



نقش باکتری‌های ریزوسفری در جذب آب و تثبیت شن‌های روان مروری بر مطالعات انجام‌شده و کاربردهای آن در بیابان‌زدایی

سیدمرتضی ابطحی^{۱*}

مقدمه

بیابان‌زدایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فرایندهای تخریب اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی، تنوع زیستی و معیشت جوامع انسانی محسوب می‌شود (Zhao et al., 2026). براساس گزارش‌های موجود، حدود ۷۵ درصد از اراضی خشک جهان در معرض تهدید بیابان‌زدایی هستند. در کشور چین حدود ۲۰ درصد از مساحت کل کشور، بیابانی یا در معرض بیابان‌زدایی شدید است (Sun et al., 2026).

فرسایش بادی و حرکت شن‌های روان از مهم‌ترین عوامل پیش‌رونده بیابان‌زدایی هستند که هر ساله خسارات جبران‌ناپذیری به منابع خاک و آب وارد می‌آورند (Tao et al., 2026). روش‌های زیستی تثبیت شن‌های روان، به‌ویژه استفاده از گونه‌های گیاهی سازگار با شرایط بیابانی، به‌عنوان روش‌های کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست در اولویت برنامه‌های بیابان‌زدایی قرار دارند (El Keblawy et al., 2025). با این حال، بقا و استقرار موفق گیاهان در شرایط سخت بیابانی تا حد زیادی به توانایی آن‌ها در برقراری همزیستی با جمعیت‌های میکروبی مفید خاک وابسته است. در این میان، باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد که در ناحیه اطراف ریشه گیاهان (ریزوسفر) ساکن هستند، با مکانیسم‌های متنوع مستقیم و غیرمستقیم به افزایش رشد و تاب‌آوری گیاهان در شرایط تنش کمک می‌کنند (Kesavardhini et al., 2026; Aulakh et al., 2026). بر همین مبنا، در نوشتار پیش‌رو، با مرور نظام‌مند مطالعات انجام‌شده در سطح بین‌المللی، نقش باکتری‌های ریزوسفری درختان و بوته‌های بیابانی، در سه محور زیر بررسی شده است:

- * افزایش کارایی جذب آب توسط گیاهان در شرایط کم‌آبی،
- * تثبیت فیزیکی ذرات شن و ماسه از طریق ترشحات پلی‌ساکاریدی و تشکیل خاک‌دانه
- * کاربردهای عملی این دانش در برنامه‌های بیابان‌زدایی و احیای اکوسیستم‌های تخریب‌یافته.

مفاهیم پایه: ریزوسفر و باکتری‌های محرک رشد گیاه

ریزوسفر به‌عنوان ناحیه‌ای از خاک در اطراف ریشه گیاهان تعریف می‌شود که تحت تأثیر مستقیم ترشحات ریشه‌ای قرار دارد. این ناحیه از نظر تعداد و تنوع میکروارگانیسم‌ها، بسیار غنی‌تر از خاک‌های مجاور است. باکتری‌های ساکن در این منطقه که براساس نوع تأثیر خود بر گیاه به سه دسته مفید، مضر و بی‌اثر تقسیم می‌شوند، باکتری‌های ریزوسفری نام دارند. باکتری‌های ریزوسفری مفیدی که قادر به افزایش رشد گیاه از طریق یک یا چند مکانیسم خاص هستند، باکتری‌های محرک رشد گیاه یا PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) نامیده می‌شوند (Besharati, 2022; Rehman et al., 2025). مکانیسم‌های تأثیرگذاری PGPR بر گیاه به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند (شکل ۱).

مکانیسم‌های مستقیم شامل تولید هورمون‌های گیاهی مانند اکسین (IAA) و جبریلین، انحلال ترکیبات نامحلول مانند فسفر (فسفات‌سازی)، تثبیت زیستی نیتروژن، تولید سیدروفور (افزایش جذب آهن) و تولید آنزیم ACC-Deaminase (کاهش تنش اتیلن) است (Kesavardhini et al., 2026).

