پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۱؛ ۸(۲): ۶۵-۸۰

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.52547/jra.8.2.65

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

مقاله پژوهشی

عوامل زیستی مؤثر بر فرسودگی زیستی سطوح آجری در میراث جهانی یونسکو- برج گنبد قابوس

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

۱. دانشجوی دکتری میکروبیولوژی، گروه زیست فناوری صنعتی و محیط زیست، پژوهشکدهٔ زیست فناوری، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.

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

۳. استادیار گروه آموزشی معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گلستان، ایران.

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶**

چکیده

هدف از این پژوهش شناسایی عوامل اصلی فرسودگی زیستی ساکن روی آجرهای متعلق به میراث جهانی گنبد قابوس واقع در شهر گنبد کاووس در استان گلستان است. در این پژوهش با استفاده از مشاهدات میدانی، مشاهدات ماکروسکوپی در محل، روش‌های میکروسکوپی و مطالعات کتابخانه‌ای به شناسایی و نحوهٔ تأثیرگذاری عوامل زیستی بر سطح آجری بنای گنبد قابوس در سه قسمت پایه، بدنه و مخروط پرداخته شد. بر این اساس، عوامل فرسودگی زیستی به دو گروه نمونه‌برداری تقسیم‌بندی شدند. گروه اول، شامل ماکروارگانیسم‌ها که برای جلوگیری از صدمه به بنا، روش شناسایی بر اساس مستندنگاری و عکس با دوربین انجام شد. گروه دوم، نمونه‌برداری از عوامل میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌ها و قارچ‌ها، ریزجلبک‌ها و سیانوباکترها، گلسنگ‌ها که با پنس استریل از روی سطح آجری نمونه‌برداری انجام و سپس به داخل میکروتیوپ انتقال و با روش‌های ریخت‌شناسی و کشت و میکروسکوپی شناسایی شدند. به‌طور کلی، نُه گروه از ارگانیسم‌های عامل فرسودگی زیستی در این مطالعه شناسایی شدند که ازجمله گروه‌های عمدهٔ آن‌ها می‌توان به باکتری‌ها، سیانوباکترها و جلبک‌ها، قارچ‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها و گیاهان، حشرات و حیوانات کوچک اشاره کرد. ماکروارگانیسم‌ها با تغییرات میزان رطوبت، کم‌وزیاد می شوند و بنابراین، در تخریب مکانیکی اجزای بستر مؤثرند. در بین ماکروارگانیسم‌ها گیاهان و خزه‌ها از مهم‌ترین دشمنان بستر آجری بنای گنبد قابوس موجود شناخته شدند. میکروارگانیسم‌ها قادرند کلون و بیوفیلم‌هایی را روی سطح بستر آجری تشکیل دهند. آن‌ها اسیدهایی را ترشح می‌کنند که مواد معدنی تشکیل‌دهندهٔ بستر آجری را تجزیه کرده و به این صورت نقش مهمی در فرسودگی زیستی بنا ایفا می‌کنند. به‌طور کلی، آجرهای دیوارهای بیرونی بنا در معرض حملهٔ عوامل متنوع زیستی و عوامل غیرزنده قرار دارند و درمجموع، مقاومت کمتری نسبت‌به فعالیت‌های عوامل فرسودگی نشان می‌دهند. رطوبت، دما و نور و آلودگی غبار شهری از عواملی بالقوه در افزایش عوامل دخیل در فرسودگی زیستی می‌توانند در پژوهش‌های بعدی مورد بحث قرار گیرند.

واژگان کلیدی: کلاه‌های عتیقه، پرتونگاری صنعتی، خانوادهٔ تاویچی، ایتالیا ، سه‌بُعدی‌سازی و وردش.

* نویسنده مسئول مکاتبات: جاده قدیم کرج، سه راه شهریار، مجتمع تحقیقاتی عصر انقلاب، پژوهشکدهٔ زیست‌فناوری و موزهٔ گلسنگ‌های ایران سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران کد پستی: ۳۳۱۳۱۹۳۶۸۵

پست الکترونیکی: sohrabi@irost.org

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

۱. مقدمه

میراث فرهنگی یونسکو، به‌خصوص بناهای تاریخی، در طول زمان عمدتاً به دلیل ترکیبی از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی تحت شرایط آب و هوایی مختلف، دچار تخریب جدی می‌شوند و در میان این عوامل فعالیت‌های زیستی موجودات نقش قابل چشمگیری دارند. فعالیت‌های زیستی که میراث‌های فرهنگی را دچار تخریب و فرسودگی می‌کنند، با عنوان فرسودگی زیستی شناخته می‌شود که به دلیل تعاملات بین آن‌ها و بسترهای سازنده میراث صورت می‌گیرد[1]. فرسودگی زیستی شامل یک اثر متقابل پیچیده بین عوامل زیستی، مواد سازندهٔ بستر، تغییر آب‌وهوا و عوامل‌محیطی خاص است که یک چالش بزرگ برای حفاظت از بناهای تاریخی است. توانایی‌های محققان برای روشن‌کردن مکانیسم‌های بیوژئوفیزیکی و بیوژئوشیمیایی فرآیندهای پیچیدهٔ فرسودگی زیستی که در آثار تاریخی رخ می‌دهد، با استفاده از روش‌های جدید مولکولی، فیزیکی و شیمیایی امکان‌پذیر شده است. تعامل بین تجمع عوامل زیستی و بسترهای سازندهٔ بناهای تاریخی را می‌توان به سه نوع مختلف تقسیم کرد. در نوع اول، بستر می‌تواند به‌صورت آنزیمی توسط یکی از عوامل تجزیه شود و در ادامه، توسط سایر عوامل زیستی به‌عنوان منبع غذایی مورد استفاده قرار گیرد. نوع دوم عوامل زیستی می‌توانند ترکیبات متابولیکی مانند اسیدهای معدنی و آلی را که با ترکیبات معدنی بستر در تعامل هستند، ترشح کنند. بنابراین، باعث انحلال و تغییر رنگ می‌شوند. در نوع سوم، بستر به دلیل رشد عوامل زیستی می‌تواند توسط فعالیت‌های فیزیکی (مکانیکی) ناشی از آن‌ها آسیب ببیند[2]. تعداد قابل توجهی از مطالعات برای مشخص‌کردن نقش عوامل زیستی در فرآیندهای فرسودگی انجام شده است. محققان همچنین از روش‌های چندفازی برای افزایش دانش خود در مورد تنوع زیستی درگیر در فرایند فرسودگی زیستی استفاده کرده‌اند. بااین‌حال، عوامل زیستی همچنین نقش اساسی در پایداری بسترهای سازنده بناهای تاریخی دارند. شناسایی عوامل زیستی و مکانیسم‌های مُضر باید نقطهٔ کانونی تشخیص فرسودگی زیستی باشد. بنابراین، ملاحظات بیشتری باید در استراتژی‌های حفاظت پایدار مورد توجه قرار گیرد و پس از انجام اقدامات پیشگیرانه برای جلوگیری از صدمه به بناهای تاریخی و طرح‌ریزی مناسب با استفاده از رشته‌های چندگانهٔ خاص (میکروبیولوژی، مرمت، معماری و ...) میزان ارزیابی فرسودگی زیستی انجام شود[3,4]. اجتماع زیستی بسترها بسیار پیچیده است و گروه‌های مختلف با خصوصیات فیزیولوژیکی مختلف را دربرمی‌گیرد. این تجمع‌ها بسته به شرایط‌محیطی و خصوصیات فیزیک و شیمیایی بستر می‌توانند به طُرُق مختلف توسعه یابند. شناسایی عوامل درگیر در فرسودگی زیستی یکی از مهم‌ترین مراحل در مطالعهٔ فرسودگی زیستی بناهای تاریخی محسوب می‌شود و این کار می‌تواند به ما در درک تنوع زیستی، مراحل اجتماع‌پذیری و تعاملات بین عوامل زیستی و زیرلایه‌ها کمک کند[5,6]. در ایران میراث باستانی متعددی وجود دارد که همگی در فضاهای روباز هستند و در معرض رشد و تهاجم عوامل زیستی مختلفی نظیر باکتری‌ها، گلسنگ‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها، خزه‌ها، گیاهان و فعالیت جانوران مختلفی مانند پستانداران، پرندگان، جوندگان، حشرات و غیره قرار گرفته‌اند. تاکنون مطالعات فرسایش زیستی ارگانیسم‌های روی بناهای سنگی مانند تخت جمشید و ... انجام شده، ولی مطالعات جدی روی بناهای آجری مورد پایش قرار نگرفته و اطلاعاتی از نرخ فرسایش بناهای اجری در ایران گزارش نشده است. گنبد قابوس یکی از شاهکارهای معماری دورهٔ اسلامی ایران که به‌عنوان پانزده اثر ایران در فهرست میراث جهانی به ثبت رسیده است. روی سطح آجری بنا عوامل آسیب‌رسان زیستی قابل مشاهده هستند که موجب فرسایش تدریجی آجرها و ملات‌ها می‌شوند که با توجه به اقلیم گرم و مرطوب و شرایط زیست‌محیطی گنبد قابوس نیاز است پایش روشمند برای شناسایی فرسایش زیستی و گونه‌های آن صورت گیرد. با توجه به آثار مخرب در سطوح آجرهای بنا، نیاز به جست‌وجوی روشی مناسب برای کاهش این اثرات یا توقف آن‌هاست. توصیف خصوصیات عوامل فرسودگی در آجرهای باستانی گنبد قابوس، زمانی‌که فعالیت‌های حفاظتی یا فرآیندهای پاکسازی برنامه‌ریزی شده‌اند، امری ضروری است. هدف در این پژوهش شناسایی اصلی‌ترین عوامل زنده است که به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم در فرسودگی زیستی بنای گنبد قابوس نقش مؤثر دارند و همچنین بررسی تأثیرات آن‌هاست.

