Journal of Research on Archaeometry, 2021; 7 (2): 159-182

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.52547/jra.7.2.159

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

Review Papers

A Review of Biodeterioration in Iranian Historical Monuments with Emphasis on Porous Architectural Materials

Mehdi Zabihi [1], Mohammad Sohrabi [*2], Mohammad Hassan Talebian [3], Abdolmajid Nortaghani [4]

[1]. Ph.D. Student in Microbiology, Iranian Research Organization for Scientific and Technology, The Museum of Iranian Lichens, Tehran, IRAN

[2]. Assistant Professor, Iranian Research Organization for Scientific and Technology, The Museum of Iranian Lichens, Tehran, IRAN

[3]. Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture, University of Tehran, Tehran, IRAN

[4]. Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, IRAN

Received: 21/09/2021 **Accepted: 21/12/2021**

Abstract

Iran is known as one of the top 10 countries in this field with its various historical-artistic works made of stone and brick. It is the historical monuments that determine the antiquity, history, and civilization of each land. Physical, chemical, and biological factors in co-operation, from coexistence to antagonism, cause biodeterioration. The biodeterioration of historical monuments and art in countries with ancient history and having historical buildings has been considered by many scientists. Any adverse change in the properties of materials that occurs through the vital activities of living organisms is called biodeterioration. Living organisms that can cause biodeterioration are known as biodeteriogens. These factors cause biodeterioration by forming biofilms on surfaces. Substances that are altered and degraded by the activities of organisms are divided into two categories: organic and inorganic. The development of specific biological species in specific structural materials is determined by the nature and properties of the materials (mineral composition, pH, relative percentage of different minerals, salinity, moisture, and texture). It also depends on specific environmental factors (e.g. temperature, relative humidity - RH, light conditions, oxygen, nitrogen, level of atmospheric pollution, wind, and rainfall). In this article, the biodeterioration factors of historical-artistic works made of porous materials in Iran have been studied to evaluate the factors affecting the activity of organisms and their reproduction on historical-artistic works and to understand the mechanisms related to biodeterioration and design appropriate solutions for use protection and repair.

Keywords: Biodeterioration, Historic Monuments, Porous Materials, Living Organisms, Biofilm

*Corresponding Author: sohrabi@irost.org

Introduction

Iran is known as one of the top 10 countries in this field with its various historical-artistic works made of stone and brick. There are many magnificent monuments throughout the country that are rich in structural diversity and aesthetics. Chogha Zanbil, Shahr-e Sukhteh, Persepolis Palace Complex, Taq Kasra, Behistun Inscription, Gonbad-e Qābus tower, and Soltanieh tower, and Arg-e Bam are some of the most famous architectural monuments in Iran [22]. Antiquities, statues, and monuments are exposed to the effects of physical, chemical, and biological decay, and in the meantime, they have been mostly destroyed by organisms, severe and irreversible decay. This damage and deterioration not only destroys the aesthetic value but also poses challenges for researchers exploring the evolution of ancient civilizations. Deterioration is defined as the loss of structural properties over time resulting from the activity of external agents or the leaching of materials. Deterioration of monuments is a phenomenon that causes the loss of materials or the formation of new materials that are artistically and historically undesirable. The biodeterioration of historical monuments and art in countries with ancient history and having historic buildings has been considered by many scientists. Any adverse change in the properties of materials that occurs through the vital activities of living organisms is called biodeterioration. In this article, the biodeterioration factors of historical-artistic works made of porous materials in Iran have been studied to evaluate the factors affecting the activity of organisms and their reproduction on historical-artistic works and understand the mechanisms related to their biodeterioration and design appropriate solutions for use conservation and restoration [2,3].

Organisms involved in biodeterioration:

Both artifacts and art-historical artifacts stored in museums and artifacts outside the enclosed space have been largely exposed to degradation processes by macro- and micro-organisms (e.g., rodents, birds, plants, insects, lichens, algae, bryophytes, fungi, bacteria, cyanobacteria (commonly known as biodeteriogens. Bio-damages of building materials can be divided into different categories. Harmful effects of organisms may be aesthetic, biogeochemical, or biogeophysical (table 1). Apart from the inherent characteristics of organisms in the immediate environment, many ecological factors affect the biodeterioration of the substrate [16].

Ecological aspects and bioreceptivity of biodeterioration:

The development of specific biological species in specific structural materials is determined by the nature and properties of the materials (mineral composition, pH, relative percentage of different minerals, salinity, moisture, and texture). It also depends on specific environmental factors (e.g. temperature, relative humidity - RH, light conditions, oxygen, nitrogen, level of atmospheric pollution, wind, and rainfall). Weathering of building materials, including their bio-receptivity capacity, is influenced by their chemical nature, physical structure, and geological origin, such as igneous, sedimentary, or metamorphic rocks. During the period of microbial contamination, the physicochemical properties of the mineral substrate generally change and increase the subsequent bio-receptivity [14,21,43].

Methods of studying the factors involved in biodeterioration

Assessing the factors affecting the microbial activity and their proliferation on works of art and understanding the mechanisms associated with biodeterioration is necessary to design appropriate strategies for conservation and restoration. To assess biological hazards, it is important to measure both the total amount of microbes in the indoor environment and the art surface. Studies using non-artificial sampling methods and molecular approaches to investigate the role of microorganisms in the degradation process provide a deeper understanding of the phenomena of biodeterioration[49]. Traditional culture methods for the isolation and identification of microorganisms are very useful in the biological assessment of cultural heritage. Culture-based methods are still the most common method for studying the physiology of microorganisms. However, traditional culture techniques separate less than 1% of the microbial community, but molecular methods in detecting, identifying, and to some extent determining the number of microorganisms in cultural heritage objects are expanding. The use of molecular biology in cultural heritage has been used to identify the development of microorganisms in minerals or organic matter in museums and archives. Molecular

biology performs sensitive studies on microbial contamination of artwork based on DNA genome sequence analysis [50].

Types of substrates exposed to biodeterioration

Substances that are altered and degraded by the activities of organisms are divided into two categories: organic and inorganic. Dividing biodeterioration into different subjects is appropriate but artificial. Inorganic materials such as glass, metals, and rocks are present at the site of historical monuments and are exposed to biodegradation. A variety of materials such as paintings, wood, paper, leather, and leather are made from organic materials [67]. All rock materials can be bio-absorbed and therefore can be partially colonized. Microbial communities exist in stone objects, including cultural heritage assets located outside the home. These works clearly show that different types of substrates are colonized by diverse microbial communities consisting of bacteria, cyanobacteria, fungi, and lichens. The most common building materials in Iran's cultural regions are often mud, which is everywhere. Flowers can be produced in the form of bricks. One of the useful tools for diagnosing biodeterioration of bricks is an integrated microscopic method that allows the quantitative and qualitative description of degraded and original materials. Biodeterioration usually starts at the micro-level or even below the micro-level without being noticed. Once started, it can gently affect the internal structure of the material. Mortars and concrete substrates are workable paste that hardens and adheres to building blocks such as stone, brick, and concrete building blocks. Laboratory analysis of concrete samples has shown that many organisms such as fungi (yeasts, Cladosporium, Mycelia, Hyphae, etc.), bacteria (Actinomycetes, Thiobacillus, etc.), algae (the most famous diatom algae), and even protozoa can be found in concrete matrices. Due to its composition, porosity, and roughness, the first material to be successfully cloned by cyanobacteria and algae is the mortar. These clones are probably related to the capacity of these substrates to retain water for a long time [74,77,80].

Control of organisms involved in biodeterioration

Biodeterioration control has become a global necessity for the preservation of cultural heritage, and research has been strengthened by this need and by increasing knowledge about biodegradation processes. Removing the microbial community from any particular level is an intervention that must be carefully evaluated. Interdisciplinary research projects between restorers and scientists, including microbiologists, geologists, and chemists, are needed to assess the role of microorganisms in the biodeterioration of cultural heritage objects and their feasibility [88,90].

Conclusion

Although it is well established that microorganisms can cause serious damage to works of art and antiquities, knowledge of the exact mechanisms of biodeterioration is still fragmented and requires more attention. The development of new identification methods will give us a broader understanding of the diversity of existing organisms and may expand our knowledge of the new types of microbial metabolism that occur in these habitats. In this article, the main activities and mechanisms involved in the biodegradation of cultural heritage were described, and the importance of identification, protection, and cleanup methods in this area was emphasized. However, very few studies have been conducted on the activity of biodeterioration organisms in Iran and antimicrobial and preventive measures should be initiated.

پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۰؛ ۷(۲): ۱۵۹-۱۸۲

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.52547/jra.7.2.159

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

مقاله مروری

مروری بر فرسودگی زیستی در آثار تاریخی ایران با تأکید بر مصالح معماری متخلخل

مهدی ذبیحی[۱]، محمد سهرابی[۲]*، محمد حسن طالبیان[۳]، عبدالمجید نورتقانی[۴]

۱. دانشجوی دکتری میکروبیولوژی، گروه زیست فناوری صنعتی و محیط زیست، پژوهشکده زیست فناوری، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه زیست فناوری صنعتی و محیط زیست، پژوهشکده زیست فناوری و موزهٔ گلسنگ‌های ایران، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۳. دانشیار گروه آموزشی معماری، دانشکده معماری، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. استادیار گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۳۰**

چکیده

ایران با داشتن آثار هنری _ تاریخی متنوع ساخته شده از سنگ، آجر و خشت، به عنوان یکی از ۱۰ کشور برتر در این حوزه شناخته می-شود. عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی در همکاری مشترک، از هم زیستی تا هم ستیزی، سبب فرسودگی زیستی می‌شوند. هر نوع تغییر نامطلوب در خواصّ مواد را که به وسیلهٔ فعالیت‌های حیاتی ارگانیسم‌های زنده رخ می‌دهد، فرسودگی زیستی می‌نامند. فرسودگی زیستی آثار تاریخی _ هنری در کشورهایی با تاریخ کهن و داشتن ابنیهٔ تاریخی، مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است. ارگانیسم‌های زنده که می‌توانند موجب بروز فرسودگی زیستی شوند، به عنوان عوامل فرسایش‌زای زیستی شناخته می‌شوند. این عوامل با تشکیل بیوفیلم برروی سطوح، سبب فرسودگی زیستی می‌شوند. موادی که در اثر فعالیت های موجودات دچار تغییر و فرسودگی می‌شوند به دو دستهٔ آلی و غیر آلی تقسیم می‌شوند. توسعهٔ گونه‌های زیستی خاصّ در مواد ساختاری خاص، بر اساس ماهیت، خواص مواد و عوامل محیطی خاص (ترکیبات معدنی، pH، درصد نسبی مواد معدنی مختلف، شوری، رطوبت و بافت دما، رطوبت نسبی – RH، شرایط نور، اکسیژن) تعیین می‌شود. در مقالهٔ حاضر به بررسی عوامل فرسودگی زیستی آثار تاریخی _ هنری ساخته شده از مواد متخلخل در ایران پرداخته شده است. بنابراین با ارزیابی عوامل مؤثر بر فعالیت ارگانیسم‌ها، تکثیرشان و درک مکانیزم‌های مربوط به فرسودگی زیستی، می‌توان راهکارهای مناسب را برای کنترل و حفاظت در آثار تاریخی _ هنری به‌کار برد.

واژگان کلیدی: فرسودگی زیستی، آثار تاریخی، مصالح متخلخل، ارگانیسم‌های زنده، بیوفیلم.