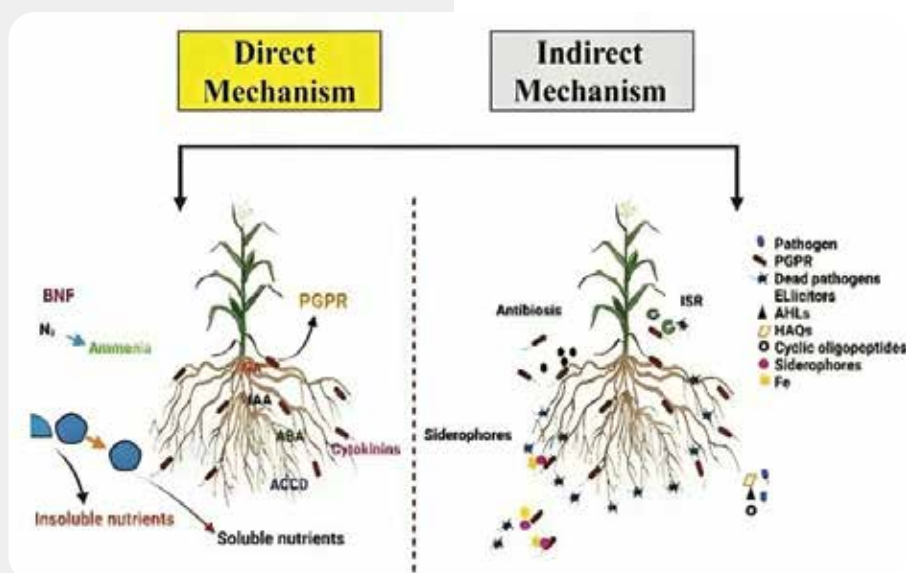
مکانیسم‌های غیرمستقیم شامل تولید آنتی‌بیوتیک‌ها، آنزیم‌های تخریب‌کننده دیواره سلولی عوامل بیماری‌زا (مانند کیتیناز)، القای مقاومت سیستمیک در گیاه، تولید سیانید هیدروژن و رقابت با عوامل بیماری‌زاست (Vives Peris et al., 2020) (شکل ۲).

در شرایط بیابانی، ترکیب این مکانیسم‌ها، به گیاهان کمک می‌کند تا ضمن بهره‌مندی بیشتر از عناصر غذایی محدود، در برابر تنش‌های غیرزنده مانند خشکی، شوری و دمای بالا مقاومت بیشتری از خود نشان دهند (Aulakh et al., 2026).

نقش باکتری‌های ریزوسفری در جذب آب و افزایش تحمل به خشکی

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و بقای گیاهان در اکوسیستم‌های بیابانی است. PGPR با ایجاد پاسخ

* نویسنده مسئول، دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کاشان، ایران. پست الکترونیک: Morabtahi70@gmail.com



شکل ۱- نمونه‌هایی از ریزوباکتری که از رشد گیاه حمایت می‌کنند (Salman and Avinash, 2025)

مکانیسم‌های مستقیم

تولید هورمون‌های گیاهی (اکسین، جیبرلین، ...)
 انحلال ترکیبات فسفر
 تثبیت نیتروژن
 تولید سیدروفور
 اکسایش گوگرد
 تولید ACC-Deaminase

مکانیسم‌های غیرمستقیم

تولید آنتی‌بیوتیک‌ها
 آنزیم‌های تخریب‌کننده دیواره سلولی پاتوژن (کتیناز، ...)
 افزایش مقاومت سیستمیک گیاه ICR
 تولید HCN
 ایجاد رقابت با پاتوژن‌ها
 تولید سیدروفور

شکل ۲- نمایی شماتیک از مکانیسم‌های افزایش رشد در باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه (Besharti, 2022)

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که PGPR با تنظیم توزیع هورمون‌های گیاهی مانند اسیدآسیزیک (ABA) و کاهش سطح اتیلن از طریق آنزیم ACC-Deaminase (Amino cyclopropane Carboxylate Deaminase) به حفظ رشد و توسعه گیاه در شرایط کم‌آبی کمک می‌کنند (Hao et al., 2026). به عنوان مثال، سویه‌های باسیلوس سودوموناس جداسازی شده از ریزوسفر تاغ (*Haloxylon ammodendron*) در کویر تنگر چین، با بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تنظیم مسیر علامت‌دهی ABA، تحمل به خشکی گیاه چچم (*Lolium temulentum*) را به طور معنی‌داری افزایش دادند (He et al., 2021). (ج) افزایش محتوای آب نسبی برگ و کاهش پراکسیداسیون لیپیدها
 محتوای آب نسبی برگ گیاهان تلقیح شده با PGPR نسبت به گیاهان شاهد، بالاتر بوده و میزان مالون‌دی‌آلدئید

فیزیولوژیک و بیوشیمیایی موسوم به استقامت و انعطاف‌پذیری ناشی از ریزوباکتری در برابر خشکی (RIDER, Rhizobacteria-Induced Drought Endurance and Resilience)، اثرهای منفی تنش خشکی را کاهش می‌دهند (Vives Peris et al., 2020). این پاسخ شامل تغییر در سطوح هورمون‌های گیاهی، تنظیمات متابولیکی، تولید آگزوبیلی ساکاریدهای باکتریایی، تشکیل بیوفیلم و افزایش مقاومت آنتی‌اکسیدانی است (He et al., 2021). از جمله مهم‌ترین مکانیسم‌های PGPR در افزایش تحمل به خشکی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Kesavardhini et al., 2026; Rehman et al., 2025):

