DOI: 10.22092/irn.2022.355079

نامه‌علمی

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۳/۱۹
تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

جداسازی و غربالگری سیانوباکتری‌های بومی بیابان سجزی از خاک‌های زیر پوشش گلسنگ‌های خاک‌زی

لیلا کاشی زنوزی[۱]، سیدحسن کابلی*[۲]، کاظم خاوازی[۳] و اولف شیفلبین[۴]

چکیده

گلسنگ‌های خاک‌زی بیابانی، بیشتر از دسته سیانوگلسنگ‌ها هستند که طیف وسیعی از سازگاری را با شرایط اکولوژیکی به دست آورده‌اند. برای جداسازی، کشت و غربالگری سیانوباکتری‌های بومی بیابانی، از خاک‌های زیر پوشش سیانوگلسنگ‌های *Collema cocophorum*، *Enchylium tenax*، *Pecania terricola* و *Lathagri-um auriforme* نمونه‌برداری شد. پس از کشت سیانوباکتری‌ها روی محیط کشت جامد BG 11 ، طی چهار مرحله خالص‌سازی، سیانوباکتری‌های خالص تهیه شدند و براساس غلظت مقدار کلروفیل a و پلی‌ساکاریدهای درون‌سلولی (LB EPS) و برون‌سلولی‌شان (TB EPS) غربالگری شدند. با توجه به ویژگی‌های مرفولوژیک، دو گونه سیانوباکتری خاک‌زی *Coleofasciculus chthonoplast* و *Microcoleus vaginatus* شناسایی شدند. طبق نتایج به دست آمده، میانگین غلظت کلروفیل a در گونه *Microcoleus vaginatus*، 0/49 میلی‌گرم در لیتر، LB-EPS ، 17/55 درصد و TB-EPS، 8/45 درصد بود، همچنین میانگین غلظت کلروفیل a در گونه *Coleo-fasciculus chthonoplast*، 0/27 میلی‌گرم در لیتر، LB-EPS 16/36 درصد و TB-EPS 8/22 درصد بود. با توجه به نتایج آزمون تجزیه واریانس، اختلاف میانگین غلظت کلروفیل و پلی‌ساکاریدهای برون‌سلولی در دو گونه سیانوباکتری‌ها معنی‌دار بود، اما میانگین غلظت پلی‌ساکاریدهای درون‌سلولی اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. براساس این نتایج پیش‌بینی می‌شود، گونه *Microcoleus vaginatus*، در مقایسه با گونه *Coleofas-ciculus chthonoplast* توانایی‌های فیزیولوژیکی بهتر و قابلیت سازگاری بالاتری را با شرایط اکولوژیک منطقه دارد، ازاین‌رو گونه مناسب‌تری برای تثبیت خاک در بیابان سجزی است.

واژه‌های کلیدی: بیابان سجزی، پلی‌ساکارید، خالص‌سازی، سیانوباکتری، سیانوگلسنگ، غربالگری.

Isolation and screening of cyanobacteria native to the Segzi Desert from soils covered with terrestrial lichens

Leila Kashi Zenouzi [1*], Seyed Hasan Kaboli[2], Kazem Khavazi [3] and Ulf Schiefelbein [4]

Abstract

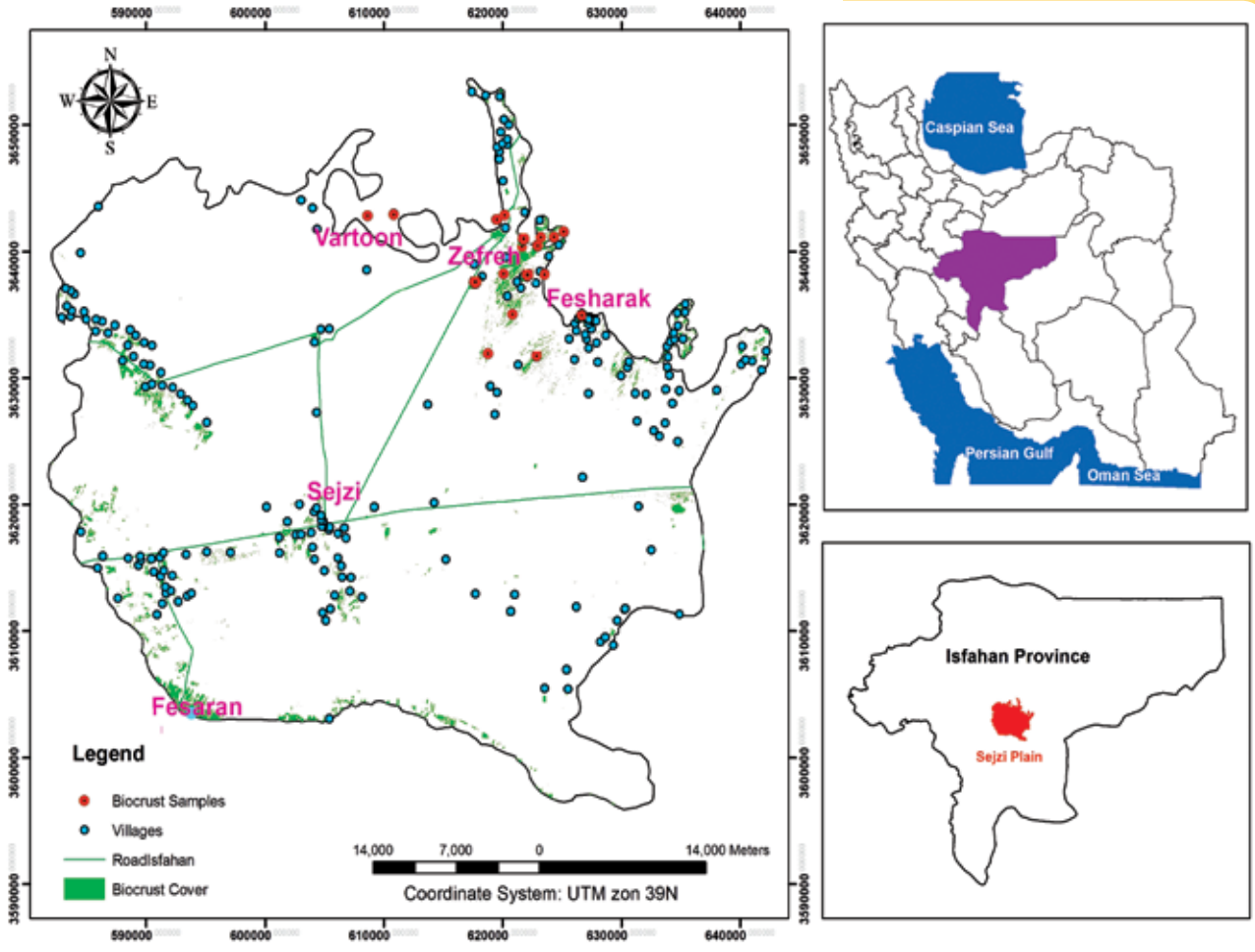
Desert terrestrial lichens are often from the cyanolichens category, which has achieved a wide range of adaptation to ecological conditions. To cultivate and screen the native desert cyanobacteria, samples were collected from the soils covered with cyanolichens, including *Pecania terricola, Enchylium tenax, Collema cocophorum*, and *Lathagrium auriforme*. After culturing the cyanobacteria on the BG 11 medium, homogeneous cyanobacteria were prepared in four purification steps and screened based on the amount of chlorophyll a and polysaccharides (LB EPS and TB EPS). Based on morphological characteristics, cyanobacteria species, including *Coleofasciculus chthonoplast* and *Microcoleus vaginatus*, were identified. According to the results, the amount of chlorophyll-a in *Microcoleus vaginatus* was 0.49 mg / l, LB-EPS was 17.55%, and TB-EPS was %8.45. In *Coleofasciculus chthonoplast* chlorophyll a, LB-EPS and TB-EPS were measured 0.27 mg /L,% 16.36 %8.22, respectively. The results of the ANOVA test showed that the difference between chlorophyll a and EPS in the two species of cyanobacteria was significant. The mean concentration of intracellular polysaccharides was not significantly different from each other. Based on these results, *Microcoleus vaginatus* had better physiological conditions and higher adaptation to the ecological stress compared to *Coleofasciculus chthonoplast*. Therefore that is a more suitable species for soil stabilization in the Sejzi desert.

