Journal of Research on Archaeometry, 2020; 6 (1):175–192

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.29252/jra.6.1.175

URL: http://jra-tabriziau.ir/

Technical Note

The field monitoring of influential biodeteriogenic Agent the historic rock surfaces in Persepolis-UNESCO World Heritage Site

Mohammad Sohrabi[1*], Mahsa Esmaeillou[2], Hamid Fadaei[3], Mohammad Hassan Talebian[4], Nasrin Noohi[3]

[1] *Assistant Professor in Iranian Research Organization for Science and Technology, & The Museum of Iranian Lichens, Tehran, IRAN*

[2] *PhD student in Microbiology, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, IRAN*

[3] *Assistant Professor in Research Center for Conservation of Cultural Relics, Research Center of Iranian Cultural Heritage and Tourism Organization, Tehran, IRAN*

[4] *Architectural Conservation, Associate Professor in Department of Fine Arts, University of Tehran, IRAN,*

Received: 21/02/2020 **Accepted: 09/06/2020**

Abstract

Cultural heritage has always been the focus of many civilizations and therefore, it needs to be preserved for future generations. From prehistoric times, when grandeur and beauty were the aims of architecture, stone was the most widely used durable material. Biodeterioration of the stone monuments, one of the most important causes for the loss of the cultural heritage, is defined as any undesirable change in the properties of a material caused by the action of biological agents such as fungi, bacteria, cyanobacteria, lichens and plants, as well as animals such as insects. The world heritage of Persepolis, for example, has been unprotected from biodeterioration for the centuries, and has unfortunately not been addressed during this time. The purpose of this study is to provide a new perspective on the study of the destructive biological factors affecting this historic site to provide a framework for future studies and serious consideration of the biological debate in conservation and restoration issues. Therefore, the presence of various factors possibly derived from the action of animals, vascular plants, mosses, fungi, lichens, green microalgae, and photosynthetic and non-photosynthetic bacteria were investigated. Based on objective observations, the presence of biodegradation factors affecting floors and the all sides of walls of various buildings in Persepolis was qualitatively investigated. Based on the results, the studied areas were classified into four classes with very high, high, medium and low risk. In addition to the initial estimate of biodiversity, the factors affecting the biodegradation of Persepolis were presented for the first time and the critical points for the presence of destructive factors were determined. Lichens exist throughout Persepolis and have proved useful in archaeological studies, since their growth can be chronologically employed to measure the age of rocks and indeed ancient monuments, their radial growth increasing logarithmically over time based on the assumed specific rate. In this study, the presence of lichens has been investigated from the perspective of biodeterioration, their presence at the microscopic scale can intensify the weathering and biodeterioration of the rock. Such action is not visible to the naked eye but leaves irreparable damage to the stone surface. It was estimated that this complex process at Persepolis is the result of more than 15 different Vascular plant species and

* Corresponding author: sohrabi@irost.org

Copyright© 2020, the Authors | This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial .terms

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]

[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]

[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

5 Non-vascular plant (mosses), 16 or 17 different species of birds, 3 to 5 species of snails and 2 to 4 species of reptiles and insects. It was shown that the establishment of a biomonitoring laboratory at Persepolis is the important task of studying the action of microorganisms since it is estimated that more than 20 strains of non-photosynthetic bacteria, more than 10 taxa of cyanobacteria, about 15 plants and mosses, more than 130 lichen species and 20 species of non-lichen fungi are involved in the biodegradation of Persepolis. The results are the estimative and provide the basis for more detailed studies to monitor the factors involved in biodegradation, which is one of the necessities of this World Heritage Site.

Keywords: XRD, Persepolis, Biodeterioration, Conservation and Restoration, World Cultural Heritage, Critical points, Biodiversity.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]

[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]

[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

پژوهه باستان‌سنجی ۱۳۹۹؛ ۶(۱): ۱۷۵-۱۹۲

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.29252/jra.6.1.175

URL: http://jra-tabriziau.ir/

دانشگاه هنر اسلامی تبریز ۱۳۷۸

مقاله پژوهشی

پایش میدانی عوامل مؤثر در فرسودگی زیستی بر سطوح تاریخی سنگ‌های میراث جهانی تخت جمشید

محمد سهرابی*[۱]، مهسا اسماعیل‌لو[۲]، حمید فدایی[۳]، محمدحسن طالبیان[۴]، نسرین نوحی[۳]

۱. گلسنگ‌شناس، استادیار گروه زیست‌فناوری صنعتی و محیط‌زیست، پژوهشکده زیست‌فناوری و موزه گلسنگ‌های ایران سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۲. دانشجوی دکتری میکروبیولوژی، گروه زیست‌فناوری صنعتی و محیط‌زیست، پژوهشکده زیست‌فناوری، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۳. استادیار پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی ـ فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع‌دستی، تهران، ایران

۴. دانشیار پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۰

چکیده

میراث فرهنگی، به عنوان ارزشمندترین یادگار گذشتگان، هویت فرهنگی و تمدنی آن‌ها، همواره زمینهٔ توجه و خاستگاه فرهنگ‌های گوناگون بوده است، از این رو، نیازمند حفظ برای آیندگان و انتقال به آن‌ها است. فرسودگی‌های زیستی، آسیب‌های برگشت‌ناپذیری هستند که به علت استقرار عوامل زیستی گوناگون نظیر قارچ، باکتری‌ها، سیانو باکترها، گلسنگ‌ها، گیاهان، موریانه‌ها و سایر حشرات بر سطوح آثار تاریخی رخ می‌دهند. در این میان، میراث جهانی تخت جمشید و آثار موجود در عرصه‌های آن از گزند عوامل دخیل در فرسودگی زیستی در امان نبوده و در طی سالیان سال در معرض عوامل فرسایندهٔ زیستی قرار گرفته‌اند. بنابراین، هدف از این تحقیق بررسی میدانی حضور کیفی و تنوع عوامل زیستی مخرب این مجموعهٔ تاریخی است تا زمینه را برای تحقیقات بعدی و شروع مباحث فرسودگی زیستی در حفاظت پیشگیرانه و مرمت آثار فراهم کند. در این پژوهش، حضور عوامل مختلفی از جمله جانوران، گیاهان گلدار، قارچ‌ها، گلسنگ‌ها، ریز جلبک‌های سبز و باکتری‌های فتوسنتزکننده و غیر فتوسنتزکننده، به صورت کلی بررسی شد. در ادامه، بر اساس مشاهدات عینی، حضور عوامل فرسودگی زیستی در کف و دیوارهای شمالی، جنوبی، شرقی و غربی بناهای مختلف تخت جمشید به صورت کیفی بررسی شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مناطق بررسی شده، به چهار منطقهٔ دارای خطر نسبی خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم درجه‌بندی شدند. در ضمن، تخمین اولیه از تنوع زیستی عوامل مؤثر در فرسودگی زیستیِ تخت جمشید برای اولین بار ارائه شد و نقاط بحرانی حضور عوامل مخرب تعیین شدند.

واژگان کلیدی: تخت جمشید، فرسودگی زیستی، حفاظت و مرمت، میراث جهانی، نقاط بحرانی، تنوع زیستی

* مسئول مکاتبات: جاده قدیم کرج، سه راه شهریار، بعد از شهرک سعیدآباد، مجتمع تحقیقاتی عصر انقلاب، پژوهشکده زیست‌فناوری و موزه گلسنگ‌های ایران سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، کد پستی: ۳۳۱۳۱۹۳۶۸۵

پست الکترونیکی: sohrabi@irost.org

حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]

[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]

