

تأثیر تغییرات اقلیمی بر آثار هنری و باستانی

ریحانه شکاری^۱، پریسا محمدی^۲

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

^۲ مرکز تحقیقات میکروبیولوژی کاربردی و بیوتکنولوژی میکروبی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

چکیده

میراث تاریخی و هنری آثاری هستند که از نسل‌های گذشته به جای مانده‌اند و اهمیت اقتصادی و فرهنگی فراوانی برای هر ملتی دارند. خطرات مختلفی این آثار را تهدید می‌کند که یکی از مهم‌ترین آنها تغییرات اقلیمی است. تغییرات اقلیمی اثرات مستقیم و غیر مستقیم بر بناهای تاریخی دارد. تغییرات مستقیم اقلیم شامل تغییرات شدید درجه حرارت، افزایش رطوبت، سیل و طوفان می‌باشد. تأثیرات غیر مستقیم تغییرات اقلیم نیز می‌تواند بر جوامع میکروبی و سایر موجودات زنده اثر بگذارد. میکروارگانیسم‌ها از عواملی هستند که نقش اصلی را در تخریب بناها برعهده دارند. با تغییر اقلیم، رفتار میکروارگانیسم‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به عبارتی تنوع میکروارگانیسم‌ها و متابولیسم آنها تغییر می‌کند. این تغییرات می‌تواند تأثیر مخرب میکروارگانیسم‌ها بر بناهای تاریخی را تشدید نماید. بنابر این در حوزه حفاظت و مرمت از آثار باستانی موضوع تغییرات اقلیمی و پیش بینی آن در آینده، بسیار ضروری است که به دنبال شناخت این اثرات روی آثار هنری و بناهای تاریخی، می‌توان راهکارهای مقابله با این خطرات را معرفی و تبیین نمود.

واژه‌های کلیدی: میراث جهانی، میراث فرهنگی، تغییر اقلیم، میکروارگانیسم‌ها، فرسودگی زیستی، بیوفیلیم، اومیکس

۱- مقدمه

آثار باستانی، میراثی هستند که از نسل‌های گذشته، برای نسل‌های آینده به عنوان هویت فرهنگی و هنری به یادگار مانده است. میراث باستانی ملموس شامل بناها و اماکن و حتی مصالحی است که در این بناها به کار رفته است. تا آنجایی که ممکن است میراث تاریخی را باید از اثرات نامطلوب تغییرات اقلیمی حفاظت نمود [۱]. تغییرات اقلیمی در تمام نقاط دنیا با تغییر پارامترهایی مثل دما، بارش، تغییر ارتفاع سطح دریا، سیل و دوره های خشکسالی همراه است. در کنار چالش‌های مختلف تغییرات اقلیمی، چالش بزرگ مورد نظر در این مطالعه، چگونگی حفظ آثار و بناهای تاریخی در این شرایط می‌باشد. بناها و اماکن تاریخی همانند موجودات زنده و سایر عوامل، به تغییرات آب و هوایی حساس می‌باشند. انجماد و ذوب، شوک حرارتی، تغییر رطوبت و سایر عوامل در آسیب و ماندگاری این بناها بسیار مهم می‌باشند. این موارد می‌توانند باعث فرسایش، پودر شدن، گسترش ترک‌ها، تغییر شکل آثار و بناهای تاریخی شود [۲]. علاوه بر این پیش بینی می‌شود با تغییرات اقلیمی، آثار تاریخی با مخاطرات جدید و ناشناخته دیگری هم روبرو گردد و چالش‌های جدیدی را بوجود آورد [۳]. اقدامات مناسب، سیاست‌گذاری و معرفی راهبردهای سازگار در مدیریت میراث فرهنگی به خصوص در مورد آثار در معرض خطر، بسیار ضروری است. علیرغم خطرات تغییر اقلیم بر آثار باستانی، تحقیقات کمی در این زمینه انجام شده است و نداشتن دانش کافی در این موضوع، تصمیم‌گیری برای حفظ این آثار را با چالش جدی مواجه کرده است. به همین دلیل سازمان یونسکو خواستار ایجاد ارتباط موثر میان سازمان‌ها، متولیان حفظ آثار و مراکز تحقیقاتی دنیا شده است [۴].

۲- روش انجام مطالعه

این مطالعه به روش کتابخانه ای و با جستجو در پایگاه‌های داده Scopus، Google scholar، Science direct با کلمه های کلیدی Biodeterioration، World Cultural Heritage، Microbial Deterioration، Climate Change انجام شد.

۳- تغییر اقلیمی

برطبق نظر سازمان (IPCC) Inter-governmental Panel on Climate Change تا اواخر قرن ۲۱ دمای کره زمین ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت [۵]. در پنجمین گزارش IPCC تاکید ویژه‌ای به حفظ آثار تاریخی از اثرات مخرب تغییر اقلیم، شده است. تغییرات آب و هوایی مطابق پروتکل IPCC چنین تعریف شده است: "تغییر آب و هوا که به طور مستقیم یا غیر مستقیم در اثر فعالیت‌های بشر، منجر به تغییر ترکیبات اتمسفر شده است و در مقایسه با گذشته منجر به تغییر تنوع آب و هوایی در یک بازه مشابه زمانی گردد". یکی از مهمترین عوامل ایجاد تغییرات آب و هوایی، افزایش گازهای گلخانه‌ای مانند دی اکسید کربن می‌باشد. غلظت دی اکسید کربن اتمسفر بعد از انقلاب صنعتی بطور چشمگیری افزایش یافته است، بطوریکه میانگین دما به دنبال آن، به میزان ۱/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است. همچنین پیش بینی می‌شود بارش‌ها در عرض‌های جغرافیایی بالای کره زمین، افزایش و در عرض‌های جغرافیایی پائین کره زمین، کاهش یابد [۶]. همانطور که ذکر گردید تغییرات آب و هوایی به طور مستقیم و غیر مستقیم به میراث جهانی آسیب می‌رساند و باعث افزایش هزینه های ناشی از مرمت آنها می‌شود و در بدترین حالت، امکان از دست رفتن این آثار ارزشمند وجود دارد [۷ و ۸]. اثرات مستقیم در اثر تغییرات ناگهانی مانند باد، طوفان، سیل و یا تغییرات شدید درجه حرارت ایجاد می‌شود و اثرات غیر مستقیم تاثیر اقلیم بر بناها می‌تواند، ناشی از تاثیر بر جمعیت‌های موجودات زنده باشد. به منظور نظارت بر خطرات ناشی از تغییرات آب و هوا، مدیران حفظ آثار تاریخی نیازمند داشتن اطلاعات علمی در مورد خطرات و آسیب پذیری‌های فعلی و نیز پیش بینی خطرات در آینده، هستند. چگونگی مقابله با خطرات احتمالی، می‌تواند به حفظ بهتر وضعیت ظاهری و فیزیکی آثار با ارزش