* نویسنده 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

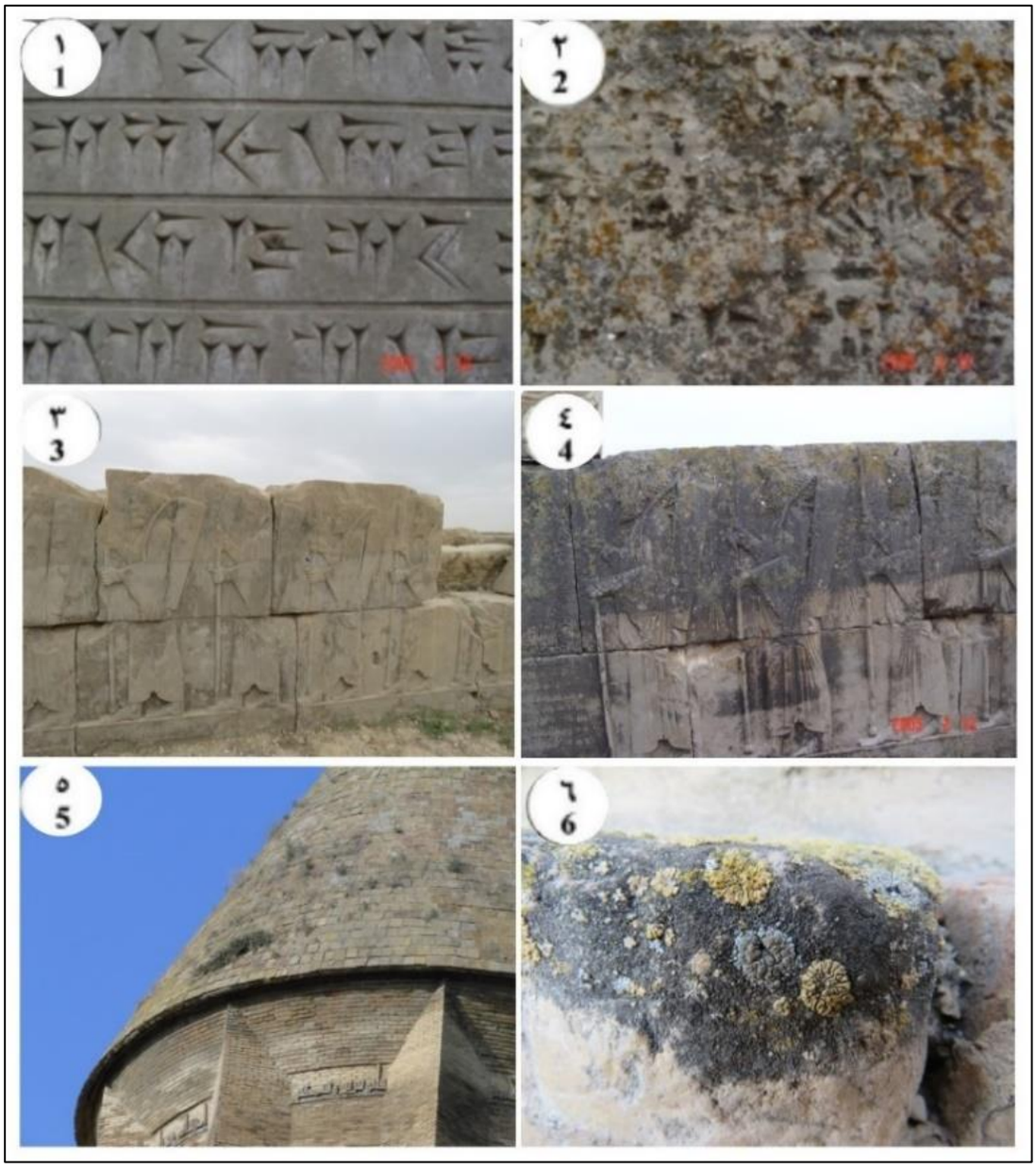
۱. مقدمه

آثار تاریخی، مجسمه‌ها و بناهای باستانی در معرض تأثیر عوامل فرسودگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی قرار دارند و در این میان، آن‌ها بیشتر توسط ارگانیسم‌ها دچار تخریب، فرسودگی شدید و غیرقابل برگشت شده‌اند [1–3]. هوک (۱۹۶۵، ۱۹۶۸) فرسودگی زیستی (biodeterioration) را به عنوان "هرگونه تغییر نامطلوب در خواص ماده ناشی از فعالیت‌های حیاتی موجودات" تعریف کرد. یکی دیگر از اصطلاحات نامعمول دیگر تجزیهٔ زیستی (biodegradation) است [4]. اگرچه هیچ تعریف رسمی پذیرش کلی ندارد، ممکن است مفید باشد که تجزیه زیستی را از جمله توانایی‌های پوسیدگی موجودات موجود در تهیه مواد زاید مفید یا قابل قبول‌تر بدانیم [5]. هر دو تعریف، بر استفاده از ارگانیسم‌ها برای تغییر مواد تأکید دارند ولی در فرسودگی زیستی به مطالعهٔ جنبه‌های منفی یا مضر و در تجزیه زیستی به بررسی جنبه‌های مثبت یا مفید پرداخته شده است [6]. فرسودگی زیستی نه تنها سبب از بین رفتن ارزش زیبایی شناختی می‌شود (شکل ۱) بلکه چالش‌هایی را نیز برای محققان کاوش در تحولات تمدن‌های باستانی به وجود می‌آورد. فرسودگی زیستی یک مشکل آشکار برای حفظ آثار تاریخی است و این می‌تواند به عنوان یک تعامل پیچیده در یک تجمع زیستی و بستر آن شناخته شود. طراحی یک روش تشخیصی برای ارزیابی میزان خسارت، شناسایی جامعه زیستی و انتخاب یک روش کارآمد با هدف از بین بردن این عوامل کمّی پیچیده است. این رویکرد مستلزم شناخت ماهیت فرسودگی زیستی و روش‌های اجرایی است [7]. پتانسیل آسیب به بسترهای مختلف توسط عوامل زیستی با مشاهدات در میدان و آزمایشات در آزمایشگاه نشان داده می‌شود. با این حال، تعیین کمیت و نسبت دادن تخریب مشاهده شده در آثار تاریخی به طور خاص دشوار است. تجمع‌کننده‌های زیستی بر روی آثار تاریخی بسیار پیچیده است و گروه‌های مختلف با خصوصیات فیزیولوژیکی مختلف را دربر می‌گیرد. این تجمع‌ها بسته به شرایط محیطی و خصوصیات فیزیکوشیمیایی بستر می‌توانند به طرق مختلف توسعه یابند. بنابراین، تنها طیف اندک از نمونه‌ها را می توان در این چارچوب مورد بحث قرار داد که بیانگر پیچیدگی تعامل بین ارگانیسم‌ها و بستر آن‌ها است [8,9]. با توجه به تنوع آثار تاریخی از لحاظ مواد سازنده در کشور ایران، لازم است تا ضمن درک و مفاهیم بیشتر با روش‌های جلوگیری و کنترل عوامل آسیب‌زای زیستی در حفاظت از این آثار ارزشمند تلاش‌های جدی‌تری انجام شود. هدف اصلی این مطالعه، بررسی فرایندهای شکل‌گیری، روش‌های مطالعه و کنترل فرسودگی زیستی بر روی آثار تاریخی ساخته شده از بسترهای مختلف است.

۲. مکانیسم‌های فرسودگی زیستی

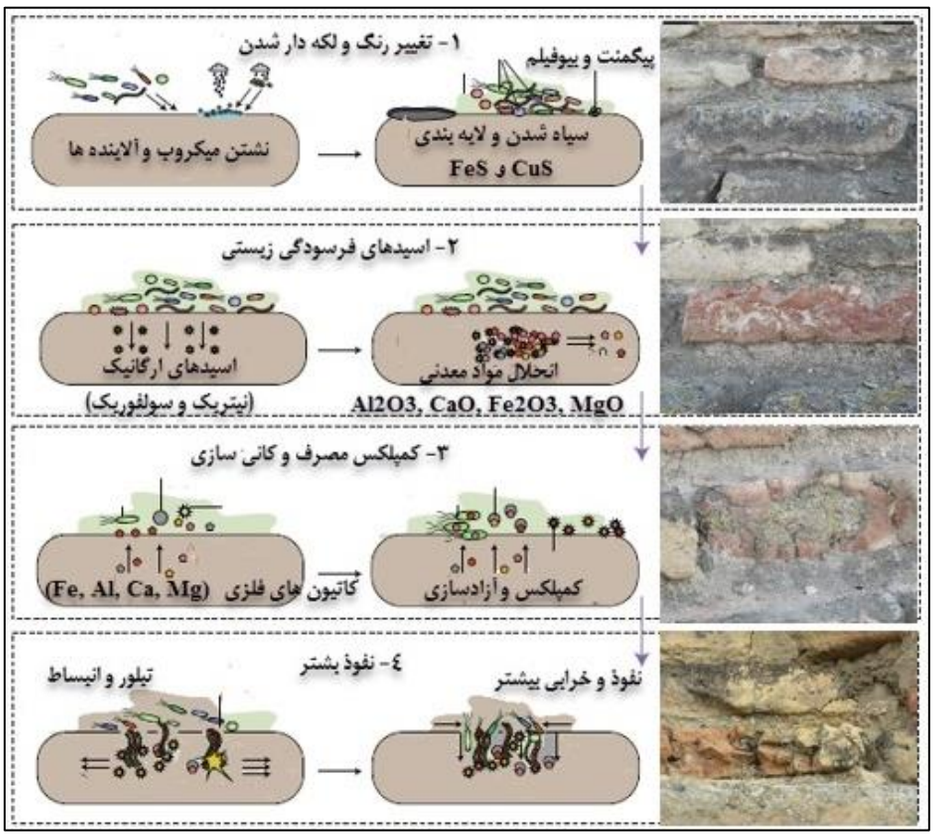
آسیب‌های زیستی مصالح ساختمانی را می‌توان به دسته‌های مختلفی تقسیم کرد. اثرات مضر ارگانیسم‌ها ممکن است زیبایی شناختی، بیوژئوشیمیایی و یا بیوژئوفیزیکی باشد (شکل ۲). عوامل دخیل در فرسودگی زیستی بیشتر از طریق تشکیل بیوفیلم این کار را انجام می‌دهند. بیوفیلم شامل هر گونه تجمع پیوسته از ارگانیسم‌ها است که در آن سلول‌ها به یکدیگر و اغلب به سطح نیز می‌چسبند. سلول‌های ارگانیسمی ممکن است با استفاده از آن به عنوان یک بستر یا به طور غیرمستقیم با تحمیل استرس جسمی، به عنوان مادهٔ مغذی موجودات دیگر یا تأمین ترکیبات برای واکنش‌های شیمیایی ثانویه، به فرسودگی زیستی کمک کنند [10,11]. نخستین نشانهٔ ظهور فرسودگی زیستی آسیب سطحی یا زیباشناختی، تولید بیوفیلم یا تولید رنگدانه است که در آن موجودات و مواد متابولیکی آن‌ها سبب کهنگی و تغییر رنگ مواد می‌شوند. نوع دیگری از فرسودگی زیستی آسیب شیمیایی، مانند تولید اسید یا تبلور نمکی، ناشی از میکروارگانیسم‌ها است که می‌تواند سبب تغییر رنگ و فرسایش شود. این تغییرات به دلیل آلاینده‌ها و همچنین محصولات رشد میکروبی ایجاد می‌شود [12]. گلسنگ‌ها، باکتری‌ها و قارچ‌ها اسیدهای آلی

مختلفی مانند اسید اگزالیک و سایر متابولیت‌ها را ترشح می‌کنند. مواد شیمیایی تولید شده توسط جلبک‌ها، قارچ‌ها و سیانوباکتری‌ها نیز ممکن است منجر به قلیایی شدن سطح بستر، انحلال و تکه‌تکه شدن دانه-های کوچکتر شود. نوع دیگری از فرسودگی زیستی آسیب ساختاری، فیزیکی یا مکانیکی ناشی از نفوذ هیف‌های قارچی یا تال به داخل بستر هستند که تحت تأثیر رشد موجودات زنده قرار دارد و منجر به جدا شدن دانه‌ها و ذرات، لایه‌برداری، خرد شدن و افزایش تخلخل سطح می‌شود و در نتیجه با توجه به نیروهای مکانیکی، شکستگی‌هایی با ابعاد متغیر ایجاد می‌شوند [4].



شکل ۱. مشکلات ناشی از فرسودگی زیستی بر روی آثار تاریخی _ هنری: ۱-۲) خط میخی در کتیبه بیستون؛ ۲-۳) تصاویر مربوط به تخت جمشید؛ ۳-۴) آجرهای برج گنبد قابوس.

Fig. 1. Problems caused by biodeterioration on historical monuments: 1-2) Cuneiform in Biston inscription; 2-3) Images related to Persepolis; 3-4) Bricks the Gonbad-e Qābus tower



شکل ۲. مکانیسم‌ها و مراحل فرسودگی زیستی [13].
Fig. 2. Mechanisms and stages of biodeterioration

۳. ارگانیسم‌های درگیر در فرسودگی زیستی

هر دو اثر مصنوعی و آثار هنری – تاریخی که در موزه‌ها ذخیره شده‌اند و بناهای تاریخی که در بیرون از فضای سر بسته قرار گرفته‌اند، عمدتاً در معرض فرایندهای تخریب توسط ماکرو و میکروارگانیسم‌ها قرار گرفته‌اند (به عنوان مثال، جوندگان، پرندگان، گیاهان، حشرات، گلسنگ‌ها، جلبک‌ها، بریوفیت‌ها، قارچ‌ها، باکتری‌ها، سیانوباکتری‌ها) که معمولاً به عنوان عامل فرسایش‌زای زیستی (biodeteriogen) شناخته می‌شوند (شکل ۳). انواع عامل فرسایش‌زای زیستی باید با توجه به حضور آن‌ها در مواد مختلف و نوع آسیب آن‌ها دسته‌بندی شوند: در جدول شماره ۱ گروه‌های اصلی عامل فرسایش‌زای زیستی نشان داده شده است [14,15].

الف) باکتری‌ها: باکتری‌ها گروهی از ارگانیسم‌های تک سلولی یا کلون‌کننده پروکاریوتی با اشکال مختلف هستند که با توجه به شکل آن‌ها به پنج گروه طبقه‌بندی می‌شوند: کوکسی، باسیل، مارپیچ، ویبریو یا اسپیروکت. این باکتری دارای یک دیوارهٔ سلولی نسبتاً ضخیم است که از پپتیدوگلیکان‌ها ساخته شده است (پلیمرهای کربوهیدرات متصل به پروتئین). با توجه به نیازهای تغذیه‌ای ساده و دقیق آن‌ها باکتری‌ها می‌توانند به راحتی در سطوح مختلف میراث معماری ایجاد شوند، به ویژه در مواردی که سطح آن دارای آب بالایی است. باکتری‌هایی که در فرسودگی بناها و آثار هنری نقش دارند، به طور عمده به سه گروه تغذیه‌ای تعلق دارند: فوتواتوتروف، کمولیتوتروف و کموارگانوتروف. گونه‌های باکتری در گروه‌های مختلف اسیدهای آلی/معدنی قوی تولید می‌کنند و می‌توانند انرژی خود را از اکسیداسیون/کاهش مواد معدنی و آلی به عنوان منبع انرژی استخراج کنند [17,18].

جدول ۱: مهمترین عوامل فرسودگی زیستی آثار باستانی و ارتباط آن‌ها با خسارات فیزیکی و شیمیایی [16].
Table 1: The most important factors of biodeterioration of antiquities and their relationship with physical and chemical damage.