Keywords: Cyanolichen, cyanobacteria, polysaccharide, purification, screening, Sejzi desert.

۱. دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، ایران.
۲*. نویسنده مسئول، استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. پست الکترونیک: hkaboli@semnan.ac.ir
۳. استاد، بخش تحقیقات بیولوژی خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
۴. پژوهشگر باغ گیاه‌شناسی، دانشگاه روستوک، آلمان.
1- Ph.D. Candidate in Combat to Desertification Department, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Iran.
2*- Corresponding author, Assistant Professor of Combat to Desertification Department, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Iran, Email: hkaboli@semnan.ac.ir
3- Professor, Department of Soil Biology Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
4- University of Rostock, Botanical Garden, Schwaansche Straße 2, 18055 Rostock, Germany.
* Corresponding author e-mail address: hkaboli@semnan.ac.ir

مقدمه

بیش از دو سوم از مساحت ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است، بنابراین، فرسایش بادی عامل مؤثری در تخریب اراضی و ایجاد خسارت در اکثر نقاط ایران است (احمدی، ۱۳۹۱). برای مقابله با این پدیده زیانبار، روش‌های گوناگونی توسط محققان پیشنهاد و در کشور اجرا شده است که بیشتر آنها در قالب روش‌های مستقیم و غیرمستقیم مبارزه با فرسایش تقسیم‌بندی شده‌اند. روش‌های مستقیم شامل روش‌های مکانیکی است که در آنها از انواع بادشکن‌ها به‌صورت ورقه‌های فلزی، توری‌های فلزی مشبک، ژئوتکستایل‌ها، همچنین از انواع خاک‌پوش‌ها شامل مالچ‌های نفتی، پلیمری، شیمیایی و ترکیبات نانو استفاده می‌شود. استفاده از مالچ‌های نفتی علاوه‌بر مشکلات محیط‌زیستی، به‌دلیل هزینه‌های بالای خریداری این مواد، جابه‌جایی و پاشش، ازنظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست (خسروشاهی و ابطحی، ۱۳۹۴). مالچ‌های غیرنفتی وارداتی نیز، به‌دلیل عدم سازگاری طوریبا شرایط اکولوژیکی کشور، هزینه‌های بالای خریداری و حتی در برخی موارد به‌دلیل مشکلات محیط‌زیستی، نتایج قابل‌قبولی نداشته‌اند، به‌طوری‌که همچنان، معضل فرسایش بادی و پدیده گرد و خاک به قوت خود باقی مانده است (طهماسبی بیرگانی و همکاران، ۱۳۹۸). روش‌های غیرمستقیم به‌طور عمومی با استقرار و تحکیم پوشش گیاهی با هدف افزایش ضریب زبری سطح خاک و ایجاد بادشکن‌های زیستی در ارتباط است، اغلب روش‌های زیستی و کاشت نهال گونه‌های مختلف ازجمله کهور و تاغ، هر کدام به‌نوبه خود دارای معایبی هستند که نشان از عدم سازگاری آنها با شرایط محیطی منطقه داشته است. در سال‌های اخیر از میکروارگانیسم‌ها و برخی باکتری‌های مولد اوره‌آز نیز، در برخی از نقاط کشور ازجمله دشت آزادگان (ارزاقی و همکاران، ۱۳۹۴) استفاده شد. همچنین با توجه به مطالعات انجام‌شده، پوسته‌های زیستی خاک ازجمله عوامل زیستی برای کنترل فرسایش خاک معرفی شده‌اند (Belnap & Gardner, 1993). پوسته‌های زیستی خاک که در سطح خاک یا عمق چند میلی‌متری آن قرار دارند شامل انواع سیانوباکتری‌ها، جلبک‌ها، قارچ‌ها، باکتری‌ها، خزه‌ها و گلسنگ‌ها با نسبت تراکم متفاوت هستند



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه به همراه نقاط نمونه‌برداری

(Weber *et al.*, 2016). این موجودات خاک‌زی، ذرات خاک را به هم می‌چسبانند و از جدا شدن و پراکندگی آنها ممانعت می‌کنند (Pluis & de Windner, 1989). این مسئله در مناطق خشک که عاری از گیاهان آوندی، یا با تراکم کم هستند و ناحیه بین بوته‌ها که در معرض فرسایش بادی هستند، اهمیت بسزایی دارد (Young *et al.*, 1986).

تحقیقات Miralles و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد، مقاومت سیانوباکتری‌های تفکیک‌شده از خاک‌های زیر پوشش پوسته‌های زیستی با غالبیت گلسنگ‌ها در مقایسه با سایر گونه‌های سیانوباکتری آزادزی، در مقابل تنش‌های محیطی ازجمله خشکی، شوری و قلیائیت خاک بیشتر است، به بیان دیگر، آنها آستانه تحمل بالاتری دارند. به‌طورکلی، سیانوباکتری‌ها ازنظر تولید مواد پلی‌ساکاریدی، تشکیل کپسول و زندگی پوکیلوهیدروس، در شرایط حاد محیطی توان زنده‌مانی زیادی دارند. زندگی پویکلیوهیدروس (Poikilohydrous) نوعی از حیات است که طی آن ارگانیسم‌ها می‌توانند در پاسخ به در دسترس بودن یا نبودن آب به سرعت به اشکال نهفته یا اشکال در حال رشد تبدیل شوند (اعتمادی‌فر و دریک‌وند، ۱۳۹۸) سیانوباکتری‌ها، میکروارگانیسم‌های فتوسنتزکننده هستند و ازنظر تولید مواد غذایی موردنیاز خود، وابسته به موجودات دیگر نیستند. همچنین، توانایی تثبیت کربن توسط سیانوباکتری‌ها بستگی به میزان کلروفیل *a* دارد (Seidlewicz *et al.*, 2020). سیانوباکتری‌ها از طریق ترشح مواد چسبنده پلی‌ساکاریدی، همچنین اتصال سلولی زنجیره‌ای با یکدیگر در اطراف ذرات خاک، باعث چسبندگی ذرات ریز خاک و تشکیل ریزساختار می‌شوند و با گسترش ابعاد زنجیره‌های سلولی تشکیل‌شده، امکان ارتباط و پیوستگی ریزساختارها را با فراهم می‌کنند و درنهایت ذرات خاک با ساختار بزرگ‌تر تشکیل می‌شوند (Malam Issa *et al.*, 2007).

