



فتوستنزکننده‌های بی‌هوازی و پتانسیل آن‌ها برای ایجاد یک بیوسفر بر روی سطح سیاره سرخ

فاطمه موسوی

استادیار، مرکز زیست هوافضا و محیط زیست، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

* نویسنده مخاطب: moosavi@ari.ac.ir

اتمسفر سیاره سرخ یا مریخ شامل ۹۵ درصد دی‌اکسیدکربن، ۳ درصد نیتروژن، ۱٫۶ درصد آرگون و تنها مقدار کمی اکسیژن می‌باشد و از نظر غلظت حدود یک درصد اتمسفر سیاره زمین است که عملاً سکونت و بقای انسان را در مریخ ناممکن می‌سازد. این امر چالشی بزرگ را برای سفر به مریخ و اقامت در آن ایجاد نموده‌است. بنابراین جستجوی راهکاری که بتواند به صورت پایدار اکسیژن لازم را برای بقا موجودات زنده و بویژه انسان در جو مریخ فراهم آورد ضروری می‌باشد. فتوستنز مهمترین واکنش بیوشیمیایی است که تقریباً تمام حیات به آن وابسته‌است. این فرآیند پیچیده در گیاهان عالی، جلبک‌ها و برخی از باکتری‌ها نظیر سیانوباکتری‌ها رخ می‌دهد. با توجه به درصد بسیار پایین اکسیژن در جو مریخ به نظر می‌رسد استفاده از گونه‌های فتوستنزکننده بی‌هوازی و متحمل به شرایط نامناسب اکولوژیکی نظیر سیانوباکتری‌ها بتواند اکسیژن مورد نیاز سیاره سرخ را تامین نماید.

واژه‌های کلیدی: مریخ، سیانوباکتری، فتوستنز، منشا حیات، RNA

Anaerobic Photosynthesizers and their Potential to Create a Biosphere on the Surface of the Red Planet

F. Mousavi

Assistant Professor, Air & Space Biology and Environment Center, Aerospace Research Institute, Ministry of Science Research and Technology, Tehran, Iran

*Corresponding Author: moosavi@ari.ac.ir

The atmosphere of the Red Planet or Mars contains 95% of carbon dioxide, 3% of nitrogen, 1.6% of argon and only a small amount of oxygen, and in terms of concentration is about one percent of the planet's atmosphere, which makes it virtually impossible for humans to live and survive on Mars. Therefore, it is necessary to find a solution that can provide the necessary oxygen for the survival of living organisms, especially humans, in the Martian atmosphere. Photosynthesis is the most important biochemical reaction on which almost all life depends. This complex process occurs in higher plants, algae and some bacteria such as cyanobacteria. Due to the very low percentage of oxygen in the Martian atmosphere, it seems that the use of photosynthetic species that are anaerobic and tolerant of adverse ecological conditions such as cyanobacteria can provide the oxygen needed by the Red Planet.

Keywords: Mars, Cyanobacteria, Photosynthesis, Origin life, RNA.

۱ مقدمه

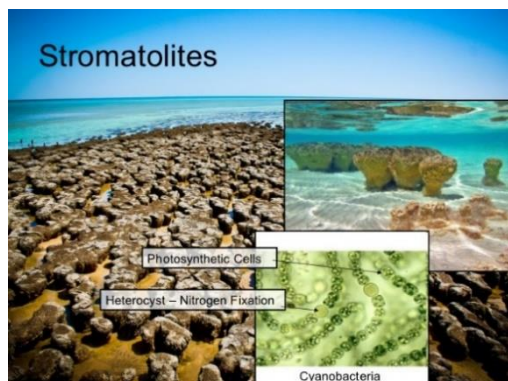
از قرن نوزدهم میلادی، سفر انسان به کرات دیگر از جمله مریخ (سیاره سرخ) همواره جز اصلی‌ترین موضوعات فیلم‌های علمی تخیلی بوده‌است. در تاریخ ۲۰ ژوئیه سال ۱۹۶۹، اداره کل ملی هوانوردی و فضا ایالات متحده آمریکا به اختصار ناسا^۱ سفر موفقیت آمیزی را به کره ماه داشت که جز بزرگترین دستاوردهای بشر تا به امروز بوده‌است. پس از فتح ماه، هدف بلندپروازانه دیگر این سازمان فضایی، سفر به مریخ می‌باشد. رویای دست یابی به مریخ و تبدیل کردن آنجا به اقامتگاهی برای انسان‌ها، یکی از مهمترین اهداف بشر امروزی می‌باشد. در راستای عملی سازی این رویا، تاکنون ناسا گام‌های اساسی برای شناسایی این سیاره برداشته‌است که از جمله آن می‌توان به ارسال کاوشگرهای وایکینگ، مریخ نورد کیوراسیتی و مریخ نوردهای دوقلوی اسپریت و آپورچونیتی اشاره کرد. خوشبختانه اطلاعاتی که این کاوشگرها از مریخ به زمین ارسال نموده‌اند تا حدودی توانسته چشم انداز مناسبی از این سیاره در اختیار دانشمندان و محققان قرار بدهد [۱].

فتوستتزر، شکل غالب حیات، یک فرآیند فراگیر و بسیار موفق در سیاره ما است که در سیانوباکتریها (جلبک‌های سبز آبی)، گیاهان ابتدایی و عالی رخ می‌دهد. ارگانیسم‌های فتوستتزر کننده قادرند با ظرافت خاصی برخی از فوتون‌های نوری خورشید را که تا اعماق دریاها نیز نفوذ می‌نمایند به انرژی شیمیایی تبدیل و ذخیره نمایند. برای مثال گیاهان آوندی بیشتر طول موج سرخ و آبی نور خورشید را جذب می‌کنند. در حالی که، باکتری‌های فتوستتزر کننده که در اعماق تاریک اقیانوس‌ها زندگی می‌کنند از طیف فروسرخ نور برای ذخیره انرژی استفاده می‌کنند و گیاهان ابتدایی تر نظیر خزه‌ها و گل‌سنگ‌ها، طیف آبی نور مرئی را جذب می‌نمایند. بنابراین گیاهان رنگدانه‌های خود را بر اساس نوری تکامل می‌دهند که به سطح آن‌ها می‌رسد [۲]. در بررسی حاضر، در قالب یک مقاله ترویجی به جمع آوری اطلاعات و انتقال دانش موجود در رابطه با منشا حیات در روی سیاره زمین، شواهد وجود حیات در مریخ و پتانسیل استفاده از فتوستتزر کننده‌های بی‌هوازی نظیر سیانوباکتری‌ها به منظور ایجاد یک بیوسفر روی سطح سیاره مریخ پرداخته می‌شود.

