. تصویر «ج»: لبه‌های دندان‌های وی شکل «ا» بلورهای کلسیت که حاکی از انحلال هستند، مشاهده می‌شوند.

می‌شود (Wendler et al, 1999). با این حال، مطالعات بسیاری حاکی از این است که میکروارگانیزم‌ها اثرات تخریبی شیمیایی و فیزیکی بر سنگ‌ها، خصوصاً سنگ‌آهک و مرمر دارند (Crispim et al, 2005) و ترکیباتی که گلسنگ‌ها آزاد می‌کنند شامل اسیدهای اگزالیک، سیتریک، گلوکونیک و لاکتیک است که در ابتدا با بستر، واکنش داده و گاهی موجب کاهش مقاومت کانی‌ها می‌شوند، (Adamo et al, 2000). طبق اظهارات محققان، در میان اسیدهای حاصله، اگزالیک اسید در واکنش با کلسیت بستر سنگی، تولید اگزالات کلسیم می‌کند که این ماده به عنوان پاتین سنگ شناخته شده است (Campos-suñol et al, 2008; Vazquez-Calvo et al, 2007)، اما در بررسی صورت گرفته بر روی ستون تراژن^{۱۴} ثابت شد که الگوی توزیع اگزالات در تعارض با

شواهدی از کانی‌زایی گلسنگ در سطح سنگ‌ها و در درون حفرات ناشی از آنها نیز مشاهده می‌شود. کانی‌های حاصل از این واکنش‌ها در اثر رشد بلوری خود به دیواره حفرات فشار وارد می‌کنند که تکرار این عمل در نهایت موجب ایجاد ریزترک در ذرات و بافت سنگ می‌گردد. بدین جهت می‌توان تخریب‌های فیزیکی ناشی از فرسودگی زیستی را به طور قطع از عوامل مخرب سنگ‌های این مجموعه میراث جهانی دانست. قابل ذکر است که برخی محققین معتقدند که میکروارگانیزم‌هایی مانند گلسنگ تنها باعث تخریب زیبایی سطح سنگ از طریق رنگ‌دانه‌هایشان می‌شوند و هیچ اثر مستقیمی بر سنگ ندارند، علاوه بر آن اظهار می‌دارند که در شرایط آب و هوایی پایدار (مانند اقلیم استوایی) یک‌لایه محافظ بر سطح سنگ ایجاد می‌کنند که موجب کنترل رطوبت و دما



تصویر ۱۲. فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی حاصل از فعالیت گلسنگ بر سنگ و محصولات ناشی از آن (Chen et al, 2002: 390)



تصویر ۱۳. از راست به چپ: طرح شماتیک نفوذ و توسعه گلسنگ در سنگ و نحوه فروپاشی آن از طریق شکل‌گیری بلورهای جدید (Chen et al, 2000: 126)

الگوی توزیع گل‌سنگ است. از این رو برخی معتقدند که ممکن است پاتین‌های اگزالات بر اثر شرایط اقلیمی کهن (میزان بیشتر رطوبت سطحی) ایجاد شده باشد، اما از طرفی پژوهش‌های بسیاری نشان داده‌اند که فساد یک پوشش آلی حتی می‌تواند به تشکیل اگزالات کلسیم منجر شود. علاوه بر آن، اخیراً مطالعات آزمایشگاهی معلوم ساختند که اگزالات تنها به علت فعالیت جلبک بر روی سنگ‌های آهکی شکل می‌گیرد (Doehne et al, 2010: 21-22)؛ بنابراین بر طبق مشاهدات ماکروسکوپی و ریزساختاری از سطح سنگ، لایه یک‌دستی که در بیرونی‌ترین بخش قرار دارد به احتمال قوی حاصل فعالیت‌های زیستی بر سنگ‌های کرم محوطه پاسارگاد است که موجب تشکیل لایه پاتین بر سنگ‌ها شده و مطمئناً تحت شرایط خاصی تشکیل شده است که برای اطلاع دقیق از نوع و چگونگی تشکیل آن، تحقیق جداگانه‌ای نیاز است و از آنجا که هدف از این تحقیق در مرحله اول شناسایی تخریب‌ها و عوامل مخرب است این دسته از پژوهش‌ها در خصوص نوع لایه و شرایط واکنش آن بسیار تخصصی است و نیاز به مهارت‌هایی در زمینه بیوشیمی دارد.