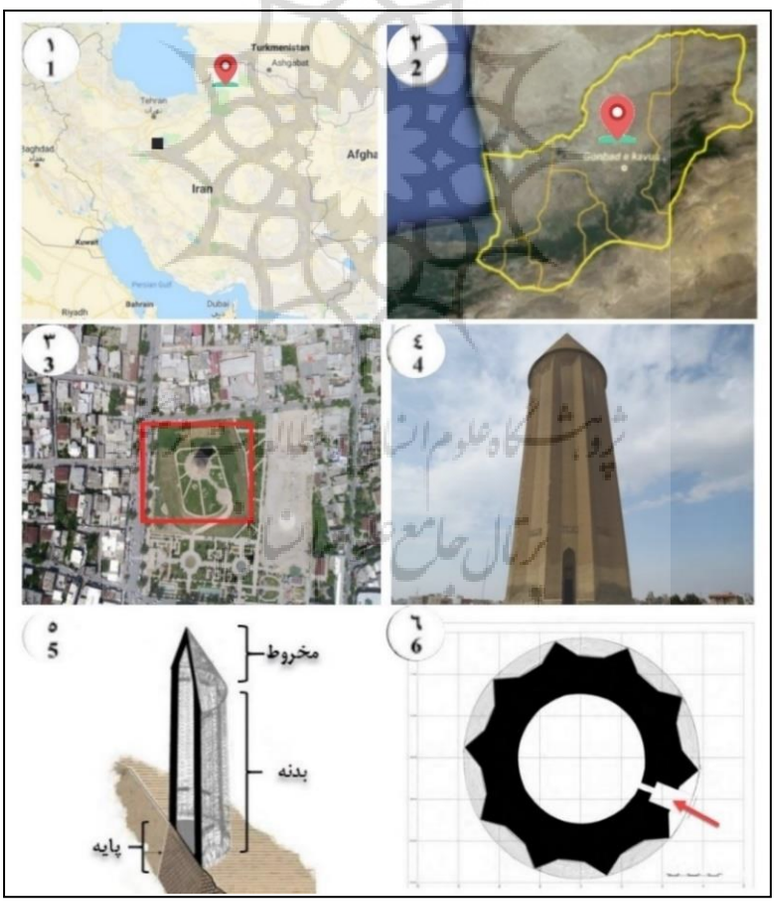
[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. میراث جهانی گنبد قابوس

بنای گنبد قابوس (تصویر شماره ۱) در گوشهٔ شمال‌غربی بوستان قابوس در شهرگنبد کاووس استان گلستان قرار دارد. این بنای یادمانی در سه کیلومتری شمال‌شرقی شهر باستانی گرگان (معرب عربی جرجان) مرکز حکومت آل زیار و به دستور شمس‌المعالی قابوس بن وشمگیر، چهارمین حکمران آل زیار، در سال ۳۴۷ هجری قمری(۳۸۵ شمسی) ساخته شده است[7]. نقشهٔ بنا از درون مدور و از بیرون ستاره ده‌پَر (ده‌تَرک) است که ترک‌ها به فواصل مساوی از یکدیگر قرار دارد. بنا از سه‌قسمت تشکیل شده که عبارت‌اند از الف) پی آجری به ارتفاع ۹/۸۰ متر، ب) بدنه ۳۶/۹۷ متر، و پ) مخروط گنبد۱۵/۹۱ به ارتفاع که در کل از پی تا سقف ۶۲/۶۸ متر است که آن را در زمرهٔ یکی از بزرگ‌ترین بنای آجری جهان درآورده است. ورودی بنا در سمت شرقی دارای سردر هلالی و گلویی مقرنسی است که یکی از نخستین مقرنس‌کاری در معماری اسلامی ایران بوده است. کتیبه‌های گنبد قابوس با خط کوفی در عین سادگی کاملاً خوانا و برجسته‌اند که در دو ردیف در بدنهٔ بنا در قاب‌های مستطیلی به‌طور قرینه در بالا و پایین تکرار شده است. که تکرار کتیبه مشابه نیز یکی از ویژگی‌های خاص این یادمان با دیگر بناهای تاریخی است. این بنای یادمانی، در تاریخ ۱۵ دی ماه ۱۳۱۰ خورشیدی برابر ۶ ژانویه ۱۹۳۲ به شمارهٔ ۸۶ در فهرست آثار ملی و در تاریخ ۱۰ تیر ماه ۱۳۹۱ خورشیدی برابر با ۳۰ جولای ۲۰۱۲ میلادی در سی‌وششمین اجلاس کمیتهٔ میراث جهانی در شهر سن پترزبورگ روسیه، به شمارهٔ ۱۳۹۸ در فهرست میراث جهانی به‌عنوان پانزدهمین اثر تاریخی ایران به ثبت رسیده است[7,8].



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی: ۱و ۲-۳) موقعیت قرارگیری بنا در کشور ایران، استان گلستان و شهرستان گنبد کاووس ؛ ۴و ۵-۶) ویژگی‌های ساختاری بنای گنبد قابوس

Fig. 1: Geographical location: 1 and 2-3) Location of the building in Iran, Golestan province and Gonbad Kavous city; 4 and 5-6) Structural features the Gonbad-e Qābus tower

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

۲-۲. بررسی ارگانیسم‌های درگیر در فرسودگی زیستی و نمونه‌برداری

این پژوهش بیشتر از طریق مشاهدات میدانی، مشاهدات ماکروسکوپی در محل، مطالعات کتابخانه‌ای و نحوهٔ تأثیرگذاری عوامل زیستی بر تخریب بنا انجام شد. مشاهدات میدانی عوامل زیستی روی سطح آجری بنای گنبد قابوس از سه قسمت پایه، بدنه و مخروط با چشم غیرمسلح انجام شد. بر این اساس عوامل فرسودگی زیستی به دو گروه نمونه‌برداری تقسیم‌بندی شدند. گروه اول، شامل ماکروارگانیسم‌ها که برای جلوگیری از صدمه به بنا روش شناسایی بر اساس مستندنگاری و عکس با دوربین سونی مدل HS 60Canon PowerShot SX انجام شد. این روش شامل عکس و دو نمونه از فضولات پرندگان، عکس از جوندگان عامل فرسودگی زیستی، عکس از خزندگان کوچک که روی بنا زندگی می‌کنند، عکس از حشراتی که تأثیرگذار فرسودگی زیستی هستند، عکس و نمونه‌برداری از گیاهان علفی، چوبی و خزه‌ها انجام شد (شکل۲). گروه دوم، نمونه‌برداری از عوامل میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌ها و قارچ‌ها (۶ نمونه)، ریزجلبک‌ها و سیانوباکترها (شش نمونه و عکس)، گلسنگ‌ها (بیست نمونه از تال گلسنگ و عکس) که با پنس استریل از روی سطح آجری نمونه‌برداری انجام و سپس به داخل میکروتیوپ انتقال داده شد (شکل۲) [9]. نمونه‌برداری‌ها از سطوح تاریخی تحت پوشش مدیریت پایگاه انجام گرفت. نمونه‌ها بستگی به نوع موجود زندهٔ مخرب و تأثیرگذار در فرسودگی زیستی و شماره‌گذاری و کدگذاری و به آزمایشگاه موجود در محل پایگاه منتقل گردید. [10]. کلیهٔ اطلاعاتی که قبلاً مستندنگاری شده بود و همچنین سوابق و تصاویر مربوطه که به‌نوعی حاوی اطلاعات تاریخچهٔ فرسودگی زیستی که در پایگاه گنبد قابوس وجود داشت، جمع‌آوری و مورد استفاده واقع شد.