۲ منشا و شکل‌گیری حیات روی سیاره زمین

پاسخ به چگونگی آغاز حیات در روی زمین می‌تواند ما را در نحوه ایجاد یک بیوسفر بر روی یک سیاره دیگر یاری رساند. قدیمی‌ترین شواهدی که ما از حیات بر روی زمین در دست داریم به استروماتولیت یا سنگ‌های حاوی سیانوباکتری‌ها (گونه‌ای از فتوستتزر کننده‌های بی‌هوازی) بر می‌گردد (شکل ۱). این سنگ‌ها

حدود ۳,۷ میلیارد سال قدمت دارند و در گرینلند کشف شده‌اند. علاوه بر این‌ها، سنگ‌های معدنی به نام زیرکن^۲ (در غرب استرالیا) کشف شده‌اند که عمرشان به ۴,۱ میلیارد سال قبل بازمی‌گردد و حاوی مقادیر بالایی از اشکالی از کربن هستند که معمولاً در فرآیندهای بیولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳].



شکل ۱- فسیل‌های استروماتولیت حاوی سیانوبکتریها در گرینلند [۴].

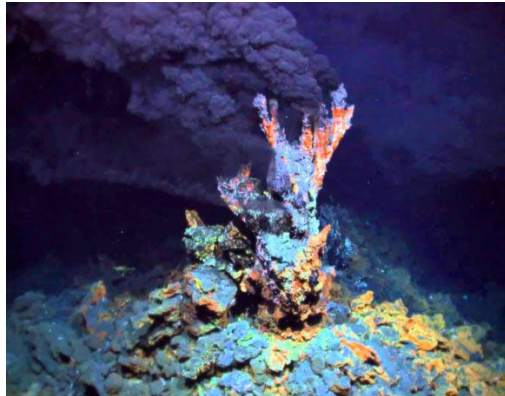
در رابطه با چگونگی پیدایش حیات در زمین تا به امروز چندین نظریه مطرح شده‌است. برخی از این نظریات تصریح می‌کنند که حیات اساساً بر روی خود زمین شروع شده‌است و برخی می‌گویند ابتدا بر روی یک سیارک یا دنباله دار آغاز شده و سپس به زمین انتقال یافته‌است. برخی دیگر از این نظریات اذعان می‌دارند که پیدایش حیات احتمالاً بیش از یکبار روی زمین بوده‌است [۵، ۶].

امروزه اکثریت دانشمندان معتقدند مولکول RNA نقش اصلی را برای حیات نخستین بازی می‌کرده‌است و سپس DNA و پروتئین‌ها که عملکرد زیستی بهینه تری نسبت به RNA دارند، این نقش را بر عهده گرفتند (فرضیه جهان RNA^۳، شکل ۲). RNA بسیار شبیه به DNA می‌باشد و امروزه نیز بسیاری از مهمترین فعالیت‌های درون سلولی بدن ما بوسیله این مولکول انجام می‌گیرد از جمله فعالیت‌های این مولکول می‌توان به انتقال مولکولی میان DNA و سنتز پروتئین (فرآیند رونویسی) و همچنین فعال و یا غیرفعال نمودن برخی از ژن‌ها اشاره نمود. تنها ایرادی که بر این فرضیه وارد است این است که این فرضیه نمی‌تواند توضیح دهد که خود مولکول RNA چگونه ایجاد شده‌است. RNA مولکول پیچیده‌ای است که از واحدهای تکرار شونده‌ای به نام نوکلئوتید ساخته شده‌است. نوکلئوتیدها با الگوهای منحصر به فردی به یکدیگر متصل شده و مولکول RNA را ایجاد می‌نمایند. برخی از دانشمندان رویدادهای نجومی را در این زمینه دخیل می‌دانند و برخی دیگر معتقدند RNA به صورت خودبخودی در دوره آغازین زمین به وجود آمده‌است. البته از نظر آماری احتمال پیدایش خودبخودی مولکولی به این پیچیدگی از طریق فعالیت‌های شیمیایی

3. RNA world hypothesis

1. National Aeronautics and Space Administration

2. Zircon



شکل ۳- نمایی از دریچه حرارتی در بستر یک اقیانوس [۱۶].

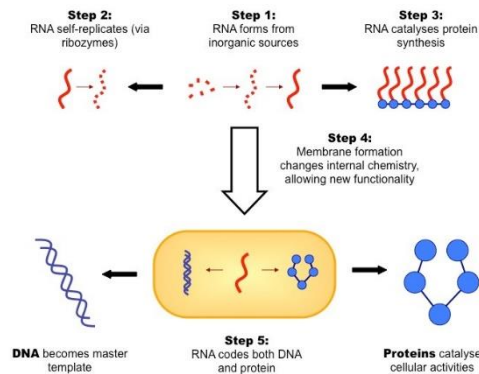
حدود ۳,۵ میلیارد سال پیش بمباران شدید سیاره زمین توسط سیارک‌ها و دنباله دارها متوقف شد و حیات توانست از اعماق به سطح زمین آمده و از نور خورشید بهره برد. اولین موجودات فتوستنتز کننده به احتمال زیاد، از نوع بدون اکسیژن بودند که در اقیانوس‌های دوره‌هایی از پرکامبرین زیست می‌کردند و از هیدروژن، گوگرد و آهن برای متابولیسم شان استفاده می‌کردند. سپس فتوستنتز اکسیژنی توسط سیانوباکتری‌ها (پروکاریوت‌های بی‌هوازی) ایجاد شد که در آن آب به عنوان ماده کاهنده عمل می‌کرد و اتمسفر را به سوی یک حالت اکسید در حدود ۲,۴ میلیارد سال پیش سوق داد. این وضعیت موجب افزایش تولید اکسیژن^۵ شد (رویداد بزرگ اکسیداسیون) که پس از برخورد به اشعه ماورایفوق بنفش جو به مولکول ازن تبدیل شده و کم کم لایه ازن را بوجود آورد. این امر موجب تکثیر ارگانیسم‌های هوازی چندسلولی پیچیده، ظهور گیاهان بر روی خشکی و انفجار حیات شد [۱۷-۲۲]

۳ شواهد وجود حیات در مریخ

اولین پروژه زیست اخترشناسی سازمان فضایی ناسا که به طور جدی به بررسی وجود حیات در مریخ پرداخت مربوط به سال ۱۹۷۶ میلادی می‌باشد. این پروژه، پروژه وایکینگ‌ها نام داشت و مریخ نشین‌های وایکینگ ۱ و ۲، سه آنالیز را بر روی خاک مریخ انجام داده و به این نتیجه رسیدند که سیاره مریخ فاقد حیات است [۲۳، ۲۴]. اما در حال حاضر با انجام آنالیزها و کاوش‌های جدیدی که در سیاره سرخ انجام داده‌است این نظریه رد شده‌است. در کاوش‌های پیشین، دانشمندان بیشتر به دنبال جستجوی شکل زمینی حیات در مریخ بودند اما در ماموریت‌ها و پژوهش‌های جدید به دنبال دیگر اشکال حیات هستند [۲۵].

