علوم و تحقیقات بذر ایران
سال دوازدهم/ شماره سوم/ ۱۴۰۴ (۶۴ - ۵۳)
مقاله پژوهشی
DOI: 10.22124/jms.2025.9416

بهره‌برداری از میکروبیوم بذر و خاک: نوآوری‌هایی به منظور افزایش تاب‌آوری و بهره‌وری زراعی

پریسا شریفی[1*]، نیما خالدی[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۳۰

چکیده

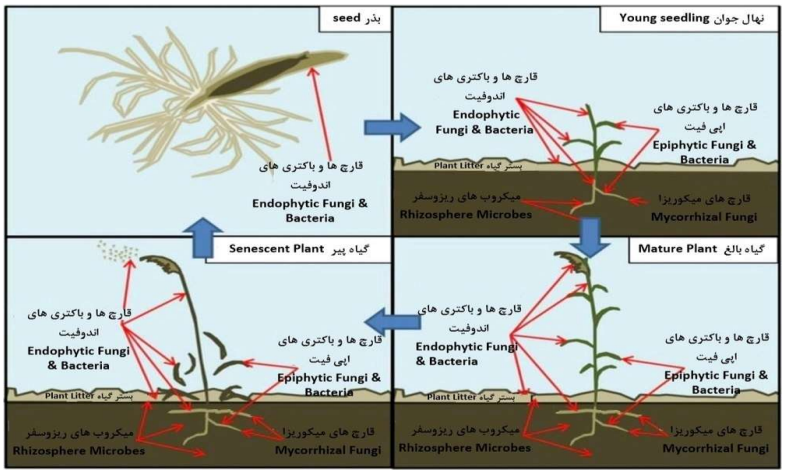
میکروبیوم بذر، مجموعه‌ای متنوع از میکروارگانیسم‌های مفید شامل باکتری‌ها و قارچ‌ها است که در بافت‌های داخلی (اندوفیت‌ها) یا سطح خارجی (اپی‌فیت‌ها) بذر گیاهان حضور دارند. این میکروارگانیسم‌ها نقش کلیدی در جوانه‌زنی بذر، رشد اولیه گیاهچه، جذب مواد مغذی و افزایش مقاومت به تنش‌های زیستی و غیرزیستی ایفا می‌کنند. در سال‌های اخیر، بیوپرایمینگ بذر به‌عنوان یکی از کارآمدترین راهبردهای زیستی برای هدایت و مهندسی هدفمند میکروبیوم بذر مطرح شده است؛ رویکردی که با استقرار زودهنگام میکروارگانیسم‌های سودمند، پایداری میکروبیوم فرایشه و تاب‌آوری گیاه را افزایش می‌دهد. این مقاله مروری جامع بر ترکیب، منشأ و تعاملات پیچیده میکروبیوم بذر با خاک و گیاه میزبان ارائه می‌دهد و پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌هایی مانند بیوپرایمینگ، پوشش‌دهی بذر، رویکردهای چند-امیکس و جوامع میکروبی مصنوعی را بررسی می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که طراحی هدفمند میکروبیوم بذر می‌تواند عملکرد محصولات را ۱۰- ۲۰ درصد افزایش داده و وابستگی به نهاده‌های شیمیایی را کاهش دهد. ادغام مهندسی میکروبیوم بذر با کشاورزی هوشمند اقلیمی و فناوری های ویرایش ژنومی، چشم‌انداز جدیدی برای توسعه بذرهای زیستی مقاوم و تضمین امنیت غذایی در شرایط تغییر اقلیم فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: پایداری کشاورزی، تنش‌ها، جوامع میکروبی مصنوعی، فرایشه، میکروبیوم بذر

۱- استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. p-sharifi@areeo.ac.ir
۲- استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. n_khaledi@areeo.ac.ir
*نویسنده مسئول: p-sharifi@areeo.ac.ir