[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

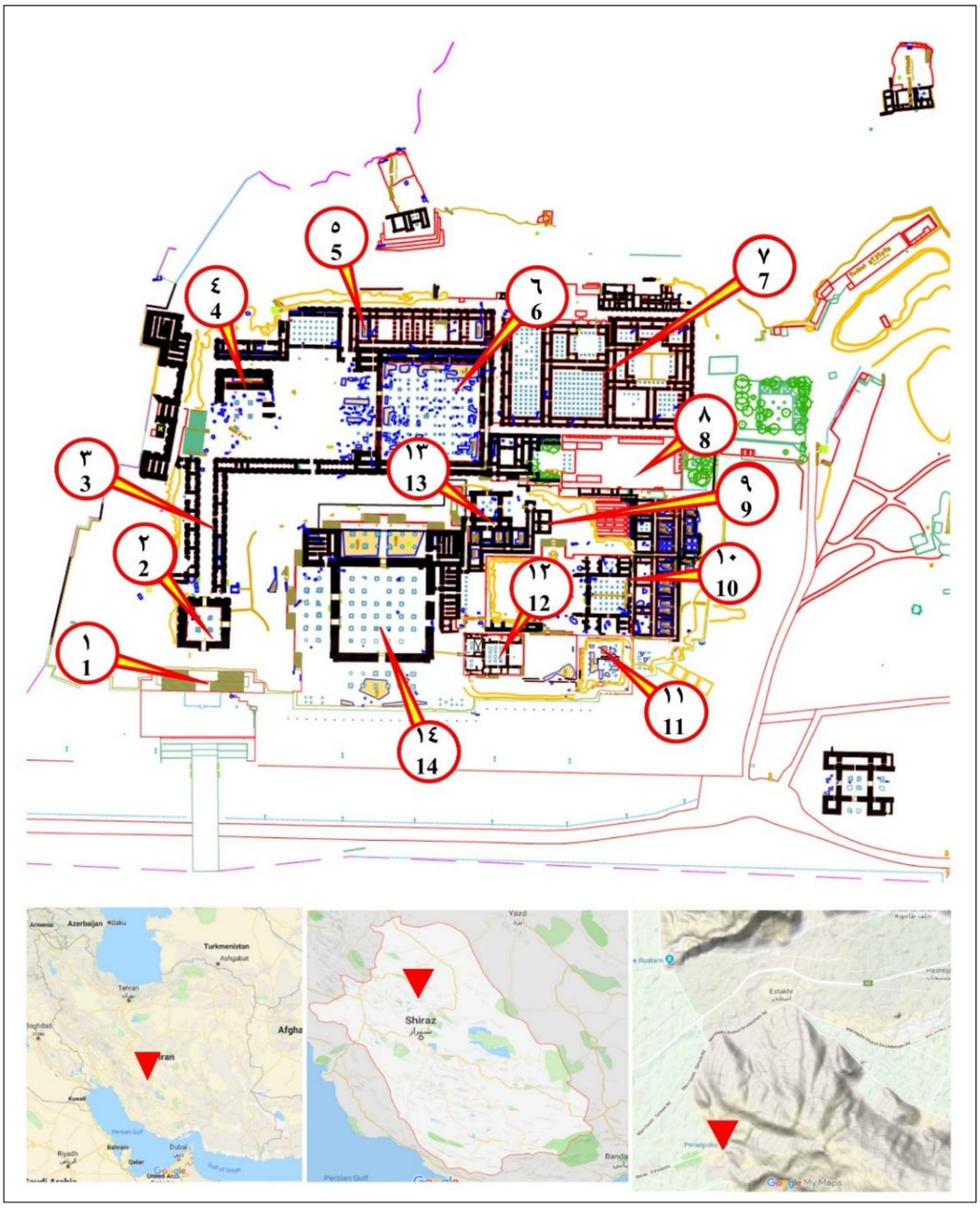
۱. مقدمه

وقوع پدیدهٔ فرسودگی زیستی یا تخریب توسط عوامل زیستی، یکی از اتفاقات آرام و نامحسوس و درعین‌حال خطرناک در سطوح آثار و بناهای تاریخی مستقر در فضاهای روباز جهان به شمار می‌آید [1]. این پدیده اغلب، به‌عنوان یک فرآیند فرسایشی برگشت‌ناپذیر پس از اثرات تخریبی اولیه وتوأم با عوامل فیزیکی و شیمیایی و زیستی در نظر گرفته می‌شود. به‌عبارتی‌دیگر، فرسودگی زیستی، تحت عنوان آسیب فیزیکی و شیمیایی حاصل از عوامل زیستی شناخته می‌شود که برگشت‌ناپذیر است و علت اصلی آن، استقرار عوامل زیستی گوناگون مانند گیاهان آوندی و غیر آوندی، جانوران، قارچ‌ها، باکتری‌ها و گلسنگ‌ها بر سطوح آثار تاریخی، است [2]. فرسودگی زیستی، به‌عنوان یک تهدید جدی و نامحسوس، آثار به‌جای مانده از تمدن‌های بشری را در فضاهای روباز با مشکل حفاظت و نگهداری مواجه می‌کند. گسترش مرزهای دانش در حوزه‌های میراث تاریخی و فرهنگی و نفوذ شاخه‌های مختلف علوم پایه، بنیادی و کاربردی مدرن، حتی در کشورهایی که پیشینهٔ اندکی از ذخایر و میراث گران‌بهای تاریخی و فرهنگی دارند، جالب‌توجه و تحسین‌برانگیز است. این در حالی است که سهم تولید علوم پایه مرتبط با میراث فرهنگی در کشور ما بسیار ناچیز است و روزبه‌روز نیاز به ظرفیت‌سازی و توسعهٔ علوم مدرن، در این زمینه احساس می‌شود. تنها حفظ آثار تاریخی و فرهنگی قرون گذشته و مرتبط کردن آن با علوم پایه و کاربردی، تضمین‌کنندهٔ آیندهٔ روشن در حفاظت از میراث فرهنگی بر کشورها است. منابع متعددی در این خصوص، منتشر شده‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد پیروروتی و همکاران ۲۰۰۴؛ آرینو و سایز–جیمنز ۱۹۹۶؛ رایزو و همکاران ۲۰۰۹؛ سنت کلایر و سیوارد ۲۰۰۴ و شرر و اورتگا ۲۰۰۹ [1,3–6]اشاره کرد. به‌علاوه، هم‌افزاییِ عوامل متعدد دخیل در تخریب آثار باستانی، موجب ویرانی سریع‌تر آن‌ها شده است. از مهم‌ترین شاخه‌های علوم پایه، دانش زیست‌شناسی است که با گرایش‌ها و شاخه‌های تخصصی در علوم مختلف ازجمله جانورشناسی، حشره‌شناسی، پرنده‌شناسی، گیاه‌شناسی، باکتری‌شناسی، قارچ‌شناسی، گلسنگ‌شناسی و جلبک‌شناسی می‌تواند نقش مهمی را در مطالعهٔ عوامل فرسودگی زیستی ایفا کند [7]. دانش تاکسونومی و سامانمند مربوط به عوامل فرسودگی زیستی، که در سطح بناهای تاریخی وجود دارند، بسیار محدود است [8]. طبقه‌بندی صحیح و علمی این ارگانیسم‌ها و میکروارگانیسم‌ها، اساس مطالعات اکولوژیک و فیزیولوژیک را درزمینهٔ فرسودگی زیستی فراهم می‌کند. هر یک از این عوامل دارای مکانیسم‌های زیستی تکثیر و تولیدمثل، استقرار و نیازهای اکولوژیکی تخصصی مربوط به خود هستند که تا حد زیادی برای متولیان حوزهٔ میراث تاریخی و فرهنگی ناشناخته محسوب می‌شوند و پیشگیری و کنترل آن‌ها به تحقیقات آزمایشگاهی و دانشگاهی زیادی، نیاز دارد [9].

بی‌تردید در طی گذر سالیان پیاپی، مجموعهٔ تخت جمشید، خارج از تهدیدات عوامل انسانی (جنگ‌ها و چپاول‌ها) از گزند عوامل طبیعی غیرزندهٔ دخیل در فرسودگی زیستی، مانند باد، باران، نور، دما و رطوبت و یا عوامل زنده‌ای مانند انواع موجودات زنده، در امان نبوده است. حضور مستمر یا موقت برخی عوامل زیستی ماکروسکوپی مانند جانوران و یا رشد گیاهان آوندی و غیر آوندی مانند خزه‌ها و برخی عوامل میکروسکوپی نظیر قارچ‌ها و گلسنگ‌ها، سیانوباکترها و باکتری‌های غیر فتوسنتزکننده، نقوش هنری ریزودرشت حجاری‌شده در دیوارها و نقش برجسته‌ها را مورد تخریب و آماج حملهٔ خود قرار می‌دهند. آثار فرسودگی زیستی تدریجی که درگذر زمان ایجادشده، بر پیکرهٔ بسیاری از نقوش مشهود است.

جریان حیات و بقا، تنوع زیستی ارگانیسم‌ها و فرآیندهای مرتبط در سطح سنگ بسیار گسترده‌تر از آن است که بشر پیش از آن تصور می‌کرد [10]. سنگ به‌عنوان یک مادهٔ اولیهٔ بادوام از زمان‌های پیش‌ازتاریخ و شکل‌گیری تمدن‌ها، موردتوجه بشر قرارگرفته و همواره از آن در طراحی و ساخت بناها استفاده شده است [11]. با شکل‌گیری تمدن‌ها و گسترش سکونت‌گاه‌ها، حفاظت از زیبایی و عظمت بناهای تاریخی ضرورت پیدا کرد [12].

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]



شکل ۱: نقشهٔ صفه تخت جمشید و موقعیت جغرافیایی آن. ۱- پلکان ورودی؛ ۲- دروازهٔ ملل؛ ۳- خیابان سپاهیان؛ ۴- دروازهٔ ناتمام؛ ۵- کاخ سی‌ودو ستون؛ ۶-کاخ صد ستون؛ ۷-خزانه‌داری؛ ۸- کاخ ملکه (حرم‌سرا و موزه)؛ ۹- کاخ دال؛ ۱۰- کاخ هدیش، ۱۱- کاخ H،۱۲- کاخ تچر، ۱۳- کاخ شورا مرکزی، ۱۴- کاخ آپادانا

Fig.1: The map of Persepolis and its geographical location. 1) Main stairway; 2) The Gate of Nations; 3) Sepahian Street; 4) The Unfinished Gate; 5) 32-columned Hall; 6) Hall of a Hundred Columns; 7) Treasury; 8) Queen's palace (harem and museum); 9) Palace 'D'; 10) Hadish Palace; 11) Palace 'H'; 12) Thatcher Palace; 13) Central Palace; 14) Apadana Palace.

نگهداری و حفاظت و مرمت سنگ‌های به‌کار رفته در بناها همواره یکی از چالش‌های جدی بشر بوده است، هوازدگی و فرسودگی سنگ در طی سالیان دراز، موجب از بین رفتن آثار تاریخی گران‌بهای بشری شده است چراکه اصالت این آثار ماندگار غیرقابل جایگزین، منحصربه‌فرد و غیرقابل‌برگشت است [13].

فرسودگی زیستی بسترهای سنگی، توسط گروه خاصی از ارگانیسم‌ها ایجاد نمی‌شود، بلکه به تعامل بین

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

گروه‌های همزیست مختلف بستگی دارد [8]. علاوه بر عوامل محیطی که موجب فرسودگی زیستی می‌شوند، خواص ذاتی مواد نیز در این امر دخالت دارند [14]. عدم توجه به شناسایی و اطلاع دقیق از بوم‌شناسی تاکسون‌های دخیل و نحوهٔ تعامل آن‌ها در محیط و بررسی جایگاه آن‌ها در تشدید فرسودگی زیستی می‌تواند تهدید جدیدی برای آیندهٔ نقوش و سنگ‌های ارزشمند این میراث جهانی تلقی شود. در حال حاضر هدف اصلی این مطالعه، تهیهٔ گزارش میدانی از حضور مؤثر عوامل زیستی دخیل در فرسودگی زیستی در سطوح تاریخی میراث جهانی تخت جمشید است. هدف دوم، ارائهٔ دیدگاه علمی مؤثر در آشنا کردن مرمتگران با تنوع این عوامل در بسترهای سنگی میراث جهانی تخت جمشید و آگاهی بخشی به کارشناسان فنی در جهت پایش و حفاظت پیشگیرانه است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. موقعیت جغرافیایی تخت جمشید

تخت جمشید در مرکز استان فارس، دَه کیلومتری شمال مرودشت و تقریباً در شصت کیلومتری شیراز قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا هزار و ۷۷۰ متر است. ضلع شرقی این مجموعه کاخ‌ها بر کوه رحمت و سه طرف دیگر، در درون جلگهٔ مرودشت قرار دارد (شکل ۱). تخت جمشید بر سکوی سنگی که ارتفاع آن بین هشت تا هجده متر بالاتر از سطح دشت مرودشت است، واقع‌شده است. این مجموعهٔ میراث جهانی بر اساس تعاریف مختلف معماری از بناها و فضاهای مختلف نظیر پلکان ورودی، دروازهٔ ملل، خیابان سپاهیان، کاخ آپادانا، کاخ صد ستون، کاخ مرکزی یا کاخ شورا، کاخ هدیش، کاخ تچر، خزانه‌داری، دروازهٔ ناتمام، کاخ ملکه یا موزه، کاخ دال و ... تشکیل‌شده است. همچنین برخی آثار تاریخی مانند نقش رستم (پنج کیلومتری شمال شرقی تخت جمشید)، نقش رجب (در سه کیلومتری شمال شرقی تخت جمشید در کوه رحمت) و شهر استخر (در پنج کیلومتری شمال تخت جمشید) از مهم‌ترین آثار باستانی هخامنشی و ساسانی هستند که در نزدیکی تخت جمشید قرار دارند [15,16].