جهانی کمک کند. برای تحقق این امر، نیاز به همکاری و همیاری دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی، مدیران مجموعه‌های میراث فرهنگی و موسسات دولتی است [۹ و ۱۰].

۳-۱- روش‌های بررسی تغییرات اقلیمی

روش‌های مختلفی برای بررسی تغییرات اقلیمی وجود دارد که می‌تواند برای ارزیابی تاثیر تغییرات آب و هوا بر بناها و آثار تاریخی هم استفاده شود. این روش‌ها را در سه گروه می‌توان قرار داد: روش‌های از بالا به پایین، روش‌های از پایین به بالا و روش‌های یکپارچه. روش‌های از بالا به پایین، به تجزیه و تحلیل مدل‌های گردش عمومی [General Circulation Models (GCMs)] برای تعیین احتمالی آب و هوا در آینده می‌پردازد. این امر بدون دخالت مردم هر منطقه به دست می‌آید. بنابراین، در این روش، ظرفیت تطبیق پدیده‌ها و پیامدهای آن بر آثار نادیده گرفته می‌شود. رویکرد از پایین به بالا بیشتر روی تجزیه و تحلیل آسیب پذیری آثار و بناها در مقیاس محلی متمرکز است. برای این منظور به عنوان مثال نظرسنجی‌ها، مصاحبه‌ها و کارگاه‌های آموزشی برای آشنایی با مناطق آسیب پذیر انجام می‌گیرد. برای توضیح بیشتر می‌توان گفت رویکرد از بالا به پایین با هدف پاسخ به این سؤال طراحی شده است: "تأثیر تغییرات اقلیمی پیش بینی شده بر یک بخش یا منطقه خاص چیست؟" در حالی که نوع سؤالی که رویکرد از پایین به بالا مطرح می‌کند عبارت است از: "تأثیر تغییرات آب و هوایی بر جوامع خاص چگونه بوده است؟". روش سوم که به عنوان رویکرد یکپارچه گفته می‌شود مؤلفه‌هایی از هر دو روش از بالا به پایین و روش از پایین به بالا را در برمی‌گیرد [۱۱].

امروزه، در تمامی جوامع علمی، تغییرات آب و هوایی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای پذیرفته شده است. ابداع مدل‌سازی مختلف در مقیاس جهانی و محلی، پیش‌بینی سناریوهای احتمالی آب و هوا را در آینده ممکن کرده است. این مدل‌های آب و هوایی که براساس روش‌های فیزیکی طراحی شده است، می‌تواند تا حدود زیادی اطلاعات مربوط به ویژگی‌های آب و هوای فعلی و تغییرات آن در گذشته و آینده را بدهد. بررسی‌ها نشان داده است که ارزیابی برخی از متغیرهای اقلیمی مانند دما، نسبت به سایر متغیرهای اقلیمی قابل اعتمادتر است. همانطور که گفته شد علاوه بر دما، بارش، میزان دی اکسید کربن و سایر متغیرها نیز قابل پیش بینی است. از جمله، میزان دی اکسید کربن اتمسفر که پیش بینی می‌شود از میزان ppm ۳۸۰ کنونی به ۷۰۰-۱۰۰۰ در قرن آینده افزایش یابد. با توجه به اینکه میکروارگانیسم‌ها نقش مهمی در تخریب بناها و آثار تاریخی دارند، از مهم‌ترین عوامل کلیدی محیطی که می‌تواند روی میکروارگانیسم‌های موجود بر بناها تاثیر بگذارند آب و هوا و شیمی اتمسفر است. به عبارتی تغییرات در عوامل مورد اشاره به طور بالقوه، باعث تغییر در بیوتای میراث فرهنگی می‌شود و حفاظت از آن را، مشکل‌تر می‌سازد [۱۲].

۳-۲- عوامل فرسایش زیستی آثار تاریخی

همواره اماکن میراث فرهنگی جهانی در طول زمان با خطرات جدی فرسایش مواجه بوده‌اند. این خطرات می‌تواند فیزیکی، شیمیایی و زیستی باشد. مطالعات نشان داده است که شرایط اقلیمی به‌ویژه آب و هوای گرمسیری می‌تواند آسیب بیشتری وارد نماید. تمام بناها به مرور زمان، در اثر آسیب فیزیکی ناشی از فعالیت‌های انسان، آسیب بیوشیمیایی ناشی از متابولیت‌های گیاهان، جانوران و میکروارگانیسم‌ها، تغییرات محیط زیست و آسیب شیمیایی ناشی از نفوذ آب و املاح، فرسوده می‌گردند [۱۳]. به عنوان مثال، شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب، بدلیل فراهم نمودن آب در دسترس کافی به همراه نور خورشید، موجب استقرار و رشد میکروارگانیسم‌ها و گیاهان بر بناهای تاریخی می‌شوند. در نتیجه آسیب و تخریب غیر قابل اجتناب ناشی از استقرار چنین بیوتایی بر ماندگاری این بناها تاثیر می‌گذارد. از عملکردهای مختلف میکروارگانیسم‌های مستقر در سطوح تاریخی، عملکرد فتوتروف‌ها و هتروتروف‌ها است. فرایندهای بیوشیمیایی مانند چرخه کربن، نیتروژن و گوگرد،

^۱ به مجموعه موجودات زنده شامل میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌ها، قارچ‌ها)، گیاهان و جانوران در یک منطقه مشخص و زمان خاص اطلاق می‌شود.