الف) بهبود معماری ریشه و افزایش جذب آب
 PGPR با تولید هورمون‌های محرک رشد مانند اکسین، موجب افزایش طول ریشه، انشعابات ریشه‌ای و تراکم ریشه‌های موئین می‌شوند. این تغییرات سطح جذب آب و عناصر غذایی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند (Albarrán Cuitiño et al., 2026).
 ب) تنظیم هورمون‌های گیاهی و مسیرهای علامت‌دهی



شکل ۳- ریشه گیاه کلبیت (*Cyperus eremicus*) و نقش باکتری ریزوسفری در تثبیت شن‌های روان (ریگ‌بلند کاشان)

ریزوسفر گیاهان بومی بیابانی منبع غنی از سویه‌های PGPR با مقاومت بالا به تنش‌های محیطی و توانایی چندنظوره افزایش رشد هستند که می‌توانند به‌عنوان کاندیداهای ارزشمند برای توسعه کودهای زیستی بومی و برنامه‌های احیای اکولوژیک در مناطق خشک استفاده شوند (Ma et al., 2026; Albarrán Cuitiño et al., 2026).

نقش باکتری‌های ریزوسفری در تثبیت شن‌های روان و بهبود خصوصیات خاک

الف) تولید اگزوپلی‌ساکارید و تشکیل خاک‌دانه یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های مستقیم باکتری‌های ریزوسفری در تثبیت فیزیکی ذرات شن و ماسه، تولید اگزوپلی‌ساکاریدها (EPS) است. اگزوپلی‌ساکاریدها پلیمرهای با وزن مولکولی بالایی هستند که توسط باکتری‌ها به محیط ترشح می‌شوند و با چسباندن ذرات خاک به یکدیگر، تشکیل خاک‌دانه‌های پایدار در آب را تسهیل می‌کنند. در مطالعه Khan و همکاران (۲۰۱۷) در پاکستان، باکتری‌های PGPR جداسازی شده از خاک‌های شنی از جمله پلانومیکروبیوم چینز، باسیلوس سرئوس و سودوموناس فلورسنس، اگزوپلی‌ساکاریدهایی تولید کردند که تجمعات خاکی را در اطراف ریشه گیاهان گندم شکل دادند و موجب افزایش قابل توجه ظرفیت نگهداری آب خاک شنی شدند. همچنین، محتوای عناصر غذایی خاک ریزوسفری گیاهان تیمار شده شامل کلسیم (۳۵ درصد)، پتاسیم (۳۴ درصد)، منیزیم (۵۲ درصد) و سدیم (۴۲ درصد) نسبت به شاهد های تحت تنش افزایش یافت. علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند، استفاده تلفیقی از PGPR مؤثر همراه با تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه مانند اسیدسالیسیلیک، می‌تواند رویکردی مؤثر و سازگار با محیط‌زیست برای افزایش تحمل به خشکی در گیاهان و مقابله با بیابان‌زایی ارائه دهد (Vives Peris et al., 2020; Kesavardhini et al., 2026).

ب) گیاهان تثبیت‌کننده شن و جمعیت‌های میکروبی ریزوسفری مطالعات متعددی به بررسی رابطه بین گیاهان تثبیت‌کننده شن و جمعیت‌های میکروبی ریزوسفری آن‌ها پرداخته‌اند. در مطالعه Li و Chen (۱۹۸۷) مشاهده شد، درختچه‌های تثبیت‌کننده شن *Hedysarum scoparium* (اسپرس بیابانی)، *Caragana korshinskii* (کاراگانا) و *Artemisia ordosica* (درمنه) پس از هشت سال کاشت در تپه‌های شنی روان،

(MDA) به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدها در آن‌ها کاهش یافته است. در مطالعه Khan و همکاران (۲۰۱۷)، محتوای آب نسبی برگ (۸۰ درصد)، وزن خشک ریشه (۶۸ درصد) و وزن تر ریشه (۸۰ درصد) در گیاهان تلقیح شده با PGPR مقایسه با گیاهان شاهد به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. د) تولید اسمولیت‌ها و متابولیت‌های سازگارکننده تنش PGPR تجمع متابولیت‌های پاسخ‌دهنده به تنش را مانند اسیدهای آمینه، قندها و الکل‌های قندی در گیاهان افزایش می‌دهند. این ترکیبات نقش مهمی در تنظیم رشد و توسعه گیاه و تقویت سیستم دفاعی در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی ایفا می‌کنند (Yin et al., 2025).