۲-۲. مشاهدات میدانی

مشاهدات میدانی و مستند نگاری این تحقیق، از سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۹ میلادی، به‌صورت تصادفی در مجموعهٔ میراث جهانی تخت جمشید بر پایهٔ نقشه‌های تهیه‌شده در انتشارات هرتسفیلد و اشمیت [16-18] صورت پذیرفت (شکل ۱). مشاهدات میدانی، بر اساس نمونه‌برداری با روش‌های غیر تخریبی و با استفاده از روش مستندنگاری و آسیب‌نگاری تصویری با دوربین سونی مدل‌های سونی سایبر شات مدل‌های ۷۱۷، DSC-HX1 و دوربین Canon PowerShot SX ۶۰ HS، بدون استفاده از فلش نوری، تهیه شد.

۲-۳. مشاهدات میکروسکوپی نوری

در این تحقیق، برای تشخیص وجود و حضور برخی قارچ‌ها (شکل ۵)، گلسنگ‌ها، سیانوباکتری‌ها و خزه‌ها در سطوح سنگ‌های تاریخی تخت جمشید و همچنین مشاهدهٔ بخشی از مورفولوژی و صفات ظاهری آن‌ها از استریو میکروسکوپ نوری مدل ام وایلد ۵ با بزرگنمایی ۸۰ برابر و میکروسکوپ نوری زایس مدل۱۴-۹۹۰۱ با بزرگنمایی ۱۲۵۰ برابر، استفاده شد. در برخی موارد، بخشی از تال گلسنگ به‌اندازهٔ چند میلی‌متر برای مشاهده در زیر میکروسکوپ از پیکرهٔ گلسنگ‌های درشت بدون آسیب زدن به بستر جدا شد.

۲-۴. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی

در این تحقیق، برای تشخیص حضور و فعالیت برخی قارچ‌ها و سیانوباکتری‌ها در سطوح سنگ‌های تاریخی و بررسی میزان عمق نفوذ آن‌ها، از میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. ابتدا جهت تهیهٔ مقطع از سطح سنگ، قسمتی از سنگ معدن خارج از محوطه باستانی برداشت و سپس توسط دستگاه مقطع‌گیری برش داده شد. سنگ، روی پودرهای مخصوص از درشت تا ریز به ترتیب و با حرکت ویژهٔ دست و در همهٔ جهات به‌طورکامل سایش داده شد تا سطحی صاف و صیقلی به دست آید. نمونه‌ها توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) مستقر در آزمایشگاه مرجع سازمان

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

پژوهش های علمی و صنعتی ایران، موردمطالعه قرار گرفتند. تصاویر با استفاده از MIRA2 TESCAN SEM در ولتاژ 15.00kv تصویربرداری شدند.

۲-۵. کشت باکتری‌ها

جهت اثبات حضور باکتری‌های هتروتروف، از روش کشت‌های روتین باکتریایی استفاده شد. به این منظور از محیط‌های کشت باکتریایی لوریا برتانی (LB) و نوترینت آگار (NA)، استفاده شد. این محیط‌های کشت، مواد مغذی لازم را جهت رشد باکتری‌های هتروتروف در محیط آزمایشگاهی، فراهم می‌کنند. به همین علت برای مطالعهٔ حضور باکتری‌ها در نواحی بیوپیت دار سنگ این محیط کشت استفاده شد. نمونه‌ها با استفاده از فیلدوپلاتین استریل از نواحی بیوپیت‌دار جداسازی شدند و در محیط اسلنت لوریا برتانی و پلیت‌های نوترینت آگار، کشت داده شدند. پس از سه هفته انکوباسیون محیط‌های کشت در دمای ۲۷°C، کلونی‌های تشکیل‌شده بر روی محیط های کشت ازنظر مورفولوژیکی موردبررسی قرار گرفتند و درنهایت پس از خالص‌سازی کلونی‌ها، رنگ‌آمیزی گرم به‌منظور بررسی جمعیت میکروبی ازنظر شکل و ساختار انجام شد.

۲-۶. طبقه‌بندی ارگانیسم‌های دخیل در فرسودگی زیستی

عوامل زیستی دخیل در فرسودگی زیستی، به دو گروه ماکروارگانیسم‌ها و میکروارگانیسم‌ها طبقه‌بندی شدند. طبقه‌بندی و تفکیک گروهی این عوامل، بر اساس منابع علمی [3,6,7,19,20] صورت گرفت. عوامل فرسودگی زیستی درشت یا ماکرو شناسایی‌شده در تخت جمشید، شامل گیاهان آوندی و غیر آوندی و جانورانی مانند پرنده‌ها، حلزون‌ها و خزندگان هستند. اصطلاح «میکروارگانیسم» طیف گسترده‌ای از اشکال زندگی ازجمله باکتری‌ها، سیانوباکتری‌ها، جلبک‌ها، گلسنگ‌ها و قارچ‌ها را شامل می‌شود. همهٔ میکروارگانیسم‌های ذکرشده، ویژگی‌های اکولوژیکی متفاوتی دارند و سبب ایجاد خسارت‌های مختلف در مواد آلی و معدنی آثار تاریخی می‌شوند. عوامل میکروسکوپی شناسایی‌شده در این تحقیق، شامل قارچ‌ها، گلسنگ‌ها، جلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها هستند.

۳. نتایج

۳-۱. گیاهان

آسیب‌های ناشی از گیاهان آوندی مانند گیاهان گل‌دار و گیاهان غیر آوندی مانند خزه‌ها (شکل ۲) در بناها یا اماکن باستان‌شناسی به‌خوبی شناخته‌شده هستند. میران تأثیر آن‌ها، به اشکال بیولوژیکی خاص و یا ویژگی‌های دستگاه‌های ریشه‌ای و نوع استقرار آن‌ها مرتبط است. به‌عبارتی‌دیگر، گیاهان ازجمله تهدیدات جدی در موضوع حفاظت و مرمت بناهای تاریخی به شمار می‌آیند. زیرا، از یک سو با روش‌های فیزیکی مانند رشد ریشه‌ها و نفوذ آن‌ها به اعماق پی یا سطح آثار، آسیب‌های فیزیکی و بصری را سبب می‌شوند و از سوی دیگر زمینه را برای نفوذ آب و سایر ارگانیسم‌ها فراهم می‌آورند. گرده‌های گیاهی (شکل ۴ تصویر ۶)، نیز مواد آلی موردنیاز را برای جذب سایر عوامل بیولوژیک نظیر حشرات فراهم می‌کنند که مجموع این عوامل سبب اجتماع دوبارهٔ عوامل میکروبی دیگر ایجاد کنندهٔ فرسودگی زیستی خواهند شد. متأسفانه محوطهٔ میراث جهانی تخت جمشید، به دلیل موقعیت قرارگیری آن در فضای باز، از این گزند رشد طبیعی گیاهان در محوطه و سطوح آثار سنگی در امان نیست و با مشاهدات میدانی فصلی که از این منطقهٔ تاریخی صورت گرفته است، رشد گیاهان آوندی و غیر آوندی در میان سنگ‌های تاریخی و حتّی برخی شکاف دیوارها به‌وضوح قابل‌مشاهده هستند (شکل ۲ تصاویر ۱-۵).

۳-۲. جانوران

جانوران نقش مهمی را در بحث فرسودگی زیستی ایفا می‌کنند. زیرا به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم، به این پدیده دامن می‌زنند. جانوران، از یک سو با لانه گزینی، نظیر لانهٔ پرندگان، و عوارض ناشی از تجمع فضولات یا اجساد مردهٔ آن‌ها (شکل ۳- پ)، سبب فرسودگی

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

می‌شوند. از سوی دیگر، فضولات آن‌ها مواد آلی موردنیاز را برای جایگزینی سایر ارگانیسم‌های میکرو، نظیر باکتری‌ها، قارچ‌ها و گلسنگ‌ها فراهم می‌کنند. جانوران با تحرک و راه رفتن در میان بناها سبب انتقال برخی از عوامل میکروبی در قسمت‌های مختلف می‌شوند. در محوطهٔ تاریخی تخت جمشید از مشکل‌سازترین جانوران می‌توان به برخی پرندگان، گروهی از مارمولک‌ها و سمورها اشاره کرد که هر یک به‌نوبهٔ خود سبب گسترش فرسودگی زیستی و تأثیر غیرمستقیم بر قسمت‌های مختلف بنا می‌شوند.

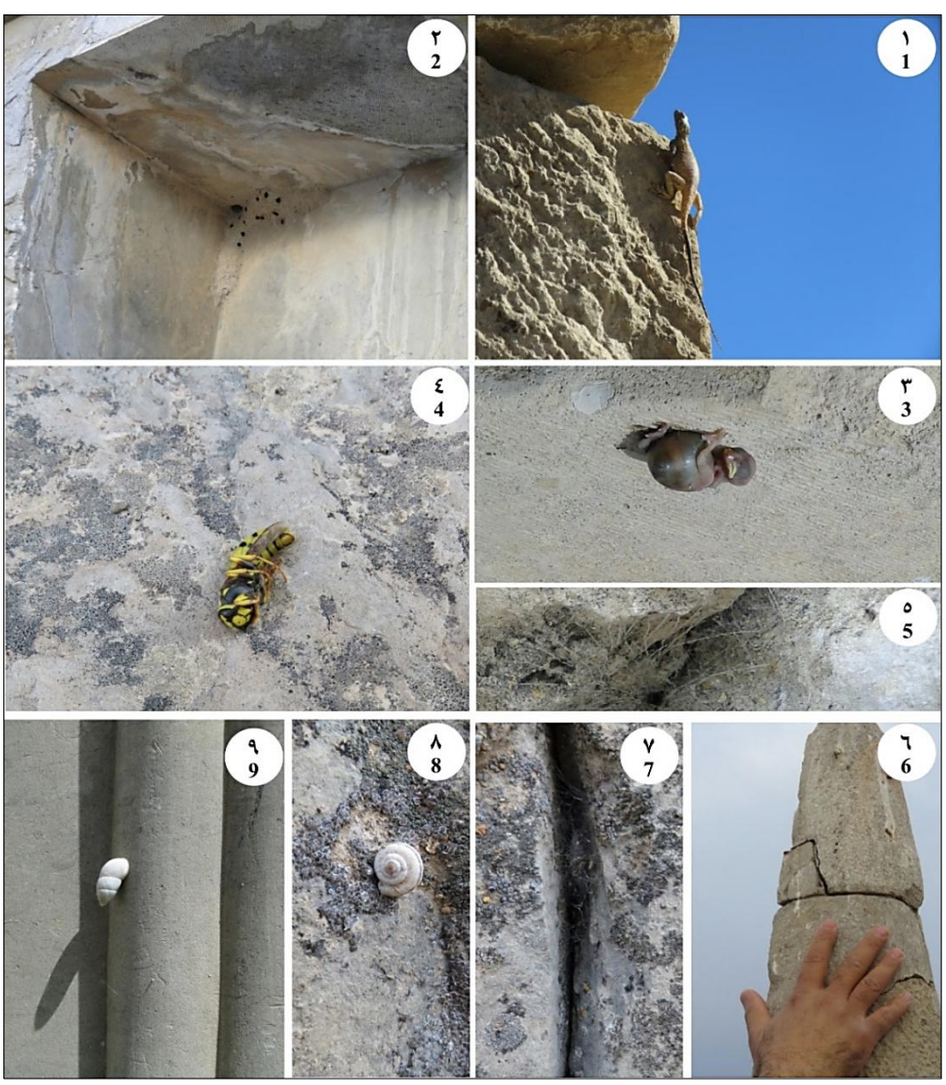
شکل ۲. نمایی از فرسودگی زیستی در بخش‌های مختلف تخت جمشید توسط گیاهان؛ ۱) پایه ستون مربوط به یکی از ستون‌های کاخ خزانه‌داری؛ ب۲) پلکان‌های ورودی؛ ۳) گیاهان روی دیوار پلکان ورودی؛ ۴) محوطه شمالی کاخ H؛ ۵) گیاهان اطراف کاخ تچر؛ ۶) گیاهان یک‌ساله اطراف کاخ صد ستون؛ ۷) خزه‌های کاخ دال؛ ۸) خزه‌های روی سنگ‌های محوطهٔ کاخ آپادانا

