



A Study of the Destructive Roles of Endolithic Lichen *Verrucaria buschirensis* s. lat., Family Verrucariaceae on the World Heritage Site of Persepolis

Mahsa Esmaeillou ¹, Mohammad Sohrabi * ², Hamideh Ofoghi ³

¹. Ph.D. Candidate in Microbiology, Research Groups of Environmental and Industrial Biotechnology, Biotechnology Department, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, IRAN

². Assistant Professor, Research Groups of Environmental and Industrial Biotechnology, Biotechnology Department, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, IRAN

³. Associate Professor, Research Groups of Medical and Pharmaceutical Biotechnology, Environmental and Industrial Biotechnology, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, IRAN

Received: 29/01/2022

Accepted: 20/06/2022

Abstract

The establishment of lichens on stone surfaces can cause serious damages to the surface. While the harms by the epilithic settlement is restricted to visual damages, the endolithic settlement will also bring about serious damage to the depths of the rock and will form small holes and fractures within the rock, which in turn will allow other organisms to penetrate and prompt further impairments. Considering the historical importance of the surfaces of carved stones at the world heritage site of Persepolis and the damages induced by lichens in these valuable works, the purpose of this study was to investigate the destructive role of lichens of the Verrucariaceae family at this legendary site. In this study, thin sections were prepared to identify the type and texture of the rock in terms of petrography. In order to detect organic substances on the rock surface as well as their color difference, pyrographic and FTIR studies were conducted. Additionally, using an electron microscope and an optical stereomicroscope, the damages caused by biopits resulting from lichen thallus in the stone were examined. In conjunction with petrographic studies, the type and origin of the stones as well as their vulnerability were identified. Based on the FTIR analysis, it was determined that the stone's color changed from gray to white due to calcium oxalate precipitation. The results of electron microscope imaging showed that the establishment of lichen (*Verrucaria buschirensis* s.lat) of the Verrucariaceae family and the penetration of hyphae into the stone severely damaged the surface of the stones at Persepolis, and any neglect will result in further irreparable damages.

Keywords: Biodeterioration, FTIR, petrography, biopit, stone damages.

*Corresponding Author: sohrabi@irost.org

Introduction

When beauty and grandeur continued to rule for thousands of years, durable materials such as stone were most widely used [1]. Outdoor unsheltered historical monuments are exposed to much more erosive factors than those in indoor exposure environments. Consequently, the deterioration of building stones causes irreparable damage to our cultural heritage. Erosion of rocks and their transformation into soil is a natural process. However, the occurrence of this process on the surface of stone buildings and historical monuments precipitates irreparable damages [2]. Microorganisms are also an important factor apart from chemical and physical factors. The placement of lichens on the surface of the stone causes serious damages to the bedrock [3]. The genus, which is classified in the family Verrucariaceae, grows mainly on rocks. They grow epilithically or endolithically in the rock surface layers and show different growth patterns and biodegradations [4]. Damage to the bedrock depends on the type of growth. Epilithic growth causes visual damages, whereas endolithic growth is associated with deep-seated damages [5]. The purpose of this study is to examine the role of dominant lichens at Persepolis and to evaluate the extent of damages caused by the establishment of *Verrucaria buschirensis* calcareous lichens. Dealing with these factors requires their identification and thorough analysis. The present study is an introduction to the study of endolithic lichens and their destructive effects in Iran to provide the basis for further research.

Material and methods

We scanned 14 points in different parts and buildings of the Persepolis World Heritage Site in several stages. The samples were transferred to Iranian Cryptogamic Herbarium based in the Iranian Research Organization for Science and Technology for detailed studies. In this study, petrographic analysis of stone samples was used to determine the minerals in the stone as well as its origin, biomineralization, and fossil content. FTIR studies were used to identify the organic matter present on the rock surface and to investigate the color change of rocks from gray to white around biopits as well as to observe calcium oxalate deposition on rocks and changes in their color. Also, the stereomicroscope was applied to examine the stones and select suitable samples for Scanning Electron Microscopy (SEM). Thus, we examined the damages caused by lichen talus formation inside the rock and biopits.

Results

Through images taken from 14 different points, the number of tallus and the damages were estimated. With more than 300 tallus, the Hadish Palace showed the highest rate of colonization. At the Apadana Palace, an average of 100 tallus were spotted and photographed. Petrographic studies determined the genus and origin of rocks and their vulnerability. The studied samples obtained from the mines are similar to the samples used in the palaces, all being of the micro-limestone type. Therefore, the examined results can be compared with instances from outside the complex and from inside the palaces. On the other hand, because the Verrucariacea family has a great tendency to grow and colonize in limestone, the material of these rocks has provided the ground for colonization and biomineralization. FTIR findings (Fig1) showed an increase in calcium oxalate deposition due to the change in the color of rocks from gray to white. As a result of electron microscopy, we see that the endolithic lichen *Verrucaria buschirensis* and the hyphae growing in the stones cause serious damages to their surfaces, so regular conservational measures are vital. The SEM study shows that hyphae have penetrated the pores of the rock. Any negligence will result in further irreparable damages. According to field observations, the points with the highest contamination with the Verrucariacea family were the Hadish Palace, the Apadana Palace, the Incomplete Gate, and the Palace of Hundred Columns as can be seen in Fig. 2. In terms of distribution, the highest rate of scattering of intracellular lichens and damage to the endolithic species of *Verrucaria buschirensis* concerns the Hadish Palace, where about 49% of the biopits resulting from the growth of this species were observed. The Apadana Palace with 16% colonization and distribution, and the walls with 8% have suffered the most damages from the presence of lichens of the Verucariaceae family.

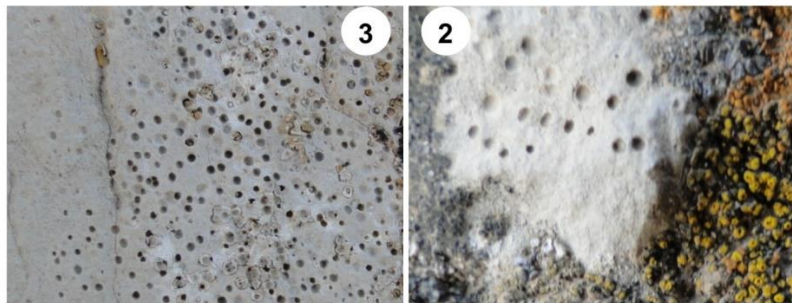
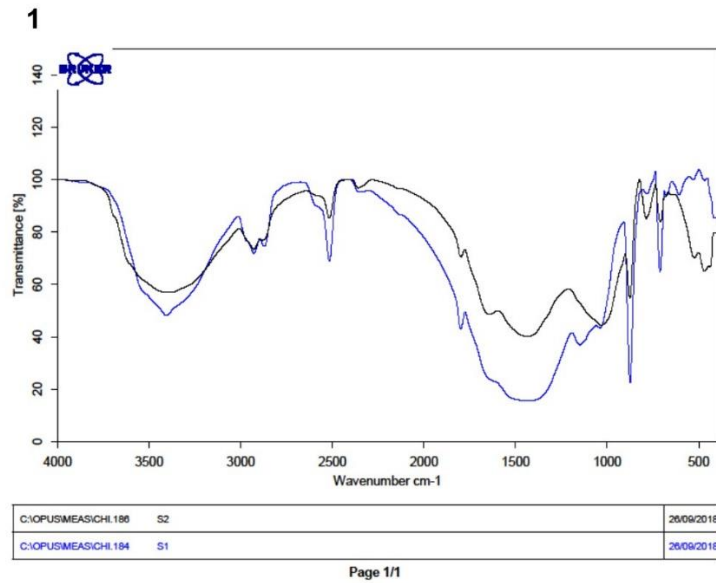


Fig1: Analyzing color changes in biopit areas using FTIR: 1) The results of FTIR show the presence of calcium carbonate salt (with index peaks in the areas of 1421 cm-1, and 771 cm-1), which confirms the results of a slight increase in the presence of calcium carbonate salt in the white areas. 2) White areas around the biopit with increasing calcium carbonate deposits; 3) Gray areas around the biopit.

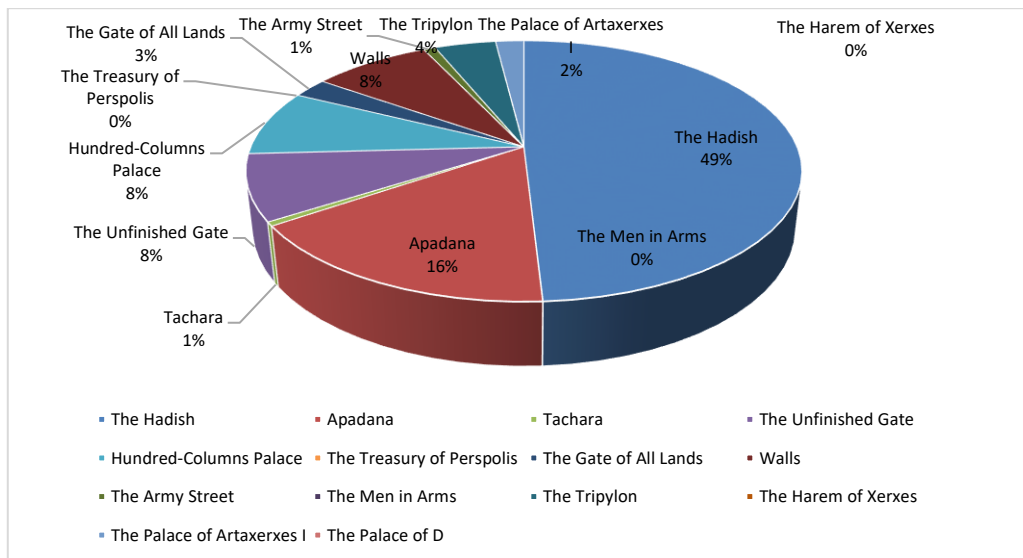


Fig2: Areas where colonization of *Verrucaria buschirensis* s. lat and biopits have been observed. The highest number of *Verrucaria* invasions was observed in the Hadish and Apadana palaces, which suffered the most damage. In the palace of Hundred Columns damages are moderate. The rate is low in the Gate of Nations and the Unfinished Gate and reaches zero percent in the Thatcher Palace and the Treasury.