مطالعات آزمایشگاهی مختلف حاکی از آن هستند که فعالیت باکتری‌ها، میزان انحلال سنگ‌آهک را دو برابر می‌کند (McNamara et al, 2005). همان‌طور که حفرة‌هایی ناشی از انحلال حفرة‌ای در سطح سنگ‌های کرم محوطه پاسارگاد (در تصاویر میکروسکوپی و ماکروسکوپی) مشهود است، در اثر فعالیت‌های باکتری گل‌سنگ‌ها خوردگی حفرة‌ای ایجاد شده است. این حفرة‌ها نه تنها ظاهر را مخدوش کرده، بلکه موجب افزایش تخلخل سطحی سنگ شده و بدین ترتیب جذب آب سنگ را بالا برده که در سرما و شرایط یخبندان می‌توانند تخریب شدیدتری را ایجاد نمایند. علاوه بر حفرة‌ها، هیف‌های قارچ نیز بر سطح سنگ و در لابه‌لای کانال‌ها و نواحی متخلخل دیده می‌شوند، چه‌بسا که خود هیف‌ها مسبب ایجاد این کانال‌ها باشند؛ زیرا انبساط و انقباضشان در اثر افزایش و کاهش رطوبت موجب فشار به دیواره‌ها شده و تکرار این پدیده در طول سالیان متمادی ممکن است باعث انفصال برخی ذرات شده باشد.

تحقیقاتی پیش از این بر روی شناسایی گونه قارچ‌های مقبره کوروش انجام شده است؛ قارچ‌های شناخته‌شده در چندگونه *Caldosporium sp.*, *Embellisia sp.*, *Cryptococcus sp.*, *Candida sp.*, *Meyerozyma sp.*, *Arthirium sp.*, *Ulocladium sp.*, *Fusarium sp.*, *Humicola sp.* و *Pseudozyma sp.* دسته‌بندی شده‌اند (Mohammadi et al, 2014).

در تصاویر ماکروسکوپی، محصولات سفیدرنگی در حاشیه اندام‌های گل‌سنگ (تصویر ۵) و در درون برخی از حفرة‌ها، اندام باردهی گل‌سنگ و در برخی حفرة‌های دیگر، کانی‌هایی مشاهده شدند (تصویر ۷). این محصولات عموماً سفیدرنگ، حاصل فعالیت گل‌سنگ‌ها هستند که به بازتولید کانی منجر می‌گردد و اصطلاحاً بایوکانی‌زایی نامیده می‌شود. این محصولات معمولاً حاصل ته‌نشست آپاتیت یا فسفات هستند (Mohammadi, 2007: 41-44)، در نمونه‌های آنالیز شده از تخت جمشید احتمال داده شده است که این کانی‌ها از جنس اگزالات مخلوط با ژئیس باشند (Ibid, 2008: 31). این کانی‌ها معمولاً به بدنه گیاه گل‌سنگ چسبیده شده‌اند. معمول‌ترین کانی‌های حاصله در سنگ‌های آهکی عبارت‌اند از ویولیت^{۱۵} (پاتین اگزالات) و مسکویت^{۱۶} (Bjelland et al, 2002) که در صورتی که در درون خلل و فرج نفوذ کنند، رشد این کانی‌ها ممکن است پیامدهایی مانند فشار وارد آوردن به دیواره سنگ را به همراه داشته باشد و با ایجاد تنش، فضای مناسبی برای تخریب ایجاد نماید. طی آزمایش‌های انجام‌شده توسط آنالیز XRD امکان شناسایی دقیق این محصولات از جهت شناسایی جنسیت وجود نداشت، به عبارتی شناسایی این نوع کانی بر روی سنگ هوازده‌شده بسیار سخت است؛ زیرا همانند نمونه‌های شناسایی نمک، میزان این فاز نسبت به فازهای اصلی سنگ بسیار اندک است و این میزان اندک، شناسایی آن را بسیار سخت می‌کند (Ibid).