Fig 2: The View of biodegradation in different parts of Persepolis by plants. 1) The base of the column in the Treasury Palace; 2) The entrance stairs; 3) The plants on the wall of the entrance stairs; 4) The northern area of the palace; H; 5) The plants around Thatcher Palace; 6) Annual plants around the palace of Hundred Columns; 7) Moss of Dal Palace; 8) Moss on the rocks of Apadana Palace.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

۳-۳. میکروارگانیسم‌ها

اصطلاح «میکروارگانیسم» طیف گسترده‌ای از اشکال زندگی، ازجمله باکتری‌ها، سیانوباکتری‌ها، جلبک‌ها، گلسنگ‌ها و قارچ‌ها، را شامل می‌شود. همه میکروارگانیسم‌های ذکرشده، خاصیت اکولوژیکی مختلفی دارند و سبب ایجاد خسارت‌های مختلف در مواد آلی و معدنی میراث فرهنگی می‌شوند. میکروارگانیسم‌های فتوتروف حاوی رنگ‌ریزه‌هایی هستند که به آن‌ها اجازه می‌دهد تا انرژی نوری را به انرژی شیمیایی تبدیل کنند و بنابراین سلول‌های آن‌ها رنگی دیده می‌شوند. برخلاف کیموتروف‌ها، فتوتروف‌ها به مواد شیمیایی به‌عنوان منبع انرژی احتیاج ندارند. این‌یک مزیت متابولیکی مؤثر است. زیرا رقابت با موجودات کیموتروف بر سر منابع انرژی مطرح نیست و نور خورشید در بسیاری از زیستگاه‌های میکروبی روی زمین در دسترس است[21] . ازجمله فتوتروف‌های مهمی که سبب فرسودگی زیستی در سطح بنای تاریخی تخت جمشید می‌شوند، می‌توان به سیانوباکترها، جلبک‌ها و خزه‌ها اشاره کرد.



شکل ۳. تصاویری از عوامل زیستی در مقیاس میکروارگانیسم‌ها که در فرسودگی زیستی تخت جمشید نقش مهمی دارند: تصویر ۱) حضور مارمولک‌ها در تخت جمشید؛ ۲ و۴- ۵ و ۷) لانه‌سازی حشرات مختلف در سطح سنگ‌ها؛ ۳) حضور پرندگان و لانه‌سازی و گاهاً لاشه اجساد آن‌ها در میان سنگ‌ها؛ ۶) فعالیت‌های انسانی و عوارض ناشی از آن؛ ۸-۹) حرکت حلزون‌ها روی سنگ‌های باستانی

Fig 3: Images of macro-scale biological factors that play an important role in the biodeterioration of Persepolis: 1) The presence of lizards in Persepolis; 2, 4-5, 7) The nesting of various insects on the surface of rocks; 3) The presence of birds and their nesting activites among the rocks; 6) Human activities and their consequences; 8-9) The movement of snails on the historic rock surfaces.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

۳-٤. باکتری‌ها

میکروارگانیسم‌ها نقشی مهم و کلیدی، در زیستگاه‌های مختلف زمینی دارند [22]. یوباکترها یا باکتری‌ها، ارگانیسم‌هایی با توانایی عملکردهای متابولیک بالا هستند که در گروه پروکاریوت‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. بسیاری از شاخهٔ باکتری‌ها تنها از طریق توالی‌های محیطی شناخته‌شده‌اند. برخی از شاخه‌ها با ویژگی‌های فنوتیپی منحصربه‌فردی مانند، مورفولوژی اسپیروکت‌ها یا فیزیولوژی خاص سیانوباکترها، شناخته‌شده‌اند، اما اغلب گروه‌های عمدهٔ باکتری‌ها شامل گونه‌هایی است که اگرچه دقیقاً به یک تبار فیلوژنتیکی منسوب هستند، ولی تشابهات فنوتیپی برجسته‌ای ندارند [23]. این حقیقت که میکروارگانیسم‌ها در طبیعت، ازلحاظ زیست‌محیطی نقش مهم و حیاتی را در بحث فرسودگی ایفا می‌کنند، به‌خوبی شناخته‌شده است. این ارگانیسم‌ها جزء اصلی چرخه‌های طبیعی نظیر چرخهٔ کربن، چرخهٔ نیتروژن و چرخهٔ گوگرد هستند [24]. عوامل محیطی مختلف در رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها تأثیر داشته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها شامل: دسترسی به آب، اکسیژن، دمای مناسب، نور (محدود به فتوتروف‌ها) و pH است. هرچند، بسیاری از میکروارگانیسم‌ها در طبیعت، خود را با شرایط سازگار کردند اما محدودیت‌های خاصی برای گونه‌های مختلف مطرح است.

باکتری‌ها قادر به کلونیزه شدن در سطح آثار تاریخی هستند و می‌توانند در شرایط دشوار به فرم‌های مقاوم نظیر اسپور، تبدیل شوند و به حالت خفته در آیند، در این شرایط باکتری ازلحاظ متابولیک غیرفعال است و زمانی که شرایط دوباره برای رشد آن‌ها فراهم شود، به حالت فعال درمی‌آیند و به فعالیت‌های متابولیک خود در سطح آثار تاریخی ادامه می‌دهند. تاکنون باکتری‌های فرسایندهٔ آثار تخت جمشید به‌صورت دقیق موردمطالعه قرار نگرفته است.

در مطالعهٔ حاضر، انواع باکتری‌های محیطی با کلونی‌های صورتی، کرم، سفید، نارنجی و زرد با اندازه و مورفولوژی‌های متنوع جداسازی شد. با توجه به این‌که سطوح سنگ‌ها اغلب در معرض نور شدید خورشید و دمای بالا هستند، جداسازی باکتری‌ها با رنگ‌دانه‌های مختلف در نمونه‌های موردمطالعه امری دور از ذهن نیست. زیرا این رنگ‌دانه‌ها منجر به مقاومت باکتری‌ها در مقابل اثرات مضر UV نور خورشید می‌شوند. تولید رنگ‌دانه‌ها توسط این گروه از باکتری‌ها امر بسیار مهم و قابل‌توجه در بحث میراث فرهنگی است. زیرا این امر، منجر به بروز آسیب‌های دیداری در بنا می‌شوند. نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی حاکی از این بود که بیشتر گروه باکتری‌های جداسازی شده کوکسی و باسیل گرم مثبت هستند. درعین‌حال، برخی سویه‌های باکتری گرم منفی نیز در این مطالعه جداسازی شد. مطالعات تکمیلی نشان داد، اغلب سویه‌های باکتری جداسازی شده در این مطالعه، به جنس‌های باکتریایی میکروکوکوس، آرتروباکتر و باسیلوس تعلق داشتند. میکرو کوک‌ها و آرتروباکترها، باکتری‌های گرم مثبت با رنگ‌دانه‌های مختلف از جنس کارتنوئید هستند که قدرت بسیار بالایی در مقاومت به اشعه UV دارند. باسیلوس‌ها به دلیل توانایی آن‌ها در تولید اسپور و مقاومت به شرایط محیطی سخت، به‌وفور از نمونه‌های مختلف محیطی جداسازی می‌شوند.

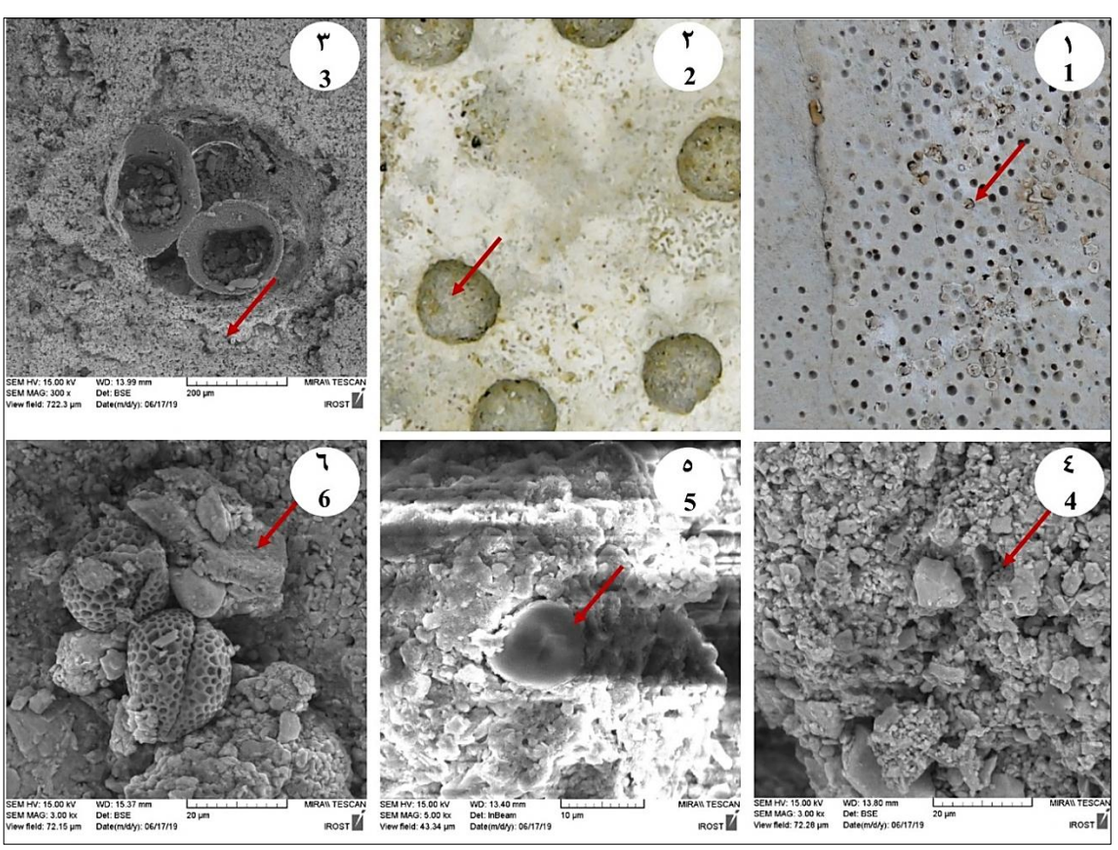
۳-۵. سیانوباکتری‌ها

سیانوباکتری‌ها در طیف گسترده‌ای از زیستگاه‌های زمینی، ازجمله بناهای جدید یا قدیمی رشد می‌کنند. نقش سیانوباکترها در تخریب بناهای تاریخی، موضوع مطالعات اخیر دانشمندان فعال درزمینهٔ میکروبیولوژی میراث فرهنگی بوده است. سیانوباکترها هم قادر هستند بیوفیلم‌های ضخیم را تشکیل دهند و هم دارای رنگ‌دانه‌های محافظ هستند که نسبت به شرایط دشوار محیطی مقاوم هستند. سیانوباکترهای کازمواندولیتیک با ایجاد فشار از داخل سنگ، با مکانیسم‌هایی نظیر جذب آب، گسترش تودهٔ سلولی درون سنگ و جذب کربنات کلسیم در اطراف خود، سبب تخریب سنگ‌های آهکی می‌شوند. شکاف‌هایی که درنتیجهٔ این امر به وجود می‌آیند، سبب نفوذ گردوغبار، حشرات و قارچ‌ها به درون سنگ می‌شود که به‌نوبهٔ خود فشار وارده بر سنگ را