شکل ۲: محل و انجام نمونه‌برداری ۱و ۲-۳) نمونه‌برداری و تصویربرداری عوامل فرسودگی از مخروط، بدنه و پایه انجام شد؛ ۴) نمونه‌برداری از گلسنگ‌ها و فضولات جاندارن ۵) نمونه‌برداری از سطح آجری در شرایط استریل برای عوامل میکروارگانیسمی؛ ۶) تصویربرداری از عوامل ماکروارگانیسمی

Fig. 2: location and sampling; 1 and 2-3) Sampling and imaging of wear factors from the dome, body and foundation were done; 4) Sampling of lichens and living wastes 5) Sampling of brick surface in sterile conditions for microorganism agents; 6) Imaging of macroorganism factors

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

۲-۲-۱. بررسی عوامل ماکروارگانیسمی

پس از مشاهدات میدانی و نمونه‌برداری و عکس‌برداری از عوامل ماکروارگانیسمی، آن‌ها به آزمایشگاه سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی انتقال و از روش‌هایی استفاده شد که در زیر بیان شده است، و سپس با انجام آزمایشات ضروری، اثرات و عوارض حضور آن در سطوح تاریخی و نقش آن‌ها در روند فرسایشی سطحی مورد بررسی قرار گرفته شدند.

گیاهان و خزه‌ها: برای انجام این تحقیق، گیاهان و خزه‌های موجود روی بنا با توجه به ویژگی‌های مورفولوژیکی در آزمایشگاه سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی شناسایی شدند. در ابتدا با استفاده از حس بینایی، شکل و اندازهٔ اندام‌های مختلف مانند فُرم رویشی، شکل ریشه، ساقه‌ها، بـرگ‌ها، گل آذیـن و میـوه باید یادداشت می‌شدند. پس از اندازه‌گیری مشاهدات اولیه بررسی نمونـه بـا اسـتفاده از استریومیکروسکوپ مدل ZSM-1001 انجام شد. ایـن میکروسکوپ بـرای مطالعـهٔ شـکل خارجـی اجسـام مهـم مانند نـــوع کرک و موهای بخش‌های مختلف گیاه، رنگ و شکل پرچم‌ها و سایر ویژگی‌ها استفاده شد. پس، مشاهدات اولیه با استفاده از کلیدهای شناسایی که در کتاب فلور ایران (اسدی ۱۳۶۷–۱۳۹۸) وجود دارد جنس و گونه‌ها مشخص گردید. شناسایی خزه‌ها بر اساس صفات ریخت‌شناسی، تشریحی، اکولوژیکی و رویشگاهی با استفاده از منابع فلورخزهای اقیانوس شمال‌غربی و فلورخزهای عراق انجام شد [11].

شناسایی جانوران: حشرات، خزندگان و پرندگان براساس ویژگی‌های ظاهری و کلیدهای شناسایی بررسی شدند. کلیدهای شناسایی حشرات بر اساس روش Borror و همکاران (۲۰۰۴) انجام شد. ویژگی‌هایی مانند بال، حالت بندبند بدن، رنگ و شکل بدن در زیر استریومیکروسکوپ برای شناسایی حشرات در نظر گرفته شد. ویژگی‌های شناسایی خزندگان و پرندگان شامل فُرم کلی بدن و جثّه، رنگ، حرکات، زیستگاه و ... با کلیدهای شناسایی در منابع معتبر در دسترس مانند (رستگار پویـانی و همکاران ۱۳۸۵ و اسکات و همکاران) در نظر گرفته شد. همچنین اجساد و فضوالات آن‌ها که روی فرسودگی زیستی بنا تأثیر دارد، مورد بررسی قرار گرفت[17].

۲-۲-۲. بررسی عوامل میکروارگانیسمی

جوامع میکروبی در بستر آجری میراث جهانی گنبد قابوس متشکل از باکتری‌ها و قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها، جلبک‌ها و گلسنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، ابتدا نمونه‌گیری از سطح بنا در شرایط استریل انجام گرفت و سپس از روش‌های مبتنی بر کشت، رنگ‌آمیزی، تکنیک‌های میکروسکوپی مانند میکروسکوپ نوری، استریومیکروسکوپ برای شناسایی عوامل میکروارگانیسمی استفاده شد. شناسایی عوامل میکروارگانیسمی بیشتر برای اثبات وجود این عوامل و تأثیرگذاری بر فرسودگی زیستی بر اساس ویژگی‌های مورفولوژیکی انجام شد. برای شناسایی دقیق در حد جنس و گونه با استفادهٔ تجزیه و تحلیل مولکولی نیاز به زمان و هزینهٔ زیادی بوده که خارج از توان این تحقیق بوده است. به‌منظور اثرات عوامل میکروارگانیسمی بر فرسودگی زیستی از روش میکروسکوپ پلاریزان و الکترونی (SEM) استفاده شد.

بررسی باکتری‌ها و قارچ‌های میکروسکوپی: روش‌هایی مانند غنی‌سازی و جداسازی در محیط کشت برای بررسی ساختار جمعیت و خصوصیات مورفولوژیکی برای شناسایی استفاده شده است. در ابتدا ۰/۵گرم از نمونه به صد میلی لیتر آب مقطر اضافه استریل اضافه شد. سپس، برای باکتری‌ها مقدار یک میلی‌لیتر به‌همراه سیکلوهگزامید با غلظت پانصد میلی‌گرم بر لیتر جهت ممانعت از رشد قارچ به محیط کشت نوترینت آگار اضافه شد. مقدار یک‌میلی‌لیتر از نمونه به محیط کشت SDA(Sabouraud dextrose agar) همراه با آنتی‌بیوتیک کلرامفنیکل برای جلوگیری از رشد باکتری‌ها اضافه گردید. نمونه‌ها سپس در دستگاه انکوباتور در دمای ۲۸ برای رشد نگهداری شدند. پس از گذشت دوهفته و مشاهدهٔ رشد ویژگی کلونی‌ها با استفاده از استریومیکروسکوپ بررسی شد. و با استفاده میکروسکوپ نوری از روش رنگ‌آمیزی گرم برای باکتری‌ها و مشاهده شکل هیف قارچی برای قارچ‌ها پرداخته شد.

جلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها: برای اثبات وجود جلبک‌ها و سیانوباکتری‌های مؤثر در فرسودگی زیستی از تکنیک کشت‌دادن و مشاهده در زیر میکروسکوپ نوری استفاده شد. مقدار پنج میلی‌گرم ازنمونه به محیط‌های کشت برای تکثیر سیانوباکترها، جلبک‌ها به‌ترتیب شامل Blue Green

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

BBM (Bold Basal Medium)،BG-110 (Medium) اضافه شد. سپس، نمونه‌ها به‌مدت سی‌روز در اتاقک رشدی با دمای ۲۸ درجه‌سانتیگراد و روشنایی ممتد فلورسنت نگهداری شدند. پس از طی دورهٔ رشد با استفاده از میکروسکوپ نوری به مشاهدهٔ اثبات رشد و شکل آن‌ها پرداخته شد [14,15].

شناسایی گلسنگ‌ها: گلسنگ‌های دخیل در فرسودگی زیستی نمونه‌ها به سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران (IROST) انتقال و در آزمایشگاه موزهٔ گلسنگ‌های ایران با روش‌های مورفولوژیکی و تجزیه و تحلیل شیمیایی متابولیت‌های ثانویه شناسایی شدند. با استفاده از میکروسکوپ نوری و استریومیکروسکوپ روش‌های مورفولوژیکی مانند نحوهٔ رشد، شکل و رنگ تال گلسنگی، نوع روش تولید مثلی و محیط رشد برای شناسایی جنس و گونه‌های گلسنگ‌ها استفاده شد. از منابع معتبر علمی برای کلیدهای شناسایی شامل کتاب گلسنگ‌های امریکا (نویسنده اروین برادو و همکاران) و هرباریوم گلسنگ‌های ایران (سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران) استفاده شد. همچنین از تجزیه و تحلیل متابولیت ثانویه با استفاده از کروماتوگرافی لایه نازک (TLC) برای شناسایی استفاده شد. مواد و ترکیبات به‌دست‌آمده با مواد و ترکیبات کتاب شناسایی مواد گلسنگی (نویسنده: آقای زیگفرید هونک و همکاران) مقایسه و برای شناسایی گونه‌ها استفاده شد[16,17].

۳-۲-۲. بررسی کلی تجمع عوامل زیستی

پس از شناسایی عوامل فرسودگی زیستی، تجمع و حضور آن‌ها روی میراث جهانی گنبد قابوس با توجه به‌شکل هندسی (قرارگیری در ارتفاع مختلف، پایه، بدنه و مخروط) و تأثیر عوامل‌محیطی (جهت باد و بارندگی و زاویه تابش خورشید) مورد بررسی قرار گرفت.

