

میکروارگانیسیم ها و فرسایش بسترهای هنری و تاریخی میراث فرهنگی

اعظم علی اصغری وشاره^۱، پریسا محمدی^۲، فریبا نیاری خمس^۳

^۱ دانشجوی دکتری میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، گروه میکروبیولوژی، دانشگاه الزهراء، ونک، تهران، ایران

^۲ دانشیار میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، گروه میکروبیولوژی، دانشگاه الزهراء، ونک، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

^۳ کارشناس ارشد میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، گروه میکروبیولوژی، دانشگاه الزهراء، ونک، تهران، ایران

p.mohammadi@alzahra.ac.ir

چکیده

آثار باستانی و بناهای تاریخی نشان دهنده ی فرهنگ و تمدن و پیشینه تاریخی یک کشور بوده و در رشد اقتصاد و توسعه کشورها، می تواند بسیار موثر واقع شود. حفاظت از این آثار گرانبغا، بسیار مهم است و اگر مورد توجه قرار نگیرد، مورد تخریب جدی و برگشت ناپذیر قرار می گیرد. در سال های اخیر علاوه بر فاکتورهای فیزیکی و شیمیایی، عوامل زیستی نیز به عنوان عوامل مهم و موثر در فرسودگی آثار تاریخی معرفی شده اند. مسئله فرسودگی زیستی یکی از مشکلاتی است که میراث فرهنگی، همواره با آن مواجه است. فرسودگی میکروبی، آسیب غیر قابل برگشتی است که توسط میکروارگانیسیم ها بر آثار باستانی ایجاد می شود. این مشکل جهانی، می تواند منجر به آسیب های زیبایی شناسی، فیزیکی و شیمیایی آثار باستانی و هنری شوند. امروزه نقش میکروارگانیسیم های مختلف در فرسایش انواع بسترهای هنری و تاریخی اعم از نقاشی ها، آثار سنگی، سرامیک، اسناد کاغذی و کتابها، چوب، منسوجات و فیلم ها به اثبات رسیده است. بنابراین اولین گام در کنترل فرسودگی میکروبی آثار هنری و تاریخی، شناسایی میکروارگانیسیم های فرسایشگر و نقش آن ها در فرسودگی آثار با ارزش تاریخی است که می تواند در انتخاب مناسب ترین روش برای پیشگیری، کنترل و تیمار آسیب های وارده به بسترها، اطلاعات با ارزشی در اختیار مرمطگران و محققان قرار دهد. این مقاله، مروری کلی بر معرفی میکروارگانیسیم های موثر در فرسودگی میکروبی بسترهای مختلف هنری و مکانیسیم آن دارد.

واژه های کلیدی: فرسودگی زیستی، میکروارگانیسیم ها، تنوع زیستی، میراث فرهنگی

مقدمه

فرهنگ منبعی از هویت، نوآوری و خلاقیت است. در گزارشی از یونسکو (سازمان آموزشی، علمی و فرهنگی ملل متحد) چنین بیان شده است که در سال ۲۰۰۵ صنایع فرهنگی بیش از ۱/۳ تریلیون دلار به اقتصاد جهانی کمک کرده است و باعث ایجاد بیش از ۷٪ از تولید ناخالص داخلی جهانی شده است. میراث فرهنگی، زیر مجموعه‌ای از این صنعت را تشکیل می‌دهد که به دلیل ماهیت شکننده و اهمیت اجتماعی و اقتصادی آن، استفاده از راهکارهای عملی و نوین برای حفظ آن ضروری است [۱].

برای مدت‌های طولانی اعتقاد بر این بود که فرایندهای فیزیکی و شیمیایی، فاکتورهای اصلی در تخریب میراث فرهنگی هستند، اما در دهه‌های اخیر نقش میکروارگانیسم‌ها در تخریب میراث فرهنگی به اثبات رسیده است [۲].

فرسودگی زیستی اصطلاحی است که اولین بار توسط هوک^۱ به کار برده شد و به هر تغییر نامطلوب در ویژگی‌های مواد که توسط فعالیت ارگانیسم‌های حیاتی ایجاد می‌شود اطلاق می‌گردد. یکی از اهداف اساسی در علم حفاظت و مرمت، افزایش دانش محققین این حوزه در مورد فرایندهایی است که می‌تواند منجر به فرسودگی زیستی شده و در نهایت باعث معرفی تیمارهای جدید در حذف این نوع فرسودگی‌ها شود [۱].

میکروارگانیسم‌ها شامل باکتری‌های اتوتروف و هتروتروف، آرکی‌ها، قارچ‌ها پروتوزوآ می‌باشد که البته گل‌سنگ‌ها و حشرات نیز از عوامل مهم زیستی مسئله ساز در میراث فرهنگی هستند. قارچ‌ها، باکتری‌ها و گل‌سنگ‌ها در نقاشی‌های دیواری در کلیساها، غارها، سطوح معماری و مقبره‌های سنگی به وفور یافت می‌شوند [۳، ۴]. میکروارگانیسم‌ها در تمام انواع بسترها از جمله سنگ و دیگر مواد ساختمانی مانند بتون، پوشش‌های نقاشی، شیشه و مواد استفاده شده در معماری‌ها فرسایش ایجاد می‌کنند [۴]. فرسودگی زیستی بویژه در مناطقی با رطوبت نسبی بالا توسط موجوداتی مانند اکتینومایست‌ها و قارچ‌ها به کرات اتفاق می‌افتد [۵]. آلودگی‌هایی مانند ترکیبات نیتروژنی و هیدروکربن‌های ناشی از منابع کشاورزی و صنعتی می‌تواند نیاز تغذیه‌ای میکروارگانیسم‌های مستقر شده روی سنگ را تامین کنند [۶]. مطالعات اولیه نشان داده است که همزیستی موجودات زنده روی سنگ با ایجاد تخلخل، افزایش زبری سطح و توانایی تجمع آب و مواد آلی باعث افزایش حساسیت و فرسایش چنین بسترهایی می‌شود [۷]. از آنجا که اولین گام در پیشگیری، کنترل و تیمار عوامل فرسودگی میکروبی، شناسایی آن‌ها در بسترهای با ارزش هنری و تاریخی است، در مطالعه‌ی حاضر، به مروری بر انواع میکروارگانیسم‌ها، نقش آن‌ها در فرسایش و نحوه آسیب‌های ایجاد شده و نیز فاکتورهای محیطی موثر می‌پردازیم.