دو نوع سنگ دیگر که کمتر تحت آسیب بیولوژیکی قرار گرفته‌اند، به شکل دیگری و توسط عامل‌های متفاوتی در طول سالیان تخریب شده‌اند. نتایج حاصل از مشاهدات ریزساختاری، داده‌های خوبی را در مورد تغییرات رخ داده در سنگ‌ها در اختیار نهادند. برای مثال، اگر از لحاظ ماهیتی مقایسه شوند، سنگ‌آهک کرم از لحاظ ساختار به طور یک‌دست از بلورهای کلسیت و دولومیت تشکیل شده است که بافت نسبتاً متراکم و همگنی دارد، اما سنگ‌آهک سیاه برخلاف بافت فشرده و تخلخل کم خود دارای نقاط ضعف ماهیتی است و بافت ناهمگنی دارد. رگه‌های درشت کلسیت ثانویه در بین بافت ریز میکراتی آن، از جمله عیوب ذاتی این سنگ است که موجب آسیب‌های جدی آن تا این زمان شده است، این رگه‌ها در تماس با آب‌های اسیدی حل شده و به آسانی از محیط خارج می‌گردند و انفصال‌هایی را در بدنه بلوک‌ها ایجاد می‌کنند. یکی دیگر از عیوب ذاتی، وجود ذرات رس در بین ذرات تشکیل‌دهنده آن است که این ذرات در تماس با آب متورم می‌گردند و در نهایت تنش برشی ایجاد می‌نمایند (Rodriguez-Navarro et al, 1998)، زیرا رس و کلسیت

متفاوت (با توجه به بافت و تنوع رنگ‌های ذرات تشکیل دهنده) مطمئناً دارای تنش تفاضلی متفاوتی هستند که این تنش تفاضلی متفاوت در برابر آب و نور خورشید موجب تنش‌های شدیدی پس از گذر زمان می‌گردد. به علاوه، از طرفی ثابت شده که کانی‌ها با رنگ‌های متفاوت خود هنگامی که در معرض نور مستقیم خورشید قرار می‌گیرند دچار تنش‌های انبساط حرارتی نامنظم شده و موجب تنش در مرز دانه‌ها می‌گردند (Doehne et al, 2010: 24). همان‌طور که در تصاویر معلوم گشت که سیمان کلسیتی این‌گونه سنگ دچار تخریب انحلالی شده است، این نوع انحلال و تخریب نیز خود از عوامل دیگر ایجاد جدایش دانه‌ای در این سنگ است که این جدایش دانه‌ای، خود را به صورت پدیده ماسه‌ای شدن سنگ نشان داده و در نهایت پس از گذشت سالیان دراز، تبدیل شدن آن به خاک را در پی داشته است.

تفاضل رطوبتی دارند و این تفاضل رطوبتی در ابتدا خود را در گوشه‌ها به شکل انفصال نشان می‌دهد و سپس در درازمدت موجب پدید آمدن انفصال‌های بیشتر و جدی‌تر می‌گردد (Doehne et al, 2005).

سنگ کبود نیز به علت عیب ذاتی خود که همان وجود ذرات تشکیل دهنده با جنسیت‌های متفاوت و همچنین میزان نسبتاً زیاد سیلیس (حدود ۸ تا ۱۳ درصد از نسبت مواد تشکیل دهنده) و کانی‌های فلدسپاتی (در نتایج XRF) است دچار ضعف ماهیتی است که این ضعف ماهیتی، خود عامل اصلی تخریب نسبتاً خاک‌گونه این نوع سنگ نسبت به سنگ‌های دیگر بوده است. همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپی مشهود است (تصویر ۵)، ترک‌ها و ریزترک‌هایی که الگوی ترک‌های رسی را دارند خود نشان‌دهنده تفاضل رطوبتی رس با دیگر مواد تشکیل دهنده در این سنگ هستند (Jiménez-González et al, 2008: 13) و همچنین ذرات متشکله با جنسیت‌های