Conclusions

Considering the historical value and importance of the Persepolis historical complex, its preservation is very necessary and vital as this historical complex has undergone many changes and damages over time. One of the most important damages to this complex is biodegradation, in which various biological factors are involved. Among these, the role of endolithic organisms is very destructive and noteworthy. The results of field observations and the approximate extent of the presence at Persepolis, stones colonized with Verrucariaceae lichens exhibit different types of damages, based on macroscopic and microscopic analyses. As lichen grows on the surface of the rock, it is visible in the form of dark spots, which is the primary damage visible to the naked eye. This damage is deep in the rock and according to electron microscopy studies, the penetration of hyphae and lichen filaments into the depths of the rock is not visible without microscopic studies, though it is far more dangerous because it causes very minor fractures inside the rock and by establishing other biological factors, it provides the ground for further penetrations and deep erosion of rocks. Secondary damage is caused by the death and evacuation of this lichen. The unique and endolithic growth of this family causes the formation of biopits in the form of small cavities in the rock surfaces. In addition to extensive damages, they provide shelter for the growth of other factors such as lichens as well as insect eggs. With the growth of various factors, the balance of chemicals in the involved areas is disturbed, and with the increasing deposition of calcium carbonate, it changes the color of the rock from gray to white. Each of these damages, in turn, is irreparable and irreversible and should not be ignored. It is hoped that this paper as an introductory contribution to the study of limestone rock microorganisms and the damages caused by them will pave the way for further research. Finally, it is noteworthy that a team consisting of a combination of biological and archeological specialties will certainly lead to a better analysis of the related topics.

References

- [1] Pangallo D, Bučková M, Kraková L, Puškárová A, Šáková N, Grivalský T, et al. Biodeterioration of epoxy resin: A microbial survey through culture-independent and culture-dependent approaches. *Environ Microbiol.* 2015;17(2):462–79 .
- [2] Zamani N, Ghezelsoufi M, Ahadi AM, Zamani M. Application of Microbial Biotechnology in Conservation and Restoration of Stone Monument. 2017;4(2):587–92 .
- [3] Gadd GM, Rhee YJ, Stephenson K, Wei Z. Geomycology: Metals, actinides and biominerals. *Environ Microbiol Rep.* 2012;4(3):270–96 .
- [4] Sanz M, Oujja M, Ascaso C, Pérez-Ortega S, Souza-Egipsy V, Fort R, et al. Influence of wavelength on the laser removal of lichens colonizing heritage stone. *Appl Surf Sci.* 2017;399:758–68 .
- [5] Pinna D, Salvadori O, Tretiach M. An anatomical investigation of calcicolous endolithic lichens from the Trieste karst (NE Italy). *Plant Biosyst.* 2013 Jan;132(3):183–95.



بررسی نقش مخرب گل‌سنگ درون‌سنگی (*Verrucaria buschirensis* s.lat) خانواده Verrucariaceae در میراث جهانی تخت‌جمشید

مهسا اسماعیل لو^۱، محمد سهرابی^{۲*}، حمیده افقی^۳

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

۲. استادیار، گروه زیست فناوری صنعتی و محیط زیست، پژوهشکده زیست فناوری، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۳. دانشیار، گروه زیست فناوری پزشکی و صنایع دارویی، پژوهشکده زیست فناوری، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

چکیده

گل‌سنگ‌ها با استقرار خود در سطوح سنگی باعث آسیب‌های جدی در سطح سنگ می‌شوند. استقرار برون‌سنگی آسیب‌های بصری ایجاد می‌کند، ولی استقرار درون‌سنگی علاوه بر آسیب‌های بصری باعث آسیب‌های جدی در اعماق سنگ و ایجاد حفرات و شکستگی‌های جزئی در سنگ می‌شود که زمینه را برای نفوذ سایر ارگان‌سیم‌ها، فراهم می‌نماید. با توجه به اهمیت تاریخی سطوح سنگ‌های نقش‌دار در میراث جهانی تخت‌جمشید و آسیب‌های ناشی از گل‌سنگ‌های درون‌سنگی به این آثار ارزشمند، هدف این پژوهش بررسی نقش مخرب گل‌سنگ‌های درون‌سنگی خانواده Verrucariaceae در این سایت میراث جهانی است. در این مطالعه، برای تشخیص جنس و بافت سنگ از لحاظ پتروگرافی مقاطع نازکی تهیه گردید. برای تشخیص مواد آلی موجود در سطح سنگ و تغییر رنگ بین آن‌ها از مطالعات پتروگرافی و FTIR استفاده شد. همچنین با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و استریومیکروسکوپ نوری آسیب‌های ناشی از بایوپیت‌های ناشی از تال گل‌سنگ درون‌سنگی بررسی گردید. با مطالعات پتروگرافی، جنس و منشأ پیدایش سنگ‌ها و میزان آسیب‌پذیری آن‌ها تعیین گردید، یافته‌های FTIR علت تغییر رنگ سنگ‌ها از خاکستری به سفید را افزایش رسوب اجزالات کلسیم نشان داد. نتایج حاصل از تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که استقرار گل‌سنگ درون‌سنگی (*Verrucaria buschirensis* s.lat) خانواده Verrucariaceae و نفوذ هیفاها به داخل سنگ آسیب جدی به سطوح سنگ‌های میراث جهانی تخت‌جمشید وارد می‌کند و هرگونه غفلت در این زمینه آسیب‌های جبران‌ناپذیر بیشتری بر نقوش ظریف میراث جهانی تخت‌جمشید وارد خواهد کرد.

واژگان کلیدی: فرسودگی زیستی، FTIR، پتروگرافی، بایوپیت، آسیب‌های سنگی.

* نویسنده مسئول مکاتبات: جاده قدیم کرج، 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 سنگی که در محیط‌های رو باز قرار دارند، در مقایسه با آثاری که در محیط‌های سرپوشیده مستقرند، تحت تاثیر عوامل فرساینده مختلفی قرار دارند [1]. فرسایش سنگ‌ها و صخره‌ها و تبدیل آن‌ها به خاک برای تکامل حیات در کره زمین یک فرایند طبیعی حیات است؛ اما وقوع این فرایند در سطح بستر بناها و یادمان‌های تاریخی سنگی خسارت‌های جبران‌ناپذیری به جای گذاشته است [2]. تخریب سنگ‌ها و صخره‌ها با دخالت و جابه‌جایی آن‌ها در محل استقرارشان آغاز می‌شود و با دخالت بشر و حفاری و کنده‌کاری‌های مختلف در سطوح آن‌ها تسریع می‌گردد. در این زمینه عوامل مختلفی مانند باد، نور خورشید، تغییرات دما و باران نقش دارد و باعث فرسودگی شیمیایی و فیزیکی سنگ می‌شود [3]. تخریب اولیه با کاهش مقاومت ماتریکس یا خمیره سنگ آغاز می‌شود و پس از آن تخریب شیمیایی ترکیبات معدنی موجود در سنگ اتفاق می‌افتد. تخریب شیمیایی شامل فرایندهایی نظیر اکسیداسیون، هیدراتاسیون هیدراسیون، تجزیه کربنات‌ها و انحلال عناصر موجود در ترکیبات سیلیکاتی است. یکی دیگر از تهدیدات جدی که آثار سنگی در محیط‌های باز را تحت شعاع قرار می‌دهند، استقرار عوامل زیستی و موجودات زنده است [4]. در این میان، حضور و استقرار گل‌سنگ‌ها در سطوح آثار تاریخی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گل‌سنگ‌های سنگ‌زی به دو گروه برون‌سنگی (Epilithic) و درون‌سنگی (Endolithic) تقسیم می‌شوند [5]. تصور می‌شود که گل‌سنگ‌های برون‌سنگی معمولاً به درون بستر خود نفوذ نمی‌کنند و آسیب‌های وارد شده توسط آن‌ها، آسیب‌های بصری است و این در حالی است که گل‌سنگ‌های درون‌سنگی یا اندولیتیک با استفاده از ریشه‌های خود به قسمت‌های درونی سنگ‌ها نفوذ می‌کنند و باعث ایجاد حفره و فرسوده شدن اعماق سنگ می‌شوند [6]. رشد اندولیتیک به زیرمجموعه‌های کاماندولیتیک (Chasmoendolithic)، کریپتو اندولیتیک (Crypto Endolithic) و یواندولیتیک (Euendolithic) تقسیم می‌شوند [7]. در رشد کاماندولیتیک گل‌سنگ‌ها،