روش بررسی

این مطالعه به روش کتابخانه‌ای و با جستجو در پایگاه‌های الکترونیکی Science direct, Scopus, Google scholar با کلمات کلیدی Biodeterioration, Microorganisms, Microbial Deterioration, Cultural Heritage انجام شد.

۱- میراث فرهنگی

زمانی که از میراث فرهنگی صحبت می‌شود منظور، میراث ملموس مانند ساختمان‌ها، بناهای تاریخی، کتاب‌ها، آثار هنری، چشم اندازهای فرهنگی، تنوع زیستی و میراث طبیعی و سایر مصنوعات دست بشر و نیز میراث ناملموس مانند آداب و رسوم، سنت‌ها، زبان و غیره می‌باشد، که از نسل‌های گذشته به ارث رسیده و در زمان حال موجود است و باید برای استفاده به نسل‌های بعدی نگهداری شود [۸، ۹]. طبق گزارش‌های یونسکو در حال حاضر ۹۶۲ سایت میراث جهانی در سطح بین‌المللی و در ۱۵۷ کشور وجود دارد که هر کدام از این سایت‌ها برای جامعه بین‌المللی حائز اهمیت می‌باشند [۸].

1- Hueck

۲- فرسودگی زیستی

طبق تعریف همانطور که قبلاً اشاره شد فرسودگی زیستی^۲ یک فرایند پیچیده است که باعث ایجاد تغییرات نامطلوب در ویژگی های فیزیکوشیمیایی و مکانیکی مواد، توسط عوامل زیستی می شود [۱۰].

تاریخچه تجزیه و تحلیل علمی فرسودگی زیستی بناهای تاریخی توسط گلینگ ها و گیاهان به اوایل قرن بیستم بر می گردد. در دهه ۱۹۸۰ روش های مدرن میکروبیولوژی برای پاسخ به سوالات مربوط به هوازگی زیستی آثار و بناهای تاریخی توسط پیشگامان این رشته مانند Krumbein در آلمان، Jiménez در اسپانیا، Koestler in در امریکا، Monte در ایتالیا، Inou در ژاپن و Allsopp در انگلستان به کار برده شد. اکثر مقالات در این حوزه، در اولین شماره های مجله علمی IBBS در سال ۱۹۹۱ انتشار یافت [۱۱].

بسیاری از معماری ها و ساختمان ها هنگام تماس با خاک، آب، پساب، غذا، محصولات کشاورزی و مواد زائد، در معرض فرسودگی زیستی قرار می گیرند. این پدیده پیچیده در ارتباط تنگاتنگی با بسیاری از فرایندهای فیزیکی و شیمیایی اتفاق می افتد. تمایز بین آسیب های ایجاد شده توسط عوامل زیستی از غیر زیستی کار ساده ای نیست. سهم میکروارگانیسم ها در فرسودگی زیستی مواد، حدود ۳۰ درصد تخمین زده شده است [۱۲].

بیشتر مسیرهای تجزیه مواد میراث فرهنگی توسط موجودات زنده، به منظور تغذیه آن ها انجام می شود. همچنین محصولات متابولیکی ترشح شده توسط میکروارگانیسم ها مانند اسیدهای آلی، آنزیم ها، حلال ها، سورفکتانت ها، رنگدانه ها و بیوفیلیم ها موجب می گردد تا آثار هنری و تاریخی نمونه های باستانی آسیب ببینند [۱۳، ۱۴]. این فرایندها شاید در کوتاه مدت شدید و قابل توجه نباشد اما در بلند مدت منجر به فرسایش قابل توجهی می شوند [۱۵]. شرایط محیطی در رشد میکروارگانیسم ها و به تبع آن فرسودگی زیستی بسیار مؤثر است. مهمترین فاکتورهایی که بر رشد میکروارگانیسم ها اثر می گذارند شامل فاکتورهای فیزیکی بویژه رطوبت، دما و نور و ماهیت شیمیایی بستر است [۸]. الگوهای فرسودگی زیستی توسط میکروارگانیسم های مختلف متفاوت است. برخی آسیب ها به شکل زنگارهایی^۳ در سطح مواد، مشاهده می شود. تولید و گسترش زنگارهای زیستی معمولاً باعث تغییر رنگ، تشکیل لایه، پوسته پوسته شدن^۴ و رسوب مواد معدنی ثانویه می شوند. نشان داده شده است که گاهی برخی از زنگارها به واسطه پوششی که روی سطح ایجاد می کنند، بستر خود را از عوامل محیطی محفوظ می نمایند و از این لحاظ ممکن است مطلوب باشند. اما در اغلب موارد زنگارها باعث ایجاد تغییرات عمیق و نامطلوب در ویژگی های فیزیکوشیمیایی مواد معدنی بستر می شوند. لازم به ذکر است فرسودگی زیستی مواد به طور مستقیم وابسته به پذیرش زیستی بستر می باشد که خود نیز وابسته به ویژگی های شیمیایی، تخلخل سطح و توانایی استقرار میکروارگانیسم ها روی بستر می باشد [۱۶].

از دیگر الگوهای فرسودگی زیستی روی سطوح ساختمان ها تغییر رنگ^۵ سطوح توسط ترشح رنگیزه های زیستی و تولید مواد پلیمری خارج سلولی (EPS)^۶ است که فشارهای مکانیکی به ساختار بستر وارد می کنند. به واسطه انقباض و انبساط لایه پلیمری با منشای زیستی، اندازه منافذ سطوح تغییر یافته که همراه با تغییر در میزان رطوبت و دماست [۱۷]. همچنین جمعیت های میکروبی می توانند اسیدیته بسترها را تغییر دهند. گزارش هایی وجود دارد که تغییر در pH منجر به تغییر رنگ در پارچه ها شده است. بررسی ها نشان داده است که رشد میکروبی منجر به تجزیه فیبرها، تغییر در ساختار و تکه تکه شدن شدن بستر شده، بنابراین منجر به کاهش درجه پلی مریزاسیون و قدرت انبساط و قابلیت ارتجاع مواد پارچه ای هستند [۱۸].