نتیجه‌گیری

فاز اصلی سنگ‌های پاسارگاد، کربنات کلسیم است که حدود ۹۰ درصد از نسبت وزنی آنها را تشکیل داده است، بدین سبب می‌توان آنها را در دسته سنگ‌های آهکی قرار داد. سنگ‌های کرم‌رنگ این محوطه با دو فاز متفاوت کربنات کلسیم و کربنات منیزیم نسبتاً خالص شناسایی شدند. دو نوع سنگ دیگر علاوه بر فاز کربنات کلسیم، دارای مقدار فازهای متفاوت از نوع کوارتز و رس هستند که در سنگ سیاه، درصد وزنی ناچیزی در حدود ۵ درصد و در سنگ کبود در حدود ۸ تا ۱۳ درصد را شامل می‌شوند. مشاهدات میکروسکوپی و میکروسکوپی، بافت فشرده و یک‌دست سنگ کرم را تأیید کردند. در مشاهدات دو سنگ دیگر، عیوب ذاتی سنگ‌ها نمایان شدند که از مهم‌ترین آنها رگه‌های کلسیت ثانویه در سنگ سیاه و گوناگونی ذرات متشکله در سنگ کبود است. رگه‌های کلسیت ثانویه در تماس با آب باران خصوصاً اگر باران اسیدی باشد به راحتی محلول شده و از محیط سنگ خارج می‌گردند و خارج شدن آن از بافت سنگ موجب انفصال قطعات سنگ در همان نواحی می‌گردد، درست مانند آنچه در محوطه پاسارگاد برای سنگ‌های سیاه رخ داده است. به علاوه حضور رس (احتمالاً از گروه اسمکتیت) در بافت سنگ باعث ضعیف شدن سنگ در تماس با آب می‌شود، زیرا رس در تماس با آب متورم شده و در اثر تکرار خیس و تر شدن متداوم، انبساط تفاضلی آن موجب ایجاد تنش و از هم‌پاشیدگی می‌گردد. مشکل تنوع ذرات تشکیل دهنده در سنگ کبود نیز پیامدهای مشابهی داشته است. ذرات متفاوت عکس‌العمل‌های متفاوتی در برابر تغییر درجه حرارت و یا حتی در تماس با آب دارند که این مسئله تنش تفاضلی (انبساط تفاضلی، حرارت تفاضلی) در مدت‌زمان طولانی برای سنگ‌هایی که در محوطه باز جوی قرار دارند، مشکل‌ساز خواهد شد. می‌توان گفت چندین عامل به طور هم‌زمان موجب تخریب سنگ‌های پاسارگاد شده‌اند، میزان اثرگذاری هر کدام از این عوامل در این سنگ‌ها شدت و ضعف دارند. به‌عنوان مثال در سنگ کرم که بافت همگنی دارد مهم‌ترین عامل مخرب، گل‌سنگ‌ها هستند. گل‌سنگ‌ها در این نوع سنگ، چه از طریق تغییر رنگ سطح، چه با ایجاد بافت متخلخل و پوسته‌شدگی سطحی موجب مخدوش شدن ظاهر شده‌اند. علاوه بر این، اثرات تخریبی شیمیایی نیز داشته‌اند که از جمله آنها انحلال کلسیت و ایجاد خوردگی حفره‌ای را می‌توان نام برد. از طرفی، می‌توان ادعا داشت که احتمالاً در یک مورد گل‌سنگ‌ها عامل مفیدی بوده‌اند و آن در صورتی است که بتوان به‌طور قطع گل‌سنگ را عامل ایجاد پاتین بر سطح سنگ دانست؛ زیرا پاتین‌های سطحی نقش انسان‌بالدار و دیواره تل تخت، مانند یک پوشش، سطح سنگ‌ها را

پوشانده‌اند که این پوشش می‌تواند مقاومت سطح سنگ را در برابر عوامل جوی بالا ببرد. گلسنگ در دو نوع دیگر سنگ‌های پاسارگاد مشاهده شد، اما شدت اثر تخریبی آن به ترتیب در سنگ کبود و سنگ سیاه کمتر مشاهده شد. در سنگ کبود علاوه بر عیوب ذاتی، گلسنگ نیز به‌طور هم‌زمان موجب تخریب بیشتر سنگ شده است. بر طبق مشاهدات و آنالیزهای انجام‌شده، مهم‌ترین عوامل آسیب‌رسان محیطی در مجموعه میراث جهانی پاسارگاد را می‌توان یکی فرسودگی زیستی از نوع گلسنگ و دیگری رطوبت (چه به شکل رطوبت نسبی و چه به شکل رطوبت نزولی) دانست. رطوبت به واسطه فراهم ساختن محیط مناسب برای زندگی گلسنگ و به علاوه ایجاد پدیده‌های انحلال و تورم رسی در سنگ‌ها، عامل تخریب برشمرده می‌شود.