میکروارگانیزم در میان دانه‌های معدنی بستر نفوذ می‌کند و پنهان می‌شود، درحالی‌که در رشد کریپتواندولیتیک تال گل‌سنگ در حفرات ازیبش ایجاد شده در سنگ رشد می‌کند و معمولاً واکنشی با سطح سوپسترا ندارد [8]. گل‌سنگ‌هایی که رشد اندولیتیک حقیقی یا یواندولیتیک دارند، به‌صورت فعال سنگ را تجزیه کرده و به داخل آن نفوذ می‌کنند و بنابراین بخشی از سلول‌های تال خود را در بستر سنگی خود ادغام می‌نمایند. اگرچه گل‌سنگ‌های کریپتواندولیتیک و کاماندولیتیک در انواعی از بسترهای سنگی نظیر ماسه سنگ و گرانیت رشد می‌کنند، رشد به صورت یواندولیتیک و حلالیت بستر، محدود به حضور کلسیت در بستر است [9]. سنگ‌های آهکی و رسوبی که دارای کلسیت بالا هستند و عمدتاً در ساخت بناهایی مانند تخت‌جمشید استفاده شده است، بستر مناسبی برای جذب گل‌سنگ‌های درون‌سنگی است [10]. در این مطالعه، به آثار مخرب گروهی از گل‌سنگ‌های درون‌سنگی با عنوان خانواده Verrucariaceae پرداخته شده است. حضور این خانواده از گل‌سنگ‌ها، به‌علت ایجاد بیوپیت (Biopits)‌هایی در سطح سنگ و فراهم‌نمودن بستری برای رشد سایر ارگانیزم‌ها در بحث فرسودگی زیستی از اهمیت بسزایی برخوردار است. گونه‌های خانواده Verrucariaceae، که به‌طور عمده روی سنگ رشد می‌کنند، خانواده بزرگی از گل‌سنگ‌های درون‌سنگ‌زی (Endolithic) هستند. تنوع آن‌ها در بسترهای سنگی آهکی قابل توجه بوده و یکی از عوامل اصلی فرسودگی زیستی سنگ به‌شمار می‌آید. روابط تبارشناسی بین گونه‌های این خانواده پیچیده است و معمولاً طبقه‌بندی مورفولوژی یک آن‌ها با داده‌های مولکولی همخوانی ندارد [11]. گونه‌های این خانواده می‌توانند در بسترهای مختلفی نظیر خاک، چوب و حتی روی سایر گل‌سنگ‌ها رشد کنند، ولی نوع سنگ‌زی آن‌ها عمدتاً در محیط‌های خشک بیابانی، کوهستانی، جنگلی و گهگاه در مناطق ساحلی جزر و مدی زندگی می‌کنند [12]. در حال حاضر، گل‌سنگ درون‌سنگی شناسایی شده از تخت‌جمشید متعلق به یک کمپلکس گونه‌ای به نام

وارد شده است. چراکه اولین گام در کنترل این عوامل فرساینده، معرفی عامل و شناسایی آن و مطالعه دقیق رفتار گونه‌هاست.

۲. پیشینه پژوهش

طی چند دهه گذشته، علم زیست‌فناوری روش‌های کاربردی و خلاقانه‌ای برای تشخیص فرسودگی زیستی و حفاظت و مرمت میراث فرهنگی ارائه نموده است که نقطه شروع این مطالعات در علم زیست‌فناوری، در سال ۲۰۰۳ با کنگره بین‌المللی زیست‌شناسی مولکولی و میراث فرهنگی در اسپانیا رقم خورد [15]. پس از آن، تاریخ مطالعات گسترده‌ای در زمینه زیست‌شناسی فرسودگی زیستی صورت گرفت. در این میان، با توجه به آثار مخربی که گلسنگ‌های درون‌سنگی به‌ویژه گلسنگ‌های متعلق به خانواده Verrucariaceae روی آثار و بناهای تاریخی دارند، مطالعات متعددی در سراسر جهان جهت کنترل و حذف این عوامل زیستی صورت پذیرفته است. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۰۳ جوزف هالدا و همکاران انجام دادند، به مطالعه تاکسونومیک و تاریخچه شناسایی گونه‌های درون‌سنگی از جنس Verrucariaceae با عنوان *Protobagliettoa* و *Bagliettoa* پرداخته‌اند، و با توجه به شکل involucrellum جنس *Bagliettoa* را در خانواده Verrucariaceae متمایز کردند [16].

در سال ۲۰۱۴، یوزان و همکاران، در مقاله‌ای به مطالعه تاکسونومی و تبارشناسی خانواده Verrucariaceae پرداختند، آن‌ها با اشاره به نقش تخریبی این خانواده در فرآیند فرسودگی زیستی، اهمیت شناسایی و طبقه‌بندی آن با روش‌های مولکولی را مطرح کردند و کلیدی برای دوازده گونه شناخته‌شده ارائه دادند، تا به گلسنگ‌شناسان و بوم‌شناسان کمک کند که گونه‌هایی از این گلسنگ‌های اندولیتیک را شناسایی کنند [17].

به‌تازگی، در سال ۲۰۲۰، پوکالا و همکاران، تاکسونومی گونه‌ای از Verrucariaceae که با اسپوره‌های بزرگ، پریتسیوم‌های باقی‌مانده در سنگ و تال نازک کم‌رنگ را در فنلاند شناسایی کردند [18].

Verrucaria buschirensis s.lat. است و دارای قرابت مورفولوژیکی زیادی به تنها گونه گزارش‌شده درون‌سنگی در جنوب ایران دارد و *Verrucaria buschirensis* s.lat. در واقع گونه *Verrucaria buschirensis* s.lat. [J. Steiner در مفهوم محدود خود یک گونه درون‌سنگی از خانواده Verrucariaceae است که بیشتر روی سنگ‌های نومولیتی و رسوبی سواحل خلیج فارس رشد داشته و در سال ۱۸۹۵ توسط آقای اشتایف، گیاهشناس سرشناس اتریشی، از سواحل خلیج فارس در استان بوشهر جمع‌آوری شده و در سال ۱۸۹۶ توسط اشتاینر، گلسنگ‌شناس، توصیف شده است [13]. مطالعات ریخت‌شناسی نمونه‌های تخت‌جم‌شید و مقایسه آن با شرح و توصیف گونه بوشهری نشان می‌دهد که این گلسنگ درون‌سنگی موجود در تخت‌جم‌شید بیشترین شباهت مورفولوژیکی به گونه کشف‌شده از جنوب ایران دارد. متأسفانه، طبق گزارشات متعدد سند جهانی گونه بوشهری طبق آخرین منابع گلسنگ‌شناسی منتشر شده گم شده و در هر باریوم‌های بین‌المللی وین و گراتز اتریش قابل دسترس نیست و احتمال از بین رفتن آن طی جنگ جهانی دوم نیز وجود دارد [14]، ولی از آنجاکه هدف این مطالعه بررسی تاکسونومیک و تمایز در مفهوم گونه‌های این کمپلکس نیست، لذا از واژه لاتین (sensu lato) و کوتاه‌شده آن در انتهای نام علمی به صورت s.lat. در مفهوم گسترده گونه استفاده می‌شود و از عبارت " cf. " یا confer به معنی مقایسه شده با نمونه‌تیپ در نام علمی *Verrucaria cf. buschirensis* پرهیز می‌گردد. نتایج بررسی دی‌ان‌ای نمونه‌های جدید و تازه جمع‌آوری‌شده از نقطه تیپ *Verrucaria buschirensis* در مقاله مستقل دیگری و در مقایسه با نمونه‌های تخت‌جم‌شید و سایر کشورها و با هدف تمایز و تعیین مرزبندی‌های بین‌گونه‌ای منتشر خواهد شد.

هدف از این مطالعه، بررسی نقش کلیدی گلسنگ‌های درون‌سنگی *Verrucaria buschirensis* s.lat. به‌عنوان گونه غالب در تخت‌جم‌شید است و معرفی اجمال گونه و بررسی میزان آسیب‌هایی است که در اثر استقرار گلسنگ‌های درون‌سنگی مربوط به خانواده Verrucariaceae به آن

کاخ‌های تخت جمشید ۱۲۵ هزارمترمربع است که روی سکویی قرار دارد که ارتفاع آن بین ۸ تا ۱۸ متر بالاتر از سطح جلگه مردوشت واقع شده است.

۲-۳. تصویربرداری

تصویربرداری از ۱۴ نقطه در کاخ‌ها و بناهای مختلف مجموعه میراث جهانی طی چند مرحله در فروردین ماه و اسفندماه ۱۳۹۷ تا خردادماه ۱۴۰۰ انجام شد. تصاویر مربوط به فرسودگی زیستی توسط گلسنگ‌های درون‌سنگی، از نقاط مختلف کاخ‌های مختلف تخت جمشید که شامل ایوان پایه ستون، دیوار شمالی کاخ آپادانا، سنگ‌های موجود در خیابان سپاهیان، کاخ تچر، کاخ هدیش و سایر قسمت‌هایی که در نقشه (شکل ۱) علامت‌گذاری شده است، بر اساس روش پیشنهادی سهرابی و همکاران [19] اخذ گردید.

۳-۳. پتروگرافی نمونه‌های بستر

نمونه‌های سنگ برای بررسی دقیق کانی‌ها و منشأ پیدایش سنگ، و بررسی زیست کانی‌سازی و حضور فسیل‌ها در خمیره سنگ از لحاظ پتروگرافی بررسی شدند. پس از تهیه برش‌ها، نمونه‌ها با میکروسکوپ پلاریزان مورد بررسی قرار گرفتند.

۳-۴. تصویربرداری با میکروسکوپ SEM

برای انتخاب نمونه‌های مناسب سنگ‌های مورد نظر با استرئومیکروسکوپ مطالعه و بررسی شدند. به این منظور، تال‌های سالم از گلسنگ انتخاب شد و پیت‌ها تخلیه شده و به مدت ۲۴ ساعت در فور به دمای شصت درجه سانتی‌گراد خشک شدند. نمونه‌ها با لایه‌ای از پالادیوم و طلا فیکس و پوشش داده شده و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مدل MIRA//TESCAN در آزمایشگاه سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران با ولتاژ ۱۵ کیلوولت مورد بررسی قرار گرفتند.