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

تشدید می‌کند. سیانوباکترها به علت داشتن رنگ‌ریزه‌ها، تغییرات رنگی را در سطح سنگ ایجاد می‌کنند.

در تخت جمشید پس از بارش باران در بخش‌هایی از دیوارها تغییرات رنگ، به‌صورت سیاه شدن سطح سنگ مشاهده می‌شود که یکی از علل اصلی این پدیده، حضور سیانو باکترهای فتوسنتز کنندهٔ دارای کلروفیل است. سیانوباکترها جمعیت منحصربه‌فردی از باکتری‌ها هستند که به علت شرایط آب و هوایی و اقلیمی حاکم بر منطقهٔ تخت جمشید به حالت VBNC تبدیل‌شده‌اند. این استراتژی در باکتری‌ها به حالتی گفته می‌شود که باکتری با قرار گرفتن در شرایط سخت محیطی به فرم کوکوئید یا غیرقابل کشت تبدیل می‌شود و مطالعات بر پایهٔ کشت را برای محققان دشوار می‌کند. نمونه‌هایی از کوکوئید شدن سیانوباکترها در بناهای تاریخی توسط Crispim و همکاران توصیف‌شده است [25]. متأسفانه ما نیز با این چالش در تخت جمشید مواجه هستیم. هرگونه گلسنگ زدایی در منطقه بدون در نظر گرفتن جمعیت باکتریایی ممکن است آسیب‌های جدی را به سنگ وارد کند. زیرا با حذف گلسنگ‌های سطح سنگی، شرایط برای رشد و گسترش جمعیت سیانوباکترها و باکتری‌های اندولیتیک یا به‌اصطلاح درون سنگی، فراهم می‌شود. باکتری‌های مولد پیگمنت یا رنگ‌دانه‌های صورتی نیز یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در تخت جمشید هستند، زیرا با حذف برخی عوامل بدون مطالعه، ممکن است به گسترش جمعیت این باکتری‌ها دامن زده شود. بنابراین، پیش از هرگونه اقدام جهت گلسنگ زدایی، مطالعهٔ دقیق دربارهٔ این میکروارگانیسم‌ها ضروری است. در این مطالعه، تلاش‌هایی جهت کشت و بررسی میکروسکوپی این‌گونه‌ها انجام‌شده که برای تأیید گونهٔ دقیق، مطالعات بعدی در سطح مولکولی نیاز است.



شکل ۴: ۱-۲) نمایی از سطوح بیرونی پیت‌های ناشی از رشد گلسنگ *Bagliettoa*؛ ۳-۵) تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از بیوپیت‌ها؛ ۶) حضور گرده‌های گیاهی در درون پیت‌ها

Fig. 4: 1-2) View of the outer surfaces of biopits from the growth of Bagliettoa lichen; 3-5) The Scanning Electron Microscopy (SEM) images of biopits; 6) The presence of plant pollen inside the biopits.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

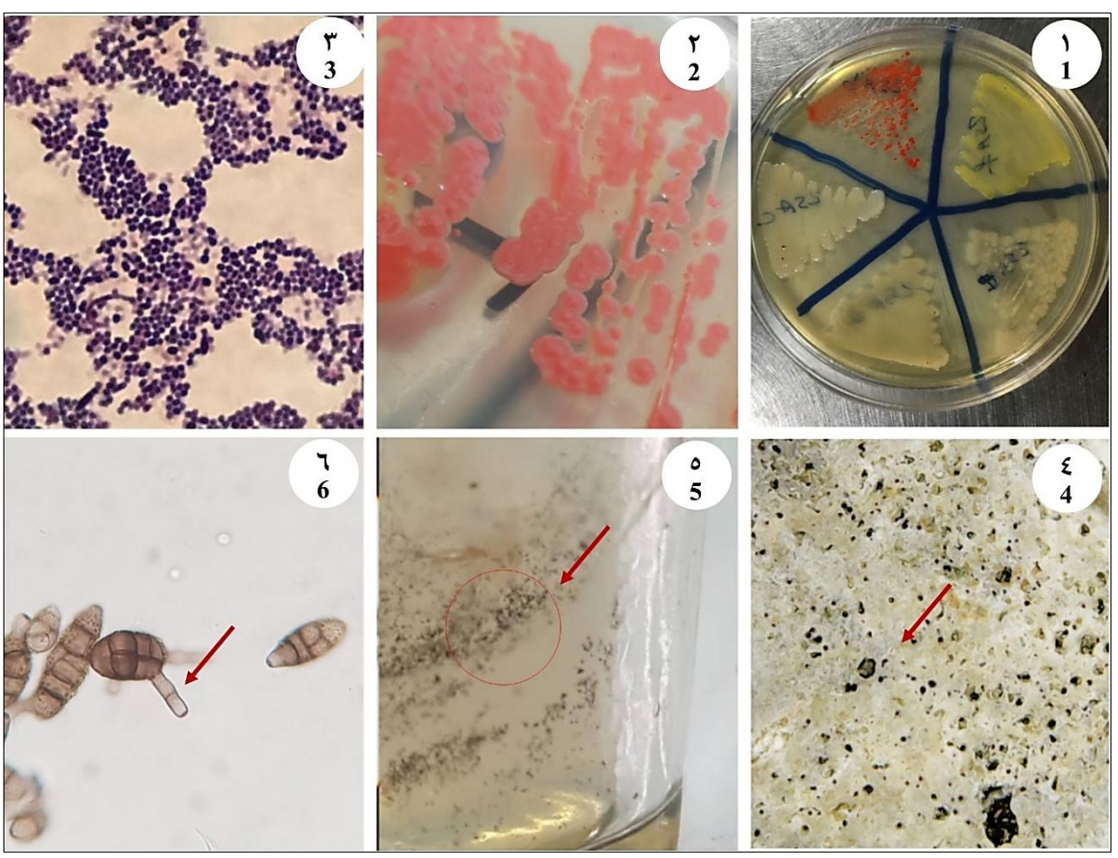
۳-۶. قارچ‌ها

قارچ‌ها موجودات هتروتروفیک یوکاریوتی هستند که با دیوارهٔ سلولی سخت خود که از مادهٔ کیتین ساخته‌شده، شناخته می‌شوند. آن‌ها به فرمانروایی مستقل قارچ‌ها تعلق دارند که این فرمانروایی، حدود ۸۰۰۰۰ گونهٔ شناخته‌شده را دربرمی‌گیرد و حدوداً یک ونیم میلیون گونه از آن‌ها ممکن است وجود داشته باشد [36]. قارچ‌ها سلسله مستقلی با تبار زایی متمایزی از سایر ارگانیسم‌های دیگر را تشکیل می‌دهند و در این خصوص بیشترین قرابت تبار زایی را با جانوران دارند.

در میراث جهانی تخت جمشید نمونه‌هایی از قارچ‌های مرستماتیک میکروسکوپی و مخمری سیاه دیده می‌شود، که نمونه‌ای از آن‌ها در آزمایشگاه کشت داده‌شده و در شکل ۵ تصاویر ۴-۶ قابل‌مشاهده است. تحقیقات در این خصوص ادامه دارد و جنس‌ها و گونه‌های مختلفی از قارچ‌ها از روی سطوح آثار سنگی در حال جداسازی است.

۳-۷. گلسنگ‌ها

گلسنگ‌ها، در سراسر سطح خشکی جهان پراکندگی دارند، به‌طوری‌که حدود هشت درصد سطح خشکی‌ها، با



شکل ۵: تصاویر مربوط به کشت‌های انجام‌شده از بخش‌های مختلف میراث جهانی تخت جمشید. تصویر ۱) نمونهٔ کشت از باکتری‌ها در محیط کشت مغذی؛ ۲) باکتری‌های موکوئیدی مولد رنگ‌دانه‌های صورتی مایل به بنفش که در شرایط میکروآئروفیل کشت داده‌شده‌اند؛ ۳) اسلایدهای میکروسکوپی تهیه‌شده از کشت که نشانگر کوکسی‌های گرم مثبت هستند؛ ۴) بایوپیت‌ها ناشی از فعالیت قارچ‌های سیاه؛ ۵) کشت مربوط به قارچ‌های مرستماتیک یا قارچ‌های سیاه؛ ۶) تصویر میکروسکوپ نوری که نشان‌دهندهٔ کنیدی‌های قارچی حاصل از کشت است.