مطالعات موردی روی گیاهان بیابانی

در سال‌های اخیر، در مطالعات متعددی به جداسازی و شناسایی سویه‌های PGPR بومی از ریزوسفر گیاهان بیابانی پرداخته شده است (شکل ۳). در یک مطالعه جامع در واحه مینقین در استان گانسو واقع در شمال غربی چین، محققان ۶۲ جدایه باکتریایی را از ریزوسفر سه گیاه شورپسند، *Tamarix ramosissima*، *Lycium ruthenicum* و *Kalidium foliatum* جدا کردند. از میان این جدایه‌ها، هفت سویه چندمنظوره PGPR شامل پرستیای فیلامنتوزا، باسیلوس آتروفوس، پانتوا اندوفیتیکا، پرپاسیلوس فریگوریتولرانس، باسیلوس آریابهاطای، باسیلوس سوبیتیلیس زیرگونه استرکوریس و پائنی باسیلوس پئوریا شناسایی شدند. همه این سویه‌ها، حداقل دارای دو ویژگی محرک رشد بودند و دو سویه HL6 (*Bacillus atrophaeus*) و HG24 (*Paenibacillus peoriae*) به‌طور هم‌زمان توانایی تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات و تولید IAA، اگزوپلی‌ساکارید (EPS) و سیدروفور را نشان دادند. همچنین، سویه‌های HL3 (*Priestia filamentosa*) و HL6 (*Bacillus atrophaeus*) تا غلظت ۱۲ درصد کلرید سدیم را تحمل کردند و سویه‌های HL3 (*Priestia filamentosa*) و HG8 (*Bacillus aryabhattai*) تنش اسمزی را تا فشار منفی ۲۰ بار تحمل نمودند (Ma et al., 2026). این یافته‌ها نشان می‌دهند،

جمعیت‌های میکروبی ریزوسفری بسیار توسعه‌یافته‌ای داشتند. تعداد میکروارگانیسم‌ها در ناحیه ریزوسفر به‌طور قابل توجهی بیش از مناطق خارج از ریزوسفر بود و تکامل خاک (*Soil Development*) در ریزوسفر به دلیل فعالیت بالاتر میکروارگانیسم‌ها بهتر از مناطق مجاور بود. همچنین، ضخامت لایه پوسته و ساختار خاک‌دانه‌ای در ریزوسفر این گیاهان بیشتر بود.

در مطالعه دیگری روی گیاه تثبیت‌کننده شن آمودندرون (*Ammodendron bifolium*) در کویر تاکرمه‌ور چین مشخص شد، ریزوسفر این گیاه در مقایسه با ناحیه غیرریزوسفری، یک محیط به نسبت غنی از نظر مواد مغذی دارد، با مقادیر بالاتر ماده آلی خاک و نیتروژن قلیایی (*Alkaline Hydrolyzable Nitrogen*). گروه‌های غالب باکتریایی در این کویر شامل شاخه هاب اکتینوباکتریا (۳۹/۸ درصد)، پروتئوباکتریا (۱۷/۴ درصد)، اسیدوباکتریا (۱۰/۲ درصد)، باکترئیدتس (۶/۳ درصد) و فیرمیکوتس (۶/۳ درصد) بودند. شاخص‌های تنوع *Chao1* و *PD_whole_tree* در خاک ریزوسفری به‌طور معنی‌داری بیشتر از خاک خارج از ریزوسفر بود. عوامل اصلی محیطی مؤثر بر جامعه باکتریایی ریزوسفر شامل هدایت الکتریکی، ماده آلی خاک، نیتروژن کل خاک، نیتروژن قلیایی و پتاسیم قابل جذب بودند (Zhu et al., 2025).

ج) اثر طول مدت تثبیت شن بر غنی‌شدگی میکروبی ریزوسفر تثبیت طولانی مدت شن توسط گیاهان بیابانی تأثیر عمیقی بر ساختار و عملکرد جوامع میکروبی ریزوسفر دارد. در مطالعه Liu و همکاران (۲۰۲۲) روی گیاه کاراگانا کورشینسکی (*Caragana korshinski*) (یکی از رایج‌ترین گیاهان تثبیت‌کننده شن در شمال غربی چین)، مقایسه سنین مختلف تثبیت (۶، ۱۲ و ۱۸ سال) نشان داد، کهن‌واژه‌های باکتریایی کلیدی (*Bacterial keystone taxa*) و گونه‌های سطح جنس با عملکرد بالا در ریزوسفر گیاهان ۱۸ ساله به‌طور قابل توجهی بیشتر از سنین کمتر بود. این جنس‌ها شامل ریزوبیوم، انسيفر، نئوریزوبیوم، مزوریزوبیوم، استرپتومایسس، اسفینگوموناس و فلاوباکتریوم بودند که اغلب گروه‌های تثبیت‌کننده نیتروژن، یا حلال فسفات هستند. همچنین، خصوصیات فیزیوشیمیایی خاک ریزوسفر در گیاهان ۱۸ ساله، بهبود قابل توجهی نشان داد، از جمله نیتروژن کل بالاتر، نیتروژن قابل جذب بیشتر، نسبت نیتروژن به فسفر بالاتر و نسبت کربن به نیتروژن پایین‌تر. این یافته‌ها نشان می‌دهند، جوامع میکروبی ریزوسفر با چرخه کربن و نیتروژن در فرایند احیای اکوسیستم‌های بیابانی ارتباط نزدیکی دارند و نقش مهمی در معکوس‌سازی بیابان‌زایی ایفا می‌کنند (Liu et al., 2022).