نقش تلقیح سیانوباکتری‌ها به خاک توسط Wang و همکاران (۲۰۰۹)، Li و همکاران (۲۰۱۴) و Rossi و همکاران (۲۰۱۷) در تثبیت تپه‌های ماسه‌ای و مهار فرسایش بادی و Sadeghi و همکاران (۲۰۱۸) در مهار فرسایش آبی، بهبود ویژگی‌های خاک و پایداری خاک‌دانه‌ها تأیید شده است. براساس مطالعات انجام شده، سیانوباکتری‌ها توانایی فعالیت در طیف pH، دمایی و خشکی گسترده‌ای را دارند (Huixia *et al.*, 2007). هرچند شوری بالای ناشی از نمک‌های مختلف در خاک به‌عنوان چالشی جدی در میزان زنده‌مانی، استقرار و فعالیت ریزموجودات تلقیحی مطرح شده است، بااین‌حال، یافته‌های پژوهشگران متعددی از قبیل Soleimani و همکاران (۲۰۱۷) بیانگر قابلیت زیستی و فعالیت بالای برخی از سیانوباکتری‌ها در برابر تنش‌های ناشی از شوری زیاد خاک هستند. خیرفام و اسدزاده (۱۳۹۹) امکان‌سنجی ایجاد پوسته‌های زیستی در بوم‌سازگان‌های نوپدید و حساس را به فرسایش بادی و در بسترهای خشک‌شده دریاچه ارومیه از طریق فناوری زیستی تلقیح سیانوباکتری‌ها بررسی کردند. براساس نتایج تحقیقات ایشان، بوم‌سازگان‌های نوپدید به‌دلیل نبود پوسته‌های زیستی توسعه‌یافته، حساسیت و ناپایداری زیادی در برابر عوامل تخریب سرزمین دارند که منجر به تهدید امنیت غذایی و بوم‌سازگان‌های مجاور خواهد شد. از طرفی نتایج به دست آمده، رویکرد زیست پوسته‌سازی از طریق فناوری تلقیح سیانوباکتریایی و بهبود نمایه‌های مهم پویایی پوسته‌های زیستی و مؤثر در پایداری خاک ازجمله کلروفیل a، ضخامت پوسته و اتصال بین ذره‌ای، به‌صورت قابل‌توجهی کارایی تلقیح سیانوباکتریایی را در زیست پوسته‌سازی بوم‌سازگان‌های نوپدید تأیید کرد.

این پژوهش با توجه به ویژگی‌های سیانوباکتری‌ها، با هدف استخراج و شناسایی سیانوباکتری‌های بومی بیابان سجزی از خاک‌های زیر پوشش سیانوگلسنگ‌های خاک‌زی انجام شده است و پس از غربالگری آنها براساس توان زنده‌مانی، ترسیب کربن و تولید پلیمرهای کربوهیدراته، گونه بومی سازگار با شرایط اکوسیستم بیابان سجزی برای اصلاح خاک معرفی شده است.

● مواد و روش‌ها

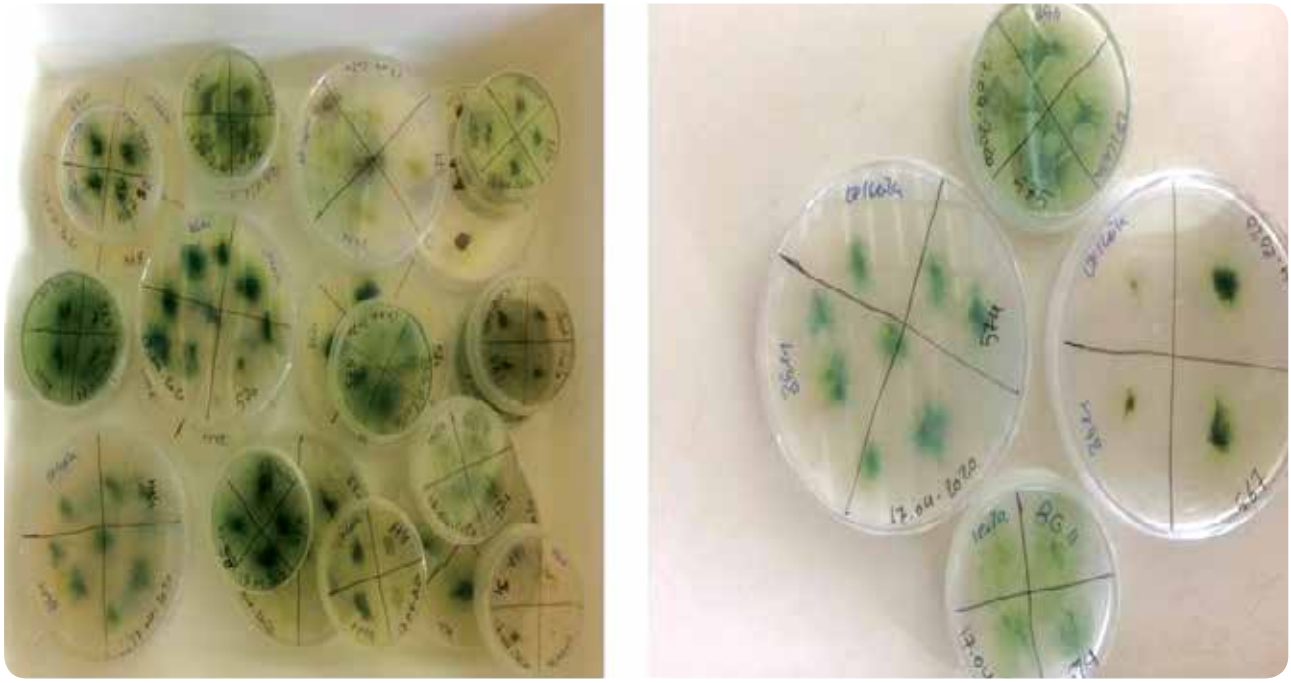
منطقه موردمطالعه

محدوده موردمطالعه بخشی از بیابان سجزی (بیابان‌های مرکزی ایران) است که در استان اصفهان، با مساحت ۱۹۹/۵ هکتار بین طول‌های شرقی "۳۲'۵۲°۵۱ تا "۴۱'۲۷°۵۲ و عرض‌های شمالی "۳۱'۳۳°۳۲ تا "۰۱'۵۵°۳۲ گسترده شده است (شکل ۱). شیب متوسط دشت سجزی ۱/۰۸درصد و ارتفاع متوسط آن ۱۶۸۰ متر است. براساس آمار ایستگاه سینوپتیک شهید بهشتی واقع در شرق اصفهان، متوسط بارش سالیانه منطقه، ۱۰۶ میلی‌متر است. براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم منطقه از نوع خشک و براساس طبقه‌بندی آمبرژه از نوع خشک سرد است (خداقلی و حجه‌فروش، ۱۴۰۰).