توسط قارچ‌ها و باکتری‌های اکسید کننده گوگرد، باکتری و آرکی‌های اکسید کننده آمونیاک، می‌تواند طول عمر بنا را تحت تاثیر قرار دهند. انسان می‌تواند با مداخله و محافظت از ورود آب به بناها، از آسیب‌های فیزیکی ناشی از آب پیشگیری نماید و عمر چنین بناهایی را افزایش دهد یا به عبارتی آثار ویرانگر این عوامل را با مدیریت صحیح علمی کاهش دهد [۱۴ و ۱۵]. بیوفیلیم‌های میکروبی که از میکروارگانیسم‌های مختلف هتروتروف و اتوتروف تشکیل می‌شوند در همه جا حاضر هستند و به نوعی همزیستی با بناهای تاریخی پیدا کرده‌اند. موجودات ذکر شده با تشکیل بیوفیلیم، قادر به تحمل شرایط سخت محیطی هستند. از آنجا که تاثیر مخرب میکروارگانیسم‌ها اثبات شده است، باید برای ممانعت از فرسایش اختصاصی میکروارگانیسم‌ها و اجتماعات پیچیده آنها راهکاری یافت. بررسی‌ها نشان داده است که بیوفیلیم‌ها بر حرکت و نفوذ آب به درون بناها تاثیر می‌گذارند که با آسیب فیزیکی همراه است. برخی معتقدند وجود بیوفیلیم روی سازه‌های سنگی می‌تواند از فرسایش فیزیکی ناشی از آب، جلوگیری کند. از طرف دیگر عده‌ای بر این باورند که بیوفیلیم می‌تواند باعث حبس بیشتر آب شود و آسیب‌های شیمیایی مرتبط با آن را تسریع کند [۱۴]. سیانوباکتری‌ها، جلبک‌ها و آرکی‌ها قادر به تشکیل بیوفیلیم روی آثار و بناها می‌باشند. از آنجا که گزارش‌های متعددی در مورد بیوفیلیم‌ها ارائه شده است، بسته به ماهیت میکروارگانیسم‌های موجود در بیوفیلیم، آنچه که مهم است اینست که بدانیم در شرایط تنش و تغییر اقلیمی، ترکیب جامعه میکروبی بیوفیلیم سطحی چگونه است یا دچار چه تغییراتی شده است [۱۶].

به عنوان مثال شرایط آب و هوای گرمسیری جنوب شرقی آسیا، آمریکای جنوبی و مرکزی به واسطه بارش‌های فراوان و تامین رطوبت مناسب، باعث استقرار سریع میکروبیوتا در آثار تاریخی می‌شود که می‌توان حضور آن‌ها را از طریق تولید لایه های رنگی به نام Patina یا زنگار تشخیص داد. مشخص شده است که پویایی جوامع میکروبی روی آثار تاریخی و تغییرات آن، وابسته به نوع مواد به کار رفته در آن سازه‌ها و تغییرات آب و هوایی در طول زمان است. از بین کلیه عوامل موثر در استقرار میکروارگانیسم‌ها روی سطوح، می‌توان به تخلخل سنگ، میزان رطوبت و دما اشاره کرد. لازم به ذکر است مطابق گزارش‌های موجود، وجود پوشش میکروبی روی سنگ، می‌تواند لایه‌های زیرین آن را از آسیب‌های بیشتر فیزیکی، شیمیایی و زیستی تا حدی حفظ کند و متأسفانه این بخش از نقش مثبت میکروارگانیسم‌ها در حفظ آثار باستانی تاکنون نادیده گرفته شده است. البته میکروارگانیسم‌هایی هستند که با فرایندهای شیمیایی باعث تغییر یکپارچگی ساختار سنگ می‌شوند و حتی در شرایط *In situ* یا شبیه سازی شده آن در آزمایشگاه، این موارد به خوبی ارزیابی و تائید شده است. لازم به ذکر است صرف جدا کردن میکروارگانیسم‌ها از سطح بناها دلیل بر فرسودگی زیستی بناها توسط میکروارگانیسم‌ها نیست و باید برای تائید آن، آزمایش‌هایی را در شرایط *In vitro* و *In situ* انجام داد [۱۴].

علاوه بر میکروارگانیسم‌ها، طیف گسترده‌ای از گیاهان بومی در نواحی گرمسیری، درون سازه‌های بناها و میراث سنگی رشد می‌کنند. به عنوان مثال بناها و معابد آنگکور (Angkor) به دلیل رشد زیاد درختان‌اش شهرت دارد. آسیب‌های گیاهان در بناهای تاپروم (Ta Prohm) و بنگ میلئا (Beng Mealea) کامبوج نیز گزارش شده است. دو گونه غالب درختان *Ceiba pentandra* و *Ficus gibbosa* با آب و هوای گرمسیری کاملاً سازگار هستند. به علاوه ریشه درختان باعث بی‌ثباتی خاک بستر ساختمان‌های مجاور آن‌ها می‌شوند و در دراز مدت می‌تواند منجر به تخریب یا ریزش کلی بنا شود. همچنین گیاهان و درختان بلند، از طریق سایه افکندن بر بناها مانع تبخیر آب می‌شوند که این هم فرسایش ناشی از حضور میکروارگانیسم‌ها را، به دلیل فراهم آمدن رطوبت کافی در دسترس، بیشتر می‌کند [۱۴ و ۱۷].