مقدمه

کیفیت بذر به‌عنوان نقطه آغاز تعامل گیاه با محیط، نقش اساسی در استقرار مزرعه، رشد اولیه و عملکرد نهایی محصول ایفا می‌کند (Truyens *et al*., 2015). در کشاورزی مدرن، استقرار یکنواخت و سریع بذرها پیش‌نیاز دستیابی به عملکرد بالا است (Sun *et al*., 2023). با وجود پیشرفت‌های اصلاح نباتات و مدیریت تغذیه، پتانسیل بذر در ارتقای بهره‌وری کاملاً بهره برداری نشده است (Garrido-Sanz and Keel, 2025). چالش‌های جهانی مانند تغییرات اقلیمی، تخریب خاک و افزایش تقاضای غذایی، نیاز به رویکردهای نوین را برجسته کرده است (Matilla, 2025). میکروبیوم بذر مجموعه‌ای پیچیده از باکتری‌ها و قارچ‌هاست که به‌صورت همزیست در بذر استقرار یافته و به نسل‌های بعدی منتقل می‌شود (Li *et al*., 2025; Yang *et al*., 2025) (شکل ۱). این میکروبیوم‌ها در شکل‌گیری فرایشه اولیه، تنظیم تعاملات گیاه-خاک و افزایش مقاومت به تنش‌ها نقش دارند (Garrido-Sanz and Keel, 2025; Yang *et al*., 2025). مطالعات نشان می‌دهند که میکروبیوم بذر کارایی مصرف عناصر غذایی (نیتروژن و فسفر) را بهبود بخشیده و مقاومت به تنش‌های غیرزیستی و زیستی را افزایش می‌دهد (Fadiji *et al*., 2025; Romão *et al*., 2025). تعاملات سه‌جانبه بذر، خاک و میکروبیوم سلامت خاک را ارتقاء داده و بهره وری را بهبود می‌بخشد (Yang *et al*., 2025; Sun *et al*., 2023). علی‌رغم پیشرفت‌ها، دانش در مورد پایداری میکروبیوم و سازوکار انتقال محدود است (Truyens *et al*., 2015; Liu *et al*., 2025). این مقاله به تحلیل میکروبیوم بذر، تعاملات با خاک و فناوری‌های نوین می پردازد و راهکارهایی برای بهره‌برداری از میکروبیوم با استفاده از سامانه‌های کریسپر-کَس[1] و جوامع میکروبی مصنوعی[2] ارائه می‌دهد. اولویت بر مطالعات ژنوتیپ-میکروبیوم و آزمایش‌های میدانی برای پر کردن شکاف‌های دانشی است (Trivedi *et al*., 2025). این بررسی بر پایه جستجوی سیستماتیک منابع از پایگاه‌های داده مانند PubMed، Scopus و Web of Science استوار است تا اعتبار علمی حداکثری تضمین شود. در این میان، بیوپرایمینگ بذر به‌عنوان پیوندی عملی میان دانش میکروبیوم و کاربردهای مزرعه‌ای، نقش کلیدی در انتقال کنترل‌شده میکروبیوم مفید به نسل بعدی گیاهان ایفا می کند. این رویکرد با تقویت کلونیزاسیون اولیه ریشه و افزایش رقابت‌پذیری میکروب‌های سودمند، امکان مدیریت پایدار میکروبیوم بذر - خاک را فراهم ساخته و به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای مهندسی زیستی در کشاورزی نوین شناخته می‌شود.



شکل ۱- نمودار شماتیک میکروبیوم بذر شامل اندوفیت‌ها و اپی‌فیت‌ها با رنگ‌بندی باکتری‌ها و قارچ‌ها (توزیع در لایه‌های بذر نشان‌دهنده تعاملات اکولوژیکی است)

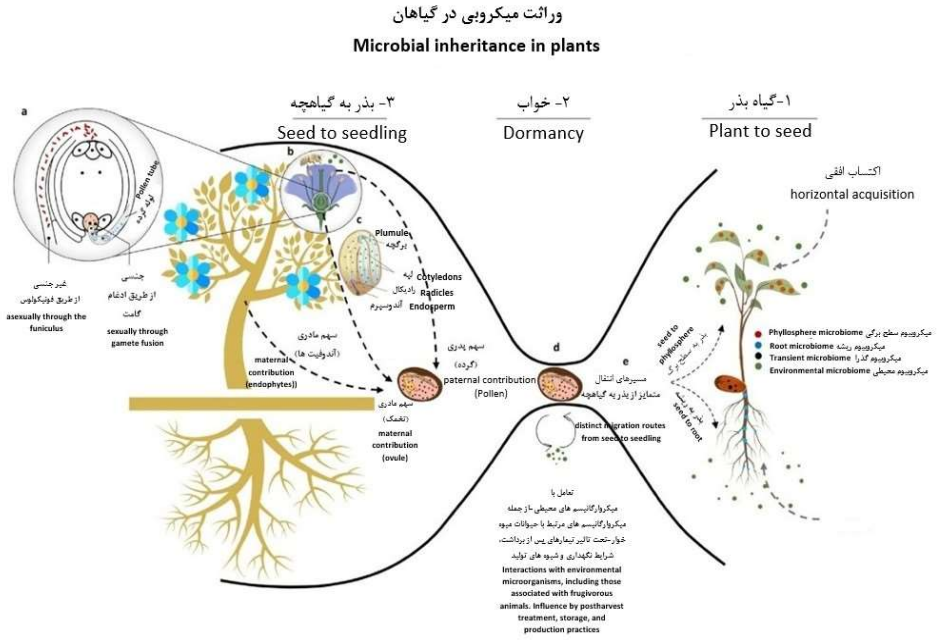
Figure 1. Schematic representation of the seed microbiome comprising endophytic and epiphytic communities, with bacteria and fungi color-coded and their distribution across seed layers illustrating ecological interactions