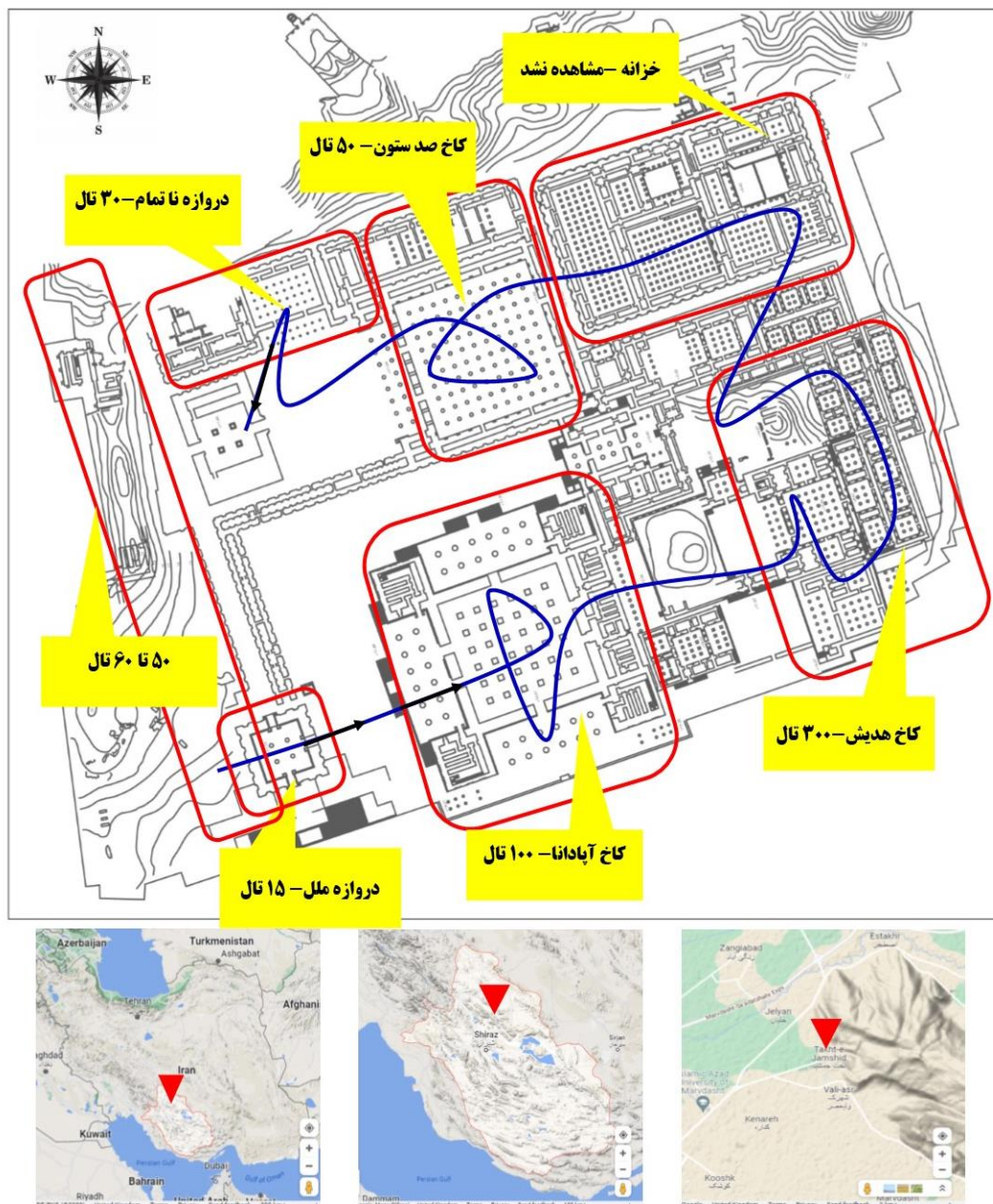
در سال ۲۰۰۴، بونگارتز و همکاران، به تشریح آناتومی دقیق *Verrucaria rubrocincta* Breuss پرداختند و پیامدهای رشد این گلسنگ درون‌سنگی در فرسودگی زیستی و زیست کانی‌سازی را تشریح نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که رشد گلسنگ‌ها و نفوذ هیف‌های آن به داخل سنگ باعث افزایش زیست کانی‌سازی و فرسودگی زیستی سنگ‌بستر می‌شود و شواهد کانی‌شناسی مطالعات آن‌ها، نشان می‌دهد که میکرویت روی سطح تال به‌طور بیولوژیکی القا می‌شود [9].

طی سال‌های اخیر، مطالعات پراکنده‌ای در زمینه فرسودگی زیستی در گوشه و کنار ایران توسط متخصصین مرمت صورت پذیرفته است. هرچند، این مطالعات بیشتر در خصوص بررسی وجود یا عدم وجود آسیب‌های وارد شده بر بناها انجام شده است و مطالعات دقیق و بنیادی در زمینه عوامل زیستی مخرب و نقش آن‌ها در تخریب آثار سنگی و راه‌های مقابله با این عوامل در سطح آثار باستانی کشور انجام نشده است. در سال ۲۰۱۷، سهرابی و همکاران [19]، کلونیزا سیون گلسنگ‌های مجموعه تاریخی پاسارگاد با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و فرآیندهای مربوط به فرسودگی زیستی سنگ را در این مکان تاریخی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. تحقیق پیش رو مقدمه‌ای بر تحقیقات گلسنگ‌های درون‌سنگی و آثار مخرب آن در ایران است تا مقدمات را برای تحقیقات تکمیلی در آینده فراهم سازد.

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. معرفی منطقه و نمونه برداری

مجموعه میراث جهانی تخت جمشید در مرکز استان فارس، ۱۰ کیلومتری شمال شهر مرودشت و در ۵۷ کیلومتری شیراز قرار دارد. ارتفاع از سطح دریای تخت جمشید ۱۷۷۰ متر است. طرف شرقی این مجموعه کاخ‌ها روی کوه رحمت و سه طرف دیگر درون جلگه مرودشت پیش رفته است. وسعت کامل



شکل ۱: نقشه صفت تخت‌جمشید و موقعیت جغرافیایی آن. نقشه نشان‌دهنده کاخ‌ها و قسمت‌های پرخطر تخت‌جمشید از نظر آسیب‌های ناشی از ایجاد بایوپیت‌ها و استقرار خانواده *Verrucaria* است. کاخ هدیش بیشترین پراکندگی و آسیب در آن مشاهده می‌شود. سپس، بیشترین استقرار و تخریب مربوط به کاخ‌های صدستون و آپادانا است که حضور بایوپیت‌ها و *Verrucaria*‌ها در پایه ستون‌ها مشاهده شده است. سپس، دروازه نیمه‌تمام بیشترین میزان بایوپیت‌ها را به خود اختصاص داده است، دروازه ملل تعدادی تال *Verrucaria buschirensis* در ارتفاعات مشاهده شده است. مسیر تردد و نمونه‌برداری در چهارده قسمت و کاخ مشخص شده است. مقیاس تصاویر مربوط به موقعیت جغرافیایی در نقشه‌های گوگل به ترتیب ۲۰۰، ۱۰۰ و ۲ کیلومتر است.

Fig1: The map of the Persepolis and its geographical location. The map shows Persepolis's palaces and high-risk areas in terms of damage caused by biopits and the establishment of *Verrucaria buschirensis* S.lat. Among them, The Hadish Palace is the most scattered and damaged, then, the majority of the settlement and destruction occurred at the 100-column palaces and Apadana, where *Verrucaria buschirensis* were found at the base of the columns. Also, *Verrucaria buschirensis* talus have been observed on the heights around the gate of the nations. The sampling route is specified in 14 sections and the palace. The scale of the images related to the geographical location is 200, 100 and 2 km, respectively.

۳-۵. ریخت‌شناسی و تاکسونومی گونه

ابتدا نمونه‌ها از لحاظ مورفولوژی و شکل ظاهری گونه *V. buschirensis* s. lat در سطوح آثار تاریخی مورد بررسی قرار گرفتند. به دلیل محدودیت قانونی در نمونه‌برداری از سطوح آثار تاریخی و جلوگیری از آسیب ناشی از نمونه‌برداری مطابق روش سهرابی و همکاران [19] ۲۰۱۷ اقدام شد. نمونه‌های گل‌سنگی درون‌سنگی از سطوح سنگ معادن کوه رحمت برای بررسی‌های دقیق مورفولوژی جمع‌آوری شدند. نمونه‌ها بعد از مقایسه میدانی با نمونه‌های موجود در سطح آثار تاریخی برای مطالعات دقیق به آزمایشگاه تاکسونومی و طبقه‌بندی موزه گل‌سنگ‌های ایران در سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انتقال داده شدند. مطالعات میکروسکوپی نمونه‌ها با استفاده از استریومیکروسکوپ دوچشمی Wild M7A و میکروسکوپ نوری زایس مدل KF2 برای بررسی فرم، رنگ، و ریخت‌شناسی کلی تال انجام گرفت. پس از مشاهدات اولیه نمونه‌ها، برش‌گیری دستی با هدف تعیین نوع جلبک، چگونگی تال و ویژگی‌های کلی، برای مشاهدات تکمیلی از میکروسکوپ نوری اولیمپوس $\times 21$ و با روش‌های استاندارد میکروسکوپی انجام شد. نمونه‌ها با استفاده از کلیدشناسی استاندارد و شرح و توصیف‌های مستخرج از مقالات [13,16,20]؛ آزمون‌های شیمیایی معمول مطابق [21] و همچنین مقایسه با فلور نمونه‌های معتبر در هرباریوم گل‌سنگ‌های ایران شناسایی شدند. مطالعات شیمیایی نمونه‌ها، با کمک آزمون‌های نقطه‌ای t شامل پاسخ سریع به معرف‌ها (KI, I, KOH) و $(OC1)$ صورت پذیرفت. در ابتدا برش‌های بسیار نازک با استفاده از تیغ بیستوری استریل از تال گل‌سنگ تهیه شد و سپس با اضافه نمودن مقدار اندکی از معرف‌های C (محلول آبی هیپوکلریت کلسیم)، معرف K که محلول آبی ده درصد هیدروکسید پتاسیم است، و معرف‌های Pd اضافه شده و اثرات تغییر رنگ آن‌ها زیر میکروسکوپ نوری یادداشت شد.