باکتری‌ها گروه بزرگی از پروکاریوت‌ها می‌باشند که برخی از آنها قابلیت تخمیر و تولید اسید را دارند و نقش مهمی در چرخه‌های عناصر مانند کربن و نیتروژن ایفا می‌کنند. در تحقیقات متعددی نشان داده است که باکتری‌ها، توانایی فرسایش آثار تاریخی را دارند. این موجودات به واسطه تولید اسیدهای آلی و معدنی و از طریق اکسیداسیون ترکیبات آلی، گوگرد و آمونیاک مسئول مکانیسم‌های فرسودگی سنگ و آثار باستانی می‌باشند. مطالعات نشان داده است که بیشترین خسارات مربوط به میکروارگانیسم‌های اکسید کننده گوگرد و ناشی از تولید اسید سولفوریک می‌باشد. بقیه باکتری‌ها نیز نقش اساسی در

فرسودگی می‌توانند داشته باشند. آرکی‌ها نیز گروهی از پروکاریوت‌ها هستند که نقش مهمی در تخریب بناهای باستانی دارند [۱۸ و ۱۹ و ۲۰]. سطوح بسیاری از بناها با داشتن املاح فراوان و رطوبت کم، شرایط رشد این گروه از پروکاریوت‌ها را فراهم می‌کند.

قارچ‌ها گروهی از میکروارگانیسم‌ها هستند که نسبت به باکتری‌ها در مقابل تنش‌های محیطی رشد بهتری دارند و روی بناها و آثار تاریخی مختلف می‌توانند مستقر شوند. عوامل فیزیکی و شیمیایی بر رشد کپک‌ها که انواع قارچ‌های رشته‌ای هستند، تاثیر می‌گذارد. این عوامل می‌تواند مواد غذایی، اسیدیته و مهمتر از همه رطوبت، باشد. فعالیت آبی بستر یا a_w (activity of water)، به عنوان آب قابل استفاده برای رشد میکروارگانیسم در سطوح تعریف می‌شود. بیشتر قارچ‌های خشکی دوست مانند *Aspergillus versicolor* و *Penicillium brevicompactum*، *Eurotium spp*، *Wallemia sebi* می‌توانند در a_w کمتر از ۰/۷ رشد کنند. در مورد منابع کربن مورد استفاده قارچ‌ها، باید گفت که این موجودات با تنوع متابولیکی کارآمدی که دارند، امکان رشد حتی در محیط‌های بسیار فقیر غذایی مانند سطوح پلاستیکی را دارند. قارچ‌ها همچنین قادرند مواد مغذی را از طریق گرد و غبار به دست آورند. این موجودات همچنین می‌توانند از مواد مختلف ساختمانی مانند کاغذ دیواری، منسوجات یا چوب استفاده و روی مواد معدنی مانند کاشی، سرامیک و بتن رشد کنند. دمای مطلوب رشد کپک‌ها معمولاً ۱۸ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، ولی برای این دسته از موجودات محدوده دمایی ۶۰-۶ درجه سانتی‌گراد هم گزارش شده است. علاوه بر این، هنگامی که رطوبت نسبی محیط بیشتر از ۶۰ درصد باشد، این میزان رطوبت، رشد کپک‌ها را تشدید می‌کند، بطوری که به راحتی بصورت لایه‌ای مرطوب روی دیوارها و پنجره‌ها رشد کرده و دیده می‌شوند. برای مقابله با رشد قارچ‌ها می‌توان از بیوسایدهای مختلفی استفاده کرد. امروزه از روش‌های جدید زیستی همانند نانو ذرات برای کنترل رشد قارچ‌ها استفاده می‌شود. روش‌های بیوشیمیایی کنترل رشد قارچ‌ها معمولاً هزینه‌بر است در حالیکه می‌توان با تغییر شرایط محیطی مانند کنترل دما و رطوبت، رشد میکروارگانیسم‌ها به‌ویژه قارچ‌ها را کاهش داد که این امر دلیلی دیگری بر اهمیت شرایط آب و هوایی است [۲۱].

گلسنگ‌ها جزء اولین موجودات تجزیه کننده سنگ‌ها، صخره‌ها و تشکیل خاک در سطح کره زمین می‌باشند. این موجودات در شرایط مرطوب و خشک، قادر به استقرار روی سنگ هستند. بررسی‌ها نشان داده است که پس از استقرار گلسنگ‌ها، سایر میکروارگانیسم‌ها بهتر استقرار یابند و از طریق تولید اسیدهای آلی و معدنی می‌توانند سنگ‌ها را خرد کنند. لازم به ذکر است که گلسنگ‌ها نتیجه زندگی همزیستی حداقل دو شریک فتوتروفی و قارچی به‌ترتیب بنام‌های فتوبیونت و میکوبیونت می‌باشند و گونه‌های بسیار مختلفی از گلسنگ‌ها از آثار تاریخی و میراث فرهنگی جدا و شناسایی شده است که باعث آسیب‌های جدی به بناهای سنگی شده‌اند [۲۲]. با تغییر شرایط اقلیمی، این گروه از موجودات و همچنین سایر میکروارگانیسم‌های همزیست آن، تحت تاثیر تغییرات اقلیمی قرار خواهند گرفت [۱۸ و ۱۹].

تشکیل بیوفیلم روی بناها امری اجتناب ناپذیر است، ولی به تاخیر انداختن تشکیل چنین ساختارهای میکروبی می‌تواند باعث حفاظت بهتر آثار شود. نکته قابل توجه اینست که در پاکسازی سطوح باید به طریقه‌ای عمل نمود تا لایه‌های زیرین بستر، مجدد در معرض اتمسفر قرار نگیرند چراکه در هر نوبت تمیز کردن آسیب می‌بینند. ولی رطوبت بنا تا حد امکان باید کنترل شود. نکته قابل توجه اینکه مولکول‌های آب باید به طور آزاد روی سطوح مختلف بنا در حرکت باشد، به‌عبارتی با استعمال رزین‌های خاص نباید موجب تجمع آب یا نمک در یک قسمت خاصی از بنا شد. همانگونه که ذکر شد میکروارگانیسم‌ها و متابولیت‌های آن‌ها تاثیر مثبت یا منفی غیر قابل برگشتی روی آثار تاریخی دارند که که متاثر از تغییرات اقلیمی است [۲۳ و ۲۴]. به نظر می‌رسد کنترل رشد بیوفیلم‌ها بهترین راهکار است که خود نیازمند تحقیقات بیشتر است.