۳. نتایج

عوامل میکروارگانیسمی و ماکروارگانیسمی اصلی که در فرسودگی زیستی بنای گنبد قابوس نقش داشتند، پس از مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی در جدول شماره ۱ بیان شده‌اند. به‌طور کلی، نُه گروه از ارگانیسم‌های عامل فرسودگی زیستی در این مطالعه شناسایی شدند که از جمله گروه‌های عمدهٔ آن‌ها می‌توان به باکتری‌ها، سیانوباکترها و جلبک‌ها، قارچ‌ها، گلسنگ‌ها، خزه‌ها و گیاهان، حشرات و حیوانات کوچک اشاره کرد. بسته به نوع نمونه‌گیری بر اساس مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی هرکدام از عوامل شناسایی‌شده شرح داده شده است و اثر آن بر فرسودگی زیستی بیان شده است.

جدول ۱: عوامل اصلی دخیل در فرسودگی زیستی میراث جهانی گنبد قابوس

Table 1: The main factors involved in the biodeterioration the Gonbad-e Qābus World Heritage

عامل زیستی Biological agent	گروه زیستی Biological group	جنس‌های غالب Dominant species	نوع فرسودگی Type of deterioration
میکروارگانیسم Microorganism	باکتری‌ها Bacteria	گرم منفی و گرم مثبت Gram negative and positive	اکسیداسیون و کاهش بستر، ترشح آنزیم‌ها Oxidation and reduction of substrate, secretion of enzymes
	سیانوباکترها و جلبک‌ها Cyanobacteria and algae	*Chlorella, Chroococcus*	پاتین‌های رنگی، شلاته‌کننده و اسیدها Color patinas, chelators and acids
	قارچ‌ها Fungi	*Penicillium* ،*Cladosporium*	نفوذ هیف، متابولیت‌های اسیدی Hyphal penetration, acidic metabolites
	گلسنگ‌ها lichens	*Lecanora*،*Caloplaca* و *Verrucari*	اسیدهای گلسنگ، نفوذ تال Lichen acids, tall penetration
ماکروارگانیسم Macroorganism	خزه‌ها و گیاهان Moss and plants	*Malva neglecta Wallr* و *Andreaopsida*	نفوذ ریزوئید و ریشه‌ها، تولید اسید Penetration of rhizoids and roots, acid production
	حشرات و جانوران Insects and animals	زنبورها، سوسک‌ها، پرندگان Bees, beetles, birds	شکاف، فراهم‌کردن رشد برای سایر عوامل Gaps, providing growth for other

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

۳ -۱. باکتری‌ها

نتایج کشت‌شده به روی محیط کشت‌های عمومی رشد هر دو گروه باکتری‌های گرم منفی و مثبت را نشان داد (شکل ۳ تصویر ۱و۲). بناهای تاریخی در محیط‌های مرطوب در درجهٔ اول دچار فرسودگی می‌شوند، زیرا اکتینوباکتری‌ها، جنس‌های استرپتومایسس و نوکاردیا بخش بزرگی از جمعیت را تشکیل می‌دهند و در کلونیزاسیون سطح دیوارها نقش مهمی دارند. بسیاری از گزارش‌ها نشان می‌دهد که باکتری‌های اکسیدکننده نیتروژن و اکسیدکنندهٔ گوگرد در بناهای تاریخی وجود دارند. [18]. باکتری‌های نیتریفیکاسیون شیمیولیتوتروف‌هایی هستند که اکسیدکنندهٔ نیتروژن یا دی‌اکسید نیتروژن برای انرژی هستند و آن‌ها را به اسید نیتریک و نیتروژن تبدیل می‌کنند. تیوباسیلوس توانایی تبدیل گوگرد معدنی به سولفات را به صورت اسید سولفوریک دارد [19].

۳ -۲. قارچ

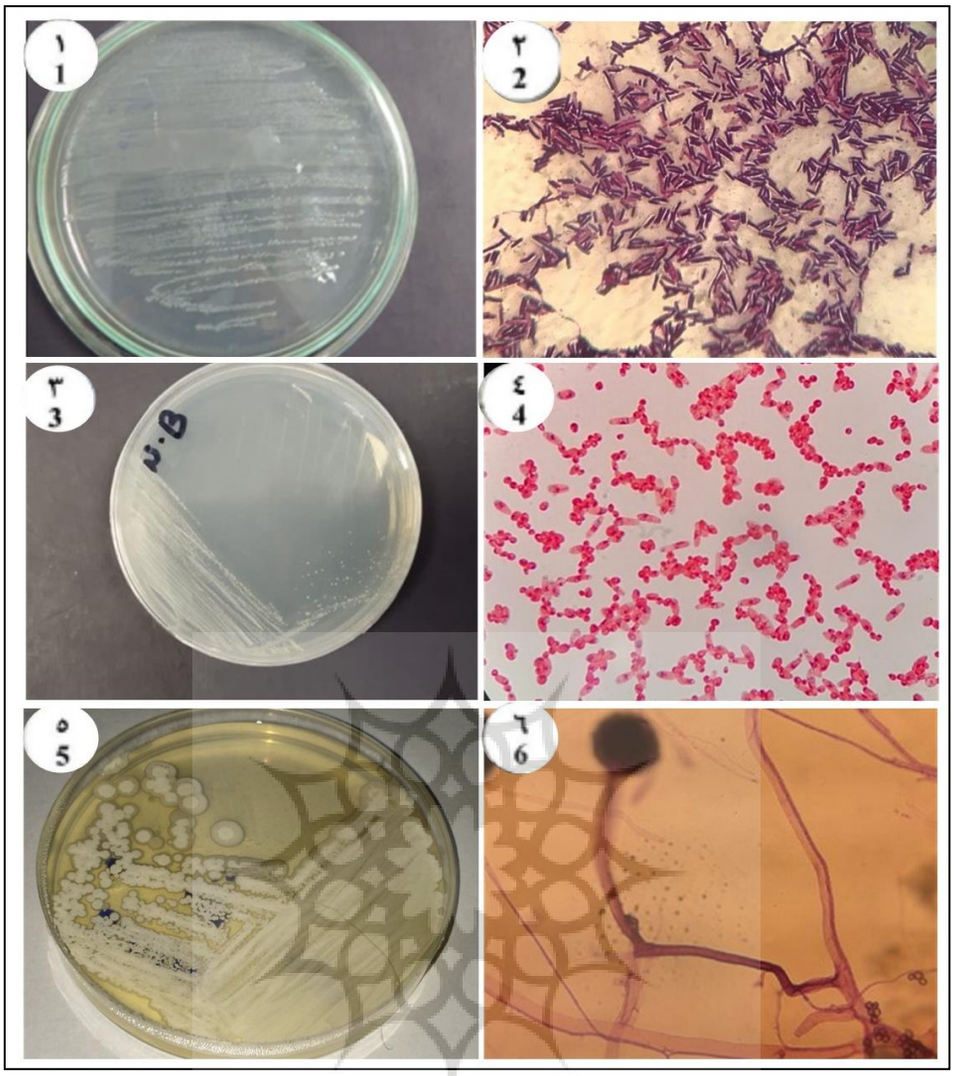
اثبات وجود قارچی‌های میکروسکوپی با استفاده محیط کشت و مشاهده هیف‌ها در زیر میکروسکوپ نوری انجام شد (شکل ۳). قارچ‌های میکروسکوپی سنگ و آجر متشکل از قارچ‌های رشته‌ای (هیفومایکتوس‌های که در همه‌جا یافت می‌شوند و کلئومایست‌ها) و قارچ‌های میکروکلونیایی (مخمرهای سیاه و قارچ‌های مریستمیکی شبه‌مخمر) است. اثرات قارچ‌ها ناشی از تأثیرات فیزیکی و شیمیایی است که اغلب در تخریب بستر هم افزایی دارند. نقش تخریب‌کنندهٔ آن‌ها توسط تولید اسید/قلیایی و شلاته‌کننده اکنون به‌خوبی پذیرفته شده است [20]. شایع‌ترین قارچ‌های یافت‌شده به روی بناهای تاریخی جنس *Cladosporium* و *Penicillium* و همچنین جنس‌های *deuteromycetes* مانند *Alternaria*، *Cladosporium* و *Trichoderma* هستند. آن‌ها می توانند از طریق نفوذ هیف‌ها، اثرات انبساط/ انقباض هیفی درون بستر ترک، درز و شکاف‌ها را بزرگ‌تر کرده یا به جداشدن بلورها شوند. عمل بیوشیمیایی قارچ‌ها می‌توانند از طریق ایجاد حفره و جابه‌جایی مواد معدنی و انحلال منجر به تغییرات میکروبیولوژیکی شوند. متابولیت‌های اسیدی (اگزالیک، استیک، سیتریک، و سایر اسیدهای کربنیک) مواد معدنی بستر را با یک اثر حل‌کننده فرسوده می‌کنند [21,22].