[1]Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats - associated proteins (CRISPR-Cas)

[2]Synthetic Microbial Communities (SynComs)

ترکیب و منشأ میکروبیوم بذر

میکروبیوم بذر شامل باکتری‌ها (*Proteobacteria*، *Actinobacteria* و *Firmicutes*) و قارچ‌ها (*Ascomycota* و *Basidiomycota*) که به صورت اندوفیت یا اپی‌فیت حضور دارند، می‌باشد (Truyens *et al*., 2015; Li *et al*., 2025). در غلات و حبوبات جنس‌های *Bacillus*، *Pseudomonas* در گندم؛ *Enterobacter* در ذرت؛ *Burkholderia* در برنج؛ و *Bradyrhizobium* در سویا کلیدی هستند. این میکروارگانیسم‌ها رشد گیاه را از طریق تولید هورمون‌ها (مانند ایندول-۳-استیک اسید)، تثبیت نیتروژن و کنترل بیماری‌ها تقویت می‌کنند. برای مثال، *Bacillus* با تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند سوپراکسید دیسموتاز، تحمل به تنش خشکی را تا ۴۵-۳۰ درصد افزایش می‌دهد (Yang *et al*., 2025; Jha *et al*., 2025). منشأ میکروبیوم از گیاه مادری، خاک و هوا است. انتقال عمودی (از مادر) مقاومت به بیماری‌ها را حفظ می‌کند، در حالی که انتقال افقی، افزایش دهنده تنوع خواهد بود (Liu *et al*., 2025; Yang *et al*., 2025)(شکل ۲).



شکل ۲- نقش وراثت میکروبی در تشکیل میکروبیوم گیاهان زراعی (انتقال عمودی و افقی به صورت گرافیکی)

Figure 2. Graphical representation of microbial inheritance in crop plants, depicting how vertical and horizontal transmission pathways shape the assembly of the plant microbiome

عوامل محیطی مانند اسیدیته خاک ترکیب را تعدیل می‌کنند (Garrido-Sanz and Keel, 2025; Yang *et al*., 2025; Sun *et al*., 2023; Berg and Raaijmakers, 2018). خاک‌های غنی تنوع بیشتری پشتیبانی می‌کنند (Fadiji *et al*., 2025). شناخت این ترکیب برای بهبود جوانه‌زنی حیاتی است (Li *et al*., 2025). ترکیب میکروبیوم تحت تأثیر ژنوتیپ گیاه است و نیازمند مطالعات ژنومیک پیشرفته است (Li *et al*., 2025; Trivedi *et al*., 2025). رویکردهای چندامیکس (متاژنومیکس، ترانس کریپتومیکس)، ساختار و عملکرد را تحلیل می‌کنند (Kimotho and Maina, 2024; Kwoji *et al*., 2023) (شکل ۳). سامانه کریسپر-کَس برای اصلاح ژنوم مفید است، مانند ژن *ipdC* در *Bacillus* spp. برای رشد ذرت (Figueredo *et al*., 2023). این فناوری‌ها بذرهای مهندسی‌شده را توسعه می‌دهند (Yang *et al*., 2025; Portal-Gonzalez *et al*., 2025). نتایج تحلیل انتقادی حاکی از آن است که تفاوت‌های جغرافیایی در ترکیب میکروبیوم بذر، ضرورت انجام پژوهش‌های بوم‌محور و تطبیقی را ایجاب می‌کند تا شکاف موجود میان دانش پایه و کاربردهای عملی در شرایط واقعی برطرف شود.

شکل ۳- رویکردهای چند-امیکس در تحقیقات میکروبیوم (شامل متاژنومیکس، ترانسکریپتومیکس و متابولومیکس) برهم‌کنش‌های بذر- میکروبیوم – خاک

Figure 3. Multi-omics approaches in microbiome research, integrating metagenomics, transcriptomics, and metabolomics to elucidate seed–microbiome–soil interactions