پی‌نوشت

1. Micrite (microcrystalline calcite): کلسیت ریزبلور
2. Sparite: کلسیت درشت‌بلور و شفاف
3. Micro-Karst: انحلال سطح و خوردگی سنگ‌های کربناته در مقیاس کوچک (Flügel, 2004:13)
4. Argillaceous
5. Calcarenite: سنگ آهک آواری حاوی دانه‌های شن و ماسه‌ای (به اندازه ۰/۰۶۲ تا ۲ میلی‌متر) (Flügel, 2004: 243)
6. گراف‌های پراش پرتو ایکس به علت تعداد زیادشان و اشغال حجم نسبتاً بالا، از مقاله حذف شده‌اند.
7. Biomineralization
8. Hyphae
9. Portlandite
10. Autotrophic Symbiotic
11. Thallus
12. گزارش‌های اداره هواشناسی استان فارس، ایستگاه مادرسلیمان
13. Chelate. کلیت‌ها، کمپلکس‌های حلقوی هستند که از پیوند ترکیبات آلی چنددندانه‌ای با یون فلزی حاصل می‌شوند.
14. Trajan's Column
15. Whewellite ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
16. Muscovite ($\text{KAl}_2[(\text{OHF})_2\text{-AlSi}_3\text{O}_{10}]$)

سپاسگزاری

نویسندگان از پروفیسور جوزپه کلترونه (Giuseppe Cultrone)، دکتر آنا آریزی (Anna Arizzi)، دکتر ادواردو مولینا (Eduardo Molina) در دانشگاه گرانادا، دانشکده علوم، بخش مینرالوژی و پترولوژی و دکتر بیتریس کامارا خایخو (Beatriz Cámara Gallego) از موسسه علوم زمین مادرید برای همکاری‌شان در تهیه آنالیزها و راهنمایی‌شان در روند انجام آزمایش‌های این پژوهش کمال تشکر را دارند. علاوه بر آن از دکتر امید عودباشی، دانشگاه هنر اصفهان؛ دکتر حمید فدایی مدیر پایگاه میراث جهانی پاسارگاد، آقایان علی تقوی و حمیدرضا کرمی و خانم فرزانه گرامی همکاران در پایگاه میراث جهانی پاسارگاد جهت همکاری‌شان در تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی و همچنین در اختیار نهادن تجربیاتشان و گزارش‌های بایگانی پایگاه میراث جهانی پاسارگاد، بسیار سپاسگزار هستیم.

منابع و مآخذ

- رخشانی، مریم و کیال، بابک. (۱۳۸۲). معرفی و بررسی فرآیند ساخت و مرمت در مجموعه جهانی پاسارگاد. پژوهش و مرمت مجموعه جهانی پاسارگاد، آرشیو دفتر فنی پایگاه میراث جهانی پاسارگاد، چاپ‌نشده.
- سامی، علی. (۱۳۳۸). پاسارگاد قدیمی‌ترین پایتخت کشور شاهنشاهی ایران، چاپ اول، تهران: مهرآیین.
- سعیدی، زهرا. (۱۳۸۳). گزارش عملکرد واحد زمین‌شناسی مرکز مطالعات. پژوهش و مرمت مجموعه جهانی پاسارگاد. آرشیو دفتر فنی پایگاه میراث جهانی پاسارگاد، چاپ‌نشده.
- شکفته، عاطفه؛ احمدی، حسین و یزدی، مهدی. (۱۳۹۴). علل ماهیتی دوام و ناپایداری سنگ‌های باقی‌مانده در مجموعه میراث جهانی پاسارگاد. همایش بین‌المللی باستان‌شناسان جوان. زیر چاپ، تهران: دانشگاه تهران.