۳-۳. جلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها

رشد و اثر ارگانیسم‌های فتوتروفیک روی بنای گنبد قابوس با چشم غیرمسلح به‌وضوح قابل مشاهده است. همچنین نتایج رشد در محیط کشت و مشاهده در زیر میکروسکوپ نوری وجود این گروه از میکروارگانیسم‌ها را اثبات می‌کند. سیانوباکتری‌ها و کلروفیتا (جلبک‌های سبز) پیشگام در کلونیزاسیون بناهای تاریخی به‌حساب می‌آیند. این میکروارگانیسم‌ها به دلیل ماهیت فوتواتوتروفیک خود به‌راحتی در سطوح شکل می‌گیرند و باعث ایجاد پاتین‌های رنگی و ناسازگاری می‌شوند (شکل ۳). سیانوباکتری‌ها و جلبک‌ها، به‌عنوان فتوتروف، برای رشد نیازی به مواد آلی ندارند. آن‌ها می‌توانند بیوفیلم و پوسته‌هایی را روی بستر تشکیل دهند که بسته به شرایط‌محیطی و سویه‌های غالب، می‌توانند سیاه، خاکستری، قهوه‌ای، سبز یا قرمز باشند. جلبک‌های سبز عمدتاً در مناطق نمناک یافت می‌شوند. میکروارگانیسم‌های فتوسنتزیِ موجود در این بررسی تقریباً به‌طور کامل در بناهای تاریخی در فضای باز یافت شده‌اند[23]. رایج‌ترین گونهٔ موجود در بناهای تاریخی معمولاً متعلق به جنس‌های *Gloeocapsa*، *Phormidium*، *Chroococcus* و *Microcoleus* است. این جنس‌ها همه‌جاپذیرند و بنابراین حضور آن‌ها به‌طور کامل به یک بستر یا آب‌وهوای خاص لیتیک مربوط نمی‌شود. همچنین، می‌توان در نظر گرفت که *Chlorella*، *Stichococcus* و *Chlorococcum* جنس جلبک‌های سبز هستند که در بناهای تاریخی به‌وفور دیده می‌شوند (شکل ۴ تصویر۱و۲). با وجود این، نمی‌توان رابطه‌ای بین این جنس‌ها و یک بستر خاص یا آب‌وهوا برقرار کرد. جدا از فرسودگی مربوط به زیبایی‌شناختی آثار، این فتوترف‌ها ممکن است باعث فرسودگی مواد شیمیایی و فیزیکی از طریق ترشح عوامل شلاته‌کننده و اسیدهای حل‌کننده شوند[24,25].

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]



شکل ۳: میکروارگانیسم‌های عامل فرسودگی زیستی: ۱-۳) محیط کشت نوترینت آگار و مشاهده کلونی باکتری‌ها ۲-۴) باکترهای گرم مثبت و منفی بر اساس رنگ‌آمیزی گرم در زیر میکروسکوپ نوری؛ ۵) محیط کشت سابرود دکستروز آگار و کلونی رشدیافته قارچ ۶) هیف قارچ‌های میکروسکوپی در زیر میکروسکوپ

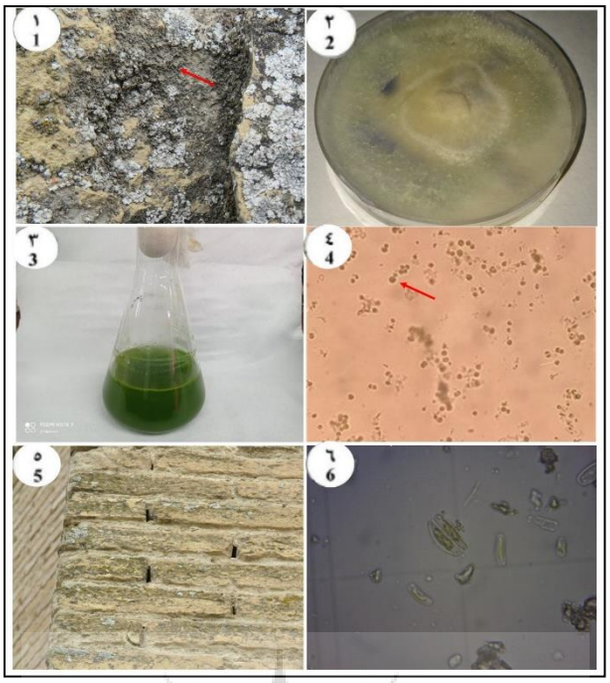
Fig. 3: Microorganisms causing biodeterioration: 1-3) The medium of the neutrino agar and observing the colony of bacteria; 2-4) gram positive and negative bacteria based on gram staining under light microscope;; 5) Subrod dextrose agar culture medium and grown mushroom colony; 6) hyphae of microscopic fungi under the microscope

٤-۳. گلسنگ‌ها

در نتایج تحقیق در بنای گنبد قابوس، شش جنس از گلسنگ‌های مخرب اصلی سطح آجری شناسایی شدند. ناحیهٔ تحتانی و همچنین ناحیهٔ میانی دیوار تقریباً به‌طور انحصاری توسط گلسنگ‌های *Caloplaca*، *Candelariella*، *Lecanora* و *Verrucaria* کلون شد، هرچند کلون *Protoparmeliopsis* نیز وجود داشت [10,15]. بسیاری از افراد رشد گلسنگ را روی سنگ خوشایند می‌دانند، اما گلسنگ می‌تواند مشکلی در پنهان‌کردن جزئیات ریزحکاکی‌ها ایجاد کند و مطمئناً به سازه آسیب می‌رساند (شکل ۳ تصویر ۳ و۴). آن‌ها همچنین با تولید مقادیر قابل توجهی از اسیدها باعث حملهٔ مستقیم شیمیایی می‌شوند. نشان داده شده است که "اسیدهای گلسنگ" باعث ایجاد صدمات در رابط کاربری سنگ/ گلسنگ می‌شوند. اسید اصلی تولیدشده اگزالیک است که به‌طور عمده به شکل گیری اگزالات کلسیم و فرم‌های مختلف هیدرات آن به صورت Whewellite و Wedellite منجر می‌شود (شکل ۴)[26].

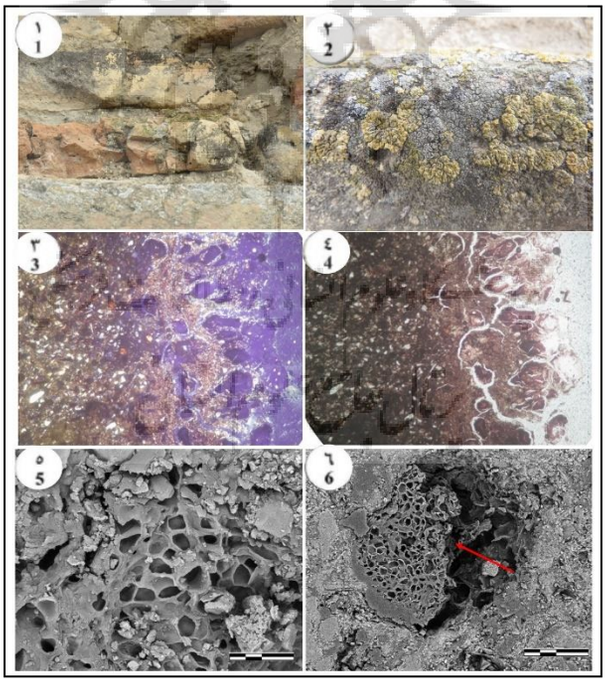
[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]



شکل ۴: میکروارگانیسم‌های عامل فروسودگی زیستی: ۱-۲) تصاویر قارچ‌های میکروسکوپی روی بنا و کلونی رشدیافته روی محیط کشت ؛ ۳) محیط کشت سیانوباکتر ۴) تصویر سیانوباکتری‌ها در زیر میکروسکوپ نوری ؛ ۵-۶) تصاویر جلبک‌ها روی بنا و در زیر میکروسکوپ نوری

Fig. 4: Microorganisms causing biodeterioration: 1-2) Images of microscopic fungi on the building and the grown colony on the culture medium; 3-4) lichens causing biodeterioration; 5-6) Algae images on the building and under the light microscope



شکل ۵: میکروارگانیسم‌های عامل فرسودگی زیستی: ۱-۲) گلسنگ‌های عامل فرسودگی زیستی روی سطح آجری؛ ۳-۴) تصویر میکروسکوپ پلاریزه از نفوذ و مینرالیزاسیون بستر آجری توسط گلسنگ‌ها ؛ ۵-۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نفوذ و ایجاد شبکهٔ هیفی با بستر آجری توسط گلسنگ‌ها با بزرگ‌نمایی ۲۰μm