ساختار جامعه میکروبی ریزوسفر در گیاهان بیابانی

الف) تفاوت ترکیب و تنوع باکتریایی در ریزوسفر و خاک مجاور مطالعات متعدد نشان داده‌اند، ترکیب و تنوع جامعه باکتریایی در ریزوسفر گیاهان بیابانی به‌طور قابل توجهی با خاک‌های مجاور (غیرریزوسفری) متفاوت است. در مطالعه Zhu و همکاران (۲۰۲۵) بر گونه آمودندرون (*Ammodendron bifolium*)، فراوانی نسبی پروتئوباکتریا (۲۰/۲ درصد) و پلانکتومایستس (۶/۱ درصد) در ریزوسفر بیشتر از خاک بکر (غیرریزوسفری) بود، درحالی‌که فراوانی فیرمیکوتس (۹/۸ درصد) و

کلروفلکسی (۶/۹ درصد) در خاک غیرریزوسفری فقیر بالاتر بود. شاخص‌های غنای گونه‌ای در خاک ریزوسفری به‌طور معنی‌داری بیشتر بود و با افزایش عمق خاک کاهش یافت. این تفاوت‌ها اغلب ناشی از حضور ترشحات ریشه‌ای و شرایط میکرواقليمی متفاوت در ناحیه ریزوسفر است که محیطی مناسب برای رشد و فعالیت طیف گسترده‌ای از میکروارگانیسم‌های مفید فراهم می‌آورد.

ب) نقش تاکسون‌های نادر و فراوان در پاسخ به تنش خشکی تحقیقات اخیر نشان داده‌اند، در جوامع میکروبی ریزوسفر گیاهان بیابانی، هر دو گروه تاکسون‌های فراوان و نادر نقش‌های اکولوژیک متمایزی ایفا می‌کنند. در مطالعه Li و همکاران (۲۰۲۵) روی *Artemisia desertorum* به عنوان یک گیاه شاخص تثبیت‌کننده شن در چهار کویر چین مشخص شد، عوامل اقلیمی به‌ویژه خشکی و میانگین بارندگی سالانه، تأثیر معنی‌داری بر ترکیب جامعه باکتریایی و پیچیدگی شبکه میکروبی دارند. تاکسون‌های نادر به عنوان گره‌های مرکزی (*Central Nodes*) در شبکه‌های میکروبی عمل می‌کنند و حذف آن‌ها می‌تواند کل شبکه را بی‌ثبات سازد. از نظر عملکردی، تاکسون‌های فراوان پتانسیل متابولیکی بالاتری از خود نشان می‌دهند، درحالی‌که تاکسون‌های نادر بیشتر در فرایندهایی مانند تحرک سلولی (*Cell Motility*) نقش دارند. این یافته‌ها اهمیت مدیریت میکروبی (*Microbial Management*) را برای سلامت گیاهان بیابانی برجسته می‌سازد.

کاربردهای فناوریانه در بیابان‌زدایی

الف) تلقیح‌های میکروبی و کودهای زیستی در سال‌های اخیر، استفاده از تلقیح‌های میکروبی به عنوان یک راهکار نوظهور در احیای اکولوژیک مناطق شنی مورد توجه قرار گرفته است. در یک مطالعه تجربی گلدانی سه‌ماهه در چین، اثر ۹ سویه میکروبی جدا شده از سه زیستگاه تحت تنش (اراضی شنی، خاک‌های شور-قلیایی ساحلی و مناطق معدنی فلزات سنگین) بر بهبود خاک و رشد گیاه در خاک شنی بررسی شد. نتایج نشان داد، تلقیح جدایه‌های میکروبی موجب افزایش زیست‌توده گیاهی به میزان ۴/۱۵ تا ۲۵/۵۹ درصد شدند. برخی سویه‌ها مانند YJ-15 رشد ریشه را به‌طور چشمگیری افزایش دادند (افزایش طول ریشه ۷۰/۸۳ درصد). تلقیح میکروبی همچنین فرایندهای چرخه عناصر غذایی را با تغییر ساختار جوامع میکروبی خاک تقویت کرد. عملکرد تلقیح‌های میکروبی بیشتر تحت تأثیر کارکردهای اکولوژیک ذاتی آن‌ها قرار دارد تا فقط توسط محیط اصلی آن‌ها تعیین شود. این یافته‌ها مبنای نظری را برای احیای اکولوژیک منطقه‌ای فراهم می‌آورند (Sun et al., 2026).