	نوع مواد مورد خسارات Damaged materials	خسارات شیمیایی Chemical damage	خسارات فیزیکی Physical damage
گیاهان عالی Higher plants	سنگ‌های طبیعی و مصنوعی Natural and artificial stones	ترشح اسید آلی توسط ریشه‌ها Roots excrete organic acids	ترک، جدا شدن سنگ Cracks, detachment of stone
حیوانات و حشرات Animals and insects	سنگ، چوب، پوست، الیاف گیاهی و حیوانی و موارد دیگر Stone, wood, parchment, vegetal and animal fibers, and more	قطرات و ادرار Droppings and urine	سوراخ‌ها، ضایعات، فرسایش و تجزیه، آسیب‌های ساختاری Holes, losses, erosion, structural damages
خزه‌ها و جگرواش-ها Mosses and liverworts	سنگ‌های طبیعی و مصنوعی Natural and artificial stones	استخراج مواد بستر، اسید کربنیک Extraction of mineral from substratum, carbonic acid	نفوذ فیزیکی توسط ریزوئیدها Physical intrusion by rhizoids
جلبک‌ها Algae	سنگ‌ها، نقاشی‌های دیواری، چوب stones, wall paintings, wood	لکه‌دار کردن، تجزیه سنگ Staining, disintegration of stone	پودر کردن Powdering
گلسنگ‌ها، قارچ‌ها Fungi, Lichens	سنگ، نقاشی، چوب، پوست و چرم، الیاف گیاهی و جانوری و سنگ آهک .... Stone, paintings, wood, parchment and leather, vegetal and animal fibers, Limestone	تولید اسیدها و رنگدانه‌های آلی و معدنی، خواص شلاته کننده Production of organic and inorganic acids and pigments, chelating properties	انقباض و انبساط تالوس، از دست دادن مواد ترک و شکاف Contraction and expansion of thallus, fissures, loss of materials
باکتری‌های هتروتروف و اتوتروف Heterotrophic, Autotrophic bacteria	سنگ، نقاشی، چوب، پوست، الیاف گیاهی و جانوری و موارد دیگر Stone, paintings, wood, parchment , vegetal and animal fibers, …	لکه‌دارکردن، تولید اسیدها و رنگدانه‌ها، تشکیل بیوفیلم Staining, production of acids and pigments, biofilm	-

ب) قارچ: قارچ‌ها گروهی هستند که کلروفیل ندارند، بنابراین نمی‌توانند مواد غذایی خود را با استفاده از نور خورشید ایجاد کنند. آن‌ها می‌توانند به راحتی روی اشیاء و بناهای تاریخی ظاهر شوند. رشد آن‌ها به وسیله هیف‌های رشته‌ای تک سلولی یا چند سلولی مشخص می‌شود که اغلب می‌تواند سبب بدتر شدن فرسودگی زیستی شود. سه نوع مختلف از قارچ‌های عامل پوسیدگی که در سطوح آثار تاریخی_ هنری یافت می-شوند شاملِ پوسیدگی قهوه‌ای، پوسیدگی نرم و پوسیدگی سفید هستند. بیشتر قارچ‌های پوسیدگی قهوه‌ای و پوسیدگی سفید متعلق به بازیدومیسیت (Basidiomycetes) هستند، اما برخی متعلق به آسکومیسیت (Ascomycetes) نیز محسوب می‌شوند. بیشتر قارچ‌های پوسیدگی نرم متعلق به آسکومیسیت و قارچ‌های ناقص مانند جنس‌های Chaetomium globosum و Phialophora hoffmannii. هستند. تجمع زیستی سطوح سنگی یا مواد دیگر توسط قارچ‌ها سبب ایجاد خسارتی توسط نیروهای فیزیکی (مکانیکی) می‌شود. نفوذ بدنهٔ قارچ‌ها (هیف) بعضی از آن‌ها را قادر می‌سازد تا به طور فعال وارد مواد شوند و پس از پخش شدن و تخریب ساختارهای سوراخ مانند به نام بیوپیتینگ (Biopitting) روی بستر را ایجاد کنند. علاوه بر این تولید متابولیت‌های اسیدی تهاجمی منجر به تخریب زیستی می‌شود [3,19–21].

پ) ارگانیسم‌های فوتوتروفیک مانند جلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها بلکه خزه‌ها و حتی گیاهان عالی نیز بستر را می‌پوشانند و در نتیجه چهرهٔ بناهای جدید یا میراث فرهنگی را تغییر می‌دهند. در بسیاری موارد آن‌ها بیوفیلم یا پوسته‌هایی را تشکیل می‌دهند تا خود را از عوامل نامطلوب محیطی محافظت کنند. این پوسته‌ها یا فیلم‌ها در شرایط مرطوب محیطی یا با رنگ سیاه و سفید در شرایط خشک محیطی به رنگ سبز عمیق یا روشن ظاهر می‌شوند [3,22,23]. در شرایط خاص آب و هوایی (به عنوان مثال محیط‌های گرمسیری) این ارگانیسم‌ها یک اثر محافظتی را فراهم می‌کنند و سطح بستر را از محیط‌های تهاجمی جدا و رطوبت و دما را تنظیم می‌کنند. اما عوامل فرسودگی زیستی تشکیل شده همچنین می‌تواند در اثر فرایندهای فیزیکی و شیمیایی خسارت ایجاد کند. فرایندهای فرسودگی زیستی را می‌توان با ترشح اسیدهای خورنده، جذب ترکیبات بستر مانند گوگرد و کلسیم و تجمع در سلول‌های آن‌ها و با تغییر مواد معدنی ایجاد کرد. سرانجام نفوذ هیف، ریزوئید و ریشه‌ها سبب بزرگتر شدن منافذ و شل شدن ذرات بستر از مواد آن‌ها می‌شود. رشد این عوامل سبب از بین رفتن قوام سازه می‌شود [2,24–27]

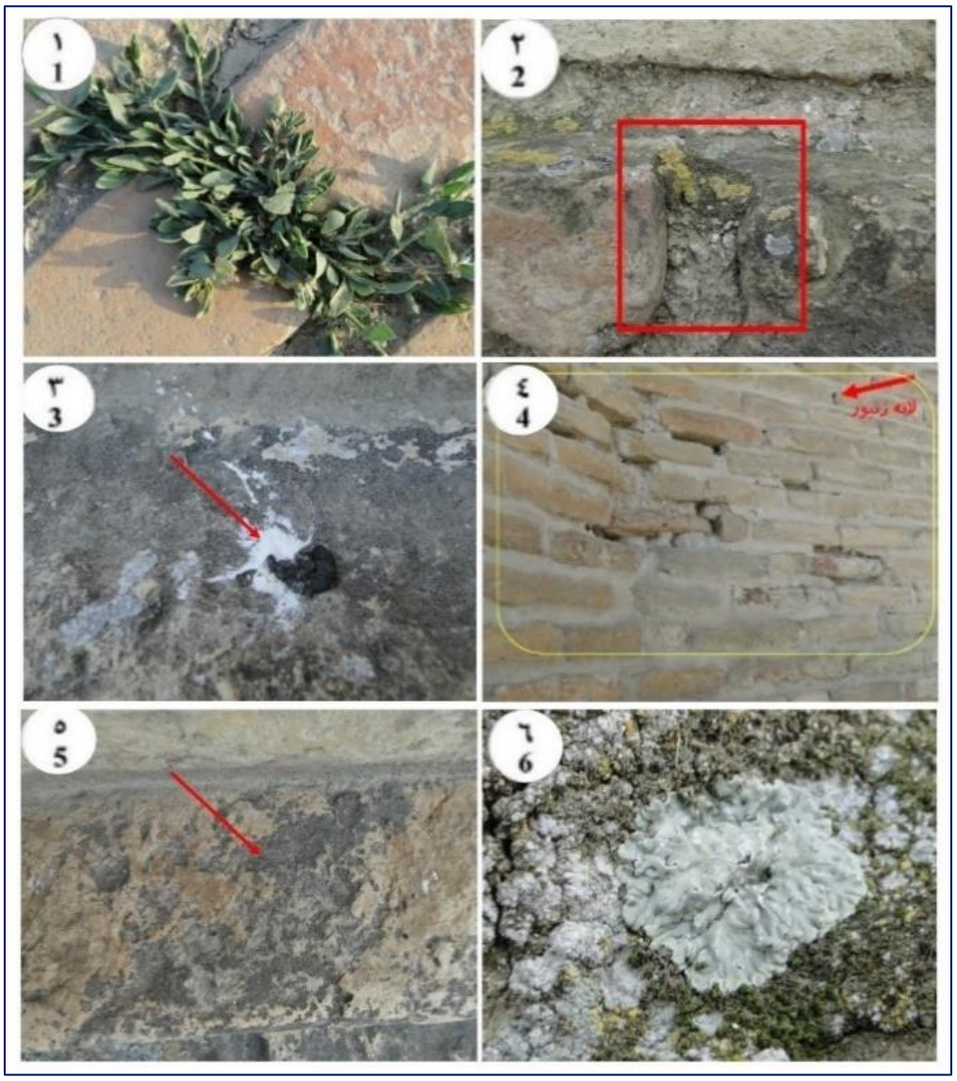
ج) گلسنگ: گلسنگ یک همزیستی اکولوژیکی پایدار بین یک قارچ زنده و یک یا چند همزیست تک سلولی است یا یک شرکای فتواتوتروف رشته‌ای واقع در خارج از سلول است. بنابراین گلسنگ‌ها ارگانیسم‌های همزیستی قارچ‌ها (مایکوبیونت) و جلبک‌ها یا سیانوباکتری‌ها (فوتوبیونت) هستند. بدن گلسنگ، ریسه (Thallus) نامیده می‌شود و آن‌ها از عوامل تجمع زیستی مکرر بناهای تاریخی هستند. با کمی رطوبت مانند شبنم صبحگاهی، گلسنگ‌ها سریعاً آبدار می‌شوند و فتوسنتز و رشد از سر گرفته می‌شود. گلسنگ‌ها به دلیل نفوذ توسط ریسه‌های متشکل از رشته‌های قارچی، انبساط / انقباض ریسه‌ها و مرطوب / خشک شدن، سبب ایجاد صدمات مکانیکی می‌شوند که می‌تواند دانه‌های سنگ را از سطح زمین جدا کنند. گلسنگ‌های خاصی می‌توانند به‌صورت درون زی (Endolithic) رشد کنند و منجر به اثرات مخرب مشابهی می‌شوند [28–32] .

ذ) حشرات و حیوانات (پرندگان، پستانداران و خزندگان): حیوانات نیز در آسیب‌رسانی به اشیاء با اهمیت باستان‌شناسی دخیل هستند. حشرات از اجزای آلی مواد بستر به عنوان مثال کاغذ یا از محصولات به عنوان چسب، پوست، چرم خاص تغذیه می‌کنند. سایر آفات جانوری مانند جوندگان نیز ممکن است با تغذیه و استفاده از آن‌ها به عنوان مواد لانه به آثار تاریخی_هنری آسیب برسانند [33–35]. فضولات حیوانات و پرندگان نه تنها ناخوشایند و خورنده هستند بلکه سبب آسیب‌رسانی مستقیم به آثار تاریخی_هنری می‌شوند. همچنین غذای قارچ‌ها، میکروارگانیسم‌ها و حشرات را نیز فراهم می‌کنند (شکل ۳). خفاش‌ها می‌توانند سطوح کتیبه‌ها و یادبودها را آلوده کنند و منجر به ایجاد ظاهر ناخوشایند برای آن‌ها و همچنین افزایش سطح آلی شوند. جوامع بندپایان روی بستر از رشد جلبک و گلسنگ حمایت می‌کنند [36,37].

٤ . جنبه‌های اکولوژیکی فرسودگی زیستی

به غیر از ویژگی‌های ذاتی ارگانیسم‌ها، عوامل اکولوژیکی زیادی بر فرسودگی زیستی بستر تأثیر می‌گذارند. عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی در ارتباطات مختلف از هم افزایی گرفته (Synergism) تا هم ستیزی (antagonism) عمل می‌کنند. خواص فیزیکی بستر بر میزان تخریب تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، سطوح خشن و تخلخل زیاد به چسبندگی و تجمع زیستی برای رشد ارگانیسم کمک می‌کند. آلودگی محیط زیست که در قرن گذشته به سرعت افزایش یافته است، ممکن است با تأمین مواد مغذی برای رشد میکروبی به طور مستقیم بر تخریب بستر (مانند باران اسیدی) یا غیر مستقیم تأثیر بگذارد. جذب زیستی را با عنوان توانایی یک ماده یا بستر برای جذب تجمعات زیستی تعریف کرده‌اند. اگرچه این مفهوم، بیشتر در زمینهٔ مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما می‌تواند

برای حفاظت از میراث فرهنگی مورد توجه باشد تا درک و ارزیابی مواد مورد استفاده در مرمت آثار مورد استفاده قرار گیرد. ویژگی‌های کیفی و کمّی کلون میکرو فلور به شدت تحت تأثیر خواص لایه بستر است. pH، ساییدگی، چگالی، تخلخل باز، آب مویرگی و تأثیر ترکیب شیمیایی بستر بر تجمع کلی میکروبی هنوز نامشخص است. با این حال گفته شده است که وضعیت بستر بر میکرو فلورا تأثیر می‌گذارد. داده‌های منتشر شده در مورد توزیع گونه‌های مختلف ارگانیسم‌های فتوسنتز کننده، ارتباط روشنی را بین ارگانیسم‌های موجود و ترکیبات بستر نشان نمی‌دهد و معمولاً بیشترین تأثیر بر تجمعات زیستی را اقلیم دارد. بالاترین درجهٔ فرسودگی زیستی در آب و هوای گرمسیری و نیمه گرمسیری با رطوبت و درجه حرارت بالا رخ می-دهد. همچنین در آب و هوای معتدل و آلوده، فرسودگی زیستی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [14,21,38–40].



شکل ۳. عوامل دخیل در فرسودگی زیستی: ۱) گیاه *Polygonum rottboellioides* رشد یافته در بین آجرها؛ ۲) خزه‌ها در سطح بنا؛ ۳) فضولات پرندگان بر روی بنا؛ ۴) حفاری‌های زنبور به عنوان یکی از عوامل فرسودگی؛ ۵–۶) گلسنگ‌های *Verrucaria nigrescens* و *Protoparmeliopsis muralis* به عنوان یکی از عوامل فرسودگی زیستی.

Fig. 3. Factors involved in biodeterioration: 1) Polygonum rottboellioides grown among bricks; 2) moss on the surface of the building; 3) bird droppings on the building; 4) Bee drilling as one of the causes of burnout; 5-6) Lichens of Verrucaria nigrescens and Protoparmeliopsis muralis as one of the causes of biodeterioration.