اولین گزارش در رابطه با کشف نشانه‌هایی از وجود آب بر روی مریخ مربوط به سال ۲۰۰۲ میلادی و مدارگرد اُدیسسه مریخ^۶ ناسا بود که موفق به کشف هیدروژن در سطح زیر مریخ شد. به

بسیار کم است بنابراین برخی از محققین معتقدند شاید قبل از RNA مولکول‌هایی با نام‌های PNA، TNA، یا ANA وجود داشته‌است. این مولکول‌ها شبیه به RNA هستند و به نظر می‌رسد اجزای آن‌ها احتمال بیشتری برای بوجود آمدن خودبخودی داشته باشند. به هر حال تاکنون شواهدی برای آن یافت نشده‌است [۷-۱۰].



شکل ۲- طرحی شماتیک از فرضیه جهان RNA در ابتدا مولکول RNA از منابع غیرآلی ایجاد شده‌است (مرحله ۱).

RNA به روش خودهمانندسازی از طریق ریبوزوم‌ها همانندسازی کرده‌است (مرحله ۲). سپس RNA سنتز پروتئین را کاتالیز نموده‌است (مرحله ۳). تشکیل غشا شیمی داخلی را تغییر داده و منجر به عملکرد جدید شده‌است (مرحله ۴). RNA، DNA و پروتئین را رمزدار نموده‌است (مرحله ۵) [۱۱].

در پژوهش مهم دیگری، محققان مدعی شده‌اند که سابقه وجود حیات در زمین به بیش از ۴ میلیارد سال (۴,۴ میلیارد سال) پیش بر می‌گردد. این زمان مقارن با بمباران شدید سیاره زمین توسط سیارک‌ها و دنباله دارها بوده‌است که به عنوان دوره ((پیشازیستی)) شناخته می‌شود. در طول این دوره بمباران سنگین زمین توسط سنگ‌های فضایی موجب شده‌است ناحیه زیر سطح زمین به مقدار کافی گرم شده و بخش‌هایی از آن برای حیات میکروبی قابل سکونت باشد [۱۲]. این مکان احتمالاً بستر اقیانوس‌ها بوده‌است. در بستر اقیانوس پدیده‌ای به نام دریچه‌های حرارتی^۴ (شکل ۳) رخ می‌دهد. این دریچه‌ها فعالیت آتشفشانی دارند و از اعماق زمین مواد معدنی و ترکیبات شیمیایی نظیر متان و هیدروژن را همراه با گرما به آب دریا انتقال می‌دهند. با اینکه در این مکان‌ها نور خورشید وجود ندارد در کنار این پنجره‌ها موجودات زنده مختلفی زندگی می‌کنند. مطابق با این نظریه، این مواد خروجی با دی اکسیدکربن ترکیب شده و به سهم خود مبنای تکوین اولین مولکول‌های بالقوه زیستی را پایه ریزی نمودند [۱۳-۱۵].

6. Orbitor
7. Mars Odyssey

4. Hydrothermal vents
5. Oxygen

عبارت دیگر، این مدارگرد توانست شواهدی از وجود مقادیر بالایی از آب یخ زده را در نزدیکی قطب شمال مریخ گزارش نماید [۲۶]. در ژوئن و ژوئیه سال ۲۰۰۳، ناسا دو مریخ نورد با نام‌های اسپریت^۸ و آپورچونیتی^۹ را با فاصله سه هفته از یکدیگر به دو نقطه متفاوت از سطح مریخ پرتاب نمود که هر دو مریخ نورد وجود آب را در سطح سیاره مریخ در گذشته‌های دور تایید نمودند [۲۷، ۲۸].

برای ایجاد حیات در مریخ، نیاز است آب بتواند به مدت طولانی بر روی سطح آن باقی بماند. بنابراین در آگوست سال ۲۰۰۵، سازمان ناسا، مدارگرد شناسایی مریخ^{۱۰} (MNO) را به سطح مدار مریخ ارسال نمود. هدف از این ماموریت، یافتن شواهدی مبنی بر وجود آب در مریخ برای مدت طولانی، شناسایی رسوب مواد معدنی در آب، یافتن محل سواحل دریاها و دریاچه‌های قدیمی و لایه‌های رسوبی در بستر آب‌های جاری ب. این مدارگرد هم اکنون هم در حال فعالیت می باشد.

پس از آنکه مدارگرد ادیسه وجود مقادیر زیادی از آب یخ زده را در نزدیکی قطب شمال مریخ نشان داد، ناسا در آگوست سال ۲۰۰۷ فضاییمای فینیکس^{۱۱} (ققنوس) پرتاب نمود که با موفقیت بر روی سطح مریخ فرود آمد. هدف از این ماموریت، استخراج یخ از زیر خاک مریخ توسط ابزار مکانیکی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی ترکیب این خاک و یخ بود [۲۹].

در نوامبر سال ۲۰۱۱، ناسا فضاییمای کنجکاوی^{۱۲} را با هدف جستجوی نشانه‌های مکان‌های قابل سکونت میکروبی به سمت سیاره سرخ ارسال نمود که توانست اطلاعاتی را در رابطه با مکان‌های پوشیده از آب در گذشته، وجود متان در سطح مریخ، و ترکیبات ارگانیک که اجزا اصلی سازنده حیات هستند ارائه دهد [۳۰-۳۳]. منبع متان در سطح مریخ می‌تواند ناشی از فعالیت جریان‌های آب گرم یا حیات میکروبی باشد. در روی زمین متان به طور طبیعی از تجزیه و پوسیده شدن مواد آلی و به طور ویژه فساد گیاهان و جانوران و همچنین فعالیت‌های حیاتی آن‌ها حاصل می‌شود. دو نمونه از منابع متان در سیاره ما گاز متان خروجی از معده گاوها و آتش فشان‌های فعال هستند. از آنجایی که در حال حاضر هیچ آتشفشان فعالی در مریخ وجود ندارد، علت انتشار این گاز در جو مریخ به صورت یک معما باقی مانده است. برخی از کارشناسان احتمال می‌دهند متان تولید شده ناشی از فعالیت حیاتی موجودات تک سلولی باشد از آنجایی که در روی زمین نیز حیات در ابتدا توسط تک سلولی‌های بی‌هوازی ایجاد شد [۳۴، ۳۵]. مریخ نورد Curiosity همچنین توانست مواد شیمیایی نظیر سولفور، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن، فسفر و کربن را در سطح مریخ پیدا کند. ترکیب این عناصر احتمالا می‌تواند منبع انرژی احتمالی برای

میکروارگانیسم‌ها بوده و یا اینکه نشان دهنده وجود آب در سطح مریخ در گذشته باشد [۳۶].