ب) فناوری پوسته‌های زیستی خاک یکی از نوآورانه‌ترین رویکردهای اخیر در بیابان‌زدایی، استفاده از پوسته‌های زیستی خاک (*Biological Soil Crusts*) است. پوسته‌های زیستی، جوامع میکروبی مترابلی هستند که در سطح خاک تشکیل می‌شوند و با بهبود ساختمان خاک، افزایش نگهداشت رطوبت و تسهیل استقرار (*Promoting Establishment*) پوشش گیاهی، نقش مهمی

در مقابله با بیابان‌زایی ایفا می‌کنند (Lv et al., 2025; Wen et al., 2026). به‌تازگی محققان چینی از توسعه نوعی تلقیح سیانوباکتری با عنوان بذریه خاکی (Soil Seed) خبر داده‌اند که می‌تواند نقش مهمی در احیای اراضی بیابانی ایفا کند و قادر است زمان تثبیت شن‌های روان را از یک قرن به یک دوره سه‌ساله کاهش دهد. این فناوری که توسط ایستگاه تحقیقات و آزمایش شاپوتو (وابسته به آکادمی علوم چین) توسعه یافته است، براساس روش اسپری تحت فشار عمل می‌کند که زمان تشکیل پوسته را از ۱۵ سال در شرایط طبیعی به تنها یک تا دو سال کاهش داده و میزان بقای بیش از ۶۰ درصد را به دست آورده است. بذریه خاکی جامد توسعه یافته که با مخلوط کردن محلول سیانوباکتری با مواد آلی و ذرات ریز در نسبت‌های خاص تهیه می‌شود، ضمن رفع محدودیت‌های روش اسپری، امکان استفاده در مقیاس وسیع را فراهم آورده است. پیش‌بینی می‌شود، در پنج سال آینده، حدود ۵۳۳۳ تا ۶۶۶۶ هکتار از بیابان‌ها با این روش احیا شوند (Zhao et al., 2026). علاوه بر این، استفاده از فناوری MICP (Microbially Induced Carbonate Precipitation) با باکتری *Sporosarcina pasteurii* برای القای پوسته کربنات کلسیم، ظرفیت باربری یا تحمل فشار (Bearing Capacity) $346/67$ کیلو پاسکال در زمین‌های دوزنقه‌ای و $298/67$ کیلو پاسکال در تپه‌های ماسه‌ای ایجاد کرد و فرسایش بادی را ۹۵ درصد (از $100/56$ به کمتر از $5/06$ میلی‌متر) کاهش داد. ضخامت پوسته به $21/02$ میلی‌متر رسید و شبکه‌های متراکم $CaCO_3$ بیش از ۹۰ درصد از منافذ بین ذرات را پر کردند. MICP یک جایگزین مقیاس‌پذیر و سازگار با محیط زیست برای روش‌های سنتی تثبیت شن، با عملکرد مکانیکی برتر و پایداری طولانی‌مدت است (Tao et al., 2026). ج) استانداردسازی و چالش‌های پیاده‌سازی در مقیاس وسیع باوجود پیشرفت‌های چشمگیر، چالش‌هایی نیز در مسیر پیاده‌سازی گسترده فناوری‌های میکروبی در بیابان‌زدایی وجود دارد. این چالش‌ها شامل پایداری پوسته‌ها در شرایط محیطی سخت، سازگاری سویه‌های بیگانه با شرایط محلی، هزینه‌های تولید در مقیاس صنعتی و اطمینان از ایمنی زیست محیطی سویه‌های معرفی شده است. کشور چین به‌عنوان پیشگام در این حوزه، نخستین استاندارد ملی را برای فناوری تثبیت شن توسط جلبک‌های بیابانی منتشر کرده است که راهنمایی کمی برای مراحل حیاتی مانند تلقیح سوسپانسیون جلبکی و مدیریت آبیاری ارائه می‌دهد. این استاندارد بر ایمنی اکولوژیک تأکید داشته و استفاده از سویه‌های بالقوه مهاجم یا تولیدکننده سموم را به شدت ممنوع کرده است (Zhao et al., 2026).

چشم‌اندازها و جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده

با توجه به یافته‌های مرور شده، چندین جهت‌گیری پژوهشی مهم برای آینده قابل‌شناسایی است:

* کشف و شناسایی سویه‌های بومی جدید: باوجود پیشرفت‌های حاصل شده، هنوز تنوع میکروبی ریزوسفر بسیاری از گیاهان بیابانی ناشناخته باقی مانده است. استفاده از رویکردهای متازنومیکس و متاترنسکرپتومیکس، می‌تواند به شناسایی سویه‌های جدید با توانایی‌های منحصربه‌فرد کمک کند.

* توسعه کنسرسیوم‌های سینتتیک (SynComs): به‌جای استفاده از سویه‌های منفرد، توسعه کنسرسیوم‌های سینتتیک متشکل از چندین سویه مکمل با کارکردهای متفاوت می‌تواند کارایی و پایداری تلقیح‌های میکروبی را در شرایط واقعی (field) افزایش دهد.