2- Biodeterioration

3- Patination

4- Exfoliation

5- Staining

6- Extracellular Polymeric Substances (EPS)

از دیگر الگوهای فرسودگی زیستی آثار هنری و تاریخی، تشکیل بیوفیلم های میکروبی است که نتیجه آن، انحلال سنگ ها، ایجاد سوراخ های میکروسکوپی و به دنبال آن افزایش تخلخل در آن می باشد. افزایش تخلخل منجر به استقرار جلبک ها و سایر میکروارگانیسم ها در لایه های زیرین سوبسترا می شود. در نهایت، تغییر در الگوهای گردش رطوبت در بستر و نیز تغییرات دمایی، منجر به قطعه قطعه شدن بسترهای سنگی می گردد [۱۹].

۲-۱ مکانیسم های فرسودگی زیستی

میکروارگانیسم ها با دو مکانیسم Assimilatory و Dissimilatory در فرسودگی زیستی عمل می کنند. فرسودگی زیستی Assimilatory رایج ترین شکل فرسودگی زیستی است و مکانیسمی است که میکروارگانیسم ها از مواد بستر، بعنوان منبع غذایی استفاده می کنند. فرسودگی زیستی Dissimilatory شامل تجزیه شیمیایی یک ماده و یا فعل و انفعالات مواد بستر، بدون استفاده مستقیم از بستر بعنوان منبع غذایی است. این دو مکانیسم فرسودگی می تواند به صورت بیوفیزیکی یا بیوشیمیایی اتفاق بیفتد.

فرسودگی بیوفیزیکی شامل همه انواع تغییرات فیزیکی روی مواد بستر و ضایعات سطحی آن است که به دلیل اتصال و انفصال میکروارگانیسم ها در طول رشد و حرکتشان ایجاد می شود. بعلاوه نفوذ و اعمال فشار باعث تخریب ساختاری و یا مکانیکی بستر می شود.

فرسودگی بیوشیمیایی شامل پیچیده ترین شکل فرسودگی زیستی است که بواسطه فرایندهای متابولیکی میکروارگانیسم ها روی مواد بستر ایجاد می شود و ممکن است با ترشح محصولات آلی و غیر آلی اسیدی و رنگدانه ها همراه باشد. این محصولات می توانند منجر به نقش انداختن، ایجاد لکه روی اشیا و در نهایت ضعیف شدن مواد زمینه ای گردد و به ایجاد شرایط مناسبتر برای اتصال و رشد بیشتر میکروارگانیسم ها و نیز افزایش فرایندهای مخرب کمک کنند. فرسودگی بیوشیمیایی همچنین می تواند با ترشح آنزیم های میکروارگانیسم های مستقر شده ایجاد شود که باعث تجزیه مولکول های آلی مانند فیبرهای سلولز در کاغذ می شود [۱].

۲-۲ فاکتورهای موثر در فرسودگی زیستی

فاکتورهای متعددی در فرایند فرسودگی زیستی نقش دارند که به برخی از مهمترین آن ها اشاره می شود:

۱- پذیرش زیستی^۷ مواد که به عنوان ظرفیت مواد برای استقرار یک یا چند گروه از ارگانیسم های زنده بدون اینکه لزوماً فرسودگی زیستی را القا کنند اطلاق می شود. به عبارتی به عنوان ویژگی های کلی مواد بستر که در ایجاد، اتصال و گسترش پوشش میکروبی شرکت می کنند، تعریف شده است [۲۰]. پذیرش زیستی و ویژگی های دیگر بستر مانند قدرت، سختی، چگالی، در ظاهر، دوام و کارایی سنگ در ساختمان ها و کارهای هنری تعیین کننده است [۲۱].

۲- شرایط محیطی شامل رطوبت نسبی، دما و همچنین تاثیرات فیزیکیوشیمیایی ناشی از تمیز کردن بسترها می باشد [۱]. بررسی ها نشان می دهد که در دمای بالاتر از ۳۰ درجه سانتیگراد همراه با رطوبت نسبی زیاد، همه ی فرایندهای زیستی تسریع می شوند، اما دماهای پایین تر از ۴ درجه سانتیگراد، می تواند رشد غالب میکروارگانیسم ها را به تاخیر می اندازد [۲۲].

۳- بیوشیمی ارگانیسم های مستقرشده که شامل نیازهای تغذیه ای و متابولیتی میکروارگانیسم های ساکن است [۱].

۳- میکرو ارگانیسم های شرکت کننده در فرسودگی زیستی

۳-۱ قارچ ها

هزاران سال است که بشر به نقش مهم قارچ ها در زندگی خود پی برده است. قارچ ها انواع مختلفی دارد که به مخمرها، کپک ها، قارچ های خوراکی و سمی تقسیم بندی می شوند. امروزه آلودگی قارچی در اماکن مختلف رو به افزایش است. قارچ ها تهدیدی جدی برای اشیای هنری در موزه ها و انبارها به شمار می رود. مطالعات نشان داده است که قارچ ها توانایی ساکن شدن، تغییر دادن و تجزیه همه انواع مواد آلی و غیر آلی را دارند. اما به نظر می رسد نیاز است که دانش کارشناسان حفاظت و مرمت از اشیای موزه ای در حوزه قارچ ارتقا پیدا کند. به دلیل تنوع زیاد آنزیم های خارج سلولی قارچ ها (مانند سلولازها^۸، گلوکونازها^۹، لاکازها^{۱۰}، فنولازها^{۱۱}، کراتینازها^{۱۲}، مونو اکسیژنازها^{۱۳}) و توانایی قابل توجه آن ها در رشد در محیط هایی با آب در دسترس کم، حفاظت از اشیای موزه ای و پیشگیری، نظارت و تیمار کپک ها روی اشیای آلوده ای میراثی اهمیت ویژه ای دارد [۲۳].