اخیرا مریخ نورد کنجکاوی موفق شده است با حفاری در عمق حدود ۵ سانتی‌متری در سنگ‌های رسوبی ۳٫۵ میلیارد ساله سه نوع مختلف از مولکول‌های آلی را کشف نماید. این حفاری در اطراف دهانه گیل صورت گرفته است که محل یک دریاچه خشک شده مربوط به دورانی است که مریخ سیاره‌ای گرم و مرطوب بوده است. یک گروه از ترکیبات آلی شناسایی شده در دهانه گیل، تیوفین‌ها^{۱۳} بودند. این ترکیبات در روی زمین به طور طبیعی در زغال سنگ، نفت خام، کروژن‌ها (مخلوطی از ترکیبات شیمیایی آلی) و همچنین در استروماتولیت‌ها و میکروفسیل‌ها روی زمین یافت می‌شوند. دانشمندان احتمال می‌دهند یک فرآیند زیستی که شامل باکتری‌ها بوده است ممکن است در ایجاد چنین ترکیبات آلی در سیاره سرخ نقش داشته باشد. به عبارت دیگر باکتری‌ها می‌توانند فرآیند احیا سولفات را که منجر به ساخت تیوفن‌ها می‌شود تسهیل نمایند [۳۷]. همچنین طی این ماموریت تغییرات فصلی در سطح متان موجود در اتمسفر (لایه‌های پائینی اتمسفر) مریخ گزارش شد [۳۸، ۳۹].

۴ فتوستتر کننده‌های بی‌هوازی

اندامگان‌های بی‌هوازی با نام‌های فتوستتر کننده‌های بی‌هوازی یا باکتری‌های بی‌هوازی نیز شناخته می‌شوند که برای رشد به وجود اکسیژن نیازی ندارند و حتی برخی در حضور اکسیژن می‌میرند. بنابراین فتوستتر کننده‌های بی‌هوازی می‌توانند به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱. بی‌هوازی اجباری (در حضور اکسیژن توانایی رشد و حیات ندارند)، ۲. بی‌هوازی اختیاری (توانایی استفاده از الکترون موجود در اکسیژن مولکولی را هم دارند و همچنین می‌توانند در محیط‌های حاوی اکسیژن، متابولیسم خود را به هوازی تغییر دهند) [۴۰].

۵ سیانوباکتری‌ها

تصور می‌شود که سیانوباکتری‌ها یکی از قدیمی‌ترین ارگانیسم‌ها هستند؛ میکروفسیل‌هایی با قدمت ۳/۵ میلیارد سال یافت شده‌اند که به سیانوباکتری‌ها نسبت داده می‌شوند [۴۱]. یک علت اصلی برای مقاومت تکاملی سیانوباکتری‌ها ترکیب مسیرهای متابولیک موفقیت آمیز آن‌ها است. سیانوباکتری‌ها از معدود گروه‌هایی هستند که می‌توانند فتوستتر اکسیژنی و تنفس را همزمان با هم در یک محفظه انجام دهند و بسیاری از گونه‌های سیانوباکتری‌ها قادر به تثبیت نیتروژن هستند. بنابراین، آن‌ها می‌توانند تحت طیف گسترده‌ای از شرایط محیطی زنده بمانند و موفق شوند. فتوستتر و

11. Mars Phoenix
12. Curiosity
13.. Thiophene

8. Spirit
9. Opportunity
10. Mars Reconnaissance Orbiter

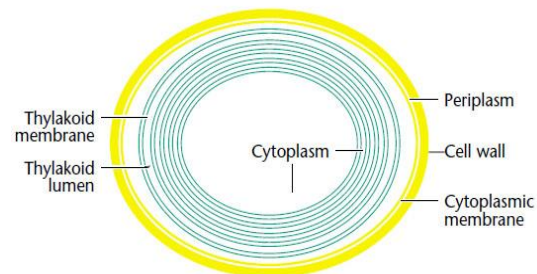
می‌گیرد. فضای بین دو جفت تیلاکوئید مجاور با سیتوپلاسم سلول است [۴۲]

در برخی از سیانوباکتری‌ها، سلول‌های اختصاصی با تمایز یافتگی ساختاری و عملکردی مشاهده می‌گردد. این سلول‌های تمایز یافته در دو بخش هتروسیست و اکاینیت قابل بررسی می‌باشند [۴۳].

تعداد زیادی از سیانوباکتری‌ها (راسته‌های نوستوک^{۱۴} و استیگونیما^{۱۵}تالیس^{۱۵}) قادرند نیتروژن اتمسفری را تثبیت نمایند و برای انجام این کار یک سلول ویژه و طولی در آن‌ها تمایز می‌یابد که به آن هتروسیست گفته می‌شود (شکل ۱۱). هتروسیست‌ها سلول‌هایی هستند که در پاسخ به محدودیت منابع نیتروژن موجود در محیط تمایز می‌یابند و به عنوان جایگاه تثبیت نیتروژن عمل می‌کنند [۴۴]. سلول‌های هتروسیست با الگوی انتشار نسبتاً منظم و با بسامد ۳ تا ۱۰ درصد از کل سلول‌ها در یک رشته جلبک تمایز می‌یابند. این سلول‌ها از نظر ساختاری و عملکردی جهت حفاظت از آنزیم نیتروژناز سازگاری یافته‌اند و مانع از غیرفعال شدن کمپلکس آنزیمی نیتروژناز در مقابل اکسیژن می‌گردند. از صفات متمایز کننده این سلول‌ها می‌توان به وجود دیواره ضخیم در آن‌ها اشاره نمود که علی‌رغم غیر قابل نفوذ بودن نسبت به گاز اکسیژن نفوذپذیر بوده و امکان انتقال آن را به داخل سلول فراهم می‌نماید. همچنین فقدان فتوسیستم II در هتروسیست‌ها، مانع از تشکیل اکسیژن و موجب حفاظت آنزیم نیتروژناز می‌گردد. در عین حال، عدم تثبیت کربن ناشی از فقدان فتوسیستم II در هتروسیست‌ها سبب می‌گردد که این سلول‌ها ترکیبات قندی مورد نیاز خود را از سلول‌های رویشی مجاور دریافت نمایند. در داخل هتروسیست کمپلکس آنزیمی نیتروژناز به صورت مستقیم نیتروژن مولکولی را به آمونیوم تبدیل می‌کند و از این طریق نیتروژن را به زنجیره غذایی وارد می‌کند [۴۵].