- شیخ‌الاسلامی، رضا. (۱۳۸۷). بررسی و امکان‌سنجی استفاده از سیمان‌های بهینه‌شده با میکرو سیلیس در مرمت آثار سنگی مجموعه جهانی پارسه- پاسارگاد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مرمت آثار فرهنگی و تاریخی. دانشگاه هنر اصفهان.
- شیروانی، مریم. (۱۳۸۷). آسیب‌شناسی سنگ‌های سیاه مجموعه پاسارگاد و پیشنهاد راه حل حفاظتی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی. دانشگاه هنر اصفهان.
- عبداللهی، پریرسا. (۱۳۸۶). فن‌شناسی، آسیب‌شناسی و ارائه طرح حفاظتی سنگ‌نگاره انسان بالدار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.
- Adamo, P. & Violante, P. (2000). Weathering of Rocks and Neogenesis of Minerals Associated with Lichen Activity. **Applied Clay Science**, 16 (5-6), 229-256.
- Aghamiri, R. & Schwartzman, D. W. (2002). Weathering Rates of Bedrock by Lichens: A Mini Watershed Study. **Chemical Geology**, 188 (3-4), 249-259.
- Arino, X. & Saiz-Jimenez, C. (1996). Factors Affecting the Colonization and Distribution of Cyanobacteria, Algae and Lichens in Ancient Mortars. **Proceedings of the Eighth International Congress on Deterioration and Conservation of Stone**, Berlin: Rathgen-Forschungslabor, 725-731.
- Bjelland, T.; Saebo L. & Thorseth H. I. (2002). The Occurrence of Biomineralization Products in Four Lichen Species Growing on Sandstone in Western Norway. **Lichenologist**. 34(5), 429-440.
- Campos-Suñol, M. J.; Domínguez-Vidal, A. & De la Torre-López, M. J. (2008). Renaissance patinas in Úbeda (Spain): Mineralogic, Petrographic and Spectroscopic Study. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, 391 (3), 1039-1048.
- Cappitelli, F. & Sorlini, C. (2008). Microorganisms Attack Synthetic Polymers in Items Representing Our Cultural Heritage. **Applied and Environmental Microbiology**, 74 (3): 564-569.
- Carcia-Rowe, J. & Saiz-Jimenez, C. (1991). Lichens and Bryophytes as Agents of Deterioration of Building Material in Spain Cathedrals. **Biodeterior**, (28), 151-163.
- Chen, J.; Blume, H. P. & Beyer, L. (2000). Weathering of Rocks Induced by Lichen Colonization—a Review. **Catena**, 39 (2), 121-146.
- _____ & Blume, H. P. (2002). Rock-Weathering by Lichens in Antarctic: Patterns and Mechanisms. **Journal of Geographical Sciences**, 12 (4), 387-396.
- Clair, L. S. & Seaward, M. R. (2004). **Biodeterioration of Stone surfaces: Lichens and Biofilms as Weathering Agents of Rocks and Cultural Heritage**. Dordrecht: Springer Science & Business Media.
- Crispim, C. A. & Gaylarde, C. C. (2005). Cyanobacteria and Biodeterioration of Cultural Heritage: a Review. **Microbial Ecology**, 49 (1), 1-9.
- Doehne, E. & Price, C. A. (2010). **Stone Conservation**. Los Angeles: Getty Conservation Institute Publication.
- _____; Simon, S.; Mueller, U.; Carson, D. & Ormsbee, A. (2005). Characterization of Carved Rhyolite Tuff: The Hieroglyphic Stairway of Copan, Honduras. **Restoration of Buildings and Monuments: an International Journal**, 11 (4), 247-254.
- Flugel, E. (2004). **Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application**. Heidelberg: Springer.
- Jiménez-González, I.; Rodríguez-Navarro, C. & Scherer, G. W. (2008). Role of Clay Minerals