Fig. 5: Microorganisms causing biodeterioration: 1-2) Lichens causing biodeterioration on the brick surface; 3-43-4) Polarized microscope image of penetration and mineralization of concrete bed by lichens; 5-6) 5-6) Electron microscope image of lichens penetration and creating hyphae network with brick substrates with 20 μm magnification.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

۵-۳. خزه‌ها و گیاهان

خزه‌ها در سطح بنای گنبد قابوس بسیار محدود پراکنش دارند و عمدتاً در حد فاصل آجرها و اغلب روی خاک و ملات رشد می‌کنند (شکل ۵ تصاویر ۱و۲). مهم‌ترین گونه‌های غالب *Andreaeopsida* است که بیشتر روی بسترهای سنگی و آجری مشاهده می‌شود. عمده دلیل رشد آن‌ها انباشت رطوبت باران در این سطوح است. زدایش خزه‌ها بسیار آسان بوده و به‌راحتی با یک کاردک می‌توان کل تال آن‌ها را از روی آجر برداشت. پیشنهاد می‌گردد کله خزه‌ها را به‌هنگام رطوبت و خیس‌شدن از روی آجرها برداشت کرد تا کمترین آسیبی به سطح بستر وارد شود. گونه‌های غالب گیاهی شامل *Polygonum rottboellioides, Malva neglecta Wallr, Tribulus terrestris, Alhagi maurorum Medik* هستند. گیاهان در حال رشد در برج تاریخی گنبد قابوس ممکن است زیبا و جذاب باشند اما حضور آن‌ها یکی از دلایل اصلی برای فرسودگی این بنای آجری با عظمت است. طرز استقرار گیاهان روی بناهای تاریخی آجری با توجه به عواملی چون محل استقرار، میزان دسترسی به آب و نوع گیاه متفاوت است (شکل ۵ تصاویر ۳و۴). گرد و غبار، مدفوع پرندگان و ضایعات و فاضلاب‌های انسانی به رشد دیگر گیاهان روی لایه بستر کمک می‌کند. علاوه‌بر آن، بقایای گیاهان پیشگام نیز می‌توانند بستر مناسبی را برای دیگر گیاهان فراهم کنند. گیاهان با ریشه‌ها و رشد خود مشکلات بزرگی برای حفاظتگران ایجاد می‌کنند. گیاهان علاوه‌بر ایجاد آسیب‌های زیباشناختی، با عمل مکانیکی ریشه‌های خود و واکنش شیمیایی از طریق تبادل یونی بین ریشه‌ها و کاتیون‌های قلیایی یا قلیایی خاکی یا تبخیر آهسته آب به دلیل وجود سایه پوشش‌های گیاهی باعث دگرگونی و تخریب بستر آجری می‌شوند[6,26].

۶-۳. حشرات و حیوانات

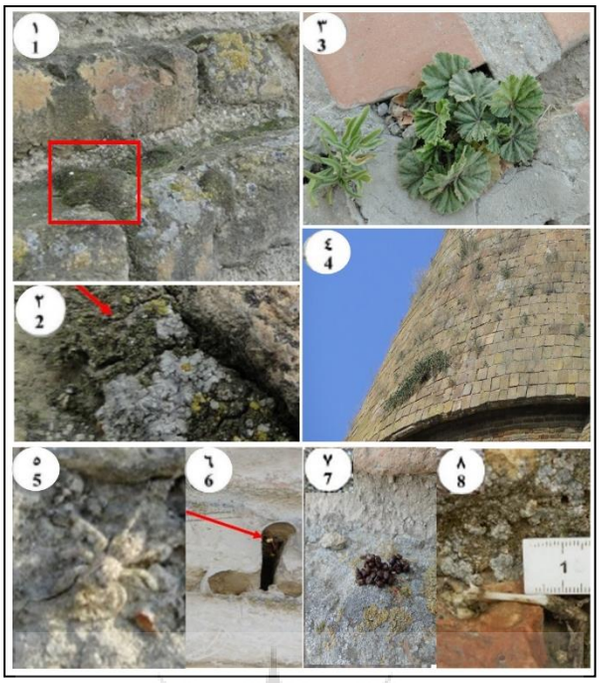
فضولات و لاشهٔ پرندگان به‌عنوان عامل غیرمستقیم در تحریک فرسودگی زیستی سطوح آجری در گنبد قابلوس نقش دارند (شکل ۵ تصاویر ۷ و ۸). تعداد فضولات در ترک هشتم و نهم بسیار زیاد است و در ردیف‌های بالاتری نیز قرار گرفته‌اند که نمی‌توان ابعادی از آن‌ها را یادداشت کرد. ابعاد نوشته‌شده در ترک هشتم و نهم مربوط به فضولاتی است که قابل دسترسی است. تعداد فضولات در ترک هشتم یعنی ترکی که محل قرارگیری دریچه در قسمت مخروطی است، بیش از سایر ترک‌هاست. پس از ترک هشتم بالاترین فضولات مربوط به ترک نهم است. یعنی می‌توان بیان نمود تعداد فضولات در قسمت شرق بنا بیش از سایر قسمت‌هاست [27–30]. بسیاری از موجودات کوچک وجود دارند که داخل حفرات، و شکاف‌های آجرها زندگی می‌کنند. در این میان، می‌توان به عنکبوت‌ها، مگس‌ها، پشه‌ها، زنبورها، مورچه‌ها و سوسک‌ها اشاره کرد (شکل ۵ تصاویر ۵ و ۶). در برج گنبد قابوس نیز حضور این عوامل به‌چشم می‌خورَد که با فعالیت خودشان موجب جابه‌جایی خاک و ملات میان آجرها شده و موجبات سستی آن‌ها را فراهم می‌کنند. ازطرفی، جابه‌جایی خاک موجب رشد بیشتر گیاهان علفی را فراهم می‌آورد. در شکل شمارهٔ ۴، به نمونه‌ای از فعالیت زنبورهای وحشی اشاره می‌شود که بسیار مخرب عمل می‌کنند[14,31,32].

۷-۳. تجمع عوامل زیستی

زاویهٔ تابش خورشید در مکانی که میراث گنبد قابوس قرار دارد، به قسمت‌های ضلع شرقی می‌تابد. بقیهٔ قسمت‌ها عموماً یا در قسمت سایه قرار گرفتند یا در معرض تابش خورشید کمتری قرار دارند. جهت باد و بارندگی در ضلع غربی بناست و بنابراین مقدار رطوبت بیشتری وجود دارد. در بررسی‌های به‌عمل‌آمده، عوامل زیستی مانند گلسنگ‌ها و جلبک‌ها در قسمت غربی و شمال‌غربی مخروط و پایه به دلیل وزش باد و بارندگی تجمع بیشتری دارند. در قسمت مخروط و پایه، پرندگان و حشرات حضور بیشتری دارند. حضور و تجمع گیاهان و خزه‌ها در قسمت شرقی پایه و مخروط با توجه زوایهٔ تابش خورشید بیشتر است.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]



شکل 6: مهم‌ترین ماکروارگانیسم‌های عامل فرسودگی زیستی بنای گنبد قابوس: ۱–۲)خزه‌ها در سطح بنا؛ ۳–۴) گیاه Malva neglecta Wallr و هجوم گیاهان علفی و چوبی به گنبد آجری بنا؛ ۵–۶) حشرات با لانه‌گزینی عامل فرسودگی زیستی محسوب می‌شوند؛ ۷–۸) فضولات پرندگان و بقایای اجساد آن‌ها روی بنا

Fig. 6: The most important microorganisms causing biodeterioration the Gonbad-e Qābus tower: 1-2) Moss on the surface of the building; 3-4) Malva neglecta Wallr plant and the invasion of herbaceous and woody plants to the brick dome of the building; 5-6) Insects are considered the cause of biodeterioration by implantation; 7-8) Bird droppings and the remains of their bodies on the building