● نمونه‌برداری و شناسایی گلسنگ‌ها

برای آغاز اجرای عملیات بیابان‌زدایی با استفاده از روش‌های زیستی به‌صورت کشت نهال، استفاده از میکروارگانیسم‌ها یا به‌صورت تلفیقی از هر دو روش، خارجی‌ترین مرزهای بیابان سجزی تعیین شد، سپس، با حرکت در یک شعاع محاسبه‌شده براساس تغییرات محسوس محیطی (هرچند که این تغییرات شامل رطوبت ثقلی خاک، تغییرات در تیپ پوشش گیاهی غالب، اسیدیته، شوری و ... در حد بسیار جزیی باشند) به سمت مرکز بیابان، از گونه‌های بومی منطقه نمونه‌برداری شد. به‌دلیل توانایی بسیار زیاد گلسنگ‌ها در تحمل شرایط سخت محیطی وسازگاری بسیار زیاد آنها، نمونه‌های خاک ترجیحاً از خاک‌های زیر پوشش گلسنگ‌های خاک‌زی، که بیشتر از نوع سیانوگلسنگ‌ها بودند، برداشت شدند. نمونه‌های گلسنگ، از پای بوته‌ها یا بین سنگ‌ریزه‌های مستقر روی خاک مخروط‌افکنه‌های روستاهای زفره، ورتون و فشارک واقع در محدوده بیابان سجزی، برداشت شدند (شکل ۲). نمونه‌های

شکل ۲- جمع‌آوری گلسنگ‌های خاک‌زی از دشت سجزی



شکل ۳- کلنی‌های سیانوباکتری در محیط کشت BG11

جمع‌آوری شده طی دو سال متوالی (۱۳۹۸-۱۳۹۷) شماره‌گذاری و در پاکت‌های کاغذی قرار داده شدند. نمونه‌های گلسنگ براساس خصوصیات مرفولوژیکی و با استفاده از استریومیکروسکوپ، میکروسکوپ معمولی و معرف‌های رنگی متداول ازجمله هیدروکسیدپتاسیم (KOH) شناسایی شدند (سهرابی و الیاسی، ۱۳۸۹).

● کشت و تکثیر سیانوباکتری‌ها

تکه‌های بسیار کوچکی از خاک زیر پوشش چهار گونه از سیانوگلسنگ‌های جمع‌آوری شده شامل گونه‌های *Pecania terricola*، *Enchylium tenax*، *Collema cocophorum* و *Lathagrium auriforme* برای جداسازی، کشت، تکثیر، خالص‌سازی و شناسایی سیانوباکتری‌ها، تفکیک شدند، این تکه‌ها روی محیط کشت BG 11، در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و زیرلامپ‌های مهتابی (Osram Luminlux Cool White lamps L36W/840) با انرژی 25 µmol photon.m^{-2}s^{-1} و در یک چرخه روشنایی/تاریکی به مدت ۱۲:۱۲ ساعت قرار داده شدند. بعد از ۲-۴ هفته، کلنی‌های سیانوباکتری در پلیت‌ها روی محیط کشت تشکیل شدند. خالص‌سازی گونه‌ها طی سه مرحله انجام شد (شکل ۳).

● اندازه‌گیری پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی و درون‌سلولی در سیانوباکتری‌ها

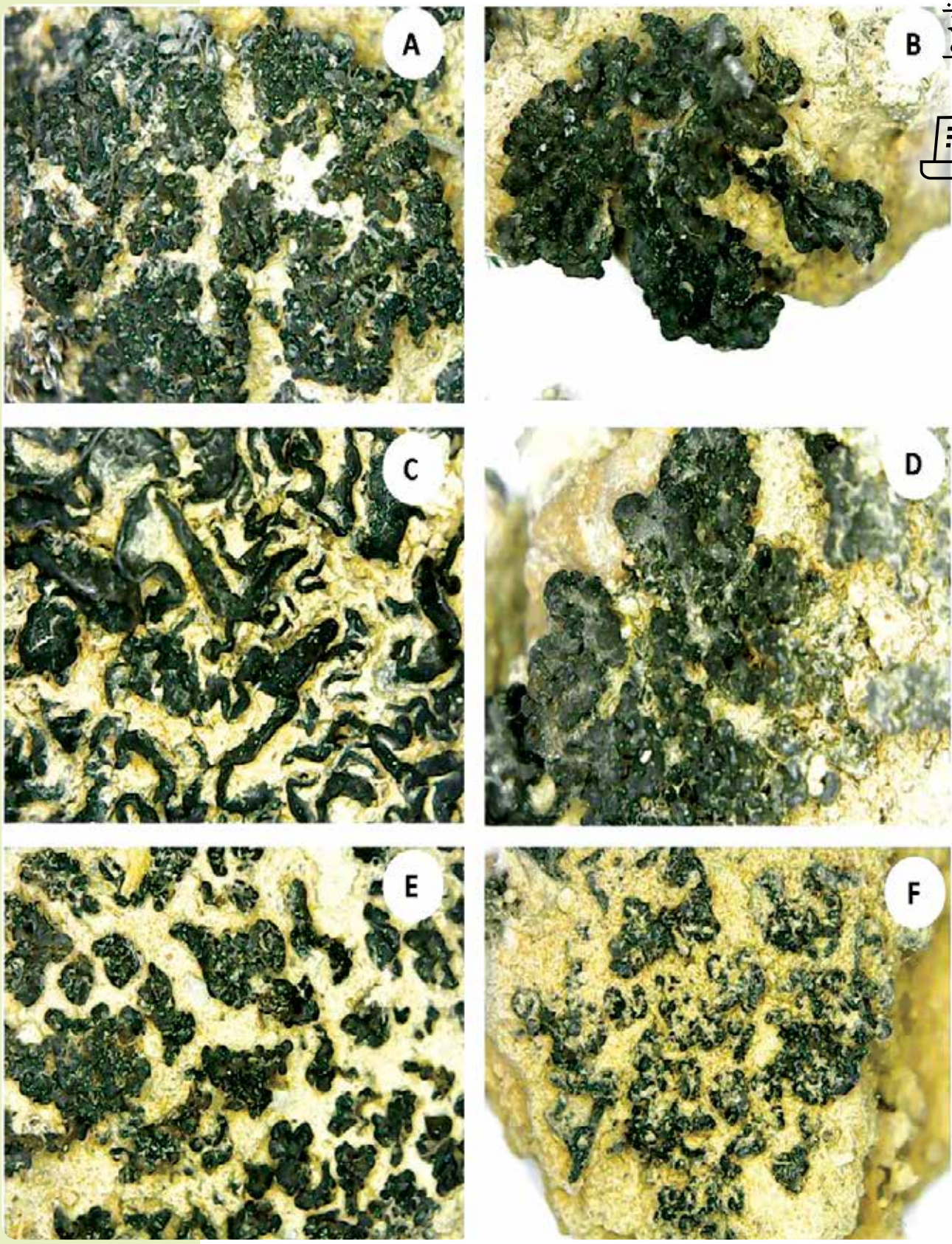
برای اندازه‌گیری پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی (LB-EPS)، ۱۰ الی ۳۰ میلی‌گرم از سیانوباکتری‌ها در لوله‌های ۱۵ میلی‌لیتری ریخته و پس از افزودن ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر، به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق به حال خود رها شدند. سپس برای ۳۰ دقیقه در دمای ۸ درجه سانتی‌گراد با ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. پس از خالی کردن مایع رویی در لوله‌های جدید، یک میلی‌لیتر آب مقطر و یک میلی‌لیتر محلول فنل ۵درصد به آنها اضافه شد. درنهایت پس از افزودن ۵ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک ۹۸درصد، با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۸۸ نانومتر قرائت شدند (Chen *et al.*, 2014).

برای اندازه‌گیری پلی‌ساکاریدهای درون‌سلولی (TB-EPS)، پس از افزودن آب مقطر و سانتریفیوژ نمونه‌ها و اضافه کردن ۵ میلی‌لیتر محلول Na2EDTA یک‌دهم مولار، برای ۱۲۰ دقیقه در دمای اتاق قرار داده شدند. سپس تیوپ‌ها در دمای ۸ درجه سانتی‌گراد و با ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند و سایر مراحل همانند پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی انجام شد (Mugnai *et al.*, 2018).