قارچ ها ارگانیسم هایی هتروتروف هستند که در همه جا حضور دارند و می توانند شرایط محیطی سخت را تحمل کرده و با راهبردهای خاص ساختاری، مورفولوژیکی و متابولیکی شان، خود را با هر شرایطی تطبیق دهند. این میکروارگانیسم ها عوامل فرسایشگر جدی و چند منظوره محسوب می شوند که می توانند در انواع بسترها مانند کاغذ، چوب، صخره و فلزات ساکن شوند [۲۴]. قارچ ها می توانند روی هر ماده ی آلی که مواد غذایی ضروری شان را فراهم می کند و همچنین روی مواد غیر آلی رشد کنند و مواد غذایی مورد نیاز خود را از آلودگی سطحی یا آلاینده های هوا بدست آورند [۸]. مطابق نظر برخی محققان، قارچ ها، مهمترین عامل در فرسودگی زیستی آثار فرهنگی در محیط های بیرونی هستند [۲۵] و به دلیل ترشح مقدار بیشتری از اسیدهای آلی نسبت به باکتری ها فرسایش بیشتری ایجاد می کنند [۷]. بعلاوه، کلنی قارچ ها به دلیل تولید ملانین زیاد در دیواره سلولی، به شکل لکه یا فیلم ظاهر می شود [۲۶]. مطالعات نشان داده است که هیف قارچ ها می تواند در سنگ ها نفوذ و شکاف وسیع در سنگ ها و مواد ساختمانی ایجاد کنند که عامل تخریب فیزیکی سنگ است [۲۵، ۲۷]. این نفوذ، باعث انتقال همزمان آب و مواد غذایی به درون سنگ شده و باعث تسهیل استقرار قارچ ها و سایر میکروارگانیسم های درون سنگ شده و همزمان باعث فرسودگی بیوشیمیایی می شوند [۲۸]. بیش از ۲۰۰ گونه ی قارچی عامل اصلی تخریب اشیای میراث فرهنگی یا کاغذی گزارش شده است. در کارهای هنری کاغذی، قارچ ها با استقرار روی بسترهای سلولزی، علاوه بر اینکه در ظاهر اشیای تغییر ایجاد کرده و رنگ و زنگار تولید می کنند، باعث تغییرات شدید در ساختار فیزیکی و شیمیایی آن ها نیز می شوند [۲۹].

قارچ ها همچنین با تولید انواع اسیدهای آلی مانند اسید اگزالیک، اسید گلوکونیک و اسید لاکتیک باعث کلاته کردن یون های منیزیم، منگنز، آهن و کلسیم از سطح سنگ شده و ایجاد فرسودگی در بستر می کنند [۳۰]. از طرفی میکروفلورهای قارچی با تجزیه مواد آلی ترشح شده توسط سایر ارگانیسم های فتوتروف و از طریق آزاد سازی متابولیت های اسیدی، موجب پوسیدگی و انحلال سنگ می شوند [۳۱].

8- cellulases

9- glucanases

10- laccases

11- phenolases

12- keratinases

13- mono-oxygenases

از لحاظ محل استقرار روی بسترهای سنگی، قارچ ها به دو گروه اپی لیتیک و اندولیتیک طبقه بندی می شوند. قارچ های اپی لیتیک که روی سنگ ها زندگی می کنند و نیز قارچ های اندولیتیک که درون سوراخ ها و شکاف ها زندگی می کنند نقش مهمی در فرسایش آثار تاریخی ساخته شده از سنگ ایفا می کنند. در آب و هوای مرطوب و معتدل جمعیت های قارچی از نوع هیفومیست ها شامل گونه های آلترناریا^{۱۴}، کلادوسپوریوم^{۱۵}، اپی کوکوم^{۱۶}، اورئوبازیدیم^{۱۷} و فوما^{۱۸} غالب می باشند. در محیط های خشک و نیمه خشک، جمعیت های غالب قارچی از نوع مخمرهای سیاه و قارچ های میکروکلنی است بررسی ها نشان می دهد قارچ های سیاه به طور عمقی درون سنگ های گرانیات، آهکی کلسیمی و مرمری ساکن می شوند و موجب فرسایش آنها می شوند. پدیده ی چاله زیستی^{۱۹} که ایجاد ضایعات حفره ای با قطر چند میلیمتر تا سانتیمتری درون سنگ است، توسط قارچ های سیاه ایجاد می شود [۲۳]. قارچ ها به دلیل فعالیت آنزیمی بسیار زیاد، نقش مهم در تجزیه مصنوعات دارند [۲۶].

از میان کلونی های فرسایشگر قارچی بسیاری از گونه های دوترومیست ها مانند گونه های آسپرژیلوس، فوزاریوم^{۲۰}، پنی سیلیوم، استمفیلیوم^{۲۱} و آسکومیست ها به طور مکرر از کتاب ها، اسناد و نقاشی ها جدا سازی شده اند. مطابق گزارش های موجود قارچ های جنس آسپرژیلوس و پنی سیلیوم از فراوان ترین قارچ هایی هستند که از بسترهای هنری و تاریخی جدا شده اند [۸].

آلودگی قارچی در موزه ها و مخازن اغلب هوابرد است و با تغییرات مهم فصلی تعداد زیادی از اسپورها می توانند همراه با گرد و غبار منتشر و روی اشیا تجمع پیدا کنند. سیستم تهویه ضعیف و دمای غیر همگن، می تواند مناطقی را روی سطوح ایجاد کند که شرایط رشد بسیاری از قارچ ها را فراهم کند [۴].

۲-۳ باکتری ها (یوباکترها و آرکی ها)

درخت فیلوژنتیکی حیات، دو قلمرو پروکاریوتی شامل باکتری ها و آرکی ها دارد که ارگانیسم های تک سلولی دارای هسته ی بدون غشا هستند. تفاوت های اصلی در ساختار سلولی میکروارگانیسم های باکتریایی و آرکیایی در ترکیب دیواره سلولی است. در یوباکتری ها دیواره سلولی از جنس پپتیدوگلیکان است ولی در آرکی ها سودومورین، پلی ساکاریدها، پروتئین ها و گلیکوپروتئین ها ساختار اصلی دیواره سلولی را تشکیل می دهد. مهمترین گروهی که از کارهای هنری جدا شده اند در زیر معرفی می شوند [۲۲].

14- *Alternaria*

15- *Cladosporium*

16- *Epicoccum*

17- *Aureobasidium*

18- *Phoma*

19- *Biopitting*

20- *Fusarium*

21- *Stemphylium*

۲-۳-۱ باکتری های شیمیولیتوتروف (شیمیوارگانوتروف)

باکتری های شیمیوارگانوتروف از مواد آلی بعنوان منبع کربن و انرژی استفاده می کنند. این میکروارگانیسم ها معمولاً با تولید اسیدهای آلی پیچیده و از طریق اکسیداسیون و آزاد سازی کاتیون های فلزی مانند یون های آهن و منگنز شبکه معدنی سنگ ها را فرسوده می کنند [۶]. برخی از مهمترین باکتری های شیمیولیتوتروف عامل فرسودگی زیستی کارهای هنری معرفی می شوند.