۳-۶. طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR)

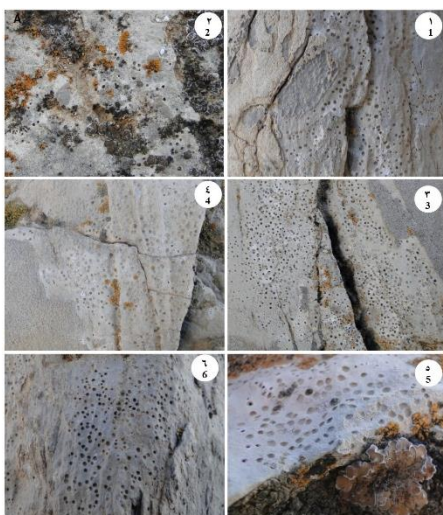
از روش طیف‌سنجی مادون قرمز با هدف بررسی علت تغییر رنگ سنگ‌ها از خاکستری به سفید در اطراف بایوپیت‌ها و نیز پایش تغییر در میزان اگرالات کلسیم و تغییرات رنگ ناشی از

رسوب این ماده مطابق روش [22] استفاده شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ۵/۰ میلی‌گرم از نمونه جامد با ۱۰۰ میلی‌گرم پتاسیم بروماید به حالت پودر درآمد، سپس مخلوط پودری تحت فشار ده‌هزار Psi در محیط خلأ فشرده شده و به حالت قرص درآمد و برای بررسی داخل دستگاه قرار گرفتند.

۴. نتایج

۴-۱. تصویربرداری

با تصویربرداری از چهارده نقطه مختلف، تعداد تال‌ها شمارش و آسیب‌های وارده برآورد شد. بیشترین میزان کلونیزاسیون در کاخ هدیش با بیش از سیصد تال مشاهده شد. در کاخ آپادانا به‌طور متوسط صد تال مشاهده و تصویربرداری گردید. اندازه تال و محل رشد آن‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است. همچنین الگوی رشد و آسیب‌های وارده و نیز بایوپیت‌های تخلیه‌شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



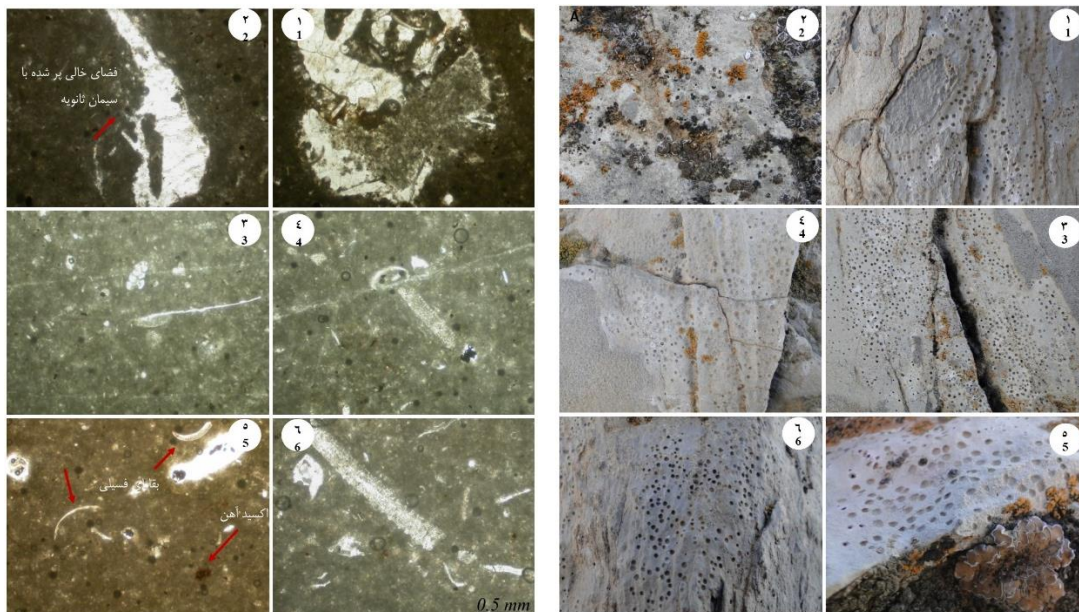
شکل ۲: آسیب‌های ناشی از استقرار *Verrucaria buschirensis* s.lat در سطوح سنگ‌های تخت‌جمشید (۱) بایوپیت‌های تشکیل شده و کلونیزاسیون دوباره گل‌سنگ‌های دیگر در محل تشکیل بایوپیت‌ها. (۲ و ۳) حفرات تشکیل شده و خالی شده (۴ و ۵) تال‌های حاوی گل‌سنگ زنده از خانواده *Verrucaria* (۶) تغییر رنگ سنگ در اثر رسوب کلسیم کربنات.

Fig2: An example of damages caused by the emergence of *Verrucaria buschirensis* s.lat in Persepolis. 1) Biopits formed and re-colonization of other lichens at the site of biopit formation. 2 and 3) cavities formed and emptied 4 and 5) thallus containing live lichen of the genus *Verrucaria buschirensis* s.lat d) discoloration of the rock due to calcification.

۴-۲. پتروگرافی سنگ‌های تخت‌جمشید

در مطالعه نمونه سنگ‌آهک با زمینه آهک ریزدانه مشاهده شد. بزرگ‌نمایی به کاررفته در این مطالعه ۱۴× است. خمیره یا زمینه اصلی نمونه، کانی گل‌آهکی است. این کانی به رنگ تیره دیده می‌شود. میکرایت متشکل از ذرات آهکی با اندازه حداکثر تا چهار میکرون قابل مشاهده است که از تبلور گل‌آهکی و یا ته‌نشینی ذرات ریز در محیط‌های آرام تشکیل می‌شود. در داخل زمینه بقایای پراکنده‌ای از فسیل‌های مختلف (فرامینیفر و خرده‌فسیل) قابل مشاهده است که کمتر از پنج درصد نمونه را تشکیل می‌دهد (شکل ۳-تصویر ۱). اندازه این قطعات کمتر از ۰/۵ میلی

متر است. همچنین بیشتر فضاهای خالی با سیمان اسپاری به صورت ثانویه پر شده است (شکل ۳-تصویر ۲). بر مبنای تقسیم‌بندی فولک (۱۹۶۲)، نمونه مورد مطالعه یک سنگ آهک میکرایتی دارای فسیل است. نمونه‌های مورد مطالعه از معادن با نمونه‌های به کاربرده شده در کاخ‌ها مشابه بوده و همه از نوع سنگ آهک هستند. پس نتایج مورد بررسی از خارج محوطه و داخل کاخ‌ها قابل تطبیق است. از طرفی، چون خانواده Verrucariaceae تمایل زیادی به رشد و کلونیزاسیون روی سنگ‌های آهکی دارند، پس جنس این سنگ‌ها زمینه را برای کلونیزاسیون و زیست‌کانی‌سازی فراهم نموده است.

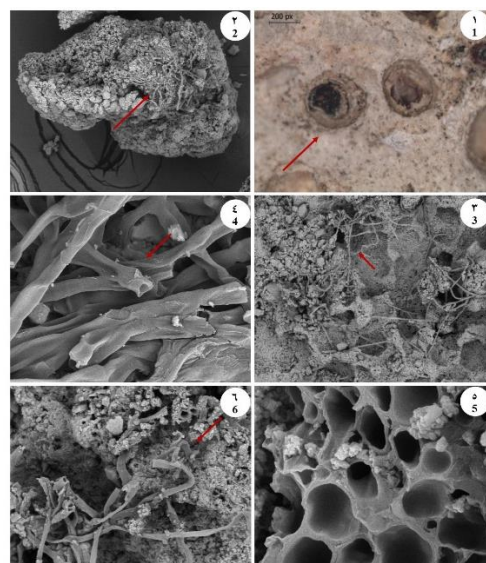


شکل ۳: تصویر ۱ نمونه سنگ را که از معادن اطراف تخت‌جمشید برای مطالعات پتروگرافی انتخاب شده است، نشان می‌دهد. فتومیکروگراف، نمونه سنگ تخت‌جمشید، نور ppl طول میدان دید ۲/۷ میلی‌متر، چند تصویر متفاوت از نمونه تخت‌جمشید. در تصاویر ۳، ۴، ۵ و ۶ بقایای قطعات فسیل همراه با اکسید آهن در زمینه آهکی مشاهده می‌شود و در تصویر ۲ فضای خالی در مرکز تصویر که با سیمان ثانویه اسپاری پر شده است. Fig3: Fig 1 shows an example of a rock selected from the mines around Persepolis for petrographic studies. Photomicrograph, Persepolis sample, ppl light, field of view, length of 2.7 mm, several different images of Persepolis sample. In Figures 3, 4, 5, and 6, the remains of fossil fragments with iron oxide can be seen in the limestone background, and in Figure 2, the empty space in the center of the image is prepared with spar secondary cement.

شکل ۲: آسیب‌های ناشی از استقرار *Verrucaria buschirensis s.lat* در سطوح سنگ‌های تخت‌جمشید (۱) باویپت‌های تشکیل شده و کلونیزاسیون دوباره گلسنگ‌های دیگر در محل تشکیل باویپت‌ها. (۳) و (۴) حفرات تشکیل شده و خالی شده (۵) تال‌های حاوی گلسنگ زنده از خانواده Verrucaria (6) تغییر رنگ سنگ در اثر رسوب کلسیم کربنات. Fig2: An example of damages caused by the emergence of *Verrucaria buschirensis s.lat* in Persepolis. 1) Biopits formed and re-colonization of other lichens at the site of biopit formation. 2 and 3) cavities formed and emptied 4 and 5) thallus containing live lichen of the genus *Verrucaria buschirensis s.lat* d) discoloration of the rock due to calcification.