● اندازه‌گیری کلروفیل

مقداری از نمونه، توزین و به لوله‌های ۱۵ میلی‌لیتری منتقل شد. سپس ۳ میلی‌لیتر اتانول ۹۶درصد، اضافه و در دمای ۷۸ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه در حمام بن قرار داده شد. پس از آن، بلافاصله به مدت ۱۰ دقیقه در ظرف یخ گذاشته شدند. نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد با دور ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. عصاره‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۶۵ نانومتر قرائت شدند. مقدار کلروفیل از فرمول ذیل محاسبه شد (Castle *et al.*, 2011).

$$Chl\ a\ (mgL^{-1}) = ([11.9035*A(665)]*V)/(g\ crust*L)$$



شکل ۴- سیانوگلسنگ‌های جمع‌آوری شده از دشت سجزی
Enchylium tenax (A-B), *Lathagrium auriforme* (C), *Collema Coccophorum* (D), *Peccania terricola* (E-F)

شکل ۵- تصاویر تهیه شده از سیانوباکتری با میکروسکوپ نوری Olympus BX51
(A) *Coleofasciculus chthonoplast*, (B) *Microcoleus vaginatus*

L: طول قطر اپتیکی سل‌های اسپکتروفتومتر به میلی‌متر، V: حجم عصاره به لیتر و g: وزن سیانوباکتری به میلی‌گرم

● شناسایی سیانوباکتری‌ها

بررسی‌های مرفولوژیکی با استفاده از میکروسکوپ نوری Olympus BX51 ((Olympus Ltd, Hamburg, Germany با دیافراگم Nomarski DIC انجام شد. میکروگراف‌ها با دوربین دیجیتال (Olympus UC30) متصل به میکروسکوپ، در مقیاس ۲۰ و ۵۰ میکرومتر گرفته و توسط نرم‌افزار OlympusSens Entry پردازش شدند.

● مقایسه گونه‌های سیانوباکتری

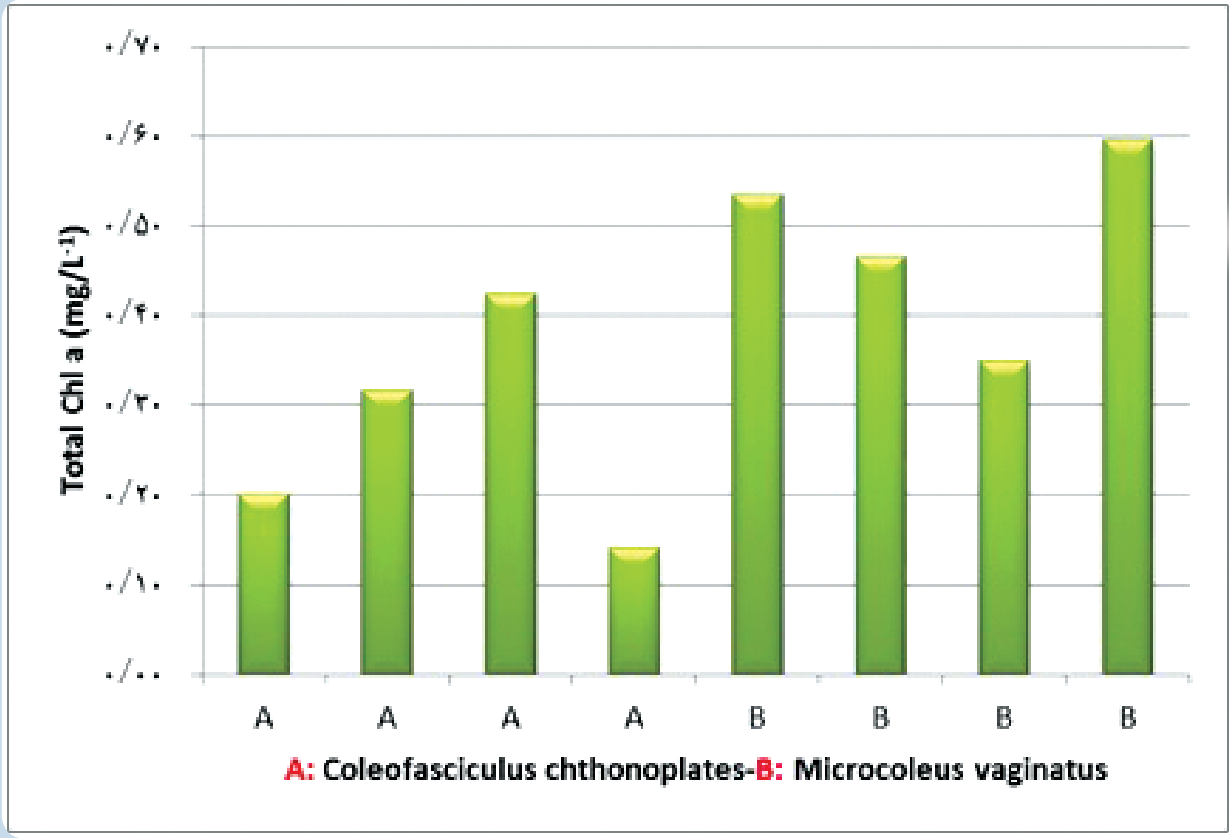
مقایسه میانگین غلظت‌های کلروفیل و پلی‌ساکاریدهای درون‌سلولی و برون‌سلولی *Microcoleus vaginatus* و *Coleofasciculus chthonoplast* براساس آزمون آماری تجزیه واریانس یک‌طرفه در سطح احتمال ۹۵درصد ($P<0/05$) با چهار تکرار انجام شد.

● نتایج

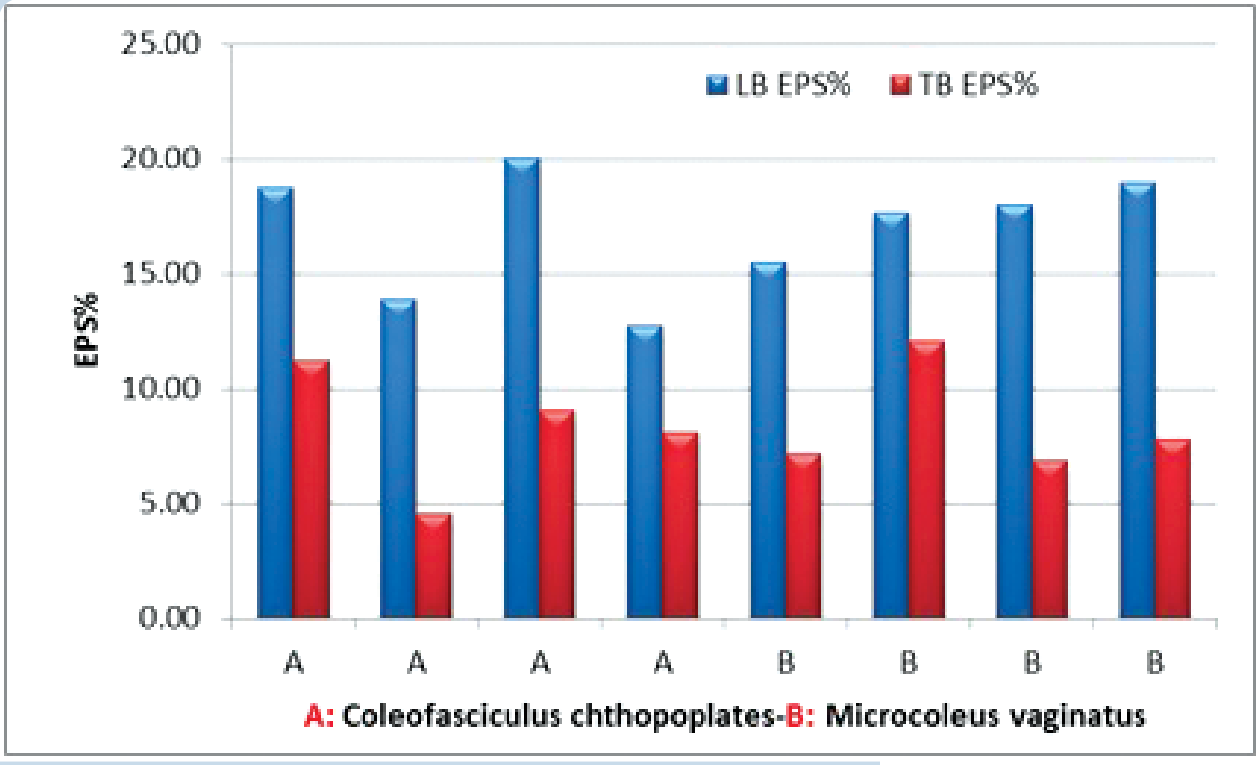
در محدوده موردمطالعه از بیابان سجزی، ۳۲ گونه گلسنگ خاک‌زی جمع‌آوری شدند. بیشتر این گلسنگ‌ها از نوع سیانوگلسنگ هستند و جزء فتوبیونت آنها از سیانوباکتری است. تصاویر گونه‌ها با فراوانی زیاد نسبت به سایر گونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. ازآنجایی‌که این گونه‌های ماکروبیوکراست، بومی مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند با شرایط تنش خشکی، شوری خاک و تابش‌های اشعه ماوراء بنفش سازگاری دارند.