* پایداری و ماندگاری تلقیح‌ها در شرایط واقعی: یکی از چالش‌های اصلی، ماندگاری سویه‌های معرفی شده در خاک‌های بیابانی پس از تلقیح است. تحقیقات آتی باید بر استراتژی‌های افزایش استقرار و تداوم سویه‌های مفید در محیط بیابانی متمرکز شود.

* مدل‌سازی و پیش‌بینی: توسعه مدل‌های پیش‌بینانه مبتنی بر داده‌های محیطی و میکروبی می‌تواند به بهینه‌سازی زمان و روش تلقیح در مناطق مختلف بیابانی کمک کند.

* ارزیابی اثرهای زیست محیطی بلندمدت: با توجه به ورود موجودات زنده به اکوسیستم‌های حساس بیابانی، ارزیابی جامع و بلندمدت اثرهای احتمالی آن‌ها بر تنوع زیستی بومی و فرایندهای اکوسیستمی ضروری است.

نتیجه‌گیری

باکتری‌های ریزوسفری درختان و بوته‌های بیابانی، از طریق مکانیسم‌های متنوع مستقیم و غیرمستقیم، نقش کلیدی در افزایش تحمل گیاهان به تنش خشکی، بهبود جذب آب و عناصر غذایی و تثبیت فیزیکی ذرات شن و ماسه ایفا می‌کنند. تولید آگزوپلی ساکاریدها و تشکیل خاک‌دانه‌های پایدار، تولید هورمون‌های محرک رشد، انحلال عناصر نامحلول از جمله فسفات‌های نامحلول، تثبیت زیستی نیتروژن و القای مقاومت سیستمیک، از مهم‌ترین مکانیسم‌های این باکتری‌ها هستند.

مطالعات متعدد نشان داده‌اند، ریزوسفر گیاهان تثبیت‌کننده شن، تنوع میکروبی بالاتری نسبت به خاک‌های مجاور دارد و فعالیت این میکروارگانیسم‌ها منجر به بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و افزایش عناصر غذایی می‌شود. همچنین، با گذشت زمان و افزایش سن تثبیت شن، جوامع میکروبی ریزوسفر از نظر ساختار و عملکرد غنی‌تر می‌شوند و نقش برجسته‌تری در چرخه عناصر غذایی و احیای اکوسیستم ایفا می‌کنند.

از منظر کاربردی، فناوری‌های مبتنی بر تلقیح میکروبی و پوسته‌های زیستی خاک، به‌عنوان رویکردهای نوین و سازگار با محیط زیست در برنامه‌های بیابان‌زدایی مطرح شده‌اند. دستاوردهای اخیر در توسعه بذریه‌های خاکی جامد و استانداردسازی فرایندهای تثبیت زیستی شن، گام‌های مهمی در جهت کاربرد عملی این دانش در مقیاس وسیع محسوب می‌شوند. با این حال، چالش‌هایی مانند پایداری تلقیح‌ها در شرایط واقعی و اطمینان از ایمنی زیست محیطی،