الف) انتقال میکروبیوم بذر به خاک و فرایشه

میکروبیوم بذر فرایشه اولیه را شکل می‌دهد. در جوانه‌زنی، میکروارگانیسم‌ها به خاک منتقل شده و جذب مواد مغذی را تقویت می‌کنند (Liu *et al*., 2025; Li *et al*., 2025). انتقال عمودی میکروارگانیسم‌ها، جمعیت میکروبی فرایشه را تشکیل می‌دهد (Zhou *et al*., 2020). ویژگی‌های خاک مانند مقدار مواد آلی، اسیدیته، ساختار خاک و رطوبت، تأثیر قابل توجهی در بقا، فعالیت و ترکیب میکروبیوم بذر دارد (Yang *et al*., 2025; Sun *et al*., 2023). مدیریت زراعی مانند تناوب کشت، ترکیب و عملکرد میکروبیوم را بهبود می‌بخشد (Garrido-Sanz and Keel, 2025). برای مثال، سیل ترکیب فرایشه سویا را کاهش می‌دهد، اما تیمارهای بذری مقاومت را تعدیل می کند (Jha et al., 2025). در شرایط میدانی، رقابت با میکروب‌های خاکی بقا را کاهش می‌دهد و نیاز جوامع میکروبی مصنوعی را ایجاب می‌کند (Yang *et al*., 2025; Garrido-Sanz *et al*., 2025). این تعاملات نشان‌دهنده پویایی اکوسیستمی هستند که در مطالعات آینده باید مدل‌سازی شوند.

ب) نقش‌های عملکردی میکروبیوم بذر در زراعت

میکروبیوم بذر با تولید متابولیت‌های محرک رشد، آنزیم‌ها و مواد ضدپاتوژن، فرایند جوانه‌زنی و رشد ریشه را تسهیل می‌کند و مقاومت به تنش‌ها را از طریق بیان ژن‌های دفاعی افزایش می‌دهد (Li *et al*., 2025; Liu *et al*., 2025; Romão *et al*., 2025). برخی گونه‌ها، تثبیت نیتروژن و حل فسفات را بهبود می‌بخشند و وابستگی به کودها را کاهش می‌دهند (Yang *et al*., 2025). در فیتورمدیاسیون، باکتری‌ها *Enterobacter* spp. فلزات سنگین مانند سرب و آرسنیک را کاهش می‌دهد (Jha *et al*., 2025). این نقش‌ها، با پتانسیل کاهش اثرات زیست محیطی، نیازمند ارزیابی اقتصادی برای کاربرد گسترده هستند.

ج) مهندسی میکروبیوم بذر و راهبردهای مدیریتی

مهندسی میکروبیوم بذر شامل مراحل شناسایی، انتخاب و تقویت میکروارگانیسم‌های مفید تلقیح‌شده با بذر است که به بهبود جوانه‌زنی، رشد گیاهچه، مقاومت به تنش‌ها و افزایش عملکرد گیاه کمک می‌کند (Yang *et al*., 2025). فناوری‌های نوین مانند بیوپرایمینگ و پوشش‌دهی بذر امکان انتقال مؤثر این میکروبیوم‌های هدفمند را به خاک و فرایشه فراهم کرده و استقرار پایدار آنها را تسهیل می‌کند

(Yang *et al*., 2025; Dubey *et al*., 2025). بیوپرایمینگ با خیساندن بذرها در سوسپانسیون میکروارگانیسم‌های مفید، جوانه‌زنی را بهبود می‌بخشد (Yang *et al*., 2025). بیوپرایمینگ، برخلاف تلقیح خاک، با تمرکز بر بذر به‌عنوان نقطه آغاز تشکیل فراریشه، امکان مهندسی دقیق‌تر، پایدارتر و کم‌هزینه‌تر میکروبیوم را فراهم می‌کند و نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت جوامع میکروبی مصنوعی و میکروب‌های ویرایش‌شده ژنتیکی دارد (Khaledi *et al*., 2021). اثرات در گونه‌های خاص:

زیره سبز[3]: بیوپرایمینگ با *Trichoderma harzianum* (جدایه TH_7) جوانه‌زنی را تا ۲۲ درصد افزایش داد و قوه نامیه را ۵۰ درصد بهبود بخشید (Khaledi *et al*., 2021).

گندم[4]: بیو پرایمینگ با *Bacillus subtilis* (استرین‌های ۱۰۴ و 26D) جوانه‌زنی را ۲۰-۱۵ درصد افزایش داد و رشد ریشه را ۸-۵ سانتی‌متر بهبود بخشید (Lastochkina *et al*., 2023).

ذرت[5]: بیوپرایمینگ با *Pseudomonas fluorescens* جوانه‌زنی را ۱۵-۱۰ درصد و رشد ریشه را ۶-۴ سانتی‌متر افزایش داد (Chin *et al*., 2022).

برنج[6]: بیوپرایمینگ با *Trichoderma harzianum* (سویه‌های TH-28 و IRRI-1) جوانه‌زنی را ۲۵-۱۸ درصد افزایش داد و رشد ریشه را ۱۰-۶ سانتی‌متر بهبود بخشید (Swain *et al*., 2021).

سویا[7]: بیوپرایمینگ با *Bradyrhizobium* spp. (سویه