با توجه به اطلاعات هواشناسی و مطابق گزارش منتشر شده‌ای در اسپانیا، پیش بینی می‌شود دمای بنای گالیسیا (Galicia) افزایش ۲ تا ۴ درجه سانتی‌گرادی داشته باشد که این تغییر در مناطق مرکزی کشور نسبت به مناطق ساحلی

شدیدتر است. ضمناً در این مطالعه، کاهش میزان بارش در فصول بهار و تابستان در قرن آینده هم پیش بینی شده است. تقریباً کل آثار تاریخی، در گالسیا از گرانیت ساخته شده است. امروزه از این سنگ برای تزئین و ساخت بناهای جدید استفاده می‌شود. در مطالعاتی، بیوفیلیم‌های فتوتروفی، روی گرانیت مدلسازی شد و با توجه به شبیه سازی تغییرات آب و هوایی در آزمایشگاه، مواردی از جمله محدودیت دسترسی به آب و افزایش دی اکسید کربن پیش بینی گردید [۱۲]. یافته‌ها نشان داد که عوامل محیطی مورد اشاره به طور معنی‌داری بر رشد و توسعه بیوفیلیم‌های فتوتروفی سطح گرانیت، تاثیر دارند. در مطالعات قبلی، افزایش رشد بیوفیلیم با افزایش دسترسی به آب تأیید شده بود. دانشمندان بر این باور بود که قرار گرفتن در معرض مقادیر بیشتر دی اکسید کربن، باعث افزایش فتوسنتز در میکروارگانیسم‌های فتوسنتز کننده در ساختار بیوفیلیم می‌شود. لازم به ذکر است که برهمکنش عوامل مختلف، ممکن است نتایج متفاوتی داشته باشد. به عبارت دیگر در پاسخ به شرایط متفاوت آب و هوایی، بسترهای میراثی و ارگانیسم‌های تشکیل دهنده بیوفیلیم روی آن‌ها، ممکن است بطور متفاوتی رفتار کنند [۲۵]. در آزمایش دیگری، با ثابت نگاه داشتن میزان دسترسی به آب، میزان دی اکسید کربن به عنوان متغیر در نظر گرفته شد و مقدار آن در شرایط فعلی و مقایسه آن با افزایش دی اکسید کربن در آینده شبیه سازی گردید. همچنین اثر کاهش مقدار رطوبت با مقدار گاز دی اکسید کربن نیز شبیه سازی انجام شد. با توجه به تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، هیچ تغییر معنی‌داری در تشکیل و گسترش بیوفیلیم فتوتروفی موجود روی سطوح گرانیته در قرن آینده در بنای گالسیا پیش بینی نمی‌شود. به عبارت دیگر، عوامل محیطی و اقلیمی می‌توانند روی هم دیگر تاثیر مثبت یا منفی داشته باشد. به بیان دیگر اثر افزایش دی اکسید کربن بر افزایش توده بیوفیلیمی با محدودیت‌های بارشی ناشی از خشکسالی، خنثی شود [۱۲]. در مطالعه دیگری، میزان کلروفیل b و ارتباط آن با کاهش آب و افزایش دی اکسید کربن، بررسی شد. نتایج نشان داد که تغییر در ترکیب اجتماع بیوفیلیم روی گرانیت در قرن آینده، با تکثیر احتمالی بیشتر جلبک‌های سبز و به ضرر سیانوباکتری‌ها می‌باشد. این نتایج آزمایشگاهی غیرمنتظره بود زیرا چنین بنظر می‌رسید که سیانوباکتری‌ها، بهتر بتوانند شرایط خشکی را تحمل نمایند [۱۲ و ۲۵]. مطالعات نشان داده است برخی از گونه‌های جلبک قادر به تحمل شرایط سخت از جمله کم آبی هستند. بنابراین ترکیب بیوفیلیم‌ها از نظر گونه‌های جلبکی، تعیین کننده مقاومت آنها به شرایط سخت محیطی است. رنگ بیوفیلیم‌های فتوتروفی با محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی ارتباط تنگاتنگی دارد و احتمال دارد رنگ بیوفیلیم‌های روی سطوح میراثی در آینده زرد باشد و بنظر می‌رسد این زردی به میزان کل کارتنوئید تولیدی جلبک‌ها ارتباط داشته باشد [۱۶].

ماتریکس پلیمرهای خارج سلولی یا Extracellular polymeric substances (EPS) در بیوفیلیم نقش مهمی در فرآیندهای فرسایش زیستی ایفا می‌کند. زیرا این ماتریکس در تماس مستقیم با سطوح سنگی قرار دارد و به عنوان رابط اصلی واکنشگر در هوازدگی زیستی سنگ‌ها عمل می‌کند. علاوه بر این، EPS تولید شده توسط میکروارگانیسم‌های فتوتروفی، می‌تواند به عنوان منبع غذایی برای رشد سایر میکروبیوتای هتروتروف ساکن بر سطوح سنگی عمل کند و باعث افزایش پتانسیل فرسایش زیستی شود. مطالعات نشان داده است که میکروارگانیسم‌ها در پاسخ به محدودیت آب، مقدار بیشتری EPS تولید می‌کنند. روند افزایش تولید EPS در بیوفیلیم‌های سنگی در تنش خشکی، نشانگر کاهش بارش ناشی از تغییرات آب و هوایی است که باعث القای تولید بیشتر EPS و افزایش بیشتر فرسودگی زیستی می‌شود. بنابراین اگر میزان دی اکسید کربن افزایش یابد و آب در دسترس هم کافی باشد، همانطوری که در تغییرات آب و هوایی پیش بینی شده است، تاثیر مهمی روی گسترش بیوفیلیم خواهد گذاشت [۲۶]. با توجه به اینکه بیشتر آثار و بناهای تاریخی در معرض هوای بیرونی اتمسفر هستند، باید اثرات محیطی در نظر گرفته شوند. افزایش سطح آب ناشی از تغییر آب و هوا در بخشی از مناطق، می‌تواند بر بخش‌های زیرین ساختمان‌ها تأثیر بگذارد و جذب مویرگی آب را تغییر دهد. در چنین مواردی افزایش زیست توده‌های زرد رنگ حاوی کارتنوئید بیشتر، پیش بینی می‌شود. مطالعات نشان داده است محتمل‌ترین سناریوی آینده با افزایش میزان دی اکسید کربن برای بناهایی در مناطق آب و هوایی خشک، تغییر ترکیب میکروارگانیسم‌های بیوفیلیم‌ها به نفع جلبک‌ها و تغییر رنگ آن‌هاست و به دلیل تولید EPS بیشتر، فرسایش بیشتر بستر سنگی پیش بینی می‌شود [۱۲].