منابع

- bolster drought tolerance in plants. *Discover Applied Sciences*, 8, 89.
- Liu, W., Qiu, K., Xie, Y., Wang, R., Li, H., Meng, W., Yang, Y., Huang, Y., Li, Y. and He, Y., 2022. Years of sand fixation with *Caragana korshinskii* drive the enrichment of its rhizosphere functional microbes by accumulating soil N. *Peer J*, 10, e14271.
- Ma, X., Wang, H. and Qu, C., 2026. Isolation, identification, and functional characterization of plant growth-promoting rhizobacteria associated with desert plants. *Acta Microbiologica Sinica*, 66(4): 1802-1818.
- Rehman, V., Kumar, S.M., Srinivas, V., Lukeye, J.N. and Gopalakrishnan, S., 2025. Rhizobacterial plant interactions: Conferring to plant growth under drought and salinity stress. In *Disease suppressive tropical soils* (pp. 119-146). Springer Nature.
- Salman, K., Avinash, P.S., 2025. Direct mechanism of PGPR for promoting plant growth: Current perspective. *Plant Science Today*, 12(3): 1-9.
- Sun, X., Yu, X., Zhang, X., Yang, X., Xue, R., Rong, A., Liu, X., Zhang, X., Li, C. and Zhang, J., 2026. Effects of microbial inoculants from three nutrient-poor environments on soil improvement and plant growth promotion in sandy soil. *Microorganisms*, 14(3), 722.
- Tao, H., Jiang, P., Qu, J. and Huang, Y., 2026. An investigation into enhancing sand stability and minimizing dust emissions through bacterial treatment in arid regions. *Scientific Reports*, 16, Article 3852.
- Vives-Peris, V., Gómez-Cadenas, A. and Pérez-Clemente, R.M., 2020. Plant growth promoting rhizobacteria for drought stress alleviation: A review. *ScienceOpen Research*, 1-26.
- Wen, Z., et al., 2026. Exploring the diversity and potential of host-associated microorganisms in *Hypnum leptothallum* to enhance plant resilience to drought stress for karst desertification restoration. *Environmental Microbiome*, 21, 33.
- Yin, H., Ma, X., Wang, W., Xu, C., Xiang, X., Li, W., Li, J., Li, Y., Tran, L.S.P. and Zhang, B., 2025. Ameliorating drought resistance in *Arabidopsis* and alfalfa under water deficit conditions through inoculation with *Bacillus tequilensis* G128 and *B. velezensis* G138 derived from an arid environment. Elsevier.
- Zhao, Y., et al., 2026. Chinese scientists develop soil "seed" to desertification control. *Chinese Academy of Sciences Press*. https://english.cas.cn/newsroom/cas-in-media/202602/t20260224_1151123.shtml
- Zhu, Y. L., Huang, Y.J., Nuerhamanti, N., Bai, X.Y., Wang, H.N., Zhu, X.Y. and Zhang, W., 2025. The composition and diversity of the rhizosphere bacterial community of *Ammodendron bifolium* growing in the Takeermohuer Desert are different from those in the nonrhizosphere. *Microbial Ecology*, 87(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02320-9>.
- نیازمند پژوهش‌های بیشتر در آینده است.
- درمجموع، بهره‌گیری از پتانسیل باکتری‌های بومی ریزوسفری گیاهان بیابانی، همراه با فناوری‌های نوین میکروبی، می‌تواند نقش مؤثری در احیای اکوسیستم‌های تخریب‌یافته، تثبیت شن‌های روان و مقابله با پدیده بیابان‌زایی ایفا کند و مسیر را برای رویکردهای پایدارتر و سازگارتر با محیط‌زیست در مدیریت مناطق خشک و نیمه‌خشک هموار سازد.
- Albarrán-Cuitiño, C., Palma, D.E., González, H., O'Brien, J. A., González, M. and Gaete, A., 2026. Development of a plant-growth-promoting bacterial EcoBiome derived from desert soil isolates. *Applied and environmental microbiology*, 92(5): e0010326. <https://doi.org/10.1128/aem.00103-26>
- Aulakh, A.M., Qadir, G., Hassan, F.U., Hayat, R., Sultan, T., Billah, M., Hussain, M. and Khan, N., 2026. Desert soil microbes as a mineral nutrient acquisition tool for chickpea (*Cicer arietinum* L.) productivity at different moisture regimes. *MDPI AG*. (Original work published 2024)
- Besharati, H., 2022. Plant growth-promoting bacteria and their application in agriculture. *Journal of Soil Biology*, 10(2):135-162.
- Chen, Z.C. and Li, D.S., 1987. Effect of rhizosphere microorganism of sand-fixing plants on sandy soil development and shifting sand stabilization. *Chinese Journal of Ecology*, 6(2): 6-12.
- El-Keblawy, A., Jarrar, H., Manikandan, S.K., Abideen, Z. and Sheteiwy, M.S., 2025. Rhizosheaths in desert plants: Natural mechanisms and bioinspired technologies for water harvesting and dryland restoration. *The Science of the total environment*, 994, 180064. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180064>
- Hao, X., Wang, X., Wang, X., Wang, C., Li, C., Lu, Y., Cheng, Q., Chen, Z., Zhu, L., Li, C. and Shen, X., 2026. Synthetic community derived from the root core microbes of a desert shrub *Caragana korshinskii* enhances wheat drought tolerance. *Microbiome*, 14, Article 76.
- He, A., Niu, S., Yang, D., Ren, W., Zhao, L., Sun, Y., Meng, L., Zhao, Q., Paré, P. W. and Zhang, J., 2021. Two PGPR strains from the rhizosphere of *Haloxylon ammodendron* promoted growth and enhanced drought tolerance of ryegrass. *Plant Physiology and Biochemistry*, 161: 74-85.
- Khan, N., Bano, A. and Babar, M.A., 2017. The root growth of wheat plants, the water conservation and fertility status of sandy soils influenced by plant growth promoting rhizobacteria. *Symbiosis*, 72: 195-205.
- Li, M.X., Lian, W.H., Lian, Z.H., Luo, X.Q., Yue, L.X., Han, J.R., Hu, C.J., Li, S., Li, W.J. and Dong, L., 2025. Rare and abundant taxa in *Artemisia desertorum* rhizosphere soils demonstrate disparate responses to drought stress. *Advanced Biotechnology*, 3(3).
- Lv, Y., Fan, R. and Qi, Z., 2025. Biological soil crust technology for ecological restoration in karst rocky desertification areas: A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22: 17447-17464.
- Kesavardhini, K., Essa, I.M. and Nayak, A.K., 2026. Harnessing plant growth promoting rhizobacteria to