باکتری های اکسید کننده ی گوگرد یکی از خطرناکترین گروه باکتری ها در آثار سنگی است. هنگامی که باکتری های اکسیدکننده گوگرد اسید سولفوریک که یک اسید غیر آلی قوی است را تولید می کنند، با تاثیر بر مواد بستر ترکیباتی مانند سولفید هیدروژن، سولفید عنصری و تیوسولفات^{۲۲} ایجاد می شود [۲۲]. این سولفات ها با رسوب درون حفره های سنگ و سپس بلوری شدن مجدد، فشار زیادی بر دیواره خلل و فرج اعمال می کنند [۲۸]. از جمله خطرناک ترین این گروه از باکتری ها تیوباسیلوس^{۲۳} و تیمیکروسپوریوم^{۲۴} ها هستند که قادرند به طور مستقیم سولفیت ها را به سولفات اکسیده کنند و ویژگی های اکولوژیکی آن ها منجر به تولید بیشتر اسید سولفوریک می شود [۲۲]. مهم ترین گروه از باکتری های عامل اصلی فرسودگی زیستی بتون، متعلق به جنس های /اسیدی تیوباسیلوس بویژه گونه های اسیدی تیوباسیلوس تیواکسیدانس [۱۲]. است و خوردگی زیستی فلزات توسط تیوباسیلوس فرواکسیدانس، تیوباسیلوس تیواکسیدانس، گونه های متالونیوم و گونه های سولفولوبوس ایجاد می شود [۲۲].

باکتری های نیتریفیه کننده شامل باکتری های اکسید کننده آمونیاک شامل نیتروزوموناس^{۲۵} و نیتروزوکوکوس^{۲۶} است که آمونیاک را به اسید نیتروس اکسیده می کنند و باکتری های اکسید کننده نیتريت مانند نیتروباکتر و نیتروکوکوس که اسید نیتروس را به اسید نیتريك اکسید می کنند. این فرایند متابولیکی نیتریفیکاسیون نامیده می شود. باکتری های نیتریفیه کننده بواسطه تولید نهایی اسید نیتريك نقش مهمی در هوازدهی زیستی سنگ ایفا می کنند.

باکتری های هیدروژنه از هیدروژن مولکولی بعنوان منبع انرژی استفاده کرده و در نهایت دی اکسید کربن را به کربن آلی تبدیل می کنند. اهمیت این باکتری ها، فعالیت در شرایط خاص محیطی، حتی در غیاب موقتی منبع اولیه انرژی است. تقریباً همه ارگانیسم های مورد اشاره شیمیولیتوتروف اختیاری هستند که امکان استفاده از ترکیبات آلی، بعنوان منبع انرژی را دارند (شیمیوارگانوتروف). باکتری های هیدروژنه تا زمانی که غلظت هیدروژن زیاد باشد، هم در حضور مواد آلی و هم در غیاب آن فعال هستند.

باکتری های آهن میکروارگانیسم هایی هستند که انرژی خود را از اکسیداسیون هوازی آهن فروس (Fe^{+2}) به فریک (Fe^{+3}) بدست می آورند. باکتری های آهن از روی سنگ های حاوی پیریت (سولفید فریک)، نقاشی های دیواری، بسترهای حاوی ترکیبات آهن احیا شده و مصنوعات آهنی جدا می شوند. در محیط های اسیدی، تیوباسیلوس فرواکسیدانس به وفور دیده می شوند که با استفاده از آهن فروس و ترکیبات احیا شده از سولفور بعنوان دهنده ی الکترون، بصورت اتوتروفي زندگی می کنند [۲۲].

22- Thiosulfate

23- Thiobacillus

24- Thiomicrospira

25- Nitrosomonas

26- Nitrosococcus

۲-۳-۲ باکتری های فتوتروف

میکروارگانیسم های فتوتروف به لحاظ محل استقرارشان روی بسترهای مختلف بصورت اپی لیتیکی (روی سطح سنگ) و یا اندولیتیکی (چندین میلیمتر داخل منافذ سنگ) زندگی می کنند [۱۷]. سیانوباکتری ها و جلبک ها ساکنان اولیه سطوح در محیط های باز هستند و از میان آن ها جلبک های سبز و کلرلا از فراوان ترین فتوتروف جدا شده از بسترهای تاریخی و هنری هستند [۱۹]. از آنجایی که سیانوباکتری های فتوتروف، برای رشد خود تنها نیاز به نور، آب و یون های معدنی دارند، تنها این میکروارگانیسم ها و جلبک ها به آسانی روی سطوح خارجی آثار تاریخی مستقر می شوند و تولید بیوفیلم می کنند و باعث تغییر ویژگی های بسترهای خود می شوند همچنین پیکره ی این موجودات به عنوان منبع غذایی به مصرف رشد سایر میکروارگانیسم های هتروتروف می رسد. این میکروارگانیسم ها نه تنها فرسودگی فیزیکی و شیمیایی بسترها را موجب می شوند بلکه به لحاظ زیبایی اثرات نامطلوب بر سطوح می گذارند [۱۷]. از طرف دیگر، سیانوباکتری ها می توانند مواد پلی مری خارج سلولی (EPS) تولید و ترشح می کنند که آن ها را در برابر خشکی و تابش شدید نور خورشید محافظت می کند [۳۲]. سیانوباکتری ها به دلیل امکان تحمل دوره های متناوب خشکی، دریافت مقادیر زیاد پرتوهای UV، اهمیت زیادی در سطوح دارند [۳۳]. بیوفیلم این گروه از باکتری ها در شرایط خشکی معمولاً به رنگ خاکستری و در مناطق مرطوب غالباً سبز رنگ دیده می شوند [۳۱]. بیوفیلم این باکتری ها نه تنها آگزوپلی مرهایی که عمدتاً پلی ساکاریدی هستند را تولید می کنند بلکه قادرند لیپیدها، رنگدانه ها و پروتئین ها را نیز تولید کنند. چنین مخلوط پیچیده ای، کمک به استحکام بیوفیلم، حفاظت آن ها علیه مواد ضد عفونی کننده کرده و نیز مخزنی برای ذخیره مواد غذایی است [۲۸]. رشد این میکروارگانیسم ها در اقلیم های سخت مانند بیابان های داغ و خاک های یخ زده مشاهده می شود. همچنین، رشد آن ها در زیستگاه های اندولیتیک موجب حفاظت آن ها از تابش شدید نور خورشید و خشکی سلول ها می شود. سیانوباکتری ها همه جایی هستند و بسته به شرایط آب و هوایی گونه های متفاوت آن ها را می توان جدا نمود. مکانیسم فرسایش سطوح توسط سیانوباکتری ها و جلبک ها، با ترشح اسیدهای آلی و غیر آلی است که باعث انحلال و نقش انداختن روی مواد معدنی می شوند. اسیدهای آلی مهم ترشح شده شامل اسید اگزالیکی، اسید سیتریک، اسید گلوکونیک، اسید ۲- اکسولوکونیک، اسید ۲- اکسولوکوتاریک، اسید اکسوالواستیک و اسید فوماریک و اسید کربنیک غیر آلی دائماً در طول تنفس تولید می شود [۳۱]. فرایند فرسودگی زیستی توسط ترشح اسیدهای خورنده سنگ آهک و سنگ مرمر و حمله ی ترکیبات قلیایی روی سنگ های سیلیکاتی، جذب و تجمع گوگرد و کلسیم به درون سلول، تغییرات مواد معدنی تشکیل دهنده ی سنگ، بزرگ شدن منافذ به دلیل نفوذ رشته های سلولی، تجزیه اجزای سنگ بویژه روی سنگ های گرانیته گزارش شده است. فتوتروف ها ممکن است کربوهیدرات ها و فاکتورهای تسهیل کننده ی رشد سایر اجزای جامعه ی میکروبی پیچیده بیوفیلم های سنگی را نیز ترشح کنند [۱۷].