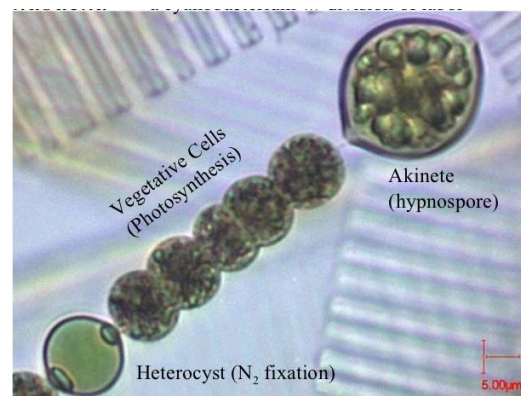
اکاینیت سلول‌هایی با دیواره سلولی ضخیم هستند که در انتهای فاز رویشی برخی از جلبک‌ها شکل می‌گیرند (شکل ۱۱). این سلول‌ها که معمولاً از نظر اندازه بزرگتر از سلول‌های رویشی هستند دربردارنده ریبوزوم‌ها، گرانول‌ها، مواد ذخیره‌ای و مواد ژنتیکی ارگانسیم به صورت RNA هستند و از فعالیت فتوستنتی آنان به میزان قابل توجهی کاسته شده‌است. اکاینیت‌ها به واسطه تجمع گرانول‌های سیانوفیسین ظاهری گرانوله یا دانه دار از خود نشان می‌دهند و به عنوان سلول‌های استراحتی تا هنگام مساعد شدن شرایط محیطی جهت رشد به صورت غیرفعال باقی می‌مانند [۴۳].

تنفس به مسیرهای انتقال الکترون نیاز دارد که تا حد زیادی توسط مجتمع‌های پروتئینی در غشا کاتالیز می‌شود. شکل ۴ تقسیم بندی بخش‌های مختلف سلول سیانوباکتری را نشان می‌دهد. غشا تیلاکوئید سیستم غشایی داخلی است که سیتوپلاسم را از لومن جدا می‌نماید و تقریباً در تمام سیانوباکتری‌ها وجود دارد و حاوی زنجیره‌های انتقال الکترون تنفسی و فتوستنتی است. این زنجیره‌های انتقال الکترون تا حدی با هم تلاقی دارند و تقریباً از اجزا یکسانی در غشا استفاده می‌کنند. فتوستنتز اکسیژنی اساساً (تبدیل CO₂ و آب به قندها با استفاده از انرژی حاصل از نور) معکوس تنفس است (تبدیل قندها به CO₂ و آزاد کردن انرژی آب). غشا سیتوپلاسمی که سیتوپلاسم را از پری پلاسم جدا می‌کند، حاوی یک زنجیره انتقال الکترون تنفسی است که در اکثر سیانوباکتری‌ها کمپلکس‌های فتوستنتی وجود ندارد. بنابراین در اکثریت سیانوباکتری‌ها، زنجیره انتقال الکترون فتوستنتی به تنهایی در تیلاکوئیدها اتفاق می‌افتد، در صورتی که جریان الکترون تنفسی هم در سیستم‌های غشایی تیلاکوئیدی و هم سیتوپلاسمی وجود دارد. حضور و فعالیت همزمان زنجیره‌های انتقال الکترون فتوستنتی و تنفسی در یک سیستم غشایی (غشا سیتوپلاسمی) غیرمعمول است [۴۲].



شکل ۴- طرح کلی غشاها و محفظه‌ها در یک سلول سیانوباکتریایی.

غشا سیتوپلاسمی سیتوپلاسم را از پری پلاسم جدا می‌کند؛ این سیستم غشایی در تنفس نقش دارد اما در فتوستنتز نقش ندارد، و رنگ زرد آن به دلیل وجود کارتنوئیدها است. غشاهای تیلاکوئیدی هم زنجیره انتقال الکترون تنفسی و هم فتوستنتی را کاتالیز می‌نماید؛ آن‌ها شامل کلروفیل هستند و بنابراین سبز می‌باشند. تیلاکوئیدها گلدانی شکل و به صورت جفت وجود دارند (نمای ارائه شده در اینجا مرتبط با برش عرضی گلدان است). یک جفت پوشش غشایی جفت دیگر را در بر می‌گیرد. فضای بین یک جفت غشا تیلاکوئید، لومن تیلاکوئید است که پروتون‌ها بواسطه انتقال الکترون فتوستنتی و تنفسی به درون آن‌ها می‌شوند. شیب پروتون حاصل در سرتاسر تیلاکوئیدها برای سنتز ATP مورد استفاده قرار



شکل ۵- تمایز یافتگی ساختاری و عملکردی در سیانوباکتر ANABAENA شامل سلول‌های رویشی، آکینت و هتروسپست [۴۶].

۶ شواهد حضور سیانوباکتری‌ها در مریخ

اگرچه هنوز شواهد قطعی از سیانوباکتری‌ها در مریخ کشف نشده‌است اما چندین تیم از محققان ساختارهای رسوبی را که شباهت زیادی به استروماتولیت‌ها دارند شناسایی نموده‌اند [۴۷، ۴۸]. تشکیل ساختارهای اکسید آهن و سایر رسوبات در مریخ از جمله هماتیت [۴۹] ممکن است توسط پروکاریوت‌ها و قارچ‌های سازگار با زندگی در چشمه‌های آب گرم و تحت فشارهای بالاتر ایجاد شده باشند. با اینحال، تمام شواهد مثبت در مورد وجود حیات در مریخ [۴۹، ۵۰] همچنان محرمانه، اثبات نشده و بحث برانگیز است [۵۱، ۵۲]. برخی از دانشمندان استدلال می‌کنند که زندگی در شرایط فعلی بعید است اما ممکن است در پوسته‌های اندولیتی در گذشته وجود داشته باشد [۵۲]. حیات در مریخ ممکن است از طریق انتقال شهاب سنگ‌ها از زمین و سیارات دیگر بوجود آمده باشد [۵۳]. ارگانیسم‌های انتقال یافته می‌توانستند با قرار گرفتن در چندساتی متری زیر سطح در برابر شرایط سخت فضا محافظت شوند بنابراین بقا آن‌ها افزایش می‌یافت [۵۴].