Fig 5: Images related to cultivations carried out in different parts of Persepolis World Heritage. 1) Culture sample of bacteria in nutrient culture medium; 2) Mucoid bacteria producing pinkish-purple pigments cultured under microaerophilic conditions; 3) Microscopic slides prepared from imaginary culture showing gram-positive cocci. 4) Biopits Due to the activity of black fungi; 5) The culture related to meristematic fungi or black fungi; 6) Light microscope image showing fungal conidia from culture.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

گلسنگ پوشیده شده‌اند [26]. شواهد موجود در سنگواره‌ها و مطالعات فیلوژنی نشان می‌دهند که قدیمی‌ترین فسیل آن‌ها به حدود ۶۰۰ میلیون سال پیش بازمی‌گردد [27]. این موجودات زنده از تعامل و همزیستی یک شریک قارچی (مایکوبیونت) و یک شریک فتوسنتز کننده (فتوبیونت)، که ممکن است آن شریک یک‌گونه سیانوباکتری و یا جلبک‌های سبز باشند، تشکیل یافته‌اند و در تمام گلسنگ‌ها، قارچ یک تال یا بسترهٔ گلسنگی را تشکیل می‌دهد [28]. ایجاد رابطهٔ همزیستی بین یک قارچ و حداقل یک میکروارگانیسم فتوسنتز کننده، منجر به شکل‌گیری گلسنگ می‌شود [29]. ارگانیسمی که تفاوت‌های قابل‌توجهی با شرکای تشکیل‌دهنده‌اش دارد و همین تفاوت‌ها کمک می‌کنند تا بتوانند در محیط‌هایی با شرایط افراطی زندگی کنند. گلسنگ‌ها در مناطقی رشد می‌کنند که بسیاری از میکروارگانیسم‌ها قدرت رشد و زندگی در آن را ندارند و این مسئله، سبب می‌شود که نقش آن‌ها در چرخهٔ ماده و انرژی در این مناطق پررنگ گردد [30] رشد فزایندهٔ گلسنگ، سبب فروپاشی زیستی بستر آن در سطوح سنگ‌ها می‌شود [31]. این ارگانیسم‌ها نقش مهمی در فرآیند خاک‌زایی دارند [32]و نقش قابل‌توجهی در تغییر چهرهٔ زمین و تبدیل آن به شکل کنونی داشته‌اند [33]. واژهٔ خاک‌زایی به فرایند تولید خاک اطلاق می‌شود که در طبیعت فرایندی کاملاً طبیعی و مفید است. اما این پدیده، در میراث فرهنگی و آثار تاریخی سنگی امری نامطلوب است و باعث تخریب آثار می‌شود و ادامهٔ آن به خطری جدی در حفاظت و مرمت آن‌ها، تبدیل می‌شود [34] درواقع، با توجه به مطالبی که ذکر شد، می‌توان گفت گلسنگ‌ها در فرسودگی زیستی آثار باستانی سنگی نقش انکارناپذیری دارند و نوع گلسنگ و ترکیب شیمیایی و ساختار بستر سنگی در میزان فرسایش این آثار تأثیر بسزایی دارد [8,35].

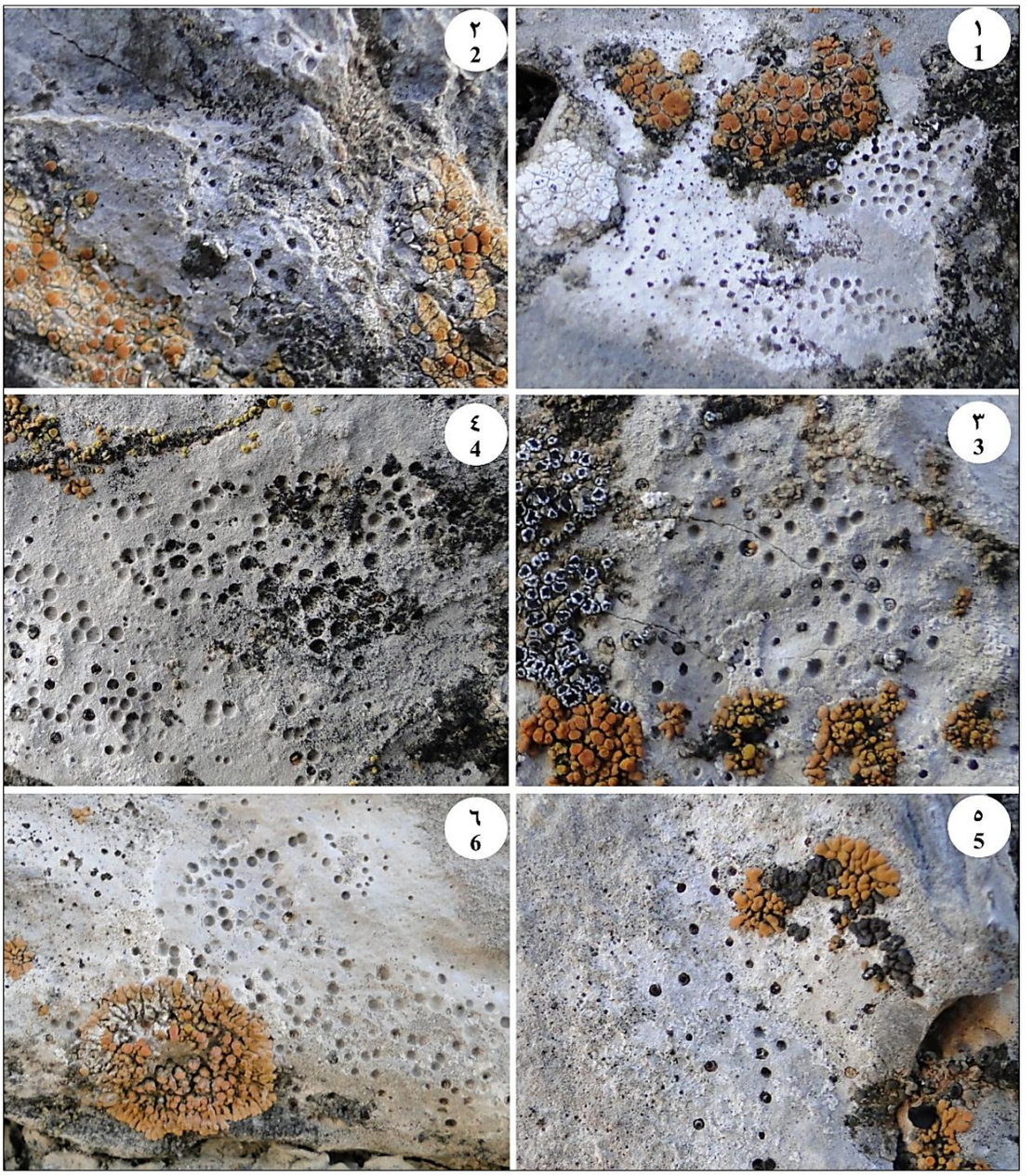
درست است که گلسنگ‌ها به تخریب کنندگان آثار باستانی شهرت دارند ولی گاهی مزایای بسیار خوبی را هم در تشخیص و تخمین سن حدودی آثار به ما می‌دهند. از اندازهٔ شعاع و قطر رشد گلسنگ‌های مدور، می‌توان در مطالعات باستان‌سنجی استفاده کرد. در علم باستان‌سنجی از نرخ رشد گلسنگ‌ها برای تعیین قدمت حدودی و تخمینی آثار استفاده می‌کنند. این تخمین قدمت، با استفاده از نرخ خاص فرض شده از میزان توسعهٔ اندازه شعاعی یک گلسنگ حلقوی رشد یافته روی آثار در طول زمان به دست می‌آید [28] ازاین‌رو می‌توان با اندازه‌گیری شعاع بزرگ‌ترین گلسنگ دایره ای شکل که روی یک سطح تاریخی رشد کرده، به منظور تعیین مدت‌زمانی که آن سنگ در معرض رشد گلسنگ قرارگرفته استفاده کرد. گلسنگ‌ها را می‌توان در سطوح سنگ‌های قدیمی تا حداکثر ده هزار سال رؤیت کرد، ده هزار سال درواقع حداکثر سن تخمینی است که این فن باستان‌سنجی با استفاده از گلسنگ‌ها برای ما فراهم می‌کند. طبق برآوردها دقت این روش با ۱۰٪ خطا همراه است [36].

در میراث جهانی تخت جمشید نیز رشد انواع گلسنگ‌های سطح سنگی و درون سنگی از قطر ۱ mm تا ۲۰cm مشهود است. هر یک این گلسنگ‌ها نرخ تخریب [37] متعددی دارند و سبب تخریب و محو شدن بسیاری از نقوش شده‌اند. در این راستا، یک اطلس مصوّر گونه‌های گلسنگی به همراه نقشه‌های پراکنش گونه‌های گلسنگی تهیه‌شده است. این کتاب مرجع به‌زودی در قالب یک کتاب مستقل از طریق پایگاه میراث جهانی تخت جمشید منتشر خواهد شد. علاوه بر این فهرست گونه‌های گلسنگی برحسب جنس و گونه و خانواده آن‌ها نیز در یک مقالهٔ مستقل همراه با داده‌های اکولوژیکی آن‌ها منتشر خواهد شد. بنابراین، در این مقاله، اطلاعات توصیفی گلسنگ‌های میراث جهانی تخت جمشید ارائه نمی‌شود.

در این پژوهش، حضور عوامل مختلفی از جانوران، گیاهان آوندی و غیر آوندی، قارچ‌ها، گلسنگ‌ها، ریز جلبک‌های سبز و باکتری‌های فتوسنتز کننده و غیر فتوسنتز کننده به‌صورت کلی در نقاط چهارده بخش معین‌شده است. ۱- پلکان ورودی؛ ۲- دروازهٔ ملل؛ ۳- خیابان سپاهیان؛ ۴- دروازهٔ ناتمام؛ ۵- کاخ سی‌ودو ستون؛ ۶-کاخ صد ستون؛ ۷-خزانه‌داری؛ ۸- کاخ ملکه (حرم‌سرا و موزه)؛ ۹- کاخ دال؛ ۱۰- کاخ هدش، ۱۱- کاخ H،۱۲- کاخ تچر، ۱۳- کاخ شورا مرکزی، ۱۴- کاخ آپادانا. حضور عوامل فرسودگی زیستی در سطح زمین و در جهات مختلف دیوارهای (شمالی، جنوبی، شرقی و

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

غربی) بناهای مختلف تخت جمشید به‌صورت کیفی



شکل ۶: تصویرهای ۱-۶) نمایی نزدیک حضور گلسنگ‌های سطح سنگی و درون سنگی در سطوح سنگ‌های تاریخی تخت جمشید
Fig 6: Pictuers 1-6) A close-up epilithic and endolithic lichens on the surface of the historic rock surfaces of Persepolis.

موردبررسی قرار گرفتند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مشاهدات میدانی، مناطق بررسی‌شده به چهار منطقهٔ دارای خطر نسبی خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم درجه‌بندی شدند.

٤. بحث

عوامل دخیل در فرسودگی زیستی در رابطه با نیازهای غذایی و خصوصیات متابولیکی، واکنش‌های متفاوتی به مواد و الگوهای مختلفی از اجتماع‌پذیری نشان می‌دهند و انواع مختلفی از آسیب‌ها را به‌وجود می‌آورند. مکانیسم‌های مختلفی در مباحث فرسودگی زیستی بسترهای سنگی مطرح می‌شوند که شامل: فرایندهای

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

فیزیکی یا مکانیکی است که سبب چسبندگی ذرات و یا از هم گسستگی آن‌ها می‌شود [38] و فرایندهای دیگر،

جدول ۱: حضور عوامل زیستی دخیل در فرسودگی زیستی تخت جمشید بر اساس موقعیت و وضعیت کیفی مشاهده میدانی

Table1: the presence of biological agants that are involved in the biodeteroration of Persepolis world heritage site, based on the position and qualitative field observations.