سنگ و صخره‌های طبیعی تحت شرایط طبیعی و تحت تأثیر آب و هوا و نیز فرآیندهای زیستی ناشی از فعالیت موجودات زنده‌ای مانند جانوران، گیاهان و میکروارگانیسم‌ها به خاک تبدیل می‌شوند. بررسی‌ها نشان داده است که در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری در جنوب شرقی آسیا، آمریکای جنوبی و مرکزی رطوبت ناشی از بارش‌ها در فصول مرطوب همراه با نور خورشید، موجب تشدید استقرار و رشد فعال میکروبیوتا، گیاهان مختلف و همچنین فونا بر میراث فرهنگی سنگی شده که تأثیر نامطلوبی بر آن می‌گذارد و فرسودگی آن‌ها را تشدید می‌کند.

بر فرض محال استریل بودن محیط، بناها با تغییر در فاکتورهای فیزیکوشیمیایی محیط و گذشت زمان تجزیه می‌شوند. گزارش‌ها، تفاوت زیادی در جنس مصالح ساختمانی بناهای آمریکا و آسیا و فاکتورهای محیطی، به خصوص دسترسی به آب و رطوبت را نشان می‌دهند. مطالعات نشان داده است، دما به عنوان یک عامل متغیر محیطی باعث ایجاد تنش داخلی در مواد بستر میراث فرهنگی می‌شود. تغییر ۵-۸ درجه سانتی‌گراد دما در تابستان بین اوایل صبح تا بعد از ظهر، در برخی مناطق گزارش شده است. بارندگی ناگهانی و سایر عوامل، مانند سایه درختان بزرگ نیز باعث تنش‌های مشابه و پوسته پوسته شدن یا لایه برداری سنگ‌ها می‌شود. اظهار نظر در مورد سهم هریک از این فرآیندها دشوار است. بنابراین، برای مطالعه تأثیر تغییر اقلیم روی میکروارگانیسم‌ها، حتماً باید شرایط آب و هوایی منطقه و مصالحی که مورد استفاده قرار گرفته بررسی شود و تنوع جامعه میکروبی، تنوع جامعه گیاهی و موقعیت قرارگیری بنا به لحاظ جهات جغرافیایی در نظر گرفته شود [۱۷ و ۱۸ و ۲۷ و ۲۸].

آنچه که مسلم است میراث فرهنگی به علت شرایط محیطی و اقلیمی پیش بینی نشده در معرض خطر می‌باشد که در مورد حفاظت طولانی مدت این بناها حتی با استفاده از فناوری‌های نوین موجود، روش‌های تضمین شده‌ای وجود ندارد و نظارت موثر در تمیز نگه داشتن بناها از ذرات گرد و غبار یا کنترل رشد بیوفیلم‌ها از مهم‌ترین راهبردهاست.

۴- روش‌های اومیکس در بررسی جوامع میکروبی

برای بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر جوامع میکروبی بناهای تاریخی، می‌توان از تکنیک اومیکس استفاده کرد. فناوری‌های اومیکس ابزارهای قدرتمندی هستند که درک تنوع زیستی و فعالیت جوامع میکروبی را به‌خوبی ارائه می‌دهند و در آینده نزدیک، ابزاری متداول برای بررسی فرسایش زیستی خواهند بود [۲۹]. لازم به ذکر است که استفاده از روش‌های کشت هنوز ضروری است و ادغام این دو روش می‌تواند اطلاعات جامع‌تری را در اختیار محققان قرار دهد. تکنیک ژنومیکس به مطالعه کل ژنوم و ارتباط ژنوم‌ها با یکدیگر می‌پردازد [۱۵ و ۳۰]. روش‌های مورد استفاده در ژنومیکس شامل توالی‌یابی نسل اول (سنگر و ماکسام-گیلبرت)، توالی‌یابی نسل دوم (Next Sequencing Generation)، توالی‌یابی نسل سوم و ریزآرایه (Microarray) هستند. اخیراً، در مطالعات بررسی فرسودگی زیستی، از تکنیک متاژنومیکس بیشتر استفاده شده است. در متون علمی مربوط به محیط زیست، به‌جای متاژنومیکس، از واژه‌های ژنومیکس محیطی یا اکوژنومیکس استفاده شده است. متاژنومیکس به معنای کاربرد تکنیک‌های ژنومیکس برای مطالعه مستقیم جمعیت‌های میکروبی در محیط‌های طبیعی، بدون نیاز به استفاده از روش‌های کشت آزمایشگاهی است. متاژنومیکس مزایای زیادی نسبت به ژنومیکس دارد، از جمله می‌توان به

^۲ به مجموعه جانوران موجود در یک منطقه در یک زمان خاص اطلاق می‌گردد.

^۳Omic

^۴Genomics

^۵Sanger & Maxam-Gilbert

سریع و ارزان بودن آن، عدم نیاز به تهیه کشت خالص از موجودات مورد نظر و از همه مهمتر تجزیه و تحلیل حدود ۱۰۰ درصد همه موجودات یک محیط اشاره نمود [۳۱]. از روش‌های متداول مولکولی تعیین جمعیت‌های میکروبی می‌توان به Fluorescence In Situ Hybridization (FISH) و Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE) اشاره نمود [۳۲].