● گونه‌های سیانوباکتری براساس ویژگی مرفولوژیکی آنها

براساس ویژگی‌های مرفولوژیکی، دو گونه سیانوباکتری خاک‌زی شامل *Coleofasciculus chthonoplast* و *Microcoleus vaginatus* و از دسته سیانوباکتری‌های رشته‌ای خطی و بدون هتروسیست، شناسایی شدند. این گونه‌ها،



شکل ۶- مقادیر کروفیل a در دو گونه سیانوباکتری



شکل ۷- پلی‌ساکاریدهای LB EPS و TB EPS در دو گونه سیانوباکتری

جدول ۱- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های فیزیولوژیکی سیانوباکتری‌های *Microcoleus vaginatus* و *Coleofasciculus chthonoplast*

ردیف	منبع	F	میانگین مربعات
۱	کلروفیل	۲/۴۲۴	۰/۰۶۲*
۲	پلی‌ساکارید درون‌سلولی	۰/۱۷۰	۰/۱۱۴ ns
۳	پلی‌ساکارید برون‌سلولی	۳/۷۸۰	۲/۸۱۲*

*: معنی‌داری در سطح احتمال 0/95 (P<0/05)

ns: عدم معنی‌داری

سیانوباکتری‌های تشکیل‌دهنده مت یا بیوفیلم‌های پری‌فیتیک روی رسوبات، خاک‌های مرطوب، صخره‌ها و حتی گیاهان شناور هستند.

● مقادیر کلروفیل و پلی‌ساکارید در گونه‌های سیانوباکتری

مقادیر کلروفیل و پلی‌ساکاریدها با چهار تکرار از هر یک از گونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد، میانگین میزان غلظت کلروفیل a در گونه *Coleofasciculus chthonoplat*، ۰/۲۷ میلی‌گرم بر لیتر و در گونه *Microcoleus vaginatus* ، به میزان ۰/۴۹ میلی‌گرم بر لیتر بودند. با توجه به دو برابر بودن مقادیر کلروفیل a در گونه *Microcoleus vaginatus* نسبت به *Coleofasciculus chthonoplat* معلوم شد، زنده‌مانی و توان ترسیب کربن در گونه *Microcoleus vaginatus* بیشتر است. میانگین مقادیر LB EPS در گونه *Coleo-fasciculus chthonoplat*، ۱۶/۳۶درصد و در گونه *Microcoleus vaginatus*، ۱۷/۵۵درصد بودند. همچنین میانگین مقادیر TB EPS در گونه *Coleofas-ciculus chthonoplat* و *Microcole-us vaginatus* به‌ترتیب ۸/۲۲ و ۸/۴۵ درصد بود.

● مقایسه آماری دو گونه سیانوباکتری

نتایج آزمون آماری تجزیه واریانس یک‌طرفه نشان داد، میانگین غلظت‌های کلروفیل a و پلی‌ساکاریدهای برون‌سلولی دو گونه سیانوباکتری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر دارند. لیکن با وجود بیشتر بودن غلظت پلی‌ساکاریدهای درون‌سلولی *Microcoleus vaginatus*، اختلاف میانگین غلظت پلی‌ساکاریدهای درون‌سلولی بین دو گونه، معنی‌دار نبود (جدول ۱).

● بحث و نتیجه‌گیری

در نوار حاشیه دشت سجزی، همچون سایر بیابان‌ها شدت فرسایش بادی کمتر است و پوسته‌های زیستی خاک به‌صورت پراکنده در سطح خاک وجود دارند. برای ارزیابی توانایی ثبیت خاک با پوسته‌های زیستی، سیانوباکتری‌های موجود در محتوای خاک زیر پوشش گلسنگ‌های خاک‌زی در نوار حاشیه بیابان سجزی جداسازی و پس از کشت و خالص‌سازی طی چندین مرحله، درنهایت دو گونه بومی سیانوباکتری براساس ویژگی‌های مرفولوژیکی شناسایی شدند. پلی‌ساکاریدها، ابرمولکول‌های پلیمری با محتوای ارگانیک بالا هستند که توسط سیانوباکتری‌ها طی فرایند متابولیسم تولید می‌شوند، آنها سطح سلول را احاطه می‌کنند و سبب افزایش ذخیره غذایی آن و حفظ رطوبت در تنش‌های خشکی می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر، از موجود زنده در برابر شرایط سخت محافظت می‌کنند و به‌عنوان منبع کربن در تأمین انرژی در شرایط بحرانی نقش اساسی دارند (Nowruzi *et al.*, 2020). LB-EPS ها نوعی پلی‌ساکارید کم‌محلول، با باندهای ضعیف هستند که محیط را متخلخل می‌کنند، TB-EPS ها، هم در داخل سلول و هم در خارج سلول، در فاز مایع گسترش می‌یابند و سبب استحکام مکانیکی سلول می‌شوند. کلنی‌های سیانوباکتری با محتوای بالای TB EPS در برابر هیدرولیز ناشی از تنش‌های خشکی و اشعه UV مقاومت می‌کنند و به سختی تجزیه می‌شوند (Rossi *et al.*, 2017). بنابراین، سیانوباکتری‌های مولد پلی‌ساکارید با محتوای بیشتر TB EPS ها، پتانسیل بیشتری برای تحمل شرایط سخت اکوسیستم‌های بیابانی ازجمله خشکی، تنش‌های رطوبتی، دمای زیاد و اشعه UV دارد. سیانوباکتری‌ها توانایی ذخیره کردن دی‌ساکاریدها به‌ویژه ترهالوز (Trehalose) را درون سلول دارند. این نوع پلی‌ساکاریدها در شرایط تنش آبی عمل می‌کنند و در مراحل اولیه و میانی کمبود آب، در آب‌دار کردن پروتئین‌ها و حفظ ساختار سه‌بعدی آنها برای ادامه حیات میکروارگانیسم ضروری هستند. همچنین، ترهالوزها در حفظ پایداری غشای سلولی و درنتیجه پایداری سیانوباکتری‌ها در شرایط خشکی نقش زیادی دارند (اعتمادی‌فر و دریک‌وند، ۱۳۹۸). ساختار غلاف پلی‌ساکاریدی و ویژگی‌های نگهداری آب آن نیز در طول رشد سیانوباکتری قابل تنظیم است. همچنین رنگدانه‌های گلوئوکاپسین (Gloeocaspin)، فوسکورودین (Fus-corhodin) و فوسکوکلرین (Fusco-chlorin) که در غلاف پلی‌ساکاریدی وجود دارند موجب افزایش مقاومت به خشکی در سیانوباکتری می‌شوند، اما مکانیسم دقیق

آنها هنوز مشخص نیست (اعتمادی‌فر و دریک‌وند، ۱۳۹۸).