بنا	موقعیت	وضعیت	مهم‌ترین عوامل زیستی دخیل در فرسودگی زیستی (قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها و برخی گیاهان علفی و بوته‌ای)	خطر نسبی تأثیر عوامل			
				زیاد خیلی	زیاد	متوسط	کم
کاخ تچر	جنوبی	روباز	سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها		✓		
	شمالی	روباز	گلسنگ‌ها قارچها سیانو باکتری‌ها، خزه‌ها، گیاهان	✓			
	شرقی	روباز	سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، گلسنگ‌ها			✓	
	غربی	روباز	گلسنگ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری				✓
	سطح زمین	روباز	گیاهان			✓	
آپادانا	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها			✓	
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها	✓			
	شرقی	پو.شیده	باکتری‌ها				✓
	غربی	روباز	سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها		✓		
	سطح زمین	روباز	گیاهان				✓
کاخ هدیش	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، گلسنگ‌ها، گیاهان، خزه‌ها			✓	
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، گلسنگ‌ها، گیاه، خزه‌ها	✓			
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها		✓		
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها			✓	
	سطح زمین	روباز	گیاهان علفی			✓	
کاخ شورا	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها				✓
	شمالی	پو.شیده	باکتری‌ها				✓
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها			✓	
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓	
	سطح زمین	روباز	گیاهان			✓	
صد ستون	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها				✓
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها	✓			
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها			✓	
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها			✓	
	سطح زمین	روباز	گیاهان	✓			
خزانه‌داری	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها				✓
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها			✓	
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها،				✓
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها،				✓
	سطح	روباز	گیاهان، عوامل انسانی	✓			

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

	زمین					
دروازه ملل	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها		✓	
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها		✓	
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها			✓
	سطح زمین	روباز	گیاهان			✓
پُلکان ورودی	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها	✓		
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها			✓
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها			✓
	سطح زمین	روباز	گیاهان، عوامل انسانی			✓
خیابان سپاهیان	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها			✓
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها		✓	
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓
	سطح زمین	روباز	گیاهان	✓		
پادگان نظامی	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها،			✓
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها			✓
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓
	سطح زمین	روباز	گیاهان	✓		
دروازهٔ ناتمام	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها،			✓
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها	✓		
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها		✓	
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها		✓	
	سطح زمین	روباز	گیاهان			✓
کاخ ملکه و موزه	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها		✓	
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓
	سطح زمین	روباز	گیاهان		✓	
کاخ اچ	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها			✓
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها	✓		
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها		✓	
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓
	سطح	روباز	گیاهان	✓		

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

	زمین						
کاخ دال	جنوبی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها			✓	
	شمالی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها		✓		
	شرقی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها				✓
	غربی	روباز	قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها، ریز جلبک‌ها			✓	
	سطح زمین	روباز	گیاهان			✓	

شامل فرآیندهای شیمیایی است که به‌نوبهٔ خود، سبب دگرگونی و ترا دیسی بسترهای سنگی می‌شود. فرایندهای فیزیکی و شیمیایی در سطوح سنگ‌ها اغلب، به‌صورت هم‌زمان رخ می‌دهند، هرچند ممکن است یکی بر دیگری غالب شود [39,40]. به این نکته نیز باید توجه شود که تفاوت ملموسی بین فرایندهای غیر زیستی فرسودگی (تأثیر دما، هوازدگی، رطوبت و...) ازلحاظ فیزیکی و شیمیایی وجود ندارد. مکانیسم‌های مختلفی وجود دارند که منجر به فرسودگی زیستی در سطح سنگ‌ها می‌شوند. فرایندهای فیزیکی و مکانیکی سبب کاهش چسبندگی و افزایش گسستگی کانی‌ها می‌شوند و فرایندهای شیمیایی منجر به دگرگونی و تغییر یا تجزیهٔ لایه‌های زیرین می‌شوند. این فرایندها اغلب، هم‌زمان اتفاق می‌افتند اما امکان غلبه یکی بر دیگری با توجه به عواملی چون وضعیت محیطی، نوع بستر و اجتماعات زنده، وجود دارد. عوامل فرسودگی شیمیایی و فیزیکی و زیستی را نمی‌توان به‌روشنی از هم تفکیک کرد. زیرا هر فرایند فیزیکی و شیمیایی می‌تواند بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها تأثیرگذار باشد. جهت درک بهتر فرایند فرسودگی زیستی باید در درجهٔ اول به این نکته اشاره کرد که عامل بیولوژیکی از استقرار در بستر خود چه استفاده‌ای می‌کند. ۱) استفاده از بستر به‌عنوان یک منبع غذایی ۲) استفاده از بستر تنها به‌عنوان یک تکیه‌گاه جهت رشد و گسترش؛ بنابراین بحث مهم دیگری که در این زمینه مطرح می‌شود، بحث تشخیص اتوتروف‌ها از هتروتروف‌ها است. گروه اول (اتوتروف‌ها) ارگانیسم‌هایی را شامل می‌شوند که قادر هستند مواد آلی ضروری برای رشد خود را، خود تولید کنند. گروه دوم (هتروتروف‌ها) میکروارگانیسم‌هایی هستند که مواد ضروری خود را می‌توانند از مواد آلی موجود در طبیعت دریافت کنند. به‌این ترتیب، اتوتروف‌ها (اعم از برخی باکتری‌ها، جلبک‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها و گیاهان آوندی) می‌توانند روی بسترهای غیر آلی کلونیزه شوند. درحالی‌که هتروتروف‌ها (نظیر تعداد زیادی از باکتری‌ها و قارچ‌ها) تنها در بسترهای حاوی مواد آلی قادر به رشد و ادامهٔ حیات هستند زیرا، می‌توانند از مواد آلی آن‌ها به‌عنوان منبع انرژی استفاده کنند.

۵. نتیجه‌گیری

مجموعهٔ تاریخی میراث جهانی تخت جمشید یکی از ارزشمندترین بناهای سنگی موجود در جهان است که متأسفانه با گذر زمان، در معرض فرسودگی و تخریب عوامل مختلف محیطی زنده و غیرزنده قرارگرفته است. از مهم‌ترین عوامل زنده‌ای که نقوش و کتیبه‌های سنگی موجود در تخت جمشید را با خطرات فرسودگی زیستی مواجه می‌کنند، حضور و رشد گلسنگ‌ها است. بررسی‌های میدانی نشان می‌دهند که بیش از بیست گونهٔ گلسنگی تنها درروی کتیبه‌های خط میخی کاخ H رشد کرده است. ادامهٔ این روند رشد طبیعی، موجب تحریک فرسودگی زیستی کتیبه‌ها و از بین رفتن نقوش و خطوط میخی شده‌اند.

بر اساس بررسی‌های میدانی ما در میراث جهانی تخت جمشید و همچنین مقایسهٔ مطالعات مشابه در سایر نقاط جهان، تخمین زده می‌شود، این سطوح سنگ‌های تاریخی مجموعه، دارای تنوعی گونه‌ای در حدود پانزده گونه گیاهان آوندی، پنج گونه از گیاهان غیر آوندی (خزه‌ها) اغلب در سطح یا شکاف سنگ‌ها، بین شانزده تا بیست گونهٔ مختلف پرنده، سه تا پنج گونه حلزون و دو تا

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

چهار گونه خزنده، سی الی چهل گونه حشره باشند. در خصوص حضور میکروارگانیسم‌ها در سطوح تاریخی تخت جمشید برآورد تخمینی به این صورت است که حضور بیش از بیست سویهٔ باکتریایی هترتروف غیر فتوسنتزکننده سنگ زی و دَه سویه فتوسنتزکننده (سیانوباکتری) سنگ زی، در حدود صد و سی تاکسون از قارچ‌های گلسنگی و بیست گونه از قارچ‌ها غیر گلسنگی، هجده تاکسون جلبک سبز می‌تواند در فرسودگی زیستی نقش داشته باشد. نتایج به‌دست‌آمده، تخمینی است و زمینه را برای مطالعات دقیق‌تر جهت پایش عوامل دخیل در فرسودگی زیستی فراهم می‌آورد که یکی از ضروریات این پایگاه میراث جهانی است.

پیشنهادها و مسیر پیش رو

یکی از گام‌های اصلی در ادامهٔ مطالعات عوامل زیستی دخیل در فرسودگی زیستی تخت جمشید که از سال ۱۳۸۳ شمسی شروع‌شده و تاکنون ادامه دارد، ایجاد پایلوتی برای تحقیقات گلسنگ‌زدایی و همچنین دفتری برای پایش مستمر حضور عوامل ماکروسکوپی شناسایی‌شده مانند انواع گیاهان گل‌دار بوته‌ای و علفی، گیاهان بی‌گل مانند خزه‌ها و جانورانی مانند پرنده‌های ساکن روی سنگ‌ها (کبوترها، قمری‌ها، کلاغ‌ها و گنجشک‌ها) و خزندگان و انواع حشرات و حلزون‌های سطح سنگ‌ها است. تهیهٔ اطلس شناسایی هریک از عوامل دخیل در فرسودگی زیستی می‌تواند در پیشبرد ایدهٔ حفاظت پیشگیرانه کمک مؤثری داشته باشد؛ بنابراین تأسیس یک مرکز دائمی پایش فرسودگی زیستی در تخت جمشید یک ضرورت است.

از طرفی با توجه به اقلیم و آب‌وهوای حاکم بر محوطهٔ تخت جمشید، بحث تغییر فرم رویشی درون سنگی گلسنگ‌ها و سیانو باکتری‌ها به‌صورت جدی بین پژوهشگران مطرح شده است. چراکه در اقلیم گرم و خشک، ارگانیسم‌ها جهت فرار از شرایط دشوار محیطی، به بخش‌های داخلی سنگ، نفوذ می‌کنند و آسیبی که به سنگ وارد می‌کنند، به‌مراتب بیشتر است. با توجه به مطالعات مشابه در اروپا [41] تخمین زده می‌شود که سویه‌های مختلف سیانوباکتری و باکتری‌های هتروتروف و قارچ‌های میکروسکوپی گلسنگ‌های درون سنگی دخیل در فرسودگی زیستی تخت جمشید نقش داشته باشند که برای شناسایی دقیق آن‌ها مطالعات متاژنومیکسی نیاز است.