۳-۴. میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM

مطالعات حاصل از SEM که از تخلیه تال گل‌سنگی داخل بایوپیت‌ها به دست آمده است، به خوبی نشان‌دهنده نفوذ هیف‌ها به درون خلل و فرج سنگ است که در شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی. ۱) تال گل‌سنگی مربوط به *Verrucaria buschirensis s.lat* برای مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی انتخاب شد. ۲) تال تخلیه شده زیر میکروسکوپ الکترونی، ۳) رشته‌های هیف‌های گل‌سنگی که درون سنگ تنیده شده‌اند. ۴) ساختار هیف‌ها از نزدیک (۵) برش عرضی هیف‌ها (۶) منظره‌ای از هیف‌های تنیده شده در داخل کانی‌های سنگ

Fig4: Images from a scanning electron microscope. 1) Limestone talus related to *Verrucaria buschirensis s.lat*, which was selected for scanning electron microscopy studies. 2) The discharged thallus under the electron microscope, 3) The strands of lichen hyphae that are woven into the rock. 4) The structure of the hyphae up close 5) The cross section of the hyphae 6) A view of the hyphae woven inside the rock minerals

۴-۴. ریخت‌شناسی و تاکسونومی گونه

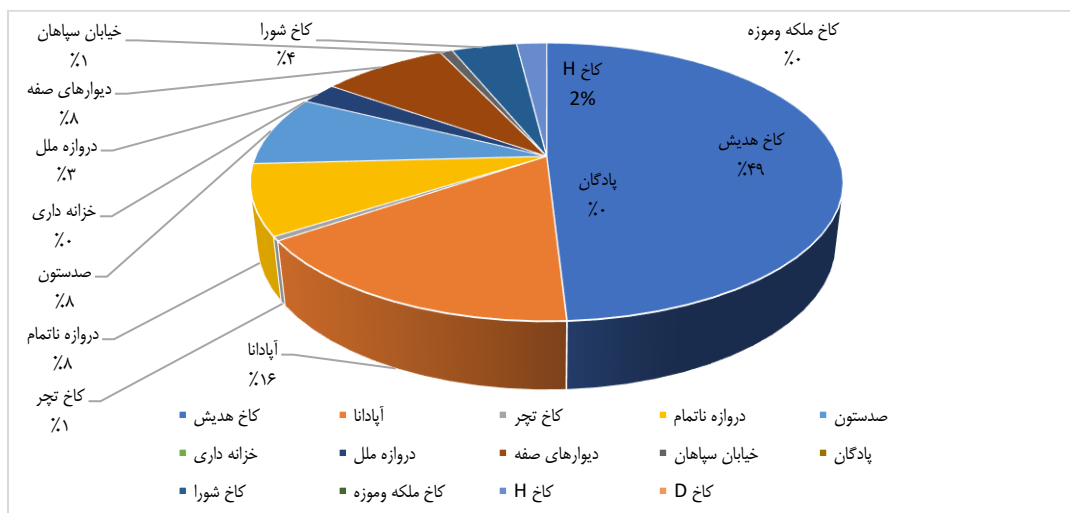
در این مطالعه، نمونه‌های متعددی از گل‌سنگ‌های درون سنگی متعلق به خانواده Verrucariaceae موجود در تخت‌جمشید مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند، با توجه به مشاهدات میدانی و اطلاعات جمع‌آوری شده یک گونه متعلق به جنس *V. buschirensis s. lat* شناسایی شد. با توجه به صفات ظاهری در بین نمونه‌های جمع‌آوری شده و مقایسه شده در سطوح آثار تاریخی احتمال وجود دو گونه مختلف از این جنس وجود دارد که

در مطالعات تکمیلی نمونه‌ها و از طریق شناسایی مولکولی و بارکدگذاری دی‌ان‌ای گونه‌ها در دست بررسی است. گونه غالب با توجه به مشاهدات ریخت‌شناسی نمونه‌ها متعلق به *V. buschirensis s. lat* تشخیص داده شد.

۴-۵. شرح گل‌سنگ *Verrucaria buschirensis s.lat*

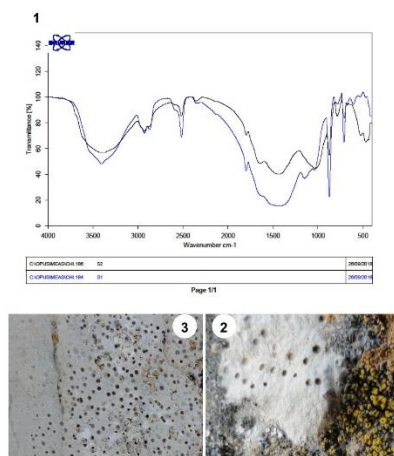
شکل رشد: پوسته‌ای و درون سنگی واقعی، اغلب با یک خط تال اولیه سیاه نازک مرزی قابل مشاهده است. **سطح:** سفید گچی تا خاکستری مایل به سفید صاف، مات، پیوسته، اغلب با ترک‌های ظریفی که از پرتسیا نمایان می‌شود و تا حدی آن‌ها را به هم متصل می‌کند. **بخش فتوسنتزکننده:** جلبک سبز غیر از *Trentepohlia*. **آنتومی:** تمایز نیافته، قشر فوقانی غیر قابل تشخیص، سلول‌های جلبکی به قطر ۷-۱۵ میکرومتر، تشکیل یک ناحیه نامنظم در بالاترین بخش نرم‌سنگ، **پرتسیوم:** به‌طور کامل در سنگ حفره ایجاد می‌کند و پرتسیوم فرو رفته و فقط رأس آن نمایان، و کمی محدب است اما به‌سختی ظاهر می‌شود و پس از پوسیدگی و زوال پرتسیوم حفرات خالی (شکل ۶ تصویر ۱ و ۲) باقی می‌ماند. **دیواره‌ها (اگزپیل):** گلابی شکل، ۲۵-۴۰، ۰.۴-۰.۲ میلی‌متر عرض، ۱۵-۲۰ میکرومتر ضخامت، کمی ضخیم در رأس، سیاه و سفید در سراسر، کربن دار **اوستیول:** نامحسوس، **آسک:** به شکل کلاف، ۵۰-۷۰ x ۲۰-۱۵ میکرومتر، ۸ اسپور، **آسکوسپورها:** بی‌رنگ، ساده، بیضوی، ۱۶-۱۲ x ۱۸-۲۵ **پیکنیدیوم:** ناشناخته، **آزمون‌های نقطه‌ای:** همه منفی است. **متابولیت‌های ثانویه:** شناسایی نشده است. **بستر و اکولوژی:** اندولیتیک در سنگ‌های آهکی سخت زیستگاه: اغلب روی سنگ‌های رسوبی در مناطق آفتاب‌گیر.

توضیحات: طبق بررسی‌های میدانی و مرور جامع منابع گل‌سنگ‌شناسی ایران و جهان، گونه *Verrucaria buschirensis s.lat* در سال ۱۹۸۳ و ۱۹۹۵ توسط آقای اشتاپف، گیاهشناس سرشناس اتریشی، از سواحل بوشهر جمع‌آوری شده و در سال ۱۹۹۶ توسط اشتاینر به‌عنوان یک گونه جدید از ایران گزارش [13] شده است. هنوز بعد از گذشت ۱۲۶ سال از معرفی این گونه، خارج از ایران در هیچ جای دیگری غیر از ایران گزارش نشده است. این گونه اولین بار معرفی شده [23,24]، و دومین بار در سال ۱۹۷۹ از سواحل استان هرمزگان در مسیر میناب به جاسک توسط ریدل، قارچ‌شناس اتریشی، مجدداً جمع‌آوری و گزارش شده است [25].



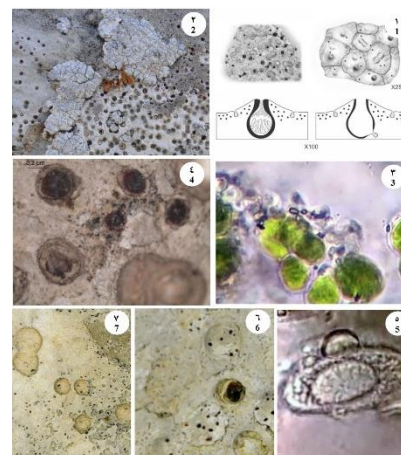
شکل ۵: نواحی که کلونیزاسیون خانواده *Verrucariaceae* و بایوپیت‌ها مشاهده شده‌اند. بیشترین میزان تهاجم *Verrucaria* ها در کاخ هدیش و کاخ آپادانا مشاهده شد که بیشترین آسیب را دیده‌اند. در کاخ صدستون آسیب‌ها متوسط است. این میزان در دروازه ملل و دروازه نیمه‌تمام کم بوده و در کاخ تجر و خزانه به صفر درصد می‌رسد.

Fig5: Areas where colonization of *Verrucaria buschirensis s.lat* and biopits have been observed. The highest number of *Verrucaria* invasions was observed in Hadish Palace and Apadana Palace, which suffered the most damage. In the palace, one hundred columns of damage are moderate. This rate is low in the Gate of Nations and Unfinished Gate and reaches zero percent in Thatcher Palace and the Treasury.