ایزوفرم غالب کلروفیل در سیانوباکتری‌ها، کلروفیل a است. سیانوباکتری‌ها دارای فیکوبیلی‌زوم (Phycobilisome)، کمپلکس‌های برداشت‌کننده نور هستند که با فتوسیستم II در ارتباطند و در انتقال انرژی نوری نقش دارد. اندازه و ترکیب پروتئینی این کمپلکس در پاسخ به نور و رژیم‌های غذایی تغییر می‌یابد و نسبت به اسیدیته، شوری، تغییر دما، خشکی و تنش نور حساس است. این فیکوبیلین‌ها، طول موج نوری اختصاصی خود را در طول موج‌های بین ۴۷۰ تا ۶۵۰ نانومتر جذب می‌کنند که طول موج‌های کوتاه‌تر از باند جذبی قرمز در حدود ۶۶۰ نانومتر در کلروفیل هستند. انرژی برانگیختن بالا، امکان انتقال انرژی نوری از فیکوبیلین‌ها به کلروفیل a را مهیا می‌کند. آزمایش‌های انجام شده نشان داده است، فعالیت ضدرادیکالی کلروفیل a بسیار بیشتر از کلروفیل b است (اعتمادی‌فر و دریک‌وند، ۱۳۹۸)، بنابراین، سیانوباکتری‌ها براساس دو ویژگی میزان کلروفیل a و مقادیر پلی‌ساکارید تولید شده، غربالگری شدند.

هر دو گونه *Coleofasciculus chthonoplast* و *Microcoleus vaginatus* گونه‌های بومی بیابان سجزی هستند. بنابراین، تاب‌آوری قابل‌قبولی را در برابر تنش‌های محیطی از قبیل خشکی، نبود رطوبت کافی به‌ویژه در فصول گرم سال، شوری و قلیائیت خاک دارند. براساس یافته‌های تحقیق، میزان کلروفیل a موجود در گونه *Microcoleus vaginatus*، ۰/۴۹ میلی‌گرم در لیتر و در گونه *Coleofasciculus chthonoplast*، ۰/۲۷ میلی‌گرم در لیتر است. بنابراین، گونه *Microcoleus vaginatus* به سبب داشتن مقادیر بالای کروفیل a، قابلیت فتوسنتز، تولید مواد غذایی موردنیاز، جذب دی‌اکسیدکربن (ترسیب کربن)، درنهایت توان زنده‌مانی بیشتری در مقایسه با گونه *Coleofasciculus chthonoplast* دارد. همچنین، میانگین مقادیر LB EPS و TB EPS در گونه *Microcoleus vaginatus* به‌ترتیب ۱۷/۵۵ و ۸/۴۵ درصد و در گونه *Coleofasciculus chthonoplast* به‌ترتیب ۱۶/۳۶ و ۸/۲۷ درصد بود. به‌عبارتی با توجه به مقادیر مواد اگزوپلی‌ساکاریدی و بیشتر بودن ذخیره غذایی، می‌توان گفت، تاب‌آوری گونه *Microcoleus vaginatus* در شرایط حادتر محیطی از قبیل دما، خشکی، تنش‌های تابش خورشیدی و ... بیشتر است.

● نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

برای موفقیت حداکثری در اجرای طرح‌های بیابان‌زدایی و کنترل پدیده بیابان‌زایی، از یک سو باید نقاط برداشت، درمان و از سوی دیگر مرزهای رو به گسترش بیابان کنترل شوند. به‌عبارت‌دیگر، به‌طور هم‌زمان هم در نقاط بحرانی، که اغلب در مرکز بیابان‌ها واقع شده‌اند و هم در خارجی‌ترین مرزهای بیابان به هر روش ممکن ازجمله روش‌های مکانیکی، شیمیایی، یا روش‌های بیولوژیکی اقدامات بیابان‌زدایی انجام شود. اجرای روش‌های مکانیکی (استفاده از بادشکن‌های فلزی ورقه‌ای یا توری‌های مشبک)، شیمیایی (مالچ‌پاشی و استفاده از انواع خاک‌پوش‌های شیمیایی، پلیمری و نفتی)، یا روش‌های بیولوژیکی در نقاط بحرانی بیابان‌ها و روش‌های بیولوژیکی شامل کاشت نهال گونه‌های مناسب، یا استفاده از مالچ‌های زیستی ازجمله سیانوباکتری‌های بومی بیابان‌های کشور در خارجی‌ترین مرزهای بیابان می‌تواند مفید باشد.

با توجه به ویژگی‌های فیزیولوژیکی سیانوباکتری‌ها، بسیاری از محققان از آنها برای اصلاح و تثبیت خاک و مقابله با بیابان‌زدایی استفاده کرده‌اند. خیرفام و همکاران (۱۳۹۵) از کشت، تکثیر و تلقیح سیانوباکتری‌ها در عرصه‌های گسترده منابع طبیعی با هدف بهبود کیفیت خاک، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب و با هزینه اقتصادی قابل توجیه یاد کردند. همچنین امکان کشت انبوه سیانوباکتری‌های بومی دشت سجزی، در شرایط آزمایشگاهی مورد تأیید واقع شد، زیرا سرعت رشد سیانوباکتری‌های *Coleofasciculus chthonoplates* و *Microcoleus vaginatus* بسیار زیاد بود و در مدت زمان کوتاهی (دو تا چهار هفته) کلنی‌های حجیم و بزرگی تشکیل دادند. بنابراین، می‌توان پس از مراحل غربالگری، این سیانوباکتری‌های بومی را با استفاده از فناوری‌های جدید از قبیل هواپیماهای سم‌پاشی کوچک یا تانکرهای بزرگ مالچ‌پاشی در خاک تلقیح کرد. نتایج آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه و مقایسه میانگین غلظت‌های کلروفیل a و پلی‌ساکاریدها (جدول ۱ و شکل‌های ۶ و ۷) مؤید آن بود که گونه *Microcoleus vaginatus*، به‌طور ذاتی از قابلیت‌های فیزیولوژیکی بهتری برای سازگاری با شرایط حاد محیطی برخوردار و گونه‌ای مناسب‌تر برای بیابان‌زدایی در دشت سجزی است. Fattahi و همکاران (۲۰۲۰) دو گونه سیانوباکتری *Microcoleus vaginatus* و *Nostoc* sp. را روی ماسه‌های بادی کشت دادند و میزان بادبردگی ماسه‌های بادی را در سرعت‌های مختلف باد با استفاده از تونل باد اندازه‌گیری کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد، گونه *Microcoleus vaginatus* عملکرد بهتری در کاهش شار تلفات ماسه‌های بادی در مقایسه با گونه *Nostoc* sp. دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده چنین استنباط می‌شود که می‌توان از سیانوباکتری *Microcoleus vaginatus* در بیابان سجزی به‌عنوان یک نوع خاک‌پوش زیستی استفاده کرد. این گونه سیانوباکتری، یک گیاه زنده در خاک و حاوی کلروفیل و اتوتروف است و علاوه‌بر بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، با ترشح مواد اگزوپلی‌ساکاریدی، سبب استحکام خاک‌دانه می‌شود و فرسایش و هدررفت خاک را کاهش می‌دهد.