۵ . جذب زیستی

بدیهی است که هوازدگی مواد سازندهٔ آثار تاریخی_هنری از جمله قابلیت جذب زیستی (Bioreceptivity) آن‌ها، تحت تأثیر ماهیت شیمیایی، ساختار فیزیکی و منشأ زمین شناسی آن‌ها، مانند سنگ‌های آذرین، رسوبی یا دگرگونی قرار دارد. همانطور که قبلاً ذکر شد، کلون ارگانیسمی در سنگ‌ها به عوامل محیطی از جمله در دسترس بودن آب، pH، قرار گرفتن در معرض آب و هوا، منابع غذایی و پارامترهای سنگ‌شناسی از جمله ترکیب مواد معدنی، نوع سیمان و همچنین تخلخل و نفوذ پذیری مواد سنگ بستگی دارد [41,42]. وجود سطح منافذ داخلی گسترده ناشی از تخلخل زیاد یا وجود مواد معدنی، گسترش میکرو فلور را در داخل سیستم منافذ تسهیل می‌کند. مقادیر بالای تخلخل، سبب نفوذ عمیق رطوبت به ماده‌ای می‌شود که راه را برای آلودگی ارگانیسمی تا عمق ۳–۵ سانتی‌متر آماده می‌کند. در حالی که ماسه سنگ‌های منافذ بزرگ به دلیل احتباس کوتاه آب، سبب ایجاد آلودگی ارگانیسمی فقط به طور موقت می‌شوند، بسترهای منافذ کوچک با زمان ماندگاری بیشتر آب شرایط مناسب تری را برای استقرار ارگانیسم‌های تجمع کننده فراهم می‌کنند. پوسته‌های بستر، لایهٔ محافظتی مناسب را برای تجمعات زیستی در برابر تابش شدید خورشید، دمای بالاو خشک شدن ایجاد می‌کنند [43,44]. وجود مقادیر قابل توجهی از ترکیبات کربناته در سنگ مانند ماسه سنگ‌های آهکی، بتن یا ملاط آهک، منجر به ایجاد بافر در محصولات متابولیک بیوژنیک می‌شود که یک محیط پیوسته مناسب را برای رشد ارگانیسم‌ها ایجاد می‌کند. بسترهایی که حاوی مقادیر قابل توجهی از مواد معدنی مستعد هوازدگی هستند در برابر رشد ارگانیسم‌ها ضعیف به نظر می‌رسند. حتی باقی مانده-های آلی موجود در سنگ‌های رسوبی را می‌توان به عنوان منابع مغذی احتمالی میکرو فلورای ساکن سنگ در نظر گرفت. سنگ‌های ساخته شده توسط انسان مانند آجر، ملاط یا بتن نیز در معرض حملهٔ ارگانیسمی هستند. میزان آلودگی به توزیع اندازهٔ منافذ و همچنین به قلیایی بودن سنگ‌های مصنوعی بستگی خواهد داشت. آجر و ملاط بناهای تاریخی اغلب حاوی چسب-های آلی مانند خاک اره، مو و چسب است که حساسیت بستر معدنی را در برابر حملهٔ ارگانیسمی افزایش می-دهد [45,46]. در دورهٔ آلودگی ارگانیسمی، خواص فیزیکی–شیمیایی بستر معدنی به طور کلی تغییر می-کند و سبب افزایش جذب زیستی بعدی می‌شود. بیوفیلم میکروبی همراه با هوازدگی فیزیکی و شیمیایی ممکن است به فرم‌های پوسیدگی سطحی به‌نام پاتین از تشکیل فیلم تا پوسته تبدیل شوند. تشکیل بیوفیلم در وهلهٔ اول به دلیل تغییر رنگ سطح بستر در اثر رنگدانه‌های آلی (به عنوان مثال کلروفیل، کاروتنوئیدها و ملانین‌ها) آشکار می‌شود. بسته به نوع بستر بعداً با غنی‌سازی لایه‌های چسب حاصل از رشد قارچ و باکتری، بالاترین لایه‌ها شرایط مناسب را برای رشد ایجاد می‌کنند. در اینجا نمک‌های رسوبی همراه با ذرات منتقل شده در هوا و ترکیبات شیمیایی به عنوان منبع غذایی اضافی برای میکرو فلور پنهان بستر می-شوند. تنش‌های فیزیکی ناشی از تغییرات انجماد و ذوب، تبلور مجدد نمک و همچنین فعل و انفعالات شیمیایی، سبب تضعیف و آزاد شدن مواد معدنی زیر پوسته در بستر می‌شوند. سرانجام تجزیهٔ اتصال دهنده-های سیمان بستر منجر به تضعیف ساختار معدنی می-شود که با شن و ماسه یا تجزیهٔ گرانول لایه‌های بالایی بستر ظاهر می‌شود و در نتیجه، فضا را برای آلودگی میکروبی بیشتر باز می‌کند. این فرایند با سیکل خشک و مرطوب شدن، تکرار می‌شود و منجر به افزایش تراکم رطوبت در سیستم منافذ بستر می‌شود و رشد میکروبی را ترجیح می‌دهد. در نتیجه، موانع انتشار ثانویه برای رطوبت و گازها در داخل ساختار معدنی ایجاد خواهد شد. در نهایت، مقیاس‌های زیادی در معرض قرار گرفتن یک سطح تازه برای ادامهٔ چرخه فرسودگی زیستی قرار می‌گیرند [45,47,48].

٦. روش‌های مطالعهٔ عوامل دخیل در فرسودگی زیستی بر روی سطح آثار باستانی

ارزیابی عوامل مؤثر بر فعالیت میکروبی و تکثیرشان بر روی آثار هنری و درک مکانیسم‌های مربوط به فرسودگی زیستی لازم است تا طراحی راهکارهای مناسب برای حفاظت و ترمیم به‌کار گرفته شود. آگاهی از آلودگی ارگانیسمی میراث فرهنگی نه تنها از نظر شناخت جوامع زیستی با اثرات بالقوهٔ خطرناک برای مواد ذخیره شده یا آثار تاریخی، بلکه از نظر شناسایی ارگانیسم‌هایی که خطر ابتلا به سلامت انسان را نشان می‌دهند، حائز اهمیت است. این امر نیاز به انجام نمونه‌گیری سیستماتیک را برای برآورد شیوع آلودگی‌های زیستی توجیه می‌کند [51–49] شناسایی جوامع میکروبی یا با روش مبتنی بر کشت یا تکنیک‌های میکروسکوپی انجام شده است (شکل ۴). این روش‌ها می‌توانند تنها بخش کوچکی از رشد میکروبی در سطح بستر را شناسایی کنند. خصوصیات مورفولوژیکی و بیوشیمیایی و شناسایی ایزوله‌های باکتریایی، روش‌های مهمی برای شناسایی باکتری‌ها تا حد جنس هستند. کلون‌های باکتریایی تشکیل شده بر روی صفحات آگار و خصوصیات کِشتی کلونی‌ها از جمله شکل، اندازه، بافت، ارتفاع، رشد، تراکم، حاشیه و ظاهر را می‌توان مشاهده کرد و آزمایش‌های بیوشیمیایی مختلف دیگری همچون اکسیداز، کاتالاز ، تحرک، ایندول، استفاده از کربوهیدرات، کاهش نیترات، هیدرولیز نشاسته و آزمایش هیدرولیز لیپید نیز شناسایی تا حدّ جنس است. تکنیک‌های رنگ‌آمیزی گرم یک گام مقدماتی بسیار مهم در توصیف اولیه و طبقه‌بندی باکتری‌ها است که می‌تواند باکتری‌ها را به دو گروه مثبت گرم و منفی گرم متمایز کند. از روش‌های سنتی کشت مانند غنی‌سازی و جداسازی جوامع میکروبی برای توصیف ساختار جمعیت جوامع میکروبی بر روی بستر فرسوده استفاده شده است. میکروارگانیسم‌های روی یا داخل بستر ممکن است با طیف وسیعی از تکنیک‌های وابسته به کشت و مستقل از کشت، شمارش و شناسایی شوند [52].

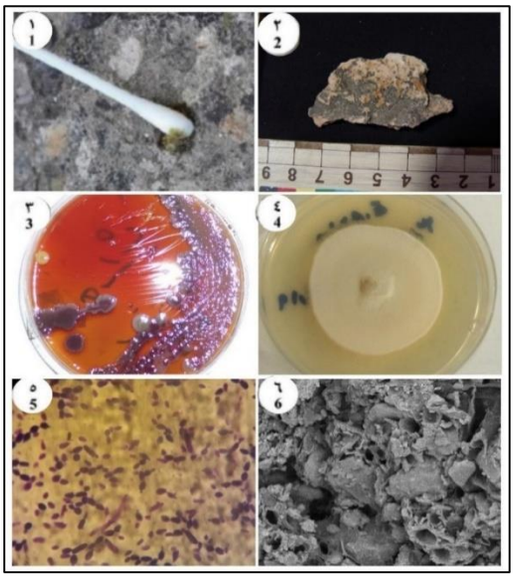
٦ -١. تکنیک‌های نمونه‌گیری

روشی‌های نمونه‌برداری از ارگانیسم‌های محیطی، به‌خصوص اشیاء مرتبط با میراث فرهنگی دشوار است. خسارت ناشی از برداشتن نمونهٔ نماینده باید با اطلاعات به‌دست آمده، متعادل باشد. معمولاً روش‌های نمونه‌گیری غیر مخرب و نمونه‌گیری خُرد ترجیح داده می‌شوند. با این حال این نمونه‌ها ممکن است نتایجی را ارائه ندهند که نشان دهندهٔ کل میکرو فلور موجود باشد. میکروارگانیسم‌های اندولیتیک اغلب با چنین تکنیک‌هایی نادیده گرفته می‌شوند. تعداد بسیار کمی از باکتری‌های هدف با لوپ تلقیح، سوزن، قطعه قطعه و روش سواب یافت شدند. روش‌های نمونه‌گیری مخرب شامل تراشیدن سطح و برداشتن قطعات با ابزارهای استریل است. این روش‌ها امکان ارزیابی میکروارگانیسم‌های متصل به یکدیگر و آن‌هایی که در اعماق بستر قرار دارند را فراهم می‌کنند [9,53].

٦-٢. تشخیص، شناسایی و تعیین میزان فلور ارگانیسمی روی بستر

کشت ارگانیسم‌ها در محیط آزمایشگاهی، طیف وسیعی از کشت‌های خالص را ایجاد کرده است که می‌توان فیزیولوژی و فعالیت‌های فرسودگی آن‌ها را مورد مطالعه قرار داد. کل میکروارگانیسم‌ها را می‌توان با روش‌های کشت، مانند روش احتمالی تعداد (MPN) (برآورد اندازه جمعیت میکروبی از طریق کشت رقت های شناخته شده نمونه)، با روش‌های شمارش میکروسکوپ، اغلب در ترکیب با رنگ‌های فلورسنت با استفاده از نفلومتری (یک روش شمارش که مبتنی بر پراکندگی نور ناشی از سلول‌ها در یک سوسپانسیون مایع است) و شمارش ذرات لیزری (اندازه‌گیری جذب نور توسط ذرات در یک سوسپانسیون مایع) تعیین کرد [54]. روش‌ها و ابزارهای مورد استفاده برای بررسی میکروارگانیسم‌های درون بیوفیلم بر روی سطح بستر شامل میکروسکوپ اپی فلورسانس، با رنگ‌آمیزی رنگ فلورسنت برای موجودات غیر خود فلورسنت، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، میکروسکوپ

اسکن لیزری کانفوکال (CLSM)، تغییرات مختلف SEM و ESEM و میکروسکوپ الکترونی عبوری است [55–57].

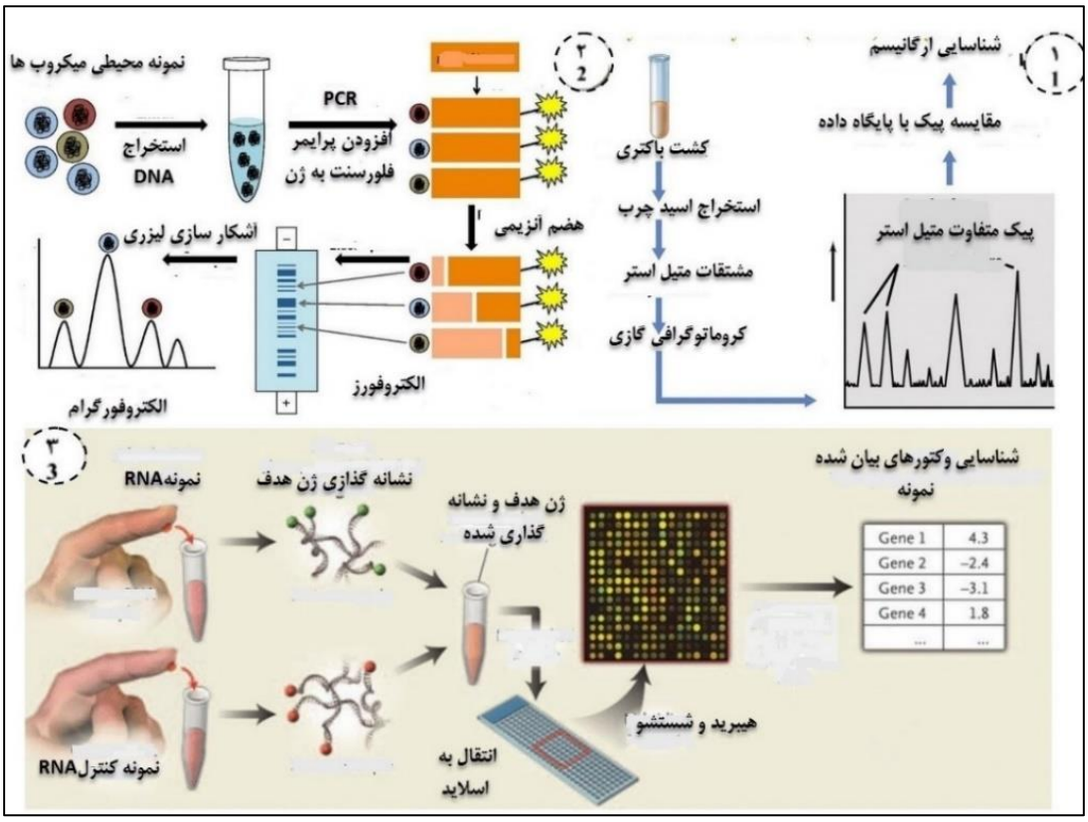


شکل ۴. مطالعات اولیه در فرسودگی زیستی: ۱–۲) نمونه‌گیری غیرمخرب و مخرب؛ ۳–۴) محیط‌های کشت برای رشد عوامل دخیل در فرسودگی زیستی؛ ۵–۶) استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی.