۷ کدام نوع از سیانوباکتری‌ها برای ایجاد یک

بیوسفر روی سطح سیاره سرخ مناسب می‌باشند؟

بسیاری از گونه‌های سیانوباکتری‌ها از راسته نوستوکالیس^{۱۶} نظیر *Anabaena cylindrica* از آکینت‌ها^{۱۷} تشکیل شده‌اند. این سلول‌های راکد، به خشکی، دمای بالا، و تماس با یو وی مقاوم هستند و می‌توانند شرایط بسیار سخت را برای مدت طولانی تری تحمل نمایند [۵۵]. به هر حال، بعد از رویش آکینت‌ها، این گونه‌ها عموماً رشته‌های طولانی غیرمنشعب را از سلول‌های منفرد متصل

ایجاد می‌نمایند. این رشته‌ها می‌توانند ضمن یک تمایز سلولی پیچیده سلول‌های رویشی که تثبیت دی‌اکسیدکربن، تکامل اکسیژن را انجام می‌دهند و هتروسپست‌ها را ایجاد نمایند. هتروسپست‌ها دارای کمپلکس نیتروژناز است که تبدیل نیتروژن اتمسفری به یون‌های آمونیوم را کاتالیز می‌نماید. این رشته‌ها اگر در یک لایه لجن ضخیم قرار نگیرند قادر به تحمل شرایط سخت تنشی نیستند. به هر حال، هیچ مدرکی برای لایه‌های لجن در مریخ وجود ندارد [۵۶].

گونه‌هایی که آکینت تشکیل نمی‌دهند از راسته *Pleurocapsales* به طور ویژه جنس *Chroococcidiopsis*، دارای احتمال بقای بیشتری بر روی مریخ هستند. ویژگی بارز *Chroococcidiopsis* مقاومت در برابر خشک شدن است. این ارگانیسم در خشک‌ترین مکان‌ها در سرتاسر جهان نظیر بیابان‌ها، از قبیل آتاکامی شیلی^{۱۸} [۵۴]. موهاوی^{۱۹} در قسمت جنوب غربی ایالات متحده آمریکا [۵۷]، و قطب جنوب [۵۸] وجود دارد. در دسترس بودن آب توسط بارندگی در چنین مکان‌هایی به شدت پایین است و ارگانیسم‌ها عمدتاً در رطوبت جوی که با مه آورده شده‌است زنده می‌مانند. آن‌ها با زندگی درون صخره‌ها، که حالت اندولیتیک زندگی نامیده می‌شود از خودشان در برابر پرتوهای شدید تابشی محافظت می‌نمایند. *Chroococcidiopsis* همچنین نزدیک سطوح رسوبات نمک (هالیت^{۲۰}) زنده می‌ماند [۵۹]، که فضاهایی را در میان کریستال‌های نمک در صحرای آتاکاما^{۲۱} اشغال می‌کند [۶۰]. آبی که روی پوسته‌های هالیت متراکم می‌شود ظاهراً برای زندگی آن‌ها کافی است [۶۱].

در مقابل سیانوباکتری‌ها، گل‌سنگ‌ها به طور ویژه با یک همزیستی سه گانه قارچ، جلبک سبز و یک سیانوباکتریوم تثبیت کننده N_2 ممکن است به عنوان کاوشگر زندگی در مریخ مورد توجه قرار بگیرند. آن‌ها در زیستگاه‌های سخت رشد می‌کنند [۶۲] اما رشد کند آن‌ها ممکن است مانع از استفاده موفقیت آمیزشان در مریخ در مقابل *Chroococcidiopsis* شود [۵۶].

۸ نتیجه گیری

اکسیژن یک عامل محیطی ضروری برای اکثریت موجودات زنده روی زمین است. رویداد بزرگ اکسیداسیون در حدود ۲،۳ تا ۲،۴ میلیارد سال پیش موجب تکامل بیوسفر سیاره زمین شد و به طرز چشمگیری مسیر حرکت تکاملی موجودات را تحت تاثیر قرار داد [۶۳]. این رویداد کاملاً مطابق با تکامل فرآیند فتوسنتز اکسیژنی توسط سیانوباکتری‌ها بود و زمین را به یک سیاره با سطحی غنی از

19. Mojave
20. Halite
21. Atacama

16. Nostocales
17. Akinetes
18. Atacama of Chile

- [6] H. P. Yockey, "Origin of life on earth and Shannon's theory of communication," *Computers & chemistry*, vol. 24, no. 1, pp. 105-123, 2000.
- [7] H. S. Bernhardt, "The RNA world hypothesis: the worst theory of the early evolution of life (except for all the others) a," *Biology direct*, vol. 7, no. 1, pp. 1-10, 2012.
- [8] M. Levy and S. L. Miller, "The stability of the RNA bases: implications for the origin of life," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 95, no. 14, pp. 7933-7938, 1998.
- [9] S. Srivatsan, "Modeling prebiotic catalysis with nucleic acid-like polymers and its implications for the proposed RNA world," *Pure and applied chemistry*, vol. 76, no. 12, pp. 2085-2099, 2004.
- [10] F. Dellsén, "Abductively robust inference," *Analysis*, vol. 77, no. 1, pp. 20-29, 2017.
- [11] A. Wochner, J. Attwater, A. Coulson, and P. Holliger, "Ribozyme-catalyzed transcription of an active ribozyme," *science*, vol. 332, no. 6026, pp. 209-212, 2011.
- [12] R. Grimm and S. Marchi, "Direct thermal effects of the Hadean bombardment did not limit early subsurface habitability," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 485, pp. 1-8, 2018.
- [13] W. Martin, J. Baross, D. Kelley, and M. J. Russell, "Hydrothermal vents and the origin of life," *Nature Reviews Microbiology*, vol. 6, no. 11, pp. 805-814, 2008.
- [14] M. Russell, A. Hall, A. Cairns-Smith, and P. Braterman, "Submarine hot springs and the origin of life," *Nature*, vol. 336, pp. 117-117, 1988.
- [15] V. Sojo, B. Herschy, A. Whicher, E. Camprubi, and N. Lane, "The origin of life in alkaline hydrothermal vents," *Astrobiology*, vol. 16, no. 2, pp. 181-197, 2016.
- [16] S. F. Jordan, H. Ramm, I. N. Zheludev, A. M. Hartley, A. Maréchal, and N. Lane, "Promotion of protocell self-assembly from mixed amphiphiles at the origin of life," *Nature ecology & evolution*, vol. 3, no. 12, pp. 1705-1714, 2019.
- [17] A. H. Knoll, "Cyanobacteria and earth history," *The cyanobacteria: molecular biology, genomics, and evolution*, vol. 484, 2008.
- [18] S. Awramik, "Archaeal and Proterozoic stromatolites," *Calcareous algae and stromatolites*, pp. 289-304, 1991.
- [19] L. J. Stal, "Cyanobacterial mats and stromatolites," *Ecology of cyanobacteria II: their diversity in space and time*, pp. 65-125, 2012.