۲-۳-۳ باکتری های هتروتروف

باکتری های هتروتروف زیادی می توانند روی کارهای هنری استقرار یابند، مانند باکتری هایی که انواع مختلف آنزیم ها را تولید می کنند و به طور مستقیم روی مواد مختلف بویژه مواد آلی تاثیر می گذارند. باکتری های هتروتروف همچنین از روی مواد غیر آلی مانند سنگ های تاریخی و تزئینی جدا شده اند و اکثر آن ها گرم مثبت متعلق به جنس های *باسیلوس*^{۲۷}، *بروی باسیلوس*^{۲۸}، *میکروکوکوس*^{۲۹}، *کلستریدیوم*^{۳۰}، *فرانکیا*^{۳۱}، *جنودرماتوفیلوس*^{۳۲}، *بلاستوکوکوس*^{۳۳}، *استافیلوکوکوس*^{۳۴}،

27- *Bacillus*28- *Brevibacillus*29- *Micrococcus*30- *Clostridium*31- *Frankia*

استرپتومایسس^{۳۵} و باکتری های گرم منفی مانند سودوموناس^{۳۶} و آسینتو باکتر^{۳۷} می باشند. اخیراً آرکی های هالوفیل مانند هالوموناس^{۳۸} و هالوکوکوس^{۳۹} از نقاشی های روی گچ بناها جدا شده است [۲۲]. هالوموناس^{۴۰} و سالینیسفرا^{۴۱} از روی سرامیک های با شوره های نمکی [۳۴] و هالوباکتریوم و هالوکوکوس از روی مواد سنگی شوره زده جدا شده اند. این گروه میکروارگانیسم ها گاهی اوقات می توانند رنگدانه های صورتی تولید کنند [۱۳]. باکتری های هتروتروف معمولاً بر اساس ماهیت فعالیت آنزیمی شان شناسایی می شوند مانند باکتری های پروتئولیتیک، باکتری های سلولوتیک، باکتری های آمیلولیتیک و باکتری های لیپولیتیک [۲۲].

باکتری های هتروتروف و قارچ ها می توانند حتی در غیاب استقرار اولیه فتوتروف ها، روی سطوح نقاشی رشد کرده و از ترکیبات آلی نقاشی به عنوان منبع غذایی استفاده کنند و با تولید اسید، باعث آسیب به نقاشی ها و سطوح زیرین آن ها شوند [۱۷].

۴-۲-۳ اکتینومیست ها

اکتینومیست ها بیشتر در مکان هایی یافت می شوند که رشد جلبک ها و میکروارگانیسم های شیمیوسنتتیک تثبیت کننده ی نیتروژن وجود دارد و با فعالیت متابولیکی خود، در تقویت هوازدگی و تجزیه مواد آلی سطوح سنگ نقش دارند [۳۵،۳۶]. بیشتر گونه های جدا و گزارش شده متعلق به جنس های نوکاردیا و استرپتومایسس می باشد. این میکروارگانیسم ها بیشتر در محیط های زیرزمینی مانند دخمه ها، سرداب ها، غارها و مقبره های با رطوبت دائمی و زیاد رشد می کنند. برخی از گونه های اکتینومیست مانند استرپتومایسس آلبوس^{۴۲} و استرپتومایسس فرادیه^{۴۳} در تجزیه پشم و دیگر فیبرهای پروتئینی نقش داشته و از چنین بسترهایی جدا شده اند [۳۵].

۳-۳ گل سنگ ها

گل سنگ ها همزیست های پیچیده ای هستند که از قارچ میکوبیونت که از لحاظ تغذیه ای وابسته به بخش فتوسنتز کننده یا فوتوبیونت هستند تشکیل شده اند [۲۲].

32- *Geodermatophilus*

33- *Blastococcus*

34- *Staphylococcus*

35- *Streptomyces*

36- *Pseudomonas*

37- *Acinetobacter*

38- *Halomonas*

39- *Halococcus*

40- *Halomonas*

41- *Salinisphaera*

42- *Streptomyces albus*

43- *Streptomyces fradiae*

گل‌سنگ‌ها در بسیاری از فرایندهای بیوژئوشیمیایی و بیوژئوفیزیکی شرکت دارند که می‌تواند عامل فرسایش شدید صخره‌ها در مدت زمان کوتاهی باشند [۳۷]. گل‌سنگ‌ها قادر به استقرار روی هر نوع سطحی از سنگ و ماسه سنگ در شرایط مرطوب و خشک هستند [۳۸]. علت فرسایش شدید بسترها توسط گل‌سنگ‌ها، اساساً به میکروبیونت آنها که شدیداً در تماس با سوبسترا قرار دارد، نسبت داده می‌شود [۳۹]. این فرایند باعث تبدیل صخره‌ها به خاک شده و طی تکامل منجر به تسهیل زندگی روی سطح زمین شده است. هنگامی که این بسترها به لحاظ فرهنگی و میراثی با ارزش باشند گل‌سنگ‌ها تهدیدی جدی برای آن‌ها محسوب می‌شوند [۳۷]. گل‌سنگ‌ها با تولید اسیدهای آلی باعث آزاد سازی مواد معدنی و ریز مغذی‌ها از بسترهای سنگی می‌شود [۳۸].