Fig. 4. Preliminary studies on biodeterioration: 1-2) non-destructive and destructive sampling; 3-4) Culture media for the growth of factors involved in biodeterioration; 5-6) Use of light microscope and electron microscope.

برای مطالعهٔ فیزیولوژی میکروارگانیسم‌ها روش‌های مبتنی بر کشت، هنوز رایج‌ترین روش است. با این حال، تکنیک‌های کشت سنتی کمتر از ۱ درصد از جامعهٔ میکروبی را جدا می‌کنند ولی روش‌های مولکولی در تشخیص، شناسایی و تا حدودی تعیین میزان میکروارگانیسم‌ها در اشیاء میراث فرهنگی رو به گسترش هستند [58–60]. تکنیک‌هایی از قبیل دناتوره کردن شیب الکتروفورز ژنتیکی (DGGE)، پلی مورفیسم کنفورماسیون تک رشته (SSCP) و هیبریداسیون فلورسنت درجا (FISH)، نشانگر این احتمال هستند که میکروارگانیسم‌های دیگری نیز می‌توانند در فرسودگی بستر نقش داشته باشند (شکل ۵). بسیاری از مشکلات عملی در تجزیه و تحلیل جامعه با استفاده از روش‌های زیست‌شناسی مولکولی شامل دی‌ان‌ای (DNA) وجود دارد. این موارد شامل به عنوان مثال استخراج انتخابی DNA از میکروارگانیسم‌های مختلف تقویت انتخابی در پی‌سی‌آر (PCR)، عدم تقویت سطوح پایین DNA در یک مخلوط و دخالت در واکنش توسط مواد محیطی مانند پلی ساکاریدها یا ترکیبات بستر است [61,62]. تشخیص میکروارگانیسم‌ها عمدتاً براساس توالی زیر واحدهای کوچک (۱۶S برای باکتری‌ها و ۱۸S و ITS برای قارچ‌ها و یوکاریوت‌ها) ژن‌های آران‌ای (RNA) ریبوزوم‌rRNA است. تجزیه و تحلیل فیلوژنتیک ژن‌های میکروبی 16S rRNA جوامع میکروبی مختلف و بیشتری را در سطح بستر فاش می‌کند. رابطهٔ توالی‌های کتابخانه ریبوزومی و ارگانیسم‌های مرتبط از پایگاه داده ژن بانک (GenBank) را می‌توان براساس مرکز ملی اطلاعات بیوتکنولوژی (NCBI)، ایالات متحده (http://www.ncbi.nlm.nih.gov) تجزیه و تحلیل کرد [63,64]. تکنیک‌های ژنتیکی اثر انگشت (DGGE) ابزار مهمی برای کشف تغییر در تنوع ژنتیکی باکتری‌ها هستند. تکنیک‌های ژنتیکی اثر انگشت را می‌توان برای تجزیه و تحلیل پروفایل جوامع باکتریایی در سطوح بستر استفاده کرد [65–68]. هیبریداسیون فلورسنت درجا یک رویکرد جایگزین است که مقدار کمّی و کیفی جمعیت در محیط‌ها را ارائه می‌دهد. پروپ فلورسانس خاص، می‌تواند ارگانیسم‌ها یا ژن‌ها را در جوامع پیچیده میکروبی مشخص کند و به همبستگی هویت، کمیت، فیزیولوژی، فعالیت متابولیکی و مورفولوژی کمک می‌کند [66,69–71]. نمای کاملی از جوامع میکروبی و ژن‌های آن‌ها را در چرخه‌های مختلف زیست ژئوشیمیایی (S و Fe) عوامل فرایندی محیطی از جمله اکسیداسیون آمونیاک، اکسیداسیون متان، اکسیداسیون گوگرد و رفع نیتروژن، می‌توان با استفاده از میکروارای (Microarray) ارزیابی کرد. تکنیک‌های توالی متاژنومی، بررسی ژنوم میکروبی جمعی است که به طور مستقیم از نمونه‌های زیست محیطی مانند بیوفیلم

گرفته می‌شود و به کشت یا دانش قبلی جوامع باکتریایی بستگی ندارد. تنوع ژنتیکی بسیاری از محیط‌ها شامل جداسازی، کلون شدن و انتقال DNA و غربالگری کلون‌های مثبت است. در حال حاضر، پیشرفت در فناوری‌های تعیین توالی به سطح "توالی نسل جدید (NGS)" رسیده است که داده‌های توالی را سریعتر و ارزان‌تر از روش‌های توالی معمولی ارائه می‌دهد. همه گونه‌های میکروبی از جمله قابل کشت و از همه مهمتر غیر قابل کشت، با سیستم عامل‌های توالی نسل جدید (NGS) قابل بررسی است [72,73].

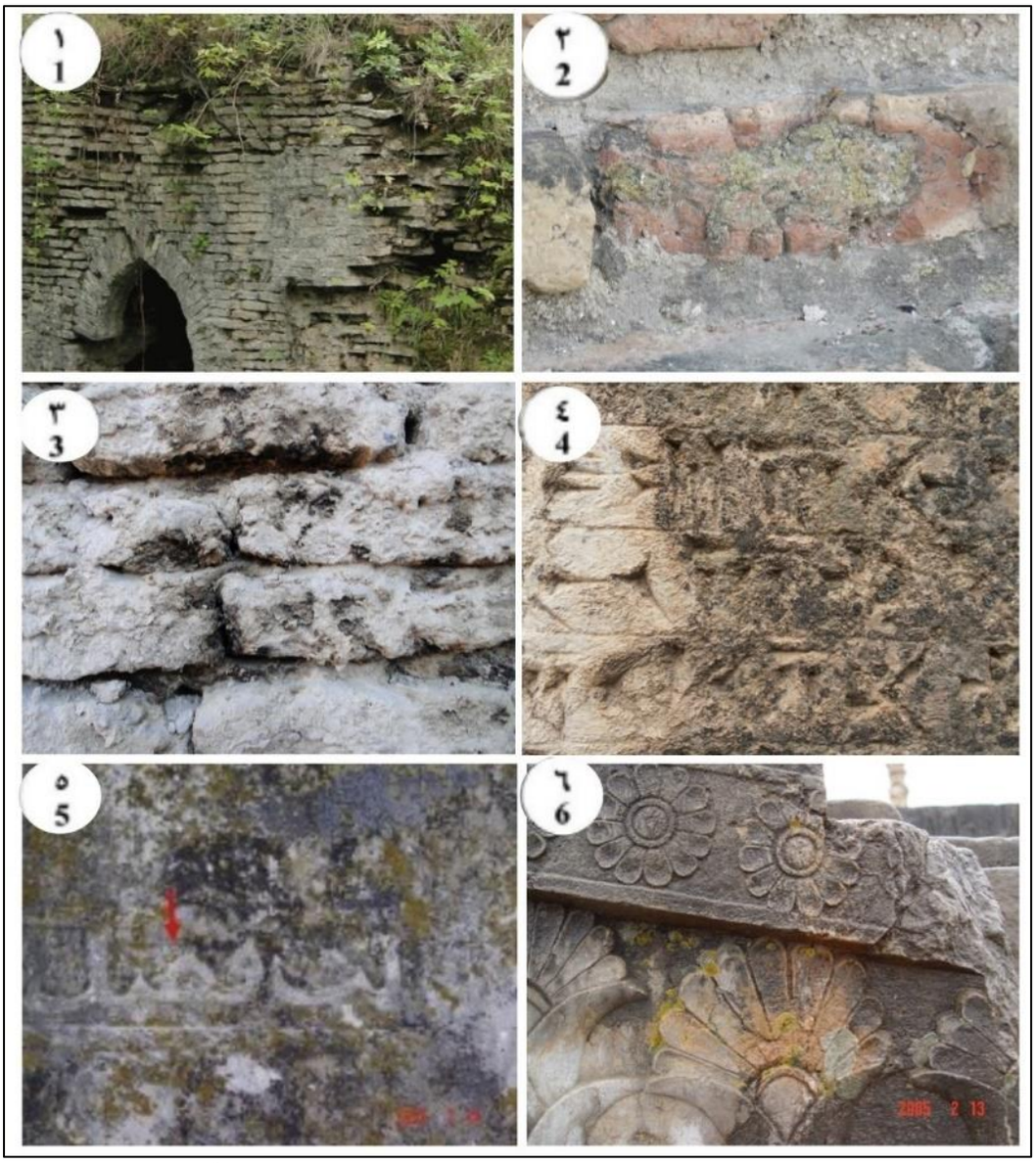


شکل۵ . انواع روش‌های مولکولی مورد استفاده در حوزهٔ فرسودگی زیستی [11].

Fig. 5. Types of molecular methods used in the field of biodeterioration

۷ . انواع بسترهای در معرض فرسودگی زیستی

تقسیم فرسودگی زیستی به موضوعات مختلف، مناسب اما مصنوعی است. مواد غیرآلی مانند شیشه، فلزات و سنگ‌ها در محل آثار تاریخی وجود دارند و در معرض فرسودگی زیستی قرار می‌گیرند. تنوعی از موادی مانند نقاشی‌ها، چوب، کاغذ، پوست و چرم که از مواد آلی ساخته شده‌اند. ایران کشوری باورنکردنی از لحاظ آثار تاریخی است. بر اساس سازمان آموزشی، علمی و فرهنگی ملل متحد (یونسکو)، ایران یکی از قدیمی ترین تمدن‌های جهان است و آثار تاریخی_ هنری بسیاری دارد که در این سازمان ثبت شده‌اند. داستان معماری ایران از ۵۰۰۰ سال قبل از میلاد شروع می‌شود و معماران ایرانی همیشه نسبت به نوع مصالح و همچنین طراحی‌های داخلی و خارجی نگرش خاصی داشته‌اند. به همین دلیل بسیاری از بناهای تاریخی باشکوه در سراسر کشور وجود دارند که از نظر تنوع ساختاری و زیبایی‌شناسی غنی هستند (شکل ۶). چغازنبیل، شهر سوخته، مجموعه کاخ تخت جمشید، طاق کسرا، بیستون، برج گنبد قابوس و سلطانیه و ارگ بم برخی از مشهورترین آثار معماری در ایران محسوب می‌شوند [22].



شکل۶. فرسودگی زیستی در بسترهای مختلف بناهای تاریخی ایران: ۱-۲) فرسودگی زیستی بر روی بستر آجری در قلعه رودخان و گنبد قابوس؛ ۳) فرسودگی زیستی بر روی خشت ارگ بم؛ ۴ و ۵-۶) بسترهای سنگی در بیستون، پاسارگاد و تخت جمشید.

Fig. 6. biodeterioration in different beds of Iranian historical monuments: 1-2) biodeterioration on a brick substrate Rudkhan Castle and Gonbad-e Qabus ; 3) biodeterioration on the clay of Bam citadel; 4 and 5-6) rock beds in Biston, Pasargad and Persepolis

۷-۱. مواد سنگی

مهمترین بناهای تاریخی دنیا از سنگ ساخته شده‌اند. مهمترین بناهای سنگی ایران که در میراث جهانی یونسکو به ثبت رسیده‌اند شامل تخت جمشید، پاسارگاد، سنگ نوشته بیستون و مجموعه آثار رهبانی ارامنه هستند. سنگ، یکی از مهمترین موادی است که به طور سنتی هم در ساخت‌وساز و هم برای اهداف مهم مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسیاری از میراث فرهنگی در سراسر جهان با استفاده از این مادهٔ متخلخل ساخته شده‌اند. در ساختمان‌ها، پل‌ها و در مواردی در هنگام مرمت بناهای میراث فرهنگی از مواد سنگی طبیعی و ساخته شده توسط انسان (بتون، آجر کاری، ملاط) از رنگ‌ها و بافت‌های خاص برای تحقق الزامات فیزیکی و فنی مورد نیاز مهندسان و معماران و

همچنین تضمین ارزش‌های زیبایی‌شناختی و هنری استفاده می‌شود. سنگ طبیعی، طیف گسترده‌ای از ترکیبات معدنی، بافت و ساختار را دارد. بنابراین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی انواع مختلف سنگ بسیار متغیر است، در نتیجه، سنگ‌هایی با توانایی‌های بسیار متفاوت در برابر هوازدگی (دوام) ایجاد می‌شوند. انواع مختلفی از سنگ در طول سال‌ها توسط هنرمندان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. متداول‌ترین آن‌ها سنگ مرمر و سنگ آهک، از نوع آهکی، ماسه سنگ (که عمدتاً کوارتز، فلدسپات و اکسید آهن است) و گرانیت (عمدتاً کوارتز و فلدسپات) از نوع سیلیسی هستند. این‌ها در سختی، تخلخل و قلیایی بودن خواصی که بر حساسیت آن‌ها به فرسودگی زیستی تأثیر می‌گذارد، متفاوت هستند. پوسیدگی مواد سنگی به عنوان نتیجهٔ تعامل آن‌ها با محیط می‌تواند از نظر ارزش‌های فرهنگی یا هنری منجر به از بین رفتن پیام‌های اساسی شیء معماری شود. فوری‌ترین نتیجهٔ این تعامل تغییرات شیمیایی و فیزیکی است که در اکثر موارد توسط تجمع زیستی صورت می‌گیرد. میزان تجمع زیستی یک سطح سنگ نه تنها به عوامل محیطی بلکه به خصوصیات ذاتی آن‌ها نیز بستگی دارد. بنابراین ممکن است دو نوع سنگ مختلف، تحت شرایط محیطی یکسان در مراحل مختلف تجمع زیستی قرار بگیرند. کلیهٔ مصالح سنگی می‌توانند جذب زیستی داشته باشند و بنابراین تا حدی قادر به تجمع زیستی هستند. مقالات متعددی در مورد اثرات هم‌افزایی تغییر آب و هوایی (درجه حرارت و بارندگی) با آلودگی هوا در خرابی و فرسودگی زیستی مواد سنگی در قالب ساختمان منتشر شده است. پاسخ به تغییرات محیطی تا حد زیادی به ماهیت سنگ بستگی دارد و بنابراین، مواد سنگی، به ویژه آن‌هایی که مستعد به تجمع زیستی هستند، سریعتر به تغییرات آب و هوایی و آلودگی جوی واکنش نشان می‌دهند [74]. جوامع میکروبی در اشیاء سنگی از جمله دارایی‌های میراث فرهنگی که در بیرون از منزل قرار دارند، وجود دارند. این آثار به روشنی نشان می‌دهند که انواع مختلفی از بسترها توسط جوامع میکروبی متنوع متشکل از باکتری‌ها، سیانوباکتری‌ها، قارچ‌ها و گلسنگ‌ها مورد تهاجم قرار می‌گیرند. این مهم است که تأکید کنیم که بیوفیلم در سطوح تماس در رابط بین زیرلایهٔ معدنی و جو رخ می‌دهد. بنابراین آن‌ها دائماً در معرض شرایط نامطلوب محیطی مانند تابش شدید خورشید، نوسانات دما و رطوبت، کمبود مواد مغذی و غیره قرار می‌گیرند. تجمع زیستی اندولیتی یک استراتژی موفقیت‌آمیز برای بقا است که شرایط محیطی را برای زندگی روی سنگ زمانی که در معرض تابش شدید خورشید و خشک شدن، کمبود مواد مغذی معدنی و رطوبت است، مهیا می‌کند و سطوح رشد در آن فراهم می‌شود. چندین فرضیه در زمینهٔ زیست‌شناسی تکاملی میکروبی ارائه شده است برای توضیح اینکه چرا میکروارگانیسم‌ها شروع به تجزیهٔ سنگ‌ها می‌کنند و به هوازدگی سنگ‌ها کمک می‌کنند. انواع مختلفی از فشارهای انتخابی به عنوان منشأ این رفتار پیشنهاد می‌شود: کسب مواد مغذی، پیدا کردن نیچ اکولوژیکی با رقابت محدود جلوگیری از شرایط نامطلوب روی سطح سنگ‌ها یا جلوگیری از کانی‌سازی. میکروارگانیسم‌های فتواتوتروف (میکرو جلبک‌های سبز، سیانوباکتری‌ها و گلسنگ‌ها) حتی در صورت عدم وجود مادهٔ آلی در سطح سنگ می‌توانند رشد کنند و به عنوان ارگانیسم‌های پیشگام در کلنیزاسیون مواد سنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند [3,45,67,74].