O2 تبدیل نمود که قادر به پشتیبانی از حیات گیاهان و جانوران است [۶۴].

توسعه فناوری‌های فضایی و نانوماهورهای ناسا، بیش از گذشته شرایط قرارگیری ارگانیسم‌ها و مولکول‌ها را در محیط فضا ممکن ساخته‌است؛ هدف از این آزمایشات، رمزگشایی از منشأ، تکامل و گسترش حیات بر روی زمین و در جهان است. مهمترین اثر ناشی از خلا فضا، خشک‌شدگی است. سیانوباکتری از جنس *Chroococcidiopsis* در جوامع صخره‌ای و صحرای آتاکاما در شیلی سخت (نظیر دره‌های خشک قطب جنوب، صحرای آتاکاما در شیلی یا صحرای موهاوی^{۲۲} در کالیفرنیا که آنالوگ‌های زمینی مریخ محسوب می‌شوند) زیست می‌کند. تحمل خارق العاده این سیانوباکتری در برابر تنش خشکی، یونیزاسیون و پرتو یوی وی موجب شده‌است به عنوان گونه آزمایشگاهی مناسب برای سفرهای فضایی، توسعه سیستم پشتیبان حیات، و استفاده از منابع در محل برای استقرار انسان بر روی ماه انتخاب شود. بنابراین به نظر می‌رسد *Chroococcidiopsis* ارگانیسمی است که توانایی رشد در مریخ را دارد. به هر حال، هنوز مشخص نیست که کدام یک از سویه‌های آن دارای بهترین ویژگی‌ها برای مقاومت در برابر شرایط متفاوت و سخت مریخ هستند. بنابراین به نظر می‌رسد یک تحقیق دقیق برای یافتن سویه مناسب که بتواند از عهده همه شرایط نامناسب مریخ نظیر مقاومت به خشکی به دنبال احیا سریع، محافظت در برابر حجم زیاد نمک، اسید، پرتو یو وی، فشار بالا، غلظت‌های بالای دی اکسیدکربن، شدت نور کم، مقادیر آب کم (مرزی) و منبع دی نیترژن گازی و غیره برآید برای به حداکثر رساندن پتانسیل رشد سیانوباکتری‌ها در مریخ ضروری باشد.

۹ منابع

- [1] K. H. Williford *et al.*, "The NASA Mars 2020 rover mission and the search for extraterrestrial life," in *From habitability to life on Mars*: Elsevier, 2018, pp. 275-308.
- [2] N. Y. Kiang, "The color of plants on other worlds," ed: JSTOR, 2008.
- [3] K. McNamara and S. Awramik, "Stromatolites: a key to understanding the early evolution of life," *Science Progress* (1933-), pp. 345-364, 1992.
- [4] C. F. Demoulin *et al.*, "Cyanobacteria evolution: Insight from the fossil record," *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 140, pp. 206-223, 2019.
- [5] G. D. Snooks, "The origin of life on earth: A new general dynamic theory," *Advances in Space Research*, vol. 36, no. 2, pp. 226-234, 2005.