٤. بحث

میراث جهانی گنبد قابوس به‌عنوان یکی از شاهکارهای آجری معماری دورهٔ اسلامی ایران در فضای روباز و در معرض رشد و تهاجم زیستی مختلفی قرار گرفته است[7,33]. آجرهای سازنده این بنا زمانی‌که در معرض شرایط خاص اقلیمی و موجودات زنده نیز قرار می‌گیرند ناپایدار گشته و متحمل تغییرات ریزساختاری و معدنی می‌شود که با عنوان فرسایش و هوازدگی یا فرسودگی زیستی شناخته می‌شوند. این پدیده باعث ازهم‌پاشیدگی ساختارهای مشبک کریستالی آجرها شده و سبب تغییرات یونی به‌منظور تشکیل مواد معدنی جدید با گرایش به ایجاد یک تعادل ترمودینامیکی با محیط اطرافشان می‌شود[34–36]. آجرهای سازنده بنا به دلیل داشتن تخلل زیاد و حفظ آب، محیط مستعدی را برای رشد و گسترش ارگانیسم‌های درگیر در فرسودگی زیستی فراهم می‌کند. ازجمله مهم‌ترین موجوداتی که بر روی بنای گنبد قابوس وجود دارد، میکروارگانیسم‌های مانند باکتری‌ها، سیانوباکترها، گلسنگ‌ها، جلبک‌ها و قارچ‌ها هستند. همچنین ماکروارگانیسم‌هایی نیز مانند پرندگان، خزه‌ها، گیاهان و حشرات هستند که با گذشت زمان سطوح تاریخیِ آجری را در گنبد قابوس خراشیده و تبدیل به خاک می‌کنند. مهم‌ترین آسیب‌های زیستی که این عوامل روی بستر آجری بنای گنبد گذاشته‌اند، شامل تغییر رنگ و ازبین‌بردن جنبهٔ زیبایی، نفوذ در بین ترک‌ها و شکاف‌ها و آسیب فیزیکی و تجزیهٔ بیوشیمیایی است. ماکروارگانیسم‌ها با تغییرات میزان رطوبت، کم و زیاد می‌شوند و بنابراین در تخریب مکانیکی اجزای بستر مؤثر هستند. به‌جرئت می‌توان گفت که در بین عوامل فرسودگی زیستی مختلف گلسنگ‌ها، گیاهان و خزه‌ها از مهم‌ترین دشمنان بستر آجری بنای گنبد قابوس موجود شناخته می‌شوند و به‌خصوص در قسمت بیرونی و روی سطح بنا بیشتر مشاهده می‌شوند. کنترل و پایش آن‌ها از

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

ضروری ترین علوم در حوزهٔ حفاظت و مرمت این آثار باستانی جهانی است. این ارگانیسم‌ها می‌توانند از طریق فرآیند مکانیکی توسط نفوذ هیف‌ها، ریسه و ریشه‌ها، انبساط و انقباض بدنه، تورم نمک‌های آلی و معدنی تولیدشده در اثر فعالیت آن‌ها، فرآیندهای شیمیایی مانند دفع و ترشح اسیدهای آلی مختلف و انحلال کانی‌ها سطوح آجرها را با آسیب‌های جدی مواجه کنند. در پژوهش‌های مشابهی که توسط شیرزادیان و همکاران در سال ۲۰۰۸ به‌دست آمده، نشان داده شده است که گیاهان و خزه‌ها از طریق مکانیسم‌های مکانیکی و شیمیایی باعث فرسودگی پل تاریخی زاینده‌رود شده‌اند[37]. البته طبق نتایج به‌دست‌آمده در برخی از پژوهش‌ها این ارگانیسم‌ها با کاهش ازدست‌رفتن عناصر متحرک در برخی نمونه‌ها می‌توانند از تخریب سطوح آجری در معرض فرسایش اتمسفری جلوگیری کنند، چون آن‌ها آب را درون خود حفظ کرده و زمان مرطوب‌بودن را افزایش داده و از کریستالیزاسیون جلوگیری می‌کند. بنابراین، آن‌ها بررسی نرخ قدرت تخریب را برای اثر فرسودگی زیستی پیشنهاد کرده‌اند[41–38]. حشرات (مانند زنبورها)، خزندگانی (مانند مارمولک) و پرندگان کوچک (مانند گنجشک و کبوتر) که در قسمت‌های برجسته یا خلل‌وفرج بنا لانه کرده و باعث آسیب به بنا می‌شوند. همچنین اجساد و فضولات این موجودات مواد تغذیه‌ای را برای رشد سایر ارگانیسم‌ها فراهم کرده و به این صورت در تشدید فرسودگی زیستی مؤثرند. نتایج مطالعاتی مشابهی هم که توسط سهرابی و همکاران ۱۳۹۹ به‌دست آمده است، نشان می‌دهد که جانورانی مانند حشرات، خزندگان و پرندگان از طرق لانه‌سازی، فضولات و حتی اجساد آن‌ها در فرسودگی زیستی روی بنای تخت جمشید تأثیرگذار هستند[42]. میکروارگانیسم‌های مانند باکتری‌ها و قارچ‌ها قادرند بیوفیلم‌هایی را روی سطح بستر آجری تشکیل دهند. آن‌ها اسیدهایی را ترشح می‌کنند که مواد معدنی تشکیل‌دهندهٔ بستر آجری را تجزیه کرده و به این صورت نقش مهمی در فرسودگی زیستی بنا ایفا می‌کنند. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که باکتری‌هایی مانند جنس‌هایی *Thiobacillus* یا *Nitrobacteria* با واکنش‌های اکسیداسیون و کاهش توسط آنزیم‌ها می‌توانند باعث بیومینرالیزاسیون در سطح بناهای تاریخی شده و در نتیجه باعث افزایش فرسودگی زیستی بشوند. وجود جنس‌های باکتری باسیلوس و قارچ‌های آلترناریا در ایجاد فرسودگی زیستی روی بناهای تاریخی اصفهان توسط مدرسی و همکاران ۲۰۱۴ نشان داده شده است. پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که قارچ‌هایی مانند *Aspergillus niger*، *Penicillium thjeshtissimum* و *Scopulariopsis brevicaulis* معمولاً روی سطح بناهای تاریخی وجود داشته و در فرسودگی زیستی نقشی مؤثر دارند. دیگر میکروارگانیسم‌ها مانند سیانوباکتری‌ها و جلبک‌ها از طریق تولید محصولات متابولیکی مانند رنگ‌دانه‌ها و پیگمنت‌ها ظاهری ناخوشایند را روی بنا به‌وجود می‌آورند و بیشتر باعث فرسودگی زیستی در حوضهٔ زیبایی‌شناختی می‌شوند[45–26,43]. مطابق اظهارات اورتگا–کالوو و همکاران (۱۹۹۵) جنس‌هایی مانند *Chlorella*، *Chlorococcum Klebsormidium* و *Trentepohlia* را می‌توان به‌راحتی در بناهای تاریخی واقع در اروپا، آمریکا و آسیا مشاهده کرد [50–46].

مقایسهٔ کلی پراکنش و تجمع عوامل فرسودگی زیستی دیوارهای بیرونی بنا در سه قسمت پی، بدنه و مخروط با توجه به جهت جغرافیایی نسبت‌به تابش خورشید، جهت باد و بارندگی و ارتفاع از سطح زمین نتایج متفاوتی همراه داشت. طبق پایش‌های انجام‌گرفته افزایش ماکروارگانیسم‌هایی مانند گیاهان و خزه‌ها در قسمت مخروط و پایهٔ ضلع شرقی بنا بیشتر بود. در قسمت ضلع شرقی مخروط تابش مستقیم آفتاب و نور کافی در دسترس است و در قسمت پایه به دلیل گرد و خاک و دانه‌های گیاهی نزدیک سطح زمین بیشتر بوده و می‌تواند از دلایل تجمع و پراکندگی بیشتر گیاهان و خزه‌ها باشد. حضور سبزرنگ جلبک‌ها و گلسنگ‌ها در ضلع شمال‌غربی بنا به دلیل رطوبت بیشتر در قسمت پایه و بدنه بنا بیشتر است. در این قسمت‌ها از بنا مقدار رطوبت بیشتری وجود دارد که فاکتور اصلی برای رشد محسوب می‌شود. حضور پرندگان و فضولات ناشی از آن‌ها در قسمت مخروط بنا به دلیل ارتفاع مناسب برای زندگی