● منابع

احمدی، ح.، ۱۳۹۱. ژئومرفولوژی کاربردی (جلد دوم: فرسایش بادی). انتشارات دانشگاه تهران،

تهران، ۷۰۶ صفحه.
ارزاقی، ف.، فرخیان فیروزی، ا.، عنایتی ضمیر، ن. و خلیل مقدم، ب.، ۱۳۹۴. بررسی اثر قارچ تریکودرما هارزیانوم بر کنترل فرسایش بادی خاک شنی دشت آزادگان در شرایط آزمایشگاهی و تونل باد. مدیریت خاک و تولید پایدار، ۵(۲): ۲۳۹-۲۵۱.
اعتمادی‌فر، ز. و دریک وند، پ.، ۱۳۹۸. زیست‌شناسی سیانوباکتری‌ها. انتشارات دانشگاه اصفهان، اصفهان، ۲۳۷صفحه.
خداقلی، م. و حجه‌فروش، ش.، ۱۴۰۰. بررسی وضعیت گیاه دارویی خارشتر در جهت کاهش مخاطرات گرد و غبار (مطالعه موردی: دشت سجزی اصفهان). کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، ۷: ۳۳-۴۹.
خسروشاهی، م. و ابطحی، س.م.، ۱۳۹۴. تأثیر شش مالچ شیمیایی و معدنی بر استقرار و زنده‌مانی گیاهان اسکنبیل و تاغ. دانش آب و خاک، ۲۶(۱): ۳۹-۴۶.
خیرفام، ح.، همایی، م.، صادقی، س.ح. و زارعی دارکی، ب.، ۱۳۹۵. نقش غنی‌سازی پوسته زیستی خاک از طریق تلقیح و تحریک باکتری‌ها در افزایش نیتروژن خاک حساس به فرسایش. آب و خاک، ۳۱(۲): ۵۴۵-۵۵۶.
خیرفام، ح. و اسدزاده، ف.، ۱۳۹۹. ایجاد و احیای پوسته‌های زیستی در بوم‌سازگان‌های تخریب‌یافته با فناوری تلقیح سیانوباکتریایی. تخریب و احیای اراضی طبیعی، ۱(۱): ۱۳۲-۱۳۸.
سهرابی، م. و الیاسی، ر.، ۱۳۸۹. نکاتی درباره گلسنگ‌های اپی‌فیت مهم مازندران، همراه با تاریخچه کوتاهی از گلسنگ‌شناسی در جنگل‌های هیرکانی. رستنی‌ها، ۱۱(۲): ۱۲۱-۱۳۱.
طهماسبی بیرگانی، ع.م.، زارع، س. و رفیعی، ز.، ۱۳۹۸. دستورالعمل فنی ارزیابی کارایی تثبیت‌کننده‌های خاک (مالچ). انتشارات سازمان حفاظت محیط‌زیست کشور، تهران، ۱۶۰ صفحه.

Belnap, J. and Gardner, J.S., 1993. Soil microstructure in soils of the Colorado Plateau: the role of the cyanobacterium *Microcoleus vaginatus*. Great Basin Naturalist, 53: 1. 40-47.
Castle, S.C., Morrison, C.D. and Barger, N.N., 2011. Extraction of chlorophyll a from biological soil crusts: A comparison of solvents for spectrophotometric determination. Soil Biol Biochem 43: 853–856.
Chen L., Rossi F., Deng S., Liu Y., Wang G., Adessi A. and De Philippis R., 2014. Macromolecular and chemical features of the excreted extracellular polysaccharides in induced biological soil crusts of different ages. Soil Biology and Biochemistry, 78: 1-9.
Fattahi, S.M., Soroush, A. and Huang, N., 2020. Wind erosion control using inoculation of aeolian sand with cyanobacteria. Land Degraded Development, 31(15): 1-13.
Etemadifar, Z. and Derik Vand, P., 2014. The biology of cyanobacteria. Isfahan University Press, Isfahan, 237p.
Huixia, P., Zhengming, Ch., Xuemei, Zh., Shuyong, M., Xiaoling, Q. and Fang, W., 2007. A study on an oligotrophic bacteria and its ecological characteristics in an arid desert area. Science in China Series D: Earth Sciences, 50: 128-134.
Li, D., Hu, Ch. and Liu, Y., 2014. Spatial heterogeneity of cyanobacteria-inoculated sand dunes significantly influences artificial biological soil crusts in the Hopq Desert (China), Environmental Earth Sciences, 71: 245-253.
Malam Issa, O., Le Bissonnais, Y., Defarge, Ch., Marin, B., Duval, O., Bruand, A., D'Acqui, L.P., Nordenberg, S. and Annerman, M., 2007. Effect of the inoculation of cyanobacteria on the microstructure and the structural stability of a tropical soil. Plant and Soil, 1-19.
Miralles, I., Lazaro, R., Sanchez-Maranon, M., Soriano, M. and Ortega, R., 2020. Biocrust cover and successional stages influence soil bacterial composition and diversity in semiarid ecosystems. Science of the Total Environment, 709: 1-19.
Mungai, G., Rossi, F., Felde, V.J. M.N.L., Colesie, C., Budel, B., Peth, S., Kaplan, A. and De Philippis, R., 2018. The potential of the cyanobacterium *Leptolyngbya ohadii* as inoculum for stabilizing bare sandy substrates. Soil biology and Biochemistry, 127: 318-328.
Nowruzi, B., Sarvari, G. and Blanco, S., 2020. The cosmetic application of cyanobacterial secondary metabolites. Algal Research, 49: 1-14.
Pluis, J.L.A. and de Winder, B., 1989. Spatial patterns in algae colonization of dune blowouts. Catena, 16: 499-506.
Rossi, F., Li, H., Liu, Y. and De Philippis, R., 2017. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal. Earth-Science Reviews, 171: 28-43.
Sadeghi, S.H.R., Ghavimi Panah, M.H., Younesi, H. and Kheirfam, H., 2018. Ameliorating some quality properties of an erosion-prone soil using biochar produced from dairy wastewater sludge. Catena, 171: 193-198.
Seidlewicz, G., Zak, A., Sharma, L., Kosakowska, A. and Pazdro, K., 2020. Effects of oxytetracycline on growth and chlorophyll a fluorescence in green algae (*Chlorella vulgaris*), diatom (*Phaeodactylum tricornutum*) and cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa* and *Nodularia spumigena*). Oceanologia, 62(2): 214-225.
Soleimani, R., Alikhani, H.A., Towfighi, H., Khavazi, K. and Pourbabaee, A.A., 2017. Isolated bacteria from saline–sodic soils alter the response of wheat under high adsorbed sodium and salt stress. International Journal of Environmental Science and Technology, 14(1): 143-150.
Wang, W., Liu, Y., Li, D., Hu, C. and Rao, B., 2009. Feasibility of cyanobacterial inoculation for biological soil crusts formation in desert area. Soil Biology and Biochemistry, 41(5): 926-929.
Young, J.P., Evans, R.A., Roundy, A.B. and Brown, J.A., 1986. Dynamic landforms and plant communities in a pluvial lake basin. The Great Basin Naturalist, 46: 1-21.