- mineralogical terrestrial analogue of Mars," *Life*, vol. 4, no. 3, pp. 511-534, 2014.
- [36] J. Mustard, "Windows into the Martian Subsurface: Prospects for a Deep Biosphere," in *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2013, vol. 2013, pp. B23F-0604.
- [37] J. Heinz and D. Schulze-Makuch, "Thiophenes on Mars: Biotic or abiotic origin?," *Astrobiology*, vol. 20, no. 4, pp. 552-561, 2020.
- [38] J. E. Moores *et al.*, "Methane seasonal cycle at Gale Crater on Mars consistent with regolith adsorption and diffusion," *Nature Geoscience*, vol. 12, no. 5, pp. 321-325, 2019.
- [39] C. R. Webster *et al.*, "Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations," *Science*, vol. 360, no. 6393, pp. 1093-1096, 2018.
- [40] K. Decker, K. Jungermann, and R. Thauer, "Energy production in anaerobic organisms," *Angewandte Chemie International Edition in English*, vol. 9, no. 2, pp. 138-158, 1970.
- [41] J. W. Schopf, "The fossil record: tracing the roots of the cyanobacterial lineage," *The ecology of cyanobacteria: their diversity in time and space*, pp. 13-35, 2002.
- [42] W. F. Vermaas, "Photosynthesis and respiration in cyanobacteria," *e LS*, 2001.
- [43] R. N. Kaplan-Levy, O. Hadas, M. L. Summers, J. Rücker, and A. Sukenik, "Akinetes: dormant cells of cyanobacteria," *Dormancy and resistance in harsh environments*, pp. 5-27, 2010.
- [44] T. Sarma, G. Ahuja, and J. Khattar, "Nutrient stress causes akinete differentiation in cyanobacterium *Anabaena torulosa* with concomitant increase in nitrogen reserve substances," *Folia microbiologica*, vol. 49, pp. 557-561, 2004.
- [45] P. Fay, "Oxygen relations of nitrogen fixation in cyanobacteria," *Microbiological reviews*, vol. 56, no. 2, pp. 340-373, 1992.
- [46] J. W. Golden and H.-S. Yoon, "Heterocyst development in *Anabaena*," *Current opinion in microbiology*, vol. 6, no. 6, pp. 557-563, 2003.
- [47] N. Noffke, "Ancient sedimentary structures in the < 3.7 Ga Gillespie Lake Member, Mars, that resemble macroscopic morphology, spatial associations, and temporal succession in terrestrial microbialites," *Astrobiology*, vol. 15, no. 2, pp. 169-192, 2015.
- [48] V. Rizzo and N. Cantasano, "Structural parallels between terrestrial microbialites and Martian sediments: are all cases of 'Pareidolia'?", *International Journal of Astrobiology*, vol. 16, no. 4, pp. 297-316, 2017.
- [20] B. A. Neilan, B. P. Burns, D. A. Relman, and D. R. Lowe, "Molecular identification of cyanobacteria associated with stromatolites from distinct geographical locations," *Astrobiology*, vol. 2, no. 3, pp. 271-280, 2002.
- [21] D. J. Des Marais, "When did photosynthesis emerge on Earth?," *Science*, vol. 289, no. 5485, pp. 1703-1705, 2000.
- [22] N. Y. Kiang, "Looking for life elsewhere: photosynthesis and astrobiology," *The Biochemist*, vol. 36, no. 6, pp. 24-30, 2014.
- [23] G. A. Soffen and C. W. Snyder, "The first Viking mission to Mars," *Science*, vol. 193, no. 4255, pp. 759-766, 1976.
- [24] H. P. Klein, J. Lederberg, and A. Rich, "Biological experiments-The Viking Mars Lander," *Icarus*, vol. 16, 1972.
- [25] D. A. Rothery, I. Gilmour, and M. A. Sephton, *An introduction to astrobiology*. Cambridge University Press, 2018.
- [26] J. T. Wilson *et al.*, "Equatorial locations of water on Mars: Improved resolution maps based on Mars Odyssey Neutron Spectrometer data," *Icarus*, vol. 299, pp. 148-160, 2018.
- [27] L. A. Haskin *et al.*, "Water alteration of rocks and soils on Mars at the Spirit rover site in Gusev crater," *Nature*, vol. 436, no. 7047, pp. 66-69, 2005.
- [28] R. Showstack, "Mars Opportunity rover finds gypsum veins," ed: Wiley Online Library, 2011.
- [29] J. E. Graf, R. W. Zurek, H. J. Eisen, B. Jai, M. Johnston, and R. DePaula, "The Mars reconnaissance orbiter mission," *Acta Astronautica*, vol. 57, no. 2-8, pp. 566-578, 2005.
- [30] R. G. Bonitz *et al.*, "NASA Mars 2007 Phoenix lander robotic arm and icy soil acquisition device," *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 113, no. E3, 2008.
- [31] C. R. Webster *et al.*, "Mars methane detection and variability at Gale crater," *Science*, vol. 347, no. 6220, pp. 415-417, 2015.
- [32] C. R. Webster *et al.*, "Measurements of Mars methane at Gale Crater by the SAM tunable laser spectrometer on the Curiosity Rover," *LPSC XXXIV, abstract*, vol. 1366, 2013.
- [33] G. Levin, "Evidence for microbial life on Mars?," 2013: SPIE.
- [34] C. Oze and M. Sharma, "Have olivine, will gas: serpentinization and the abiogenic production of methane on Mars," *Geophysical research letters*, vol. 32, no. 10, 2005.
- [35] R. Amils, D. Fernández-Remolar, and I. Team, "Río Tinto: a geochemical and

- transmittance in the Mojave Desert: a Mars terrestrial analogue," *International Journal of Astrobiology*, vol. 13, no. 3, pp. 271-277, 2014.
- [58] E. I. Friedmann, "Endolithic microorganisms in the Antarctic cold desert," *Science*, vol. 215, no. 4536, pp. 1045-1053, 1982.
- [59] K. M. Finstad *et al.*, "Microbial community structure and the persistence of cyanobacterial populations in salt crusts of the hyperarid Atacama Desert from genome-resolved metagenomics," *Frontiers in microbiology*, vol. 8, p. 1435, 2017.
- [60] J. Wierzchos, C. Ascaso, and C. P. McKay, "Endolithic cyanobacteria in halite rocks from the hyperarid core of the Atacama Desert," *Astrobiology*, vol. 6, no. 3, pp. 415-422, 2006.
- [61] A. F. Davila *et al.*, "Facilitation of endolithic microbial survival in the hyperarid core of the Atacama Desert by mineral deliquescence," *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 113, no. G1, 2008.
- [62] M. Baqué, J.-P. de Vera, P. Rettberg, and D. Billi, "The BOSS and BIOMEX space experiments on the EXPOSE-R2 mission: Endurance of the desert cyanobacterium *Chroococcidiopsis* under simulated space vacuum, Martian atmosphere, UVC radiation and temperature extremes," *Acta Astronautica*, vol. 91, pp. 180-186, 2013.
- [63] H. Decker and K. E. Van Holde, *Oxygen and the Evolution of Life*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [64] T. W. Lyons, C. T. Reinhard, and N. J. Planavsky, "The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere," *Nature*, vol. 506, no. 7488, pp. 307-315, 2014.
- [49] R. G. Joseph, R. S. Dass, V. Rizzo, N. Cantasano, and G. Bianciardi, "Evidence of life on Mars," *Journal of Astrobiology and Space Science Reviews*, vol. 1, pp. 40-81, 2019.
- [50] R. Joseph, "A High Probability of Life on Mars," *The Consensus of*, vol. 70, pp. 1-25, 2016.
- [51] R. A. Armstrong, "The lichen symbiosis: lichen "extremophiles" and survival on Mars," *J. Astrobiol. Space Sci. Rev*, vol. 1, pp. 378-397, 2019.
- [52] G. Kidron, "Cyanobacteria and lichens may not survive on Mars. The negev desert analogue," *J. Astrobiol. Space Sci. Rev*, vol. 1, pp. 369-377, 2019.
- [53] G. Horneck *et al.*, "Microbial rock inhabitants survive hypervelocity impacts on Mars-like host planets: first phase of lithopanspermia experimentally tested," *Astrobiology*, vol. 8, no. 1, pp. 17-44, 2008.
- [54] B. Gómez-Silva, "Lithobiontic life: "Atacama rocks are well and alive"," *Antonie Van Leeuwenhoek*, vol. 111, no. 8, pp. 1333-1343, 2018.
- [55] M. Sharma and B. Shukla, "Akinetes from Late Paleoproterozoic Salkhan Limestone (> 1600 Ma) of India: A proxy for understanding life in extreme conditions," *Frontiers in Microbiology*, vol. 10, p. 397, 2019.
- [56] H. Bothe, "The Cyanobacterium *Chroococcidiopsis* and Its potential for life on mars," *Journal of Astrobiology and Space Science Reviews*, vol. 2, pp. 398-412, 2019.
- [57] H. D. Smith, M. Baqué, A. G. Duncan, C. R. Lloyd, C. P. McKay, and D. Billi, "Comparative analysis of cyanobacteria inhabiting rocks with different light