عموماً گونه‌های گل‌سنگی موجود روی بناهای تاریخی از گونه‌های موجود روی سنگ‌های اطراف بنا متفاوت نیستند و با توجه به اینکه امکان نمونه برداری از آثار تاریخی سنگی اغلب بسیار محدود است، لذا بسیاری از مطالعات این حوزه روی نمونه‌های بدست آمده از سنگ‌های طبیعی انجام شده است [۳۹].

اگرال‌ها که توسط بسیاری از گونه‌های گل‌سنگی تولید می‌شود، در فرسودگی زیستی، شیمیایی و فیزیکی بسترهای مختلف نقش دارد. به عنوان مثال گل‌سنگ‌ها با ترشح اسید اگرالیک که عامل تخریب ماتریکس سرامیک است باعث ایجاد فرسودگی زیستی از نوع احیایی مواد سرامیکی و آزبستی سقف بناها می‌شوند [۴۰].

در برخی موارد گل‌سنگ‌ها علاوه بر فرسودگی زیستی، می‌توانند عامل حفاظت زیستی سنگ باشند. گزارش شده است برخی گل‌سنگ‌ها در شرایط محیطی خاص می‌توانند به صورت فعال، سطوح سنگی را از طریق تالوس چترمانند خود محافظت کنند. علاوه بر این، حفاظت غیرفعال سنگ با تشکیل ترکیبات شیمیایی مانند اگرال‌ات کلسیم که نامحلول هستند، نیز القا می‌شود. گرچه نقش دوگانه گل‌سنگ‌ها در چندین مطالعه گزارش شده است ولی اختلاف نظر در این مورد در میان محققین وجود دارد [۴۱].

نتیجه‌گیری

میکروارگانیزم‌ها به عنوان یکی از عوامل مهم در فرسایش انواع بسترهای با ارزش تاریخی و هنری مطرح هستند. نقش تخریب گر انواع میکروارگانیزم‌ها اعم از باکتری‌ها، آرکی‌ها، قارچ‌ها و گل‌سنگ‌ها در سال‌های اخیر به اثبات رسیده است. با توجه به اهمیت میکروارگانیزم‌های مختلف در فرسودگی بسترهای مختلف هنری و تاریخی مانند نقاشی‌ها، آثار سنگی و سرامیکی، فلزی، اسناد کاغذی، منسوجات و فیلم‌ها لازم است شناسایی میکروارگانیزم‌های تخریب گر انجام گیرد و سپس تیمارهای مناسب تجویز گردد. مطالعات نشان داده شده است که استفاده از تیمارهای مختلف مرمت بدون توجه به شناسایی میکروارگانیزم‌های فرسایشگر، نه تنها باعث تغییر تنوع آن‌ها در بستر می‌شود بلکه گاه باعث تشدید و تحریک رشد آن‌ها می‌شود. با توجه به اینکه ایران جزو ده کشور اول دنیا در زمینه آثار تاریخی در سازمان جهانی یونسکو می‌باشد، امید است با دانستن این مهم، حفاظت و مرمت کارآمدتری را در این زمینه شاهد باشیم و گامی مهم در جهت حفظ میراث ارزشمند نیاکانمان برداشته و این امانات بزرگ و مهم به سلامت به دست نسل‌های بعدی برسد.

References

- 1- Alexander, S. A., & Schiesser, C. H. (2017). Heteroorganic molecules and bacterial biofilms: Controlling biodeterioration of cultural heritage. *ARKIVOC: Online Journal of Organic Chemistry*, 2017.
- 2- Perito, B., & Cavalieri, D. (2018). Innovative metagenomic approaches for detection of microbial communities involved in biodeterioration of cultural heritage. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 364, No. 1, p. 012074). IOP Publishing.
- 3- Mihajlovski, A., Gabarre, A., Seyer, D., Bousta, F., & Di Martino, P. (2017). Bacterial diversity on rock surface of the ruined part of a French historic monument: the Chaalis abbey. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 120, 161-169.
- 4- Sterflinger, K., & Piñar, G. (2013). Microbial deterioration of cultural heritage and works of art—tilting at windmills?. *Applied microbiology and biotechnology*, 97(22), 9637-9646.
- 5- Orlita, A. (2004). Microbial biodeterioration of leather and its control: a review. *International biodeterioration & biodegradation*, 53(3), 157-163.
- 6- Warscheid, T., & Braams, J. (2000). Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 46(4), 343-368.
- 7- Ghany, T. M. A., Omar, A. M., Elwkeel, F. M., Al Abboud, M. A., & Alawlaqi, M. M. (2019). Fungal deterioration of limestone false-door monument. *Heliyon*, 5(10), e02673.
- 8- Fierascu, I., Dima, R., Ion, R. M., & Fierascu, R. C. (2013). A new approach for the remediation of biodeteriorated mobile and immobile cultural artefacts. *European Journal of Science and Theology*, 9(2), 161-168.
- 9- Prieto, B., Vázquez-Nion, D., Fuentes, E., & Durán-Román, A. G. (2020). Response of subaerial biofilms growing on stone-built cultural heritage to changing water regime and CO₂ conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 148, 104882.
- 10- Guiamet, P. S., Soto, D. M., & Schultz, M. (2019). Bioreceptivity of archaeological ceramics in an arid region of northern Argentina. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 141, 2-9.
- 11- Sterflinger, K., Little, B., Pinar, G., Pinzari, F., de los Rios, A., & Gu, J. D. (2018). Future directions and challenges in biodeterioration research on historic materials and cultural properties. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 129, 10-12.
- 12- Cwalina, B. (2008). Biodeterioration of concrete. *Architecture civil engineering environment*. 2008; 4: 133-140.
- 13- Mazzoli, R., Giuffrida, M. G., & Pessione, E. (2018). Back to the past: “find the guilty bug—microorganisms involved in the biodeterioration of archeological and historical artifacts”. *Applied microbiology and biotechnology*, 102(15), 6393-6407.
- 14- Sierra-Fernandez, A., Gomez-Villalba, L. S., Rabanal, M. E., & Fort, R. (2017). New nanomaterials for applications in conservation and restoration of stony materials: A review. *Materiales de Construcción*, 67(325), 107.
- 15- Owczarek-Kościełniak, M., Krzewicka, B., Piątek, J., Kołodziejczyk, Ł. M., & Kapusta, P. (2020). Is there a link between the biological colonization of the gravestone and its deterioration?. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 148, 104879.
- 16- Marano, F., Di Rita, F., Palombo, M. R., Ellwood, N. T. W., & Bruno, L. (2016). A first report of biodeterioration caused by cyanobacterial biofilms of exposed fossil bones: A case study of the middle Pleistocene site of La Polledrara di Cecanibbio (Rome, Italy). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 106, 67-74.
- 17- Crispin, C. A., & Gaylarde, C. C. (2005). Cyanobacteria and biodeterioration of cultural heritage: a review. *Microbial ecology*, 49(1), 1-9.
- 18- Gutarowska, B., Pietrzak, K., Machnowski, W., & Milczarek, J. M. (2017). Historical textiles—a review of microbial deterioration analysis and disinfection methods. *Textile Research Journal*, 87(19), 2388-2406.