۷-۲. آثار ساخته شده از آجر و خشت

معمول‌ترین مصالح ساختمانی در مناطق فرهنگی ایران، غالباً گلی و آجری هستند که در همه جا موجودند. بناهای ساخته شده از خشت و آجر که در میراث جهانی یونسکو ثبت شده‌اند شامل معبد چغازنبیل، ارگ تاریخی بم، گنبد سلطانیه، برج گنبد قابوس و شهر سوخته می‌شوند. اساسی‌ترین مصالح ساختمانی برای ساخت خانه‌ها، آجر معمولی است. ترکیب و فرآوری مواد اولیه می‌تواند تغییرات کوتاه مدت و بلند مدت را تحت تأثیر قرار دهد. ترکیبات

سازندهٔ آجر شامل چندین مادهٔ معدنی است که معمولاً در خاک رس هنگام استخراج از زمین یافت می‌شوند. این مواد معدنی می‌تواند شامل سدیم، پتاسیم و کلسیم باشد. دوام مصالح بنایی آجری معمولاً ناشی از پایداری شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی مراحل مختلف تشکیل دهندهٔ آن‌ها است. برای مثال مواد آجری غنی از سدیم و پتاسیم در معرض رطوبت و تجمعات زیستی، بیشتر از مواد غنی از کلسیم، آلومینا و منیزیم تجزیه می‌شوند [75,76]. فرسودگی زیستی معمولاً از سطح خرد یا حتی سطح زیر میکرو شروع می‌شود، بدون اینکه مورد توجه قرار گیرد. به محض شروع می‌تواند به آرامی بر ساختار داخلی مواد تأثیر بگذارد تا زمانی که فرایندها به حدی پیش بروند که علائم آن به صورت بیرونی بر روی ساختار نمایان شود. فرسودگی زیستی کار بنایی آجری یعنی ملاط به تنهایی یا ملاط و آجرهای مجاور تا حدّ زیادی تحت تأثیر ترکیب کانی‌شناسی و ساختار داخلی آن‌ها قرار دارد. با چشم غیر مسلح آجر سفالی یا ملاط سنگ تراشی به نوعی متراکم، همگن و نفوذ ناپذیر به نظر می‌رسد، اما در سطح میکرو آن‌ها دارای حفره و ناهمگن هستند که می‌تواند بر دوام آن‌ها تأثیر منفی بگذارد. بدیهی است که تشخیص علل فرسودگی زیستی از ظاهر بصری ساختار به تنهایی ممکن است به تفسیرهای ناتمام یا کاملاً گمراه کننده منجر شود، زیرا علائم فرسودگی زیستی به وسیلهٔ یک ارگانیسم خاص (به عنوان مثال گلسنگ‌ها) در سطح خارجی به دلیل شباهت زیاد آن‌ها ممکن است به راحتی با مکانیسم‌های دیگر (به عنوان مثال حمله یخبندان) اشتباه گرفته شود. نفوذ رطوبت در امتداد ترک یا مجاری حفره، سبب رشد عوامل دخیل در فرسودگی زیستی می‌شود و انبساط و انقباض این عوامل سبب خرابی آجر و ملاط در برخی از موارد می‌شود. یکی از ابزارهای مفید برای تشخیص فرسودگی زیستی آجر یک روش میکروسکوپی یکپارچه است که امکان توصیف کمّی و کیفی مصالح تخریب شده و اصلی را فراهم می‌آورد. یکی از این روش‌های یکپارچه شامل استریومیکروسکوپی ترکیبی، میکروسکوپ پلاریزه و فلورسنت (PFM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (معمولاً مجهز به طیف سنج اشعه ایکس پراکندگی انرژی SEM-EDS) است. سایر روش‌های تحلیلی تکمیلی مانند تجزیه پراش اشعه ایکس (XRD)، تجزیه و تحلیل گرماسنجی (TGA)، و همچنین تجزیه و تحلیل شیمیایی مرطوب و آزمایشات فیزیکی ممکن است برای حمایت از روش‌های میکروسکوپی استفاده شوند[62,77–79] .

۷-۳. بسترهای بتنی و ملاط

ملاط و بتن به عنوان یک مادهٔ خمیری مانند معمولاً برای پر کردن شکاف بین بلوک‌های ساختمانی مانند سنگ، آجر و واحدهای بنایی بتونی استفاده می‌شوند. با توجه به ترکیب، تخلخل و زبری، اولین ماده‌ای که با موفقیت توسط سیانوباکتری‌ها و جلبک‌ها آلوده می‌شود، ملاط است. این تجمع، احتمالاً مربوط به ظرفیت این بسترها برای نگهداری آب در مدت زمان طولانی است. سطح ملاط‌ها توسط گلسنگ‌ها نیز به شدت تغییر می‌کند که عمدتاً به صورت حفرهٔ کوچک نمایان است که پس از ناپدید شدن ریسه‌ها مشهود می‌شود. گلسنگ‌ها طیف وسیعی از متابولیت‌های ثانویه را تولید می‌کنند که اغلب به آن‌ها اسیدهای گلسنگ گفته می‌شود. تأثیر خزه‌ها و گیاهان بر ملاط‌ها نیز ثابت شده است. ریزوئید و ریشه‌ها ممکن است به داخل ملاط نفوذ کنند و دسترسی آسان آب به قسمت‌های عمیق را امکان پذیر سازند. میکروسکوپ نوری و الکترونی، شبکه فراوان ریزوئیدها و ریشه‌ها را در مناطق ملاط نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی نمونه‌های بتنی نشان داده‌اند که بسیاری از ارگانیسم‌ها مانند قارچ‌ها (مخمرها، کلادوسپوریوم، میسلیا، هیفا و غیره)، باکتری‌ها (اکتینومایست‌ها، تیوباسیلوس و غیره)، جلبک‌ها (معروف‌ترین جلبک‌های دیاتوم) و حتی پروتوزوئرها، را می‌توان در ماتریس بتن یافت [80–83]. پس از ساخت، بتن به دلیل قلیائی بودن زیاد معمولاً در برابر حملات بیولوژیکی مصون است. فعالیت میکروبی کمی در چنین pH بالایی رخ می‌دهد.

این pH بالا نتیجهٔ تشکیل هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)_2$به عنوان محصول جانبی هیدراتاسیون سیمان است. معمولاً عملکرد فرسایشی آب و یا اصطکاک عناصر سازه‌ای با سایر مواد سبب ایجاد زبری در سطح بتن می‌شود. این شرایط، علاوه بر در دسترس بودن رطوبت و مواد مغذی، تجمع میکروب‌ها را در سطح بتن تسهیل می‌کند. با این حال، تجمع باکتری-های کاهندهٔ گوگرد و اکسید کنندهٔ گوگرد بر روی بتن، همیشه با چرخهٔ گوگرد در محیط آن‌ها به ویژه در محیط‌های آبی همراه بوده است. باکتری‌های بی-هوازی کاهندهٔ گوگرد می‌توانند سولفات را به سولفید تبدیل کنند که به نوبهٔ خود با هیدروژن ترکیب و سولفید هیدروژن تشکیل می‌شود. با گذشت زمان، pH سطوح قلیایی بتن به تدریج توسط کربناسیون و خنثی-سازی سولفید هیدروژن که در سیستم‌های مختلف جمع می‌شود، کاهش می‌یابد. پس از آن سولفید هیدروژن فرّار در معرض اکسیداسیون به اسید سولفوریک توسط باکتری‌های اکسید کنندهٔ گوگرد تبدیل می‌شود. وقتی pH به سمت خنثی کاهش می-یابد، با pH پایین‌تر در سطح بتن شرایطی برای تجمع میکروبی بیشتر توسط ارگانیسم‌های خنثی یا اسید دوست ایجاد می‌شود. به طور معمول ، *Thiobacillus sp* ،*(Acidithio-bacillus sp)*. ، از جمله *T. thioparus*، *T. novellus* ،*T.neapolitanus*، *T. intermedius* و *T. thiooxidans)* نقش اصلی را در این حوادث تجمع، بازی می‌کنند. هنگامی که میکروارگانیسم‌ها بر روی سطح بتن مستقر می‌شوند یک بیوفیلم تشکیل می‌دهند که به دنبال آن فرسودگی زیستی شیمیایی بتن ایجاد می-شود[62,84–87].

۸ . کنترل ارگانیسم‌های دخیل در فرسودگی زیستی

کنترل فرسایش زیستی به یک ضرورت جهانی برای حفاظت از میراث فرهنگی تبدیل شده است و تحقیقات با این نیاز و با افزایش دانش در مورد فرایندهای فرسایش زیستی تقویت شده‌اند. حذف جامعهٔ زیستی از هر سطح مشخص، مداخله‌ای است که باید به دقت ارزیابی شود. حذف جامعه زیستی ممکن است منجر به ایجاد توالی جدیدی از ارگانیسم‌ها شود که آسیب-رسان‌تر از جمعیت سطح زیستی قدیمی خواهد بود. و مهار گروه‌های خاصی از ارگانیسم‌ها ممکن است رشد گروه‌های دیگر را تقویت کند. رویکرد کنترل تخریب زیستی باید یک رویکرد چند رشته‌ای، میان رشته‌ای باشد که تاریخچه و وضعیت آثار دست‌ساز و همچنین عوامل آسیب‌رسان فیزیکی و شیمیایی را در نظر بگیرد [88–91]. یک روش پاکسازی کارآمد باید ارگانیسم-های آسیب زننده را از بین ببرد و از رشد مجدد آن‌ها برای مدت زمان قابل قبول جلوگیری کند در حالی که هیچ آسیبی به بستر باقیمانده در آثار وارد نشود. پاکسازی ممکن است در مقیاس کوچک آزمایش شود، اما ترجیحاً روی خود اثر تاریخی اثر بگذارد تا اثربخشی واقعی آن‌ها در برابر میکروارگانیسم‌های تجمع شده در میکرواقلیم‌های مختلف باشد. اقدامات علیه رشد ارگانیسم‌ها را می‌توان به چهار دستهٔ عمده تقسیم کرد: (۱) کنترل غیر مستقیم با تغییر شرایط محیطی؛ (۲) حذف مکانیکی و فیزیکی‌ها؛ (۳) مواد شیمیایی (بیوساید)؛ (۴) روش‌های زیستی [92].

الف) کنترل غیر مستقیم. روش‌های پیشگیری شامل کلیه فعالیت‌هایی است که با هدف مهار حمله بیولوژیکی، با تغییر در شرایط محیطی و پارامترهای فیزیکوشیمیایی روی یک سطح انجام می‌شود. بنابراین روش های پیشگیری بدون اینکه مستقیماً روی مواد تشکیل‌دهنده آثار تایخی_ هنری عمل کنند، برای رشد بیولوژیکی نامطلوب می‌شوند. روش‌های پیشگیرانه (غیرمستقیم) مبتنی بر پایش و تنظیم پارامترها و عواملی است که در رشد میکروبی از جمله نور، دما ، pH و میزان رطوبت / رطوبت نسبی ایجاد می‌شود. در صورت امکان نیز با تغییر شرایط حمایت‌کننده می‌توان از رشد (به عنوان مثال، معرفی سیستم زهکشی) ارگانیسم‌ها جلوگیری کرد [93]. تغییر بعضی شرایط محیطی (مانند کاهش رطوبت یا نور تصادفی) بسیار سخت است اما در آثار هنری_ تاریخی که در زیر

پوشش درختان قرار دارند برداشتن زود هنگام پوشش درخت در محیط اطراف، سبب افزایش نور خورشید و گردش بهتر هوا و در نتیجه مانع رشد ارگانیسم‌های حساس به نور مانند گلسنگ‌ها می‌شود. همچنین یک پوشش برزنتی می‌تواند مانع از افزایش رطوبت ناشی از باران شود و از رشد ارگانیسم‌های عامل فرسودگی زیستی جلوگیری کند [81].