واژه پروتئوم برای اولین بار در سال ۱۹۹۴ توسط مارک ویلکینز وارد ادبیات علمی شد. مجموعه پروتئین‌های بیان شده در یک سلول و در یک زمان خاص، پروتئومیکس نامیده می‌شود. ابزار مهم در پروتئومیکس، فناوری الکتروفورز دوبعدی، طیف‌سنجی جرمی و بیوانفورماتیک است [۳۳]. واژه ترانس‌کریپتوم اولین بار در دهه ۱۹۹۰ به کار برده شد. ترانس‌کریپتومیکس به مجموعه‌ی نسخه‌های RNA در یک سلول خاص یا بافت، در شرایط ویژه‌ای از رشد یا تحت شرایط فیزیولوژیکی خاص اطلاق می‌شود که شامل تمام RNA ها از جمله mRNA, tRNA, rRNA, non-coding RNA است. لازم به یادآوری است که ژنوم در تمامی سلول‌های یک موجود زنده به‌استثنای موجودات جهش یافته ثابت است ولی تحت شرایط محیطی متفاوت، بیان ژن‌ها تغییر خواهد کرد و به تبع آن ترانس‌کریپتوم در سلول‌های مورد نظر در این شرایط، متفاوت می‌گردد. علم ترانس‌کریپتومیکس به بیان ژن‌ها با تمرکز بر اندازه‌گیری مقدار RNA می‌پردازد. به بیان دیگر ترانس‌کریپتوم هر سلول، الگوی بیانی ژن‌هایی است که به‌طور فعال در زمانی خاص بیان می‌شوند. در ترانس‌کریپتومیکس از روش‌های Real time PCR, Northern blotting, توالی‌یابی RNA، ریزآرایه و Serial Analysis of Gene Expression (SAGE) استفاده می‌شود [۳۴]. در واقع با شناسایی همه میکروارگانیسم‌های بسترهای میراثی به روش ژنومیکس و محصولات تولیدی آن‌ها با روش پروتئومیکس می‌توان به اطلاعات بسیار مفیدی دست پیدا یافت [۳۵].

۵- نتیجه گیری

اگرچه بناهای تاریخی در گذر زمان در اثر تغییرات اقلیمی در معرض خطر می‌باشند، ولی تغییرات شدید اقلیمی باعث تشدید فرآیندهای فرسایش می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که آثار تاریخی در اثر تغییرات آب و هوایی می‌تواند آسیب پذیرتر شوند. از این رو با تغییر شرایط آب و هوایی، ارزیابی خطر و آسیب پذیری چنین بناهایی ضروری است. ارزیابی و شناسایی خطرات احتمالی ناشی از تغییرات آب و هوا، به منظور بهبود مدیریت و تصمیم‌گیری در اتخاذ روش‌های حفاظت و مرمت ضروری است. مهم‌تر از اثرات فیزیکوشیمیایی تغییر اقلیم، تاثیر آن بر ترکیب و تنوع جمعیت‌های میکروارگانیسم‌ها و متابولیسم آنها است. برای بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر بناهای تاریخی، باید رفتار میکروارگانیسم‌ها در محل پایش شود و خطرات میانکنش متابولیسم‌های احتمالی میکروارگانیسم‌ها با مصالح و مواد بناها پیش بینی شود تا راهکارهای مناسبی برای مبارزه با این خطرات انتخاب و اقدامات موثری انجام گیرد. مطالعه‌ی رفتار جوامع میکروبی با تغییرات اقلیم، تحت تاثیر میانکنش فاکتورهای مختلف اقلیمی است. لازم به یادآوری است که پارامترهای مختلف اقلیمی، می‌تواند روی یکدیگر تاثیر بگذارند و اثر همدیگر را خنثی و یا تشدید کنند. برای مطالعه تاثیر تغییرات اقلیم بر جمعیت‌های میکروبی در آینده، می‌توان از روش‌های نوین بهره گرفت.

^۱Proteome

^۲Marc Wilkins

^۳Proteomics

^۴Transcriptome

۱. Sesana, E., Gagnon, A. S., Bonazza, A., & Hughes, J. J. (۲۰۲۰). An integrated approach for assessing the vulnerability of World Heritage Sites to climate change impacts. *Journal of Cultural Heritage*, 41 :۲۱۱-۲۲۴.
2. Brimblecombe, P., Grossi, C. M., & Harris, I. (2010). Climate change critical to cultural heritage. In *Survival and sustainability*. 195-205
3. Sabbioni, C., Cassar, M., Brimblecombe, P., & Lefevre, R. A. (2008). Vulnerability of cultural heritage to climate change. *EUR-OPA major hazards agreement, Council of Europe November*.
4. Bonazza, A., Messina, P., Sabbioni, C., Grossi, C. M., & Brimblecombe, P. (2009). Mapping the impact of climate change on surface recession of carbonate buildings in Europe. *Science of the total environment*, 407 :۲۰۳۹-۲۰۵۰.
5. Yanni, S. F., Helgason, B. L., Janzen, H. H., Ellert, B. H., & Gregorich, E. G. (2020). Warming effects on carbon dynamics and microbial communities in soils of diverse texture. *Soil Biology and Biochemistry*, 140 :۱۰۷-۱۲۱.
6. Change, I. C. (2014). Mitigation of climate change. *Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. ۱۴۵۴.
7. Nik, V. M., Mundt-Petersen, S. O., Kalagasidis, A. S., & De Wilde, P. (2015). Future moisture loads for building facades in Sweden: Climate change and wind-driven rain. *Building and Environment*, 93 :۳۶۲-۳۷۵.
8. Sabbioni, C., Brimblecombe, P., & Cassar, M. (Eds.). (2010). *The atlas of climate change impact on European cultural heritage: scientific analysis and management strategies* (No. 19). Anthem Press.
9. Aitsi-Selmi, A., Egawa, S., Sasaki, H., Wannous, C., & Murray, V. (2015). The Sendai framework for disaster risk reduction: Renewing the global commitment to people's resilience, health, and well-being. *International journal of disaster risk science*, 6 :۱۶۴-۱۷۶.
10. Bonazza, A., Maxwell, I., Drdácý, M., Vintzileou, E., & Hanus, C. (2018). Safeguarding Cultural Heritage from Natural and Man-Made Disasters: A comparative analysis of risk management in the EU.
11. Soares, M. B., Gagnon, A. S., & Doherty, R. M. (2012). Conceptual elements of climate change vulnerability assessments: a review. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*.
12. 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 :۱۰۴۸۸۲.
13. Mazzoli, R., Giuffrida, M. G., & Pessione, E. (2018). Back to the past—forever young: cutting-edge biochemical and microbiological tools for cultural heritage conservation. *Applied microbiology and biotechnology*, 102 :۶۸۱۵-۶۸۲۵.
14. Jia, R., Unsal, T., Xu, D., Lekbach, Y., & Gu, T. (2019). Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: a state of the art review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 137: ۴۲-۵۸.
15. Zhang, X., Ge, Q., Zhu, Z., Deng, Y., & Gu, J. D. (2018). Microbiological community of the Royal Palace in Angkor Thom and Beng Mealea of Cambodia by Illumina sequencing based on 16S rRNA gene. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 134 :۱۲۷-۱۳۵.
16. 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 :۱۰۴۷۲۳.
17. Li, X. S., Sato, T., Ooiwa, Y., Kusumi, A., GU, J. D., & Katayama, Y. (2010). Oxidation of elemental sulfur by *Fusarium solani* strain THIF01 harboring endobacterium *Bradyrhizobium* sp. *Microbial ecology*, 60 :۹۶-۱۰۴.
18. Lan, W., Li, H., Wang, W. D., Katayama, Y., & Gu, J. D. (2010). Microbial community analysis of fresh and old microbial biofilms on Bayon temple sandstone of Angkor Thom, Cambodia. *Microbial ecology*, 60 :۱۰۵-۱۱۵.