بر اساس آخرین اطلاعات جمع‌آوری‌شده توسط تیم تحقیقاتی فرسودگی زیستی میراث جهانی تخت جمشید، تعداد و تنوع گونه‌های گلسنگی در تخت جمشید نسبت به سال‌های گذشته افزایش پیداکرده است. این امر بسیار نگران‌کننده است و نشان‌دهندهٔ فراهم شدن شرایط مناسب از طریق عوامل مختلفی مانند تغییرات اقلیمی، تأثیر عوامل انسانی (توسعه جاده‌ها و فعالیت شرکت پتروشیمی مرودشت) برای رشد برخی گونه‌های جدید در مجموعهٔ تخت جمشید است. لازم به توضیح است که گلسنگ‌ها علاوه بر آثار مخربی که در سطوح سنگ‌ها دارند، ممکن است برخی از گونه‌های موجود از آن‌ها، در طی توالی اکولوژیکی مشخص در سطوح سنگ‌ها استقرار کرده باشد به همین علت حفظ و کنترل رشد آن‌ها شاید در کنترل چرخه استقرار برخی گونه‌های مخرب و فرصت‌طلب تأثیر داشته باشند.

اما پیش از ظهور گلسنگ‌ها، اولین مرحله در بحث کلونیزاسیون روی سنگ استقرار و ظهور رنگ‌دانه‌های ناشی از فعالیت زیستی گلسنگ‌ها و سیانو باکتری‌های مرتبط روی سنگ و ایجاد تغییر رنگ روی آن است؛ که علت اصلی آن بیشتر سیانوباکترها فتوسنتز کننده هستند. مطالعه و کنترل این میکروارگانیسم‌های فتوسنتز کننده نقش مهمی در کنترل و پیشگیری از روند رو به رشد تهاجم گلسنگ‌ها خواهد داشت. شناسایی میکروارگانیسم‌هایی مانند قارچ‌ها، گلسنگ‌ها، جلبک‌ها و سیانوباکترها از طریق روش‌های دی ان ای بارکدینگ نیز روش بسیار معتبری است که همواره تأثیر مستقیم این عوامل بر نقوش ظریف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همه این عوامل منجر به فرسایش تدریجی این نقوش و محو تدریجی می‌شوند.

سپاسگزاری

از مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی و بین‌المللی علوم و تحقیقات و فناوری برای حمایت از این تحقیق در قالب

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

طرح « بررسی نقش قارچ‌ها و گلسنگ‌ها در فرسودگی زیستی سطوح سنگ‌های تاریخی پایگاه میراث جهانی تخت جمشید» با شناسه ۸۲۴ تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین، از کلیهٔ نیروهای حراست و حفاظت فیزیکی میراث جهانی تخت جمشید که در طی بررسی میدانی عوامل فرسودگی زیستی در محدوده میراث جهانی از سال ۱۳۸۳-۱۳۹۹ همیشه همراه و پشتیبان تحقیقات ما بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

References

[1] Piervittori R, Salvadori O, Seaward MRD. Lichens and Monuments. In: St.Clair L, Seaward M, editors. Biodeterioration of Stone Surfaces Lichens and Biofilms as Weathering Agents of Rocks and Cultural Heritage. Dordrecht: Springer Netherlands; 2004. p. 241–82.

[2] Pangallo D, Bučková M, Kraková L, Puškárová A, Šaková N, Grivalský T, et al. Biodeterioration of epoxy resin: A microbial survey through culture-independent and culture-dependent approaches. Environ Microbiol. 2015;17(2):462–79.

[3] Ariño X, Saiz-Jimenez C. Biological diversity and cultural heritage. Aerobiologia (Bologna). 1996;12(1):279–82.

[4] Ríos ADL, Cámara B, Ángeles M, Rico VJ, Galván V, Ascaso C, et al. Deteriorating effects of lichen and microbial colonization of carbonate building rocks in the Romanesque churches of Segovia (Spain). Sci Total Environ. 2009;407(3):1123–34.

[5] St.Clair L, Seaward M, editors. Biodeterioration of Stone Surfaces: Lichens and Biofilms as Weathering Agents of Rocks and Cultural Heritage. Dordrecht: Springer Netherlands; 2004. 292 p.

[6] Scheerer S, Ortega-Morales O, Gaylarde C. Microbial Deterioration of Stone Monuments—An Updated Overview. In: Laskin AI, Sariaslani S, Gadd GM, editors. Advances in Applied Microbiology. 2009. p. 97–139.

[7] Caneva G, Nugari M, Salvadori O, editors. Plant biology for cultural heritage: biodeterioration and conservation. 1st ed. Los Ángeles, California, USA: Getty Conservation Institute; 2008. 400 p.

[8] Cutler N, Viles H. Eukaryotic Microorganisms and Stone Biodeterioration. Geomicrobiol J. 2010 Sep 10;27(6–7):630–46.

[9] Tiano P. Biodeterioration of Stone Monuments a Worldwide Issue. Open Conf Proc J. 2016 Apr 8;7(suppl 1: M3):29–38.

[10] Gorbushina AA. Life on the rocks. Environ Microbiol. 2007;9(7):1613–31.

[11] Fernandes P. Applied microbiology and biotechnology in the conservation of stone cultural heritage materials. Appl Microbiol Biotechnol. 2006;73(2):291–6.

[12] Eaton LK. A History of Architecture: Settings and Rituals Spiro Kostof. J Soc Archit Hist. 2006;47(1):75–6.

[13] De Los Ríos A, Ascaso C. Contributions of in situ microscopy to the current understanding of stone biodeterioration. Int Microbiol. 2005;8(3):181–8.

[14] Sterflinger K, Little B, Pinar G, Pinzari F, de los Rios A, Gu J-D. Future directions and challenges in biodeterioration research on historic materials and cultural properties. Int Biodeterior Biodegradation. 2018;129:10–2.

[15] Shahbazi AS. The authoritative guide to Persepolis. Safiran Publishing Company, Tehran; 2004.

[16] Schmidt EF. Persepolis I: Structures, Reliefs, Inscriptions. 1st ed. Chicago, USA: The University of Chicago Press; 1953. 297 p.

[17] Herzfeld E. Prehistoric Persia I: A Neolithic Settlement at Persepolis; Remarkable New Discoveries. 1929.

[18] Schmidt EF. Persepolis II: Contents of the Treasury and Other Discoveries. Chicago, USA: The University of Chicago Press; 1957.

[19] Sterflinger K. Fungi: Their role in deterioration of cultural heritage. Fungal Biol Rev. 2010;24(1–2):47–55.

[20] Biswas J, Sharma K, Harris KK, Rajput Y. Biodeterioration agents: Bacterial and fungal diversity dwelling in or on the pre-historic rock-paints of Kabra-pahad ,

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

India. Iran J Microbiol. 2013;5(3):309–14.
[21] Bryant DA, Frigaard N-U. Prokaryotic photosynthesis and phototrophy illuminated. Trends Microbiol. 2006;14(11):488–96.
[22] González JM, Sáiz-Jiménez C. Application of molecular nucleic acid-based techniques for the study of microbial communities in monuments and artworks. Int Microbiol. 2005;8(3):189–94.
[23] Hugenholtz P, Goebel BM, Pace NR. Impact of culture-independent studies on the emerging phylogenetic view of bacterial diversity. Vol. 180, Journal of Bacteriology. 1998. p. 4765–74.
[24] Cámara B, De los Ríos A, Urizal M, Álvarez de Buergo M, Varas MJ, Fort R, et al. Characterizing the Microbial Colonization of a Dolostone Quarry: Implications for Stone Biodeterioration and Response to Biocide Treatments. Microb Ecol. 2011;62(2):299–313.
[25] Crispim CA, Gaylarde CC. Cyanobacteria and Biodeterioration of Cultural Heritage: A Review. Microb Ecol. 2005;49(1):1–9.
[26] Chen J, Blume HP, Beyer L. Weathering of rocks induced by lichen colonization - A review. Catena. 2000;39(2):121–46.
[27] Grube M, Cardinale M, de Castro JV, Müller H, Berg G. Species-specific structural and functional diversity of bacterial communities in lichen symbioses. ISME J. 2009 Sep 25;3(9):1105–15.
[28] O'Neal MA, Legg NT, Hanson B, Morgan DJ, Rothgeb A. Lichenometric dating of rock surfaces in the northern cascade range, USA. Geogr Ann Ser A Phys Geogr. 2013;95(3):241–8.
[29] Wedin M, Maier S, Fernandez-brime S, Cronholm B, Westberg M, Grube M. Microbiome change by symbiotic invasion in lichens. Environ Microbiol. 2016;18(5):1428–39.
[30] Ariño X, Gomez-Bolea A, Saiz-Jimenez C. Lichens on ancient mortars. Int Biodeterior Biodegradation. 1997;40(2–4):217–24.
[31] Banfield JF, Barker WW, Welch SA, Taunton A. Biological impact on mineral dissolution: Application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere. Proc Natl Acad Sci. 1999 Mar 30;96(7):3404–11.
[32] Belnap J, Büdel B, Lange OL. Biological Soil Crusts: Characteristics and Distribution. In: Belnap J, Lange OL, editors. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management Ecological Studies (Analysis and Synthesis). Springer, Berlin, Heidelberg; 2001. p. 3–30.
[33] Corenblit D, Steiger J. Vegetation as a major conductor of geomorphic changes on the Earth surface: toward evolutionary geomorphology. Earth Surf Process Landforms. 2009;34(6):891–6.
[34] Cappitelli F, Sorlini C. Microorganisms Attack Synthetic Polymers in Items Representing Our Cultural Heritage. Appl Environ Microbiol. 2008;74(3):564–9.
[35] Sohrabi M, Favero-Longo SE, Pérez-Ortega S, Ascaso C, Haghighat Z, Talebian MH, et al. Lichen colonization and associated deterioration processes in Pasargadae, UNESCO world heritage site, Iran. Int Biodeterior Biodegradation. 2017;117:171–82.
[36] Benedict JB. A Review of Lichenometric Dating and Its Applications to Archaeology. Am Antiq. 2009;74(1):143–72.
[37] Gazzano C, Favero-Longo SE, Matteucci E, Roccardi A, Piervittori R. Index of Lichen Potential Biodeteriogenic Activity (LPBA): A tentative tool to evaluate the lichen impact on stonework. Int Biodeterior Biodegradation. 2009;63(7):836–43.
[38] Seaward MRD. Lichens as Agents of Biodeterioration. In: Upreti DK, Divakar PK, Shukla V, Bajpai R, editors. Recent Advances in Lichenology. New Delhi: Springer India; 2015. p. 189–211.
[39] Adamo P, Violante P. Weathering of rocks and neogenesis of minerals associated with lichen activity. Appl Clay Sci. 2000;16(5–6):229–56.
[40] Viles HA, Cutler NA. Global environmental change and the biology of heritage structures. Glob Chang Biol. 2012;18(8):2406–18.
[41] Dyda M, Decewicz P, Romaniuk K, Wojcieszak M, Sklodowska A, Dziewit L, et al. Application of metagenomic methods for selection of an optimal growth medium for bacterial diversity analysis of microbiocenoses on historical stone surfaces. Int Biodeterior Biodegradation. 2018;131:2–10.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-17]

[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.12.6]

[DOI: 10.29252/jra.6.1.175]