ب) روش‌های شیمیایی (بیوسایدها): روش‌های شیمیایی مناسب برای استفاده در میراث فرهنگی شامل طیف گسترده‌ای از محصولات است که بیشتر آن‌ها بر پایهٔ ترکیبات آلی و معدنی، ترکیبات آمونیوم کواترنر، مشتقات فنل و اوره و ترکیبات حاوی نیتروژن است. روش‌های شیمیایی است که برای از بین بردن یا مهار رشد موجودات هدف استفاده می‌شوند و باید فقط در مواردی که فرایندهای فرسودگی زیستی قابل کنترل نیستند و کاربردهای شیمیایی غیرقابل اجتناب هستند، اعمال شوند. بیوسایدها اغلب اثرات مخربی بر روی سنگ دارند، به عنوان مثال تغییر رنگ، اکسیداسیون/ کاهش ترکیبات سنگ و تشکیل نمک، با کریستاله شدن پس از خشک شدن، منجر به لایه لایه شدن می‌شود. همچنین درمان نامناسب با بیوسایدها می‌تواند اثر معکوس داشته باشد و دوباره منجر به افزایش تجمع میکروبی شود و در نتیجه فرسودگی زیستی را افزایش دهد [94].

پ) روش‌های فیزیکی و مکانیکی: روش‌های فیزیکی ضد عفونی شامل استفاده از پرتودرمانی، اشعه ایکس، گاما و اشعه ماوراء بنفش است. روش‌های فیزیکی مانند نور ماوراء بنفش مدت‌ها است که به دلیل گزارش زمان‌های طولانی درمان و عمق نفوذ کم، کاربرد آن‌ها بر روی اشیا میراث فرهنگی نادیده گرفته می‌شوند. تمیز کردن مکانیکی ساختمان‌های تاریخی از گرد و غبار یا بیوفیلم زیستی باید با تجزیه و تحلیل شیمیایی برای توصیف سطح ترکیب شود. در غیر این صورت، روش تمیز کردن مکانیکی و فیزیکی می تواند اثر طولانی مدت نداشته باشد و حتی سبب تسریع در روند تخریب یا تغییر در ترکیب تجمع‌های میکروبی شود که بر تغییرات فعالیت میکروبی تأثیر می‌گذارد. روش‌هایی مانند تمیز کردن با آب می‌تواند به از بین بردن نمک-های محلول و عوامل زیستی کمک کند، اما در طولانی مدت به دلیل افزایش رطوبت منجر به پراکندگی گسترده‌تر تجمع میکروبی شود [10].

ت) روش‌های زیستی: در دهه‌های اخیر، روش‌های زیستی در زمینهٔ بیوتکنولوژی بسیار بهبود یافته‌اند و امروزه نقش مهمی را در حفظ و ترمیم آثار تاریخی_هنری ایفا می‌کنند. امروزه روش‌های زیستی مانند سلول‌های باکتریایی زنده یا آنزیم‌های هیدرولیتیک (hydrolytic)، منبعی با پتانسیل عالی در احیای میراث فرهنگی محسوب می‌شوند. روش‌های جدید مبتنی بر باکتری‌های کاهش دهندهٔ سولفات یا مولکول‌های فعال زیستی با فعالیت هیدرولیز به عنوان روش تمیز کردن انتخابی و ایمن در از بین بردن پوسته‌های سیاه (Black shells) از سطح بستر یا مواد آلی مانند چسب نقاشی‌ها و سایر بسترها استفاده شده-اند [95–100].

۹. نتیجه‌گیری

اگرچه به خوبی مشخص شده است که میکروارگانیسم‌ها می‌توانند آسیب جدی به آثار هنری و باستانی وارد کنند اما دانش مکانیسم‌های دقیق فرسودگی زیستی هنوز تکه تکه است و در این زمینه، توجه بیشتری را می‌طلبد. توسعهٔ روش‌های شناسایی جدید درک گسترده‌تری از تنوع موجودات موجود را در اختیار ما قرار می‌دهد و ممکن است دانش ما را در مورد انواع جدیدی از متابولیسم میکروبی که در این زیستگاه‌ها رخ می‌دهد، گسترش دهد. مفهوم فرسودگی زیستی و عوامل تأثیرگذار بر آن، نیاز به درک تعاملات پیچیده بین بستر، میکروارگانیسم‌ها و محیط اطراف حتی فرایندهای شیمیایی و فیزیکی دارد. در این مقاله، فعالیت‌ها و مکانیسم‌های اصلی درگیر در فرسودگی زیستی میراث فرهنگی شرح داده شد. همچنین بر اهمیت روش‌های شناسایی، حفاظت و پاکسازی در این حوزه تأکید گردید. با توجه متنوع بودن مواد سازنده

بستر بناهای ساخته شده در ایران، یافته‌های این پژوهش برای مطالعه بسیار راهگشا است. با این حال، مطالعات بسیار کمی در رابطه با فعالیت ارگانیسم‌های عامل فرسودگی زیستی در کشور ایران صورت گرفته است و اقدامات ضد میکروبی و پیشگیری باید آغاز شوند. رویکردهای اخیر در مورد فعالیت‌های بالقوه ارگانیسم‌ها به طراحی استراتژی‌های جدید برای جداسازی و شناسایی ارگانیسم‌های عامل فرسودگی زیستی کمک می‌کند. یک هدف اصلی برای دانشمندان حوزهٔ فرسودگی زیستی همکاری با کارشناسان ریاضی و توسعهٔ نرم افزارهایی به منظور ایجاد بانک‌های اطلاعاتی است. این همکاری به منظور شناسایی و تعیین کمیت رفتارهای غیرخطی و مشخص شدن راه‌حل‌های احتمالی هوشمند برای نگهداری مناسب از میراث فرهنگی ما است. البته به منظور ارزیابی سهم میکروارگانیسم‌ها در فرسودگی زیستی اشیاء میراث فرهنگی و همچنین امکان کنترل آن‌ها، انجام پروژه‌های تحقیقاتی میان رشته‌ای بین مرمتگران و دانشمندان سایر رشته‌ها، از جمله میکروبیولوژیست‌ها، زمین‌شناسان و شیمیدانان مورد نیاز است. این متخصصان می‌توانند با شناسایی پارامترهای مناسب، روش‌های تشخیص و ارزیابی در پیشگیری، در حفاظت و مرمت از آثار تاریخی _ هنری در کشور ایران نقش مؤثری داشته باشند.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله صمیمانه از مسئولان و کارشناسان پایگاه میراث جهانی گنبد قابوس برای حمایت و تشویق از این مطالعه، کمال سپاسگزاری را دارند.

References

[1] Griffin PS, Indictor N, Koestler RJ. The Biodeterioration of Stone: a Review of Deterioration Mechanisms, Conservation Case Histories, and Treatment. vol. 28. 1991.

[2] Koestler RJ, Kumar R, Kumar A V. Biodeterioration of Stone in Tropical Environments: An Overview. J Am Inst Conserv 2002;41:98. https://doi.org/10.2307/3179902.

[3] Saiz-Jimenez C. Biodeterioration of Stone in Historic Buildings and Monuments. Mycotoxins, Wood Decay, Plant Stress. Biocorrosion, Gen. Biodeterior., Springer US; 1994, p. 587–604. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9450-2_45.

[4] Pochon J, Jaton C. The role of microbiological agencies in the deterioration of stone. Chem Ind 1967:1587–9.

[5] Gadd GM. Metals, minerals and microbes: Geomicrobiology and bioremediation. Microbiology 2010;156:609–43. https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0.

[6] Gaylarde CC, Morton LHG, Loh K, Shirakawa MA. Biodeterioration of external architectural paint films - A review. Int Biodeterior Biodegrad 2011;65:1189–98. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.09.005.

[7] Jain KK, Mishra AK, Singh T. Biodeterioration of stone: A review of mechanisms involved. Recent Adv Biodeterior 1993;1:323–54.

[8] Arora PK, Chand T, Pankaj D•, Arora K. Evaluation of potential of molecular and physical techniques in studying biodeterioration. Springer 2012;11:71–104. https://doi.org/10.1007/s11157-012-9264-0.

[9] Pasquarella C, Balocco C, Pasquariello G, Petrone G, Saccani E, Manotti P, et al. A multidisciplinary approach to the study of cultural heritage environments: Experience at the Palatina Library in Parma. Sci Total Environ 2015;536:557–67. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.105.

[10] Griffin PS, Indictor N, Koestler RJ. The biodeterioration of stone: a review

of deterioration mechanisms, conservation case histories, and treatment. vol. 28. 1991. https://doi.org/10.1016/0265-3036(91)90042-P.

[11] Mazzoli R, Giuffrida MG, Pessione E. Back to the past: "find the guilty bug—microorganisms involved in the biodeterioration of archeological and historical artifacts." Appl Microbiol Biotechnol 2018;102:6393–407. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9113-3.

[12] Scheerer S, Ortega-Morales O, Gaylarde C. Chapter 5 Microbial Deterioration of Stone Monuments-An Updated Overview. Adv Appl Microbiol 2009;66:97–139. https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)00805-8.

[13] Flemming HC. Biodeterioration of synthetic materials - A brief review. Mater Corros 2010;61:986–92. https://doi.org/10.1002/maco.201005837.

[14] Florian M-L. Plant Biology for Cultural Heritage: Biodeterioration and Conservation. vol. 54. 2009. https://doi.org/10.1179/sic.2009.54.3.191.

[15] Balloi A, Palla F. Biocleaning. Biotechnol. Conserv. Cult. Herit., Springer International Publishing; 2017, p. 67–84. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46168-7_4.

[16] Beimforde C. Biodeterioration (of Stone). Encycl Earth Sci Ser 2011:112–7. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9212-1_24.

[17] Sterflinger K, Piñar G. Microbial deterioration of cultural heritage and works of art - Tilting at windmills? Appl Microbiol Biotechnol 2013;97:9637–46. https://doi.org/10.1007/s00253-013-5283-1.

[18] Gonzalez JM, Sainz-Jimenez C. Microbial diversity in biodeteriorated monuments as studied by denaturing gradient gel electrophoresis. J Sep Sci 2004;27:174–80. https://doi.org/10.1002/jssc.200301609.

[19] Trovão J, Portugal A, Soares F, Paiva DS, Mesquita N, Coelho C, et al. Fungal diversity and distribution across distinct biodeterioration phenomena in limestone walls of the old cathedral of Coimbra, UNESCO World Heritage Site. Int Biodeterior Biodegrad 2019;142:91–102. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.05.008.

[20] Savković Ž, Unković N, Stupar M, Franković M, Jovanović M, Erić S, et al. Diversity and biodeteriorative potential of fungal dwellers on ancient stone stela. Int Biodeterior Biodegrad 2016;115:212–23. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.08.027.

[21] Guerra FL, Lopes W, Cazarolli JC, Lobato M, Masuero AB, Dal Molin DCC, et al. Biodeterioration of mortar coating in historical buildings: Microclimatic characterization, material, and fungal community. Build Environ 2019;155:195–209. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.017.

[22] Florian M-L. Plant Biology for Cultural Heritage: Biodeterioration and Conservation. vol. 54. 2009. https://doi.org/10.1179/sic.2009.54.3.191.

[23] Di Carlo E, Barresi G, Palla F. Biodeterioration. Biotechnol. Conserv. Cult. Herit., Springer International Publishing; 2017, p. 1–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46168-7_1.

[24] Kovacik L. Cyanobacteria and algae as agents of biodeterioration of stone substrata of historical buildings and other cultural monuments. Proc New Millenium Int Forum Conserv Cult Prop Daejeon, Korea 2000:44–58.

[25] Gambino M, Sanmartín P, Longoni M, Villa F, Mitchell R, Cappitelli F. Surface colour: An overlooked aspect in the study of cyanobacterial biofilm formation. Sci Total Environ 2019;659:342–53. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.358.

[26] Zhang G, Gong C, Gu J, Katayama Y,

Someya T, Gu JD. Biochemical reactions and mechanisms involved in the biodeterioration of stone world cultural heritage under the tropical climate conditions. Int Biodeterior Biodegrad 2019;143. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104723.

[27] Wakefield RD, Jones MS. An introduction to stone colonizing micro-organisms and biodeterioration of building stone. Q J Eng Geol 1998;31:301–13. https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1998.031.P4.03.

[28] Tonon C, Favero-Longo SE, Matteucci E, Piervittori R, Croveri P, Appolonia L, et al. Microenvironmental features drive the distribution of lichens in the House of the Ancient Hunt, Pompeii, Italy. vol. 136. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.10.012.

[29] Pena-Poza J, Ascaso C, Sanz M, Pérez-Ortega S, Oujja M, Wierzchos J, et al. Effect of biological colonization on ceramic roofing tiles by lichens and a combined laser and biocide procedure for its removal. vol. 126. 2018. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.10.003.

[30] Ding Y, Salvador CSC, Caldeira AT, Angelini E, Schiavon N. Biodegradation and Microbial Contamination of Limestone Surfaces: An Experimental Study from Batalha Monastery, Portugal. Corros Mater Degrad 2021;2:31–45. https://doi.org/10.3390/cmd2010002.

[31] Seaward MRD, Giacobini C, Giuliani MR, Roccardi A. The role of lichens in the biodeterioration of ancient monuments with particular reference to Central Italy. Int Biodeterior Biodegrad 2001;48:202–8. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00082-8.

[32] Lisci M, Monte M, Pacini E. Lichens and higher plants on stone: A review. vol. 51. 2003. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00071-9.

[33] Konsa K, Tirrul I, Hermann A. Wooden objects in museums: Managing biodeterioration situation. Int Biodeterior Biodegrad 2014;86:165–70. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.06.023.

[34] Sánchez-Piñero F, Bolívar FC. Indirect effects of a non-target species, Pyrrhalta luteola (Chrysomelidae) on the biodeterioration of Brussels tapestries. Int Biodeterior Biodegrad 2004;54:297–302. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2003.12.005.

[35] Viitanen H. Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions. Mater Struct 1994;27:483–93. https://doi.org/10.1007/BF02473453.

[36] Ali HE, Khattab SA, Al-Mukhtar M. The effect of biodeterioration by bird droppings on the degradation of stone built. Eng Geol Soc Territ - Vol 8 Preserv Cult Herit 2015:515–20. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3_91.

[37] Allsopp D, Seal K, Gaylarde C. Department of Microbiology MCB 314 Biodeterioration. 2004.