شکل ۷: بررسی تغییر رنگ در نواحی بایوپیت با استفاده از (FTIR) نتایج حاصل از FTIR حضور نمک کربنات کلسیم (با پیک‌های شاخصی در نواحی 1421 cm-1، و 771 cm-1) را نشان می‌دهد که نتایج افزایش جزئی حضور نمک کربنات کلسیم در نواحی سفید را نسبت خاکستری را تأیید می‌نماید. ۲) نواحی سفید در اطراف بایوپیت با افزایش رسوبات کربنات کلسیم ۳) نواحی خاکستری اطراف بایوپیت

Fig7: Analyzing color changes in biopit areas using FTIR 1) The results of FTIR show the presence of calcium carbonate salt (with index peaks in the areas of 1421 cm-1, and 771 cm-1), which confirms the results of a slight increase in the presence of calcium carbonate salt in the white areas. Gray ratio. White areas around the biopit with increasing calcium carbonate deposits 3) Gray areas around the biopit



شکل ۶: ۱) برش عرضی از تال زنده و بالغ گلسنگ *Verrucaria* و تال تخلیه‌شده در اطراف آن را مشاهده می‌کنید. ۲) عکس از بایوپیت‌های حاوی *Verrucaria* ۳) عکس میکروسکوپی فتوبیونت (جلبک) گلسنگ ۴) حضور تال گلسنگی در کنار بایوپیت تخلیه‌شده ۵) اسپور مربوط به بخش مایکوبایونت گلسنگ ۶) بایوپیت‌هایی که رسوبات کلسیم در آن‌ها رسوب کرده است به همراه یک تال گلسنگی ۷) بایوپیت‌های تخلیه‌شده و آثار ایجادشده از آن‌ها به علت استقرار قبلی *Verrucaria*

Fig 6: 1) A cross section of the live and mature thallus of the *Verrucaria* and the discharged thallus is observed around it. 2) Photos of biopits containing *Verrucaria* 3) Microscopic photographs of photobionts (algae) of lichens 4) Presence of lichen thallus next to discharged biopits 5) Spores of the lichen section 6) Biopits in which calcium deposits have deposited with a lichen thallus 7) Empty biopits and their effects due to the previous establishment of *Verrucaria*

۵. بحث در نتایج و یافته‌ها

با توجه به مشاهدات میدانی، کاخ‌هایی که بیشترین اجتماع‌پذیری با گلسنگ‌های درون‌سنگی از خانواده Verrucariaceae را داشته‌اند شامل کاخ هدیش، پایه ستون‌های آپادانا، دروازه ناتمام و کاخ صدستون بودند. از نظر پراکنش و اجتماع‌پذیری بیشترین میزان پراکندگی گلسنگ‌های درون‌سنگی و آسیب با گونه درون‌سنگی Verrucaria ها مربوط به کاخ هدیش است که حدود ۵۴ درصد از بایوپیت‌های حاصل از رشد این گونه در این کاخ مشاهده شد. کاخ آپادانا با ۱۸ درصد اجتماع‌پذیری و پراکنش و دیوارهای صفت بیرونی با ۱۱ درصد بیشترین آسیب را از حضور گلسنگ‌های خانواده Verrucariaceae داشته‌اند. نتایج مشاهدات میدانی و میزان تقریبی حضور و آسیب این گلسنگ‌های درون‌سنگی در کاخ‌های مختلف در شکل شماره ۵ قابل مشاهده است. حفاظت و نگهداری از آثار تاریخی سنگی یکی از مباحث مهم و تخصصی در مباحث دانش حفاظت و مرمت و تلفیق علوم مرتبط بین‌رشته‌ای در آثار باستانی است [26]. کاربرد متنوع و گسترده سنگ به منظور کاربردهای هنری، باعث خلق آثار هنری و اشیای فرهنگی و یادمان‌های بسیاری در سراسر جهان گشته و طی دوران مختلف، سنگ کاربرد فرهنگی و هنری‌اش را با تغییراتی حفظ نموده است. وجود آثار تاریخی سنگی ارزشمند و فراوان از دوره‌های پیش از تاریخ در ایران، اهمیت رویکرد علمی نسبت به شناسایی دقیق و در پی آن اعمال اقدامات عملی یا پیشگیرانه را با توجه به تهدیدها و آسیب‌های روزافزون، ضروری و اجتناب‌ناپذیر کرده است. برخی گلسنگ‌های خانواده Verrucariaceae به علت رشد درون‌سنگی که دارند، به ایجاد آسیب‌های جدی در بستر سنگ منجر می‌شوند. رشد درون‌سنگی برخی عناصر این خانواده، اغلب در زیستگاه‌های دشوار با شرایط افراطی، نظیر بیابان‌های سرد قطب جنوب و یا بیابان‌های گرم و خشک برای سازگاری با محیط و فرار از شرایط دشوار دیده می‌شود [8]. با توجه به اثرات مخرب گلسنگ‌های درون‌سنگی بر آثار تاریخی، علاقه زیادی برای مطالعه این دسته از گلسنگ‌ها در میان

دانشمندان علوم زیستی و دانشمندان فعال در علوم حفاظت و مرمت ایجاد شده است [27]. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۰۴ آقای فرانک بونگارتز و همکاران روی جنس Verrucaria های کویر سونورا واقع در مرز ایالات متحده آمریکا و مکزیک داشتند، به مطالعه آناتومی گلسنگ *Verrucaria rubrocincta* Breuss همانم *Bagliettoa rubrocincta* (Breuss) Gueidan & Cl. Roux پرداختند [9]. آن‌ها در این مطالعه مشاهده کردند که گونه‌های مربوط به خانواده Verrucariaceae استراتژی‌های موفق‌تری در زنده ماندن در محیط‌های افراطی نظیر اقلیم بیابانی را دارند. چراکه در این شرایط، گلسنگ برای فرار از خشکی و شرایط دشوار محیط، به شکل درون‌سنگی رشد می‌کند. مطالعه ما نیز فرایندهای فرسودگی زیستی و فرایندهای مرتبط با آن را نشان می‌دهد که گلسنگ *Verrucaria* در تخت‌جمشید به فعالیت‌های فرسایشی خود سرعت می‌بخشد.

با توجه به مطالعات ماکروسکوپی و میکروسکوپی سنگ‌های کلونیزه‌شده با گلسنگ‌های درون‌سنگی خانواده Verrucariaceae در تخت جمشید، آسیب‌های وارد شده بر چند نوع می‌باشند. آسیب اولیه به زیبایی بصری که با چشم غیرمسلح قابل مشاهده است. رشد گلسنگ‌های درون‌سنگی در سطح سنگ‌های نقش‌دار است که حضور پیکره گلسنگ‌ها در سنگ‌ها به شکل نقاط تیره قابل مشاهده است. آسیب اولیه علاوه بر زیبایی بصری سنگ، در اعماق سنگ نیز قابل مشاهده است، که به این منظور از میکروسکوپ الکترونی جهت مطالعه‌ی نفوذ ریشه‌های گلسنگی به درون سنگ استفاده شده است که البته ظاهراً اثبات آن بدون مطالعات میکروسکوپی قابل انجام نیست. این آسیب و نفوذ به داخل سنگ به مراتب خطرناک‌تر است، چراکه شکستگی‌هایی بسیار جزئی در قشر سطحی سنگ ایجاد می‌شود و با استقرار سایر عوامل زیستی زمینه را برای نفوذ هرچه بیشتر عوامل فرسودگی زیستی مانند جلبک‌ها، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها و فرسودگی اعماق سنگ‌ها فراهم می‌کند. آسیب ثانویه، در امتداد آسیب اولیه و ناشی از مرگ و تخلیه پیکره این گلسنگ است که شرایط استقرار سایر گونه‌های گلسنگی برحسب

برگشت‌ناپذیری به بنا وارد می‌نماید و باعث محو شدن نقوش از روی آثار تاریخی می‌شود و ظهور بایوپیت‌ها و آثار مخرب آن کار مرمت نقوش آسیب‌دیده را نیز دشوار می‌کند. بنابراین، شنا سایی به‌موقع و مطالعه آسیب‌های وارده، در پیشگیری از تشکیل و پیشروی این موجودات زنده پنهان شده در دل سنگ‌ها نقشی کلیدی در حفاظت و مرمت تخت‌جمشید را ایفا می‌کند.

پیشنهادها و مسیر پیش رو

از گام‌های اصلی در تکمیل مطالعات مربوط به گل‌سنگ‌های درون‌سنگی و بررسی هرچه دقیق‌تر آسیب‌های آن‌ها، ایجاد پایلوتی برای تحقیقات گل‌سنگ‌شناسی و زیست‌شناسی و نیز بسترشناسی در مجموعه میراث جهانی تخت‌جمشید و نیز تأسیس آزمایشگاه شناسایی مولکولی برای انجام مطالعات تکمیلی است. چراکه نخستین گام در کنترل این عوامل که با چشم غیرمسلح قابل مشاهده نیستند، شنا سایی دقیق آن‌ها از طریق روش‌های مدرن زیست‌فناوری در دل سنگ‌هاست. از طرفی، با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی گرم‌وخشک حاکم در منطقه، بسیاری از میکروارگانیسم‌ها تمایل به رشد درون سنگی دارند تا از شرایط نامساعد محیطی و تابش‌های مستقیم نور خورشید فرار کنند و به اعماق سنگ نفوذ نمایند. چنانچه در این مقاله نیز ذکر گردید، گل‌سنگ‌های درون‌سنگی خانواده Verrucariaceae با نفوذ هیف‌های خود به درون سنگ، زمینه را برای سایر ارگانیسم‌ها نظیر باکتری‌ها اعم از هتروتروف و فتوتروف فراهم می‌نمایند و رشد این ارگانیسم‌ها و تشکیل زیست‌توده‌ها در خلل و فرج ایجاد شده در سنگ بسیار خطرناک است. چراکه رشد آن‌ها بسیار آرام بوده و در ظاهر قابل مشاهده نیست، اما آسیب‌هایی که وارد می‌کند، به مراتب جدی‌تر است و نباید از آن غافل شد. امید داریم تا این مقاله مقدمه‌ای بر مطالعات میکروارگانیسم‌های درون‌سنگی و مطالعه آسیب‌های ناشی از آن باشد و راه را برای پژوهش‌های بعدی هموار سازد. در نهایت، وجود یک گروه با تخصص‌های زیست‌شناسی و باستان‌شناسی در کنار