19. Gaylarde, C. C., Rodríguez, C. H., Navarro-Noya, Y. E., & Ortega-Morales, B. O. (2012). Microbial biofilms on the sandstone monuments of the Angkor Wat complex, Cambodia. *Current microbiology*, 64 :۸۵-۹۲.
20. Gu, J. D. (2018). The endocrine-disrupting plasticizers will stay with us for a long time. *Applied Environmental Biotechnology*, 3(1), 61-64.
21. Campana, R., Sabatini, L., & Frangipani, E. (2020). Moulds on cementitious building materials—problems, prevention and future perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(2), 509-514.
22. 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.
23. Berns, R. S. (2000). Billmeyer and Saltzman's "Principles of Color Technology" 3rd edition, John Wiley & Sons. Inc, New York.
24. Warscheid, T., & Braams, J. (2000). Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 46 :۳۴۳-۳۶۸.
25. Vazquez-Nion, D., Silva, B., Troiano, F., & Prieto, B. (2017). Laboratory grown subaerial biofilms on granite: application to the study of bioreceptivity. *Biofouling*, 33 :۲۴-۳۵.
۲۶. Sanmartín, P., Villa, F., Silva, B., Cappitelli, F., & Prieto, B. (۲۰۱۱). Color measurements as a reliable method for estimating chlorophyll degradation to phaeopigments. *Biodegradation*, 22 :۷۶۳-۷۷۱.
۲۷. Meng, H., Katayama, Y., & Gu, J. D. (۲۰۱۷). More wide occurrence and dominance of ammonia-oxidizing archaea than bacteria at three Angkor sandstone temples of Bayon, Phnom Krom and Wat Athvea in Cambodia. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 117 :۷۸-۸۸.
28. Kusumi, A., Li, X. S., & Katayama, Y. (2011). Mycobacteria isolated from Angkor monument sandstones grow chemolithoautotrophically by oxidizing elemental sulfur. *Frontiers in Microbiology*, 2 :۱۰۴.
29. Marvasi, M., Cavalieri, D., Mastromei, G., Casaccia, A., & Perito, B. (2019). Omics technologies for an in-depth investigation of biodeterioration of cultural heritage. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 144:۱۰۴۷۳۶.
30. Gutleben, J., Chaib De Mares, M., van Elsas, J. D., Smidt, H., Overmann, J., & Sipkema, D. (2018). The multi-omics promise in context: from sequence to microbial isolate. *Critical reviews in microbiology*, 44 :۲۱۲-۲۲۹.
31. Beata, G. (2020). The use of omics tools for assessing biodeterioration of cultural heritage: A review. *Journal of Cultural Heritage*.
32. Vieites, J. M., Guazzaroni, M. E., Beloqui, A., Golyshin, P. N., & Ferrer, M. (2008). Metagenomics approaches in systems microbiology. *FEMS microbiology reviews*, 33: 236-255.
۳۳. Keller, M., & Hettich, R. (۲۰۰۹). Environmental proteomics: a paradigm shift in characterizing microbial activities at the molecular level. *Microbiology and molecular biology reviews*, 73: 62-70.
34. Horgan, R. P., & Kenny, L. C. (2011). 'Omic' technologies: genomics, transcriptomics, proteomics and metabolomics. *The Obstetrician & Gynaecologist*, 13: 189-195.
35. Adamiak, J., Otlewska, A., Tafer, H., Lopandic, K., Gutarowska, B., Sterflinger, K., & Piñar, G. (2018). First evaluation of the microbiome of built cultural heritage by using the Ion Torrent next generation sequencing platform. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 131:۱۱-۱۸

The impact of climate change on works of art and ancient- artifacts

Reyhaneh Shekari ¹ , Parisa mohammadi^{1,2*}

۱. Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, Alzahra University, Tehran, Iran.

reyhaneh.shekari96@gmail.com

۲. * Research Center for Applied Microbiology and Microbial Biotechnology, Alzahra University, Tehran, Iran, mohamadi_p@yahoo.com

Historical and world heritage are valuable buildings or artifacts that have been reached from previous generations to us and have economic and cultural importance for any nation. There are various damages on historical monuments, and one of the most important causes is climate change. Climate change has direct and indirect effects on monuments. Direct changes include severe temperature changes due to freezing and thawing, increase humidity, floods, and storms. The indirect effects of climate change are their effects on microbial communities and other living organisms. Microorganisms are one of the factors that play a major role in the destruction of buildings. Climate change affects the behavior of microorganisms and changes their metabolisms and diversities. Therefore, in protection and restoration of antiquities, climate change and its prediction for the future is essential. Following these changes in the monuments, strategies to deal with these dangers can be explained.

Keywords: World heritage, Cultural heritage, Climate change, Microorganisms, Biodeterioration, Biofilm, Omics