- 19- Goffredo, G. B., Accoroni, S., Totti, C., Romagnoli, T., Valentini, L., & Munafò, P. (2017). Titanium dioxide based nanotreatments to inhibit microalgal fouling on building stone surfaces. *Building and Environment*, 112, 209-222.
- 20- Guillitte, O. (1995). Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies. *Science of the total environment*, 167(1-3), 215-220.
- 21- Miller, A. Z., Sanmartín, P., Pereira-Pardo, L., Dionísio, A., Sáiz-Jiménez, C., Macedo, M. F., & Prieto, B. (2012). Bioreceptivity of building stones: a review. *Science of the total environment*, 426, 1-12.
- 22- Ranalli, G., Zanardini, E., & Sorlini, C. (2009). Biodeterioration—including cultural heritage. Pages 191–205
- 23- Sterflinger, K. (2010). Fungi: their role in deterioration of cultural heritage. *Fungal biology reviews*, 24(1-2), 47-55.
- 24- Trovão, J., Portugal, A., Soares, F., Paiva, D. S., Mesquita, N., Coelho, C., ... & Tiago, I. (2019). Fungal diversity and distribution across distinct biodeterioration phenomena in limestone walls of the old cathedral of Coimbra, UNESCO World Heritage Site. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 142, 91-102.
- 25- Gambino, M., Ahmed, M. A. A. A., Villa, F., & Cappitelli, F. (2017). Zinc oxide nanoparticles hinder fungal biofilm development in an ancient Egyptian tomb. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 122, 92-99.
- 26- Helmi, F. M., Ali, N. M., & Ismael, S. M. (2015). Nanomaterials for the inhibition of microbial growth on ancient Egyptian funeral masks. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 15(3), 87-95.
- 27- Urzi, C., De Leo, F., De Hoog, S., & Sterflinger, K. (2000). Recent advances in the molecular biology and ecophysiology of meristematic stone-inhabiting fungi. In *Of Microbes and Art* (pp. 3-19). Springer, Boston, MA.
- 28- Fernandes, P. (2006). Applied microbiology and biotechnology in the conservation of stone cultural heritage materials. *Applied microbiology and biotechnology*, 73(2), 291.
- 29- Pinzari, F., Pasquariello, G., & De Mico, A. (2006). Biodeterioration of paper: A SEM study of fungal spoilage reproduced under controlled conditions. In *Macromolecular Symposia*. 238 (1): 57-66). Weinheim: WILEY-VCH Verlag.
- 30- Mohammadi, P., & Maghbolli-Balasjin, N. (2014). Isolation and molecular identification of deteriorating fungi from Cyrus the Great tomb stones. *Iranian journal of microbiology*, 6(5), 361.
- 31- Ferrari, C., Santunione, G., Libbra, A., Muscio, A., Sgarbi, E., Siligardi, C., & Barozzi, G. S. (2015). Review on the influence of biological deterioration on the surface properties of building materials: Organisms, materials, and methods. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 10(1), 21-39
- 32- Li, Q., Zhang, B., Yang, X., & Ge, Q. (2018). Deterioration-Associated Microbiome of Stone Monuments: Structure, Variation, and Assembly. *Applied and Environmental Microbiology*, AEM-02680.
- 33- Crispim, C. A., Gaylarde, C. C., & Gaylarde, P. M. (2004). Biofilms on church walls in Porto Alegre, RS, Brazil, with special attention to cyanobacteria. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 54(2-3), 121-124.
- 34- Coutinho, M. L., Miller, A. Z., & Macedo, M. F. (2015). Biological colonization and biodeterioration of architectural ceramic materials: an overview. *Journal of Cultural Heritage*, 16(5), 759-777.
- 35- Tiano, P. (2002, April). Biodegradation of cultural heritage: decay mechanisms and control methods. In *Seminar article*, New University of Lisbon, Department of Conservation and Restoration (pp. 7-12).
- 36- Dakal, T. C., & Cameotra, S. S. (2012). Microbially induced deterioration of architectural heritages: routes and mechanisms involved. *Environmental Sciences Europe*, 24(1), 36.

- 37- Gholipour-Shahraki, M., & Mohammadi, P. (2017). The Study of Growth of *Calogaya* sp. PLM8 on Cyrus the Great's Tomb, UNESCO World Heritage Site in Iran. *International Journal of Environmental Research*, 11(4), 501-513.
- 38- Zhang, G., Gong, C., Gu, J., Katayama, Y., Someya, T., & Gu, J. D. (2019). Biochemical reactions and mechanisms involved in the biodeterioration of stone world cultural heritage under the tropical climate conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 143, 104723.
- 39- Salvadori, O., & Municchia, A. C. (2016). The role of fungi and lichens in the biodeterioration of stone monuments. In *The Open Conference Proceedings Journal* (Vol. 7, No. 1).
- 40- Gadd, G. M., Bahri-Esfahani, J., Li, Q., Rhee, Y. J., Wei, Z., Fomina, M., & Liang, X. (2014). Oxalate production by fungi: significance in geomycology, biodeterioration and bioremediation. *Fungal Biology Reviews*, 28(2-3), 36-55.
- 41- Municchia, A. C., Bartoli, F., Taniguchi, Y., Giordani, P., & Caneva, G. (2018). Evaluation of the biodeterioration activity of lichens in the Cave Church of Üzümlü (Cappadocia, Turkey). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 127, 160-169.