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

بیشتر است. حشرات و جانوران کوچک در قسمت پایه به دلیل نزدیکی به سطح زمین حضور بیشتری دارند. آمار پراکندگی گونه‌های شناسایی‌شده در هر ترک بنا را می‌توان این‌طور بیان نمود که میزان رطوبت، نور آفتاب و ارتفاع قسمت‌های مختلف بنا از عواملی است که در افزایش یا کاهش تجمع عوامل فرسودگی زیستی تأثیر بسزایی دارد. به‌طور کلی، ارگانیسم‌ها در ارتباط با نیازها و خصوصیات متابولیکی که دارند، واکنش و اثرات متفاوتی بر بستر آجری میراث جهانی گنبد قابوس دارند. روی‌هم‌رفته، سطوح آجری بدنهٔ گنبد قابوس و دیواره‌های طولی آن هنوز در وضعیت خوبی به‌سر می‌بَرند، ولی به‌منظور جلوگیری از هرگونه فرسایش احتمالی باید برنامهٔ پاکسازی مناسبی مطابق با نوع عامل فرسایش زیستی انتخاب بشود که ضمن کارآمدبودن مطابق فعالیت ارگانیسم‌های زیستی نیز باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با همراهی پایگاه جهانی گنبد قابوس به اجرای طرح تخصصی و بررسی نقش ارگانیسم‌های مخرب در تشدید فرسودگی زیستی در سطوح آجری پایگاه‌های میراث جهانی گنبد قابوس پرداخته شد. طبق نتایج به‌دست آمده ماکروارگانیسم‌های مانند خزه‌ها، گیاهان، حشرات، خزندگان، پرندگان و میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌ها، قارچ‌های میکروسکوپی، سیانوباکتری‌ها و جلبک‌ها به‌عنوان مهم‌ترین عوامل فرسودگی زیستی شناخته شدند. این عوامل ازطریق مکانیسم‌های بیوشیمیایی و بیوفیزیکی به‌همراه عوامل غیرزیستی و محیطی باعث تخریب و فرسودگی بستر آجری بنا شده‌اند. مبارزهٔ منظم با حضور این عوامل باید در دستور کار قرار گیرد تا از ایجاد فرسودگی بیشتر این آجرها جلوگیری گردد. با نتایج این پژوهش پایگاه‌های میراث جهانی گنبد قابوس همواره به‌عنوان یک اتاق فکر در بررسی نقش مخرب عوامل فرسودگی زیستی و فرآیند کنترل آن‌ها به مدیریت سایر پایگاه‌های ملی (قلعه رودخان و ...) و جهانی (گنبد سلطانیه) درگیر با مشکلات ناشی از عوامل فرسودگی کمک کند و به‌عنوان یکی از دستاوردهای علمی در راستای اجرای اصل مهم حفاظت پیشگیرانه در حوزهٔ میراث فرهنگی قدم بردارد تا با جمع‌آوری و مستندسازی از آن‌ها و مطالعات آزمایشگاهی در آیندهٔ نزدیک نرخ فرسایش و راه‌های نوین علمی برای کنترل و مبارزه آن را تدوین گردد. برای مثال، میزان خسارت ارگانیسم‌ها در این بناها چقدر است و اینکه آیا باید در بنا حذف یا نگهداری شوند و در زمینهٔ حفاظت از این آثار نفیس و گرانقدر ایران زمین پیشتاز باشد.

سپاسگزاری

نویسندهٔ نخست و نویسندهٔ مسئول در این مقاله از کارشناسان فنی و حراست محترم پایگاه میراث جهانی گنبد قابوس برای تسهیل شرایط بازدید و اجرای پروژهٔ رسالهٔ دانشگاهی با عنوان (شناسایی قارچ‌های گلسنگی در سطوح آجری و امکان‌سنجی پاکسازی آن‌ها در میراث جهانی گنبد قابوس) کمال قدردانی و تشکر را دارند.

References

[1] 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.

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

[3] 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.

[4] Saiz-Jimenez C. Biodeterioration of Stone in Historic Buildings and Monuments. Mycotoxins, Wood Decay, Plant Stress, Biocorrosion, and General

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

Biodeterioration, Springer US; 1994, p. 587–604. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9450-2_45.

[5] Palla F, Barresi G. Biotechnology and conservation of cultural heritage. Biotechnology and Conservation of Cultural Heritage 2017:1–100. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46168-7.

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

[7] Iranian Cultural Heritage Handicrafts and Tourism Organization. Nomination of Gonbad-e Qabus for Inscription on the World Heritage List 2011:1–360.

[8] Denmark - UNESCO World Heritage Centre n.d. https://whc.unesco.org/en/statesparties/dk (accessed March 15, 2021).

[9] 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.

[10] 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. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.12.012.

[11] Sanchez-Silva M, Rosowsky D V. Biodeterioration of Construction Materials: State of the Art and Future Challenges. Journal of Materials in Civil Engineering 2008;20:352–65. https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:5(352).

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

[13] Ali HE, Khattab SA, Al-Mukhtar M. The effect of biodeterioration by bird droppings on the degradation of stone built. Engineering Geology for Society and Territory - Volume 8: Preservation of Cultural Heritage 2015:515–20. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3_91.

[14] 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.

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

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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 Biodegradation 2004;53:13–24. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2003.07.003.

[19] Bielefeldt A, Gutierrez-Padilla MaGD, Ovtchinnikov S, Silverstein J, Hernandez M. Bacterial Kinetics of Sulfur Oxidizing Bacteria and Their Biodeterioration Rates of Concrete Sewer Pipe Samples. Journal of Environmental Engineering 2010;136:731–8.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000215.
[20] Gu JD, Ford TE, Berke NS, Mitchell R. Biodeterioration of concrete by the fungus Fusarium. Int Biodeterior Biodegradation 1998;41:101–9. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(98)00034-1.
[21] 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.
[22] 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 Biodegradation 2003;51:83–92. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00129-9.
[23] Wakefield RD, Jones MS. An introduction to stone colonizing micro-organisms and biodeterioration of building stone. Quarterly Journal of Engineering Geology 1998;31:301–13. https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1998.031.P4.03.
[24] Kovacik L. Cyanobacteria and algae as agents of biodeterioration of stone substrata of historical buildings and other cultural monuments. Proceedings of the New Millenium International Forum on Conservation of Cultural Property, Daejeon, Korea 2000:44–58.
[25] Macedo MF, Miller AZ, Dionísio A, Saiz-Jimenez C. Biodiversity of cyanobacteria and green algae on monuments in the Mediterranean Basin: An overview. Microbiology (N Y) 2009;155:3476–90. https://doi.org/10.1099/mic.0.032508-0.
[26] 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.
[27] Allsopp C, Allsopp D. An updated survey of commercial products used to protect materials against biodeterioration. Int Biodeterior Biodegradation 2001;48:243. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00088-9.
[28] Jain KK, Mishra AK, Singh T. Biodeterioration of stone: A review of mechanisms involved. Recent Advances in Biodeterioration And 1993;1:323–54.
[29] Nyuksha JP. The biodeterioration of papers and books. Recent Advances in Biodeterioration and Biodegredation: Volume 1: Biodeterioration of Cultural Heritage 1993:1–88.
[30] Di Carlo E, Barresi G, Palla F. Biodeterioration. Biotechnology and Conservation of Cultural Heritage 2017:1–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46168-7_1.
[31] Cardamone JM. Biodeterioration of Wool by Microorganisms and Insects. ACS Symposium Series 2001;792:263–98. https://doi.org/10.1021/bk-2001-0792.ch016.
[32] Viitanen H. Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions. Mater Struct 1994;27:483–93. https://doi.org/10.1007/BF02473453.
[33] Saiz-Jimenez C. Biodeterioration of Stone in Historic Buildings and Monuments. Mycotoxins, Wood Decay, Plant Stress, Biocorrosion, and General Biodeterioration, Springer US; 1994, p. 587–604. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9450-2_45.
[34] Izzati M, Hani A, … SS-IC, 2019 undefined. Strength and water absorption properties of lightweight concrete brick. IopscienceIopOrg n.d. https://doi.org/10.1088/1757-899X/513/1/012005.
[35] Wijffels T, Nijland TG. Deterioration of historic brick masonry due to combined gypsum, ettringite and thaumasite: a case of study. 2004.
[36] 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 Biodegradation 2018;134:31–8. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.07.016.
[37] Shirzadian S, Uniyal PL. Biodeteriorative impacts on bridges over Zayand-e-Rood river (Iran): Role of mosses and their

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]

control measures. J Sci Ind Res (India) 2008;67:377–80.

[38] 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 Biodegradation 2018;129:10–2. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.12.007.

[39] Welton RG, Silva MR, Gaylarde C, Herrera LK, Anleo X, De Belie N, et al. Techniques applied to the study of microbial impact on building materials. Mater Struct 2005;38:883–93. https://doi.org/10.1007/bf02482255.

[40] Learner T. Modern paints. Scientific Examination of Art: Modern Techniques in Conservation and Analysis 2005:137–51. https://doi.org/10.17226/11413.

[41] Palla F, Barresi G. Biotechnology and conservation of cultural heritage. Biotechnology and Conservation of Cultural Heritage 2017:1–100. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46168-7.

[42] Sohrabi M, et al. The field monitoring of influential biodeteriogenic agents on the historic rock surfaces in Persepolis-UNESCO World Heritage Site. Journal of Research on Archaeometry 2020;6:175–92. https://doi.org/10.29252/jra.6.1.175.

[43] 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 Biodegradation 2001;48:202–8. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00082-8.

[44] 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;63:836–43. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.05.006.

[45] Seaward MRD. Lichens as agents of biodeterioration. Recent Advances in Lichenology: Modern Methods and Approaches in Biomonitoring and Bioprospection, Volume 1, Springer India; 2015, p. 189–212. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2181-4_9.

[46] 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.

[47] 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.

[48] 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 and Built Environment 2016;25:826–37. https://doi.org/10.1177/1420326X15587178.

[49] 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.

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

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.65]