- in the Physicomechanical Deterioration of Sandstone. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 113 (F02021), 1-17.
- Lee, M. R. & Parsons, I. (1999). Biomechanical and Biochemical Weathering of Lichen-Encrusted Granite: Textural Controls on Organic-Mineral Interactions and Deposition of Silica-Rich Layers. **Chemical Geology**, 161 (4), 385-397.
 - Martín Ramos, J. D. (2004). **XPowder, a Software Package for Powder X-Ray Diffraction Analysis**. Lgl. Dep. GR 1001/04, www.xpowder.com. (access date 2016/02/21).
 - McNamara, C. J.; Perry, T. D. IV; Bearce, K.; Hernandez-Duque, G. & Mitchell, R. (2005). Measurement of Limestone Biodeterioration Using the Ca²⁺ Binding Fluorochrome Rhod-5N. **Journal of Microbiological Methods**, 61 (2), 245-250.
 - Miller, A. Z.; Rogerio-Candelera, M. A.; Dionísio, A.; Macedo, M. F. & Sáiz-Jiménez, C. (2012). Assessing the Influence of Surface Roughness on the Epilithic Colonisation of Limestones by Non-Contact Techniques. **Materiales de Construcción**, 62 (307), 411-424.
 - Mohammadi, P. (2007). Rock Inhabiting and Deteriorating Fungi from Carbonate Monuments of Persepolis. Ph.D. Thesis: Diss. in Science, Universität Oldenburg.
 - _____ & Krumbein, W. E. (2008). Biodeterioration of Ancient Stone Materials from the Persepolis Monuments (Iran). **Aerobiologia**, 24 (1), 27-33.
 - _____ & Maghbolli-Balasin, N. (2014). Isolation and Molecular Identification of Deteriorating Fungi from Cyrus the Great Tomb Stones. **Iranian journal of microbiology**, 6 (5), 361-370.
 - Rodriguez-Navarro, C.; Sebastian, E.; Doehne, E. & Ginell, W. S. (1998). The role of Sepiolite-Palygorskite in the Decay of Ancient Egyptian Limestone Sculptures. **Clays and Clay Minerals**, 46 (4), 414-422.
 - Salvadori, O. & Mucicchia, A. C. (2016). The Role of Fungi and Lichens in the Biodeterioration of Stone Monuments. **The Open Conference Proceedings Journal**, 7 (1), 39-54.
 - Scheerer, S.; Ortega-Morales, O. & Gaylarde, C. (2009). Microbial Deterioration of Stone Monuments—an Updated Overview. **Advances in Applied Microbiology**, 1 (66), 97-139.
 - Shekofteh, A.; Ahmadi, H.; Yazdi, M. (2016). Relationship between the Durability and Fabric of Pasargadae Carbonate Stones (Archaeological Site from Achaemenid Period, South of Iran), **Science and Art: A Future for Stone, Proceedings of the 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone**, Paisley: University of the West of Scotland, 1, 133-138.
 - Tilia, A. N. (1968), A Study on the Methods of Working and Restoring Stone and on the Parts Left Unfinished in Achaemenian Architecture and Sculpture, **East and West**, 18 (1-2), 67-95.
 - Vazquez-Calvo, C.; de Buergo, M. A.; Fort, R. & Varas, M. J. (2007). Characterization of Patinas by Means of Microscopic Techniques. **Materials Characterization**, 58 (11), 1119-1132.
 - Wendler, E. & Prasartset, C. (1999) Lichen Growth on Old Khmer Style Sandstone Monuments in Thailand: Damage Factor or Shelter? **12th Triennial Meeting of the ICOM Committee for Conservation**, France: Janet Bridgland, 750-754.
 - URL 1: www.googlemap.com (access date 27/04/2015).
 - URL 2: www.googleearth.com (access date 10/11/2016).

Received: 2016/04/16

Accepted: 2017/01/17



Chemical Composition and Decay Patterns of Stones used in Pasargadae World Heritage Site

Atefeh Shekofteh* Hossein Ahmadi** Mehdi Yazdi***

Abstract

Stones used in Pasargadae world heritage site are different in texture and color as well as chemical characters. Despite equal environment condition, they have been damaged in different forms. The aim of this study is to identify stones compositions and decays through XRD and XRF analysis. Also, some surface investigations have been done by Digital Macroscopic and Scanning Electron Microscope (SEM). The analyses declare that these stones are all from three different kind of limestone. Two types of the limestone that are in beige and dark gray colors have a compact texture, but the third one that is in yellow gray color has fairly porous structure. The main phase reported in X-ray diffraction analysis is Calcite (CaCO_3), in addition, minor amount of quartz phase (SiO_2) have also been reported. In some beige stone analysis, dolomite phase was observed and the quality of dolomite ($\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$) and calcite were approximately equal in ratio. According to microscopic and microstructure images, the main reason for the decay of dark and green gray types is their intrinsic problems. The main factor of decay in beige stone is lichens mechanism. Hence, the results of experiments and observations determine that the main environmental decay factors in Pasargadae World Heritage Site are microorganism and water duo to calcite dissolution and clay swelling.

Keywords: Pasargadae World Heritage Site, Limestone, Stone Deterioration, Dissolution, Bio-deterioration

* PhD candidate, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Iran.

** Associate Professor, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Iran.

*** Professor, Faculty of Science, University of Isfahan, Iran.