[38] Mihajlovski A, Seyer D, Benamara H, Bousta F, Di Martino P. An overview of techniques for the characterization and quantification of microbial colonization on stone monuments. Ann Microbiol 2015;65:1243–55. https://doi.org/10.1007/s13213-014-0956-2.

[39] Tarsitani G, Moroni C, Cappitelli F, Pasquariello G, Maggi O. Microbiological analysis of surfaces of Leonardo da vinci's Atlantic codex: Biodeterioration risk. Int J Microbiol 2014;2014. https://doi.org/10.1155/2014/214364.

[40] Traversetti L, Bartoli F, Caneva G. Wind-driven rain as a bioclimatic factor affecting the biological colonization at the archaeological site of Pompeii, Italy. Int Biodeterior Biodegrad 2018;134:31–8.

https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.07.016.

[41] Manso S, Mestres G, Ginebra MP, De Belie N, Segura I, Aguado A. Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity. Constr Build Mater 2014;54:485–95. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.001.

[42] Shirakawa MA, Beech IB, Tapper R, Cincotto MA, Gambale W. The development of a method to evaluate bioreceptivity of indoor mortar plastering to fungal growth. Int Biodeterior Biodegrad 2003;51:83–92. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00129-9.

[43] Miller AZ, Leal N, Laiz L, Rogerio-Candelera MA, Silva RJC, Dionísio A, et al. Primary bioreceptivity of limestones used in southern European monuments. Geol Soc Spec Publ 2010;331:79–92. https://doi.org/10.1144/SP331.6.

[44] Manso S, De Muynck W, Segura I, Aguado A, Steppe K, Boon N, et al. Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth. Sci Total Environ 2014;481:232–41. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.059.

[45] Miller AZ, Sanmartín P, Pereira-Pardo L, Dionísio A, Saiz-Jimenez C, Macedo MF, et al. Bioreceptivity of building stones: A review. Sci Total Environ 2012;426:1–12. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.026.

[46] Miller A, Dionísio A, Macedo MF. Primary bioreceptivity: A comparative study of different Portuguese lithotypes. Int Biodeterior Biodegrad 2006;57:136–42. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2006.01.003.

[47] Prieto B, Silva B. Estimation of the potential bioreceptivity of granitic rocks from their intrinsic properties. Int Biodeterior Biodegrad 2005;56:206–15. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2005.08.001.

[48] Guillitte O. Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies. Sci Total Environ 1995;167:215–20. https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04582-L.

[49] Gonzalez JM, Sainz-Jimenez C. Microbial diversity in biodeteriorated monuments as studied by denaturing gradient gel electrophoresis. J Sep Sci 2004;27:174–80. https://doi.org/10.1002/jssc.200301609.

[50] Borrego S, Guiamet P, Gómez de Saravia S, Batistini P, Garcia M, Lavin P, et al. The quality of air at archives and the biodeterioration of photographs. Int Biodeterior Biodegrad 2010;64:139–45. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.12.005.

[51] Leite AMO, Mayo B, Rachid CTCC, Peixoto RS, Silva JT, Paschoalin VMF, et al. Assessment of the microbial diversity of Brazilian kefir grains by PCR-DGGE and pyrosequencing analysis. Food Microbiol 2012;31:215–21. https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.03.011.

[52] Salvadori O. Characterisation of Endolithic Communities of Stone Monuments and Natural Outcrops. Microbes Art, Springer US; 2000, p. 89–101. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4239-1_7.

[53] Sterflinger K. Fungi: Their role in deterioration of cultural heritage. Fungal Biol Rev 2010;24:47–55. https://doi.org/10.1016/j.fbr.2010.03.003.

[54] Ascaso C, Wierzchos J, Castello R. Study of the biogenic weathering of calcareous litharenite stones caused by lichen and endolithic microorganisms. Int Biodeterior Biodegrad 1998;42:29–38. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(98)00043-2.

[55] Rakotonirainy MS, Heude E, Lavédrine B. Isolation and attempts of biomolecular characterization of fungal strains associated to foxing on a 19th century book. J Cult Herit 2007;8:126–33.

https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.01.003.

[56] Macedo MF, Miller AZ, Dionísio A, Saiz-Jimenez C. Biodiversity of cyanobacteria and green algae on monuments in the Mediterranean Basin: An overview. Microbiology 2009;155:3476–90. https://doi.org/10.1099/mic.0.032508-0.

[57] Videla HA, Guiamet PS, De Saravia SG. Biodeterioration of Mayan archaeological sites in the Yucatan Peninsula, Mexico. Int Biodeterior Biodegrad 2000;46:335–41. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00106-2.

[58] Caldeira AT, Schiavon N, Mauran G, Salvador C, Rosado T, Mirão J, et al. On the biodiversity and biodeteriogenic activity of microbial communities present in the hypogenic environment of the Escoural Cave, Alentejo, Portugal. Coatings 2021;11:1–17. https://doi.org/10.3390/coatings11020209.

[59] Soffritti I, D'Accolti M, Lanzoni L, Volta A, Bisi M, Mazzacane S, et al. The potential use of microorganisms as restorative agents: An update. Sustain 2019;11. https://doi.org/10.3390/su11143853.

[60] Unković N, Ljaljević Grbić M, Subakov-Simić G, Stupar M, Vukojević J, Jelikić A, et al. Biodeteriogenic and toxigenic agents on 17th century mural paintings and façade of the old church of the Holy Ascension (Veliki Krćimir, Serbia). Indoor Built Environ 2016;25:826–37. https://doi.org/10.1177/1420326X15587178.

[61] Dakal TC, Cameotra SS. Microbially induced deterioration of architectural heritages: Routes and mechanisms involved. Environ Sci Eur 2012;24. https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-36.

[62] Otlewska A, Adamiak J, Gutarowska B. Application of molecular techniques for the assessment of microorganism diversity on cultural heritage objects. vol. 61. 2014. https://doi.org/10.18388/abp.2014_1889.

[63] Sterflinger K, Little B, Pinar G, Pinzari F, de los Rios A, Gu JD. Future directions and challenges in biodeterioration research on historic materials and cultural properties. Int Biodeterior Biodegrad 2018;129:10–2. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.12.007.

[64] Gorbushina AA, Heyrman J, Dornieden T, Gonzalez-Delvalle M, Krumbein WE, Laiz L, et al. Bacterial and fungal diversity and biodeterioration problems in mural painting environments of St. Martins church (Greene-Kreiensen, Germany). Int Biodeterior Biodegrad 2004;53:13–24. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2003.07.003.

[65] Andersen CL, Hostetter G, Grigoryan A, Sauter G, Kallioniemi A. Improved procedure for fluorescence in situ hybridization on tissue microarrays. Cytometry 2001;45:83–6. https://doi.org/10.1002/1097-0320(20011001)45:2<83::AID-CYTO1149>3.0.CO;2-P.

[66] Lan W, Li H, Wang WD, Katayama Y, Gu JD. Microbial community analysis of fresh and old microbial biofilms on Bayon Temple sandstone of Angkor Thom, Cambodia. Microb Ecol 2010;60:105–15. https://doi.org/10.1007/s00248-010-9707-5.

[67] Negi A, Sarethy IP. Microbial Biodeterioration of Cultural Heritage: Events, Colonization, and Analyses. Microb Ecol 2019;78:1014–29. https://doi.org/10.1007/s00248-019-01366-y.

[68] Perito B, Cavalieri D. Innovative metagenomic approaches for detection of microbial communities involved in biodeteriorattion of cultural heritage. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 364, Institute of Physics Publishing; 2018. https://doi.org/10.1088/1757-899X/364/1/012074.

[69] Piñar G, Piombino-Mascali D, Maixner

F, Zink A, Sterflinger K. Microbial survey of the mummies from the capuchin catacombs of palermo, italy: Biodeterioration risk and contamination of the indoor air. FEMS Microbiol Ecol 2013;86:341–56. https://doi.org/10.1111/1574-6941.12165.

[70] Gutarowska B, Celikkol-Aydin S, Bonifay V, Otlewska A, Aydin E, Oldham AL, et al. Metabolomic and high-throughput sequencing analysis-modern approach for the assessment of biodeterioration of materials from historic buildings. Front Microbiol 2015;6. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00979.

[71] Capodicasa S, Fedi S, Porcelli AM, Zannoni D. The microbial community dwelling on a biodeteriorated 16th century painting. Int Biodeterior Biodegrad 2010;64:727–33. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.08.006.

[72] Neugebauer W, Leinberger DM, Petersen K, Schumacher U, Bachmann TT, Krekel C. The development of a DNA microarray for the rapid identification of moulds on works of art. Stud Conserv 2010;55:258–73. https://doi.org/10.1179/sic.2010.55.4.258.

[73] Maynard C, Berthiaume F, Lemarchand K, Harel J, Payment P, Bayardelle P, et al. Waterborne pathogen detection by use of oligonucleotide-based microarrays. Appl Environ Microbiol 2005;71:8548–57. https://doi.org/10.1128/AEM.71.12.8548-8557.2005.

[74] Warscheid T, Braams J. Biodeterioration of stone: A review. vol. 46. 2000. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00109-8.

[75] Larbi JA. Microscopy applied to the diagnosis of the deterioration of brick masonry. Constr Build Mater 2004;18:299–307. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.02.002.

[76] Van Balen K. Expert system for evaluation of deterioration of ancient brick masonry structures. Sci Total Environ 1996;189–190:247–54. https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05215-1.

[77] Gutarowska B, Celikkol-Aydin S, Bonifay V, Otlewska A, Aydin E, Oldham AL, et al. Metabolomic and high-throughput sequencing analysis-modern approach for the assessment of biodeterioration of materials from historic buildings. Front Microbiol 2015;6. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00979.

[78] 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 Biodegrad 2009;63:836–43. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.05.006.

[79] Lopez-Arce P, Garcia-Guinea J. Weathering traces in ancient bricks from historic buildings. vol. 40. 2005. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.027.

[80] Gu JD, Ford TE, Berke NS, Mitchell R. Biodeterioration of concrete by the fungus Fusarium. Int Biodeterior Biodegrad 1998;41:101–9. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(98)00034-1.

[81] Sanchez-Silva M, Rosowsky D V. Biodeterioration of Construction Materials: State of the Art and Future Challenges. J Mater Civ Eng 2008;20:352–65. https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:5(352).

[82] Nica D, Davis JL, Kirby L, Zuo G, Roberts DJ. Isolation and characterization of microorganisms involved in the biodeterioration of concrete in sewers. vol. 46. 2000. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00064-0.

[83] Turick CE, Berry CJ. Review of concrete biodeterioration in relation to nuclear waste. J Environ Radioact

2016;151:12–21. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.005.
[84] Marquez-Peñaranda JF, Sanchez-Silva M, Husserl J, Bastidas-Arteaga E. Effects of biodeterioration on the mechanical properties of concrete. Mater Struct Constr 2016;49:4085–99. https://doi.org/10.1617/s11527-015-0774-4.
[85] Bielefeldt A, Gutierrez-Padilla MGD, Ovtchinnikov S, Silverstein J, Hernandez M. Bacterial Kinetics of Sulfur Oxidizing Bacteria and Their Biodeterioration Rates of Concrete Sewer Pipe Samples. J Environ Eng 2010;136:731–8. https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000215.
[86] Javaherdashti R, Nikraz H, Borowitzka M, Moheimani N, Olivia M. On the impact of algae on accelerating the biodeterioration/biocorrosion of reinforced concrete: A mechanistic review. vol. 36. 2009.
[87] Hudon E, Mirza S, Frigon D. Biodeterioration of Concrete Sewer Pipes: State of the Art and Research Needs. J Pipeline Syst Eng Pract 2011;2:42–52. https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000072.
[88] Cutler N, Viles H. Eukaryotic microorganisms and stone biodeterioration. Geomicrobiol J 2010;27:630–46. https://doi.org/10.1080/01490451003702933.
[89] Warscheid T. The evaluation of biodeterioration processes on cultural objects and approaches for their effective control. Art, Biol Conserv Biodeterior Work Art 2003:14–27.
[90] Szostak-Kotowa J. Biodeterioration of textiles. Int Biodeterior Biodegrad 2004;53:165–70. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(03)00090-8.
[91] Rotolo V, Barresi G, Di Carlo E, Giordano A, Lombardo G, Crimi E, et al. Plant extracts as green potential strategies to control the biodeterioration of cultural heritage. Int J Conserv Sci 2016;7:839–46.
[92] Allsopp C, Allsopp D. An updated survey of commercial products used to protect materials against biodeterioration. Int Biodeterior Biodegrad 2001;48:243. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00088-9.
[93] Di Carlo E, Barresi G, Palla F. Biodeterioration. Biotechnol Conserv Cult Herit 2017:1–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46168-7_1.
[94] Palla F, Barresi G. Biotechnology and conservation of cultural heritage. Biotechnol Conserv Cult Herit 2017:1–100. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46168-7.
[95] Sarró MI, García AM, Rivalta VM, Moreno DA, Arroyo I. Biodeterioration of the Lions Fountain at the Alhambra Palace, Granada (Spain). Build Environ 2006;41:1811–20. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.029.
[96] Lavin P, Gómez de Saravia SG, Guiamet PS. An environmental assessment of biodeterioration in document repositories. Biofouling 2014;30:561–9. https://doi.org/10.1080/08927014.2014.897334.
[97] Poyatos F, Morales F, Nicholson AW, Giordano A. Physiology of biodeterioration on canvas paintings. J Cell Physiol 2018;233:2741–51. https://doi.org/10.1002/jcp.26088.
[98] Orlita A. Microbial biodeterioration of leather and its control: A review. Int Biodeterior Biodegrad 2004;53:157–63. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(03)00089-1.
[99] Ditaranto N, Van Der Werf ID, Picca RA, Sportelli MC, Giannossa LC, Bonerba E, et al. Characterization and behaviour of ZnO-based nanocomposites designed for the control of biodeterioration of patrimonial stoneworks. New J Chem 2015;39:6836–43. https://doi.org/10.1039/c5nj00527b.
[100] Pinheiro AC, Mesquita N, Trovão J,

scenario. J Cult Herit 2019;36:275–85. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.07.008.

Soares F, Tiago I, Coelho C, et al. Limestone biodeterioration: A review on the Portuguese cultural heritage