توالی رشد را فراهم می‌کند. رشد منحصربه‌فرد و تال درون سنگی این خانواده باعث ایجاد بایوپیت‌ها به شکل حفرات ریز در سطوح سنگ می‌شوند. علاوه بر آسیب بصری، پناهگاهی برای رشد سایر عوامل نظیر گل‌سنگ‌ها و نیز تخم‌گذاری حشرات فراهم می‌کنند [28]. با رشد عوامل مختلف تعادل مواد شیمیایی در این نواحی به هم ریخته و نیز با رسوب هرچه بیشتر کربنات کلسیم باعث تغییر رنگ سنگ‌ها از خاکستری به سفید می‌شود (شکل ۷). این آسیب‌ها هرکدام به نوبه خود جبران‌ناپذیر و برگشت‌ناپذیرند و نباید نادیده گرفته شوند.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به ارزش و اهمیت تاریخی مجموعه تاریخی تخت‌جمشید، حفظ و نگهداری آن امری است بسیار ضروری و حیاتی، چراکه این مجموعه تاریخی با گذر زمان دستخوش تغییرات و آسیب‌های فراوان شده است. یکی از مهم‌ترین آسیب‌هایی که دست به گریبان این مجموعه است، فرسودگی زیستی ناشی از گل‌سنگ‌هاست که البته سایر عوامل زیستی در آن نیز دخیل‌اند. در این میان، نقش ارگانیسم‌های درون‌سنگی یا اندولیتیک‌ها بسیار مخرب و قابل توجه است. مطالعه الگوهای آسیب و تخریب گل‌سنگ‌های درون‌سنگی جنس *V. buschirensis* s. lat. روی بناهای تخت‌جمشید، به‌عنوان الگویی از آثار سنگی در منطقه نیمه‌خشک ایران، به این دلیل حائز اهمیت است که با ایجاد بایوپیت‌ها در سطح سنگ شرایط را برای استقرار و رشد سایر میکروارگانیسم‌ها نظیر باکتری‌ها و آرکی و سیانوباکتر و نیز حضور سایر گل‌سنگ‌ها و نفوذ به اعماق سنگ فراهم می‌نماید. ارگانیسم‌ها می‌توانند از این حفره‌ها و ریزچاله‌های ایجادشده برای فرار از تابش مستقیم نور خورشید و فرار از شرایط نامساعد اقلیم بیابانی حاکم در تخت‌جمشید استفاده کنند، بنابراین مطالعه گل‌سنگ‌های درون‌سنگی در میراث جهانی تخت‌جمشید کمک شایانی در درک پدیده فرسودگی زیستی و حفظ و نگهداری این اثر هنری برای آیندگان خواهد داشت. چراکه رشد این عوامل فرسودگی زیستی روی نقوش آسیب‌های

پژوهش تقدیر و قدردانی می‌شود. از آقای دکتر حمید فدایی، رئیس محترم پایگاه میراث جهانی تخت‌جمشید، برای مساعدت‌ها و همکاری‌های لازم در تکمیل این پژوهش و نیز از کلیه نیروهای حراست و حفاظت فیزیکی میراث جهانی تخت‌جمشید که در طی بررسی میدانی این پژوهش در محدوده میراث جهانی همواره همراه و پشتیبان تحقیقات ما بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

یکدیگر سبب تحلیل هرچه بهتر موضوعات این رشته خواهد شد.

سپاسگزاری

از انجمن قارچ‌شناسی ایران برای اعطای جایزه دکتر حجارود به پیشنهادیه ر ساله دکتری خانم اسماعیل‌لو و شناسایی این طرح به‌عنوان یک طرح مؤثر در زمینه کاربردهای گل‌سنگ‌شناسی و حمایت مالی از این

References

- [1] Pangallo D, Bučková M, Kraková L, Puškárová A, Šaková N, Grivalský T, et al. Biodeterioration of epoxy resin: A microbial survey through culture-independent and culture-dependent approaches. *Environ Microbiol.* 2015;17(2):462–79.
- [2] Zamani N, Ghezelsoufi M, Ahadi AM, Zamani M. Application of Microbial Biotechnology in Conservation and Restoration of Stone Monument. 2017;4(2):587–92.
- [3] Martino P.D. What About Biofilms on the Surface of Stone Monuments? *Open Conf Proc J.* 2016;7(June):14–28.
- [4] Gadd GM, Rhee YJ, Stephenson K, Wei Z. Geomycology: Metals, actinides and biominerals. *Environ Microbiol Rep.* 2012;4(3):270–96.
- [5] Sanz M, Oujja M, Ascaso C, Pérez-Ortega S, Souza-Egipsy V, Fort R, et al. Influence of wavelength on the laser removal of lichens colonizing heritage stone. *Appl Surf Sci.* 2017;399:758–68.
- [6] Pinna D, Salvadori O, Tretiach M. An anatomical investigation of calcicolous endolithic lichens from the Trieste karst (NE Italy). *Plant Biosyst.* 2013 Jan;132(3):183–95.
- [7] Stjepko Golubic, Imre Friedmann J. The Lithobiotic Ecological Niche, with Special Reference to Microorganisms. *SEPM Journal of Sedimentary Research.* 2003 Jun 1;Vol. 51(2):475–8.
- [8] Kappen L, Friedmann E, Garty J. Ecophysiology of Lichens in the Dry Valleys of Southern Victoria Land, Antarctica I. Microclimate of the Cryptoendolithic Lichen Habitat. *Flora.* 2017;171(3):216–35.
- [9] Bungartz F, Garvie LAJ, Nash TH. Anatomy of the endolithic Sonoran Desert lichen *Verrucaria rubrocincta* Breuss: Implications for biodeterioration and biomineralization. *Lichenologist.* 2004;36(1):55–73.
- [10] Bonazza A, Sabbioni C, Ghedini N, Hermosin B, Jurado V, Gonzalez JM, et al. Did smoke from the Kuwait oil well fires affect Iranian archaeological heritage? *Environ Sci Technol.* 2007;41(7):2378–86.
- [11] Gueidan C, Roux C, Lutzoni F. Using a multigene phylogenetic analysis to assess generic delineation and character evolution in Verrucariaceae (Verrucariales, Ascomycota). *Mycol Res.* 2007 Oct 1;111(10):1145–68.
- [12] Prieto M, Martínez I, Aragón G, Gueidan C, Lutzoni F. Molecular phylogeny of *Heteroplacidium*, *Placidium*, and related catapyrenioid genera (Verrucariaceae, lichen-forming Ascomycota). *Am J Bot.* 2011;99(1):23–35.
- [13] Steiner J. Beitrag zur Flechtenflora Südpersiens. *Sitzungsber Kaiserl Akad Wiss, Math-Naturw Cl.* 1896;105(1):436–46.
- [14] Vondrák J, Kocourková J. New lichenicolous *Opegrapha* species on

- Caloplaca from Europe. The Lichenologist. 2008 May 6;40(3):171–84.
- [15] Palla F, Barresi G. Biotechnology and Conservation of Cultural Heritage. Palla F, Barresi G, editors. Cham: Springer International Publishing; 2017.
- [16] Halda J. A taxonomic study of the calcicolous endolithic species of the genus *Verrucaria* (Ascomycotina, Verrucariales) with the lid-like and radiately opening involucrellum. Acta Musei Richnoviensis Section Nature [Internet]. 2003;10(1):1–148. Available from: <http://www.moh.cz/pdf/amr/18.pdf>
- [17] Yuzon J, Roux C, Lendemmer JC, Gueidan C. Molecular phylogeny and taxonomy of the endolithic lichen genus *Bagliettoa* (Ascomycota: Verrucariaceae). Taxon. 2014 Dec 22;63(6):1177–92.
- [18] Pykälä J, Kantelinen A, Myllys L. Taxonomy of *Verrucaria* species characterised by large spores, perithecia leaving pits in the rock and a pale thin thallus in Finland. MycoKeys. 2020 Sep 2;72:43.
- [19] 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.
- [20] Szatala O. Lichenes in K. H. Rechinger, J. Baumgartner, F. Petrak & S. Szatala, Ergebnisse einer botanischen Reise nach dem Iran. Ann Naturhist Hofmus. 1940;50:521–33.
- [21] Orange A, James P, White FJ. Microchemical Methods for the Identification of Lichens. First Edit. London: British Lichen Society; 2001. 101 p.
- [22] Salvadori B, Errico V, Mauro M, Melnik E, Dei Luigi. Evaluation of Gypsum and Calcium Oxalates in Deteriorated Mural Paintings by Quantitative FTIR Spectroscopy. Spectroscopy Letters. 2003;36(5 & 6):501–13.
- [23] Seaward MRD, Sipman HJM, Sohrabi M. A revised checklist of lichenized, lichenicolous and allied fungi for Iran. Sauteria. 2008;15:459–520.
- [24] Seaward MRD, Sipman HJM, Schultz M, Maassoumi AA, Haji Moniri Anbaran M, Sohrabi M. A preliminary lichen checklist for Iran. Willdenowia. 2004 Dec 22;34(2):543–76.
- [25] Riedl H. Preadaptation in lichens from Iranian semi-deserts. Plant Systematics and Evolution [Internet]. 1979;131(3–4):217–33. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/BF00984255>
- [26] Scheerer S, Ortega-Morales O, Gaylarde C. Chapter 5 Microbial Deterioration of Stone Monuments—An Updated Overview. Adv Appl Microbiol. 2009;66(08):97–139.
- [27] Nimis PL, Tretiach M. Studies on the biodeterioration potential of lichens, with particular reference to endolithic forms. In: Interactive Physical Weathering and Bioreceptivity Study on Building Stones, Monitored by Computerized X-Ray Tomography (CT) as a Potential Non-destructive Research Tool. 1995. p. 63–122.
- [28] Sohrabi M, Esmaeillou M, Fadaei H, Talebian MH, Noohi N. The field monitoring of influential biodeteriogenic agents on the historic rock surfaces in Persepolis-UNESCO World Heritage Site. Journal of Research on Archaeometry. 2020 Jun 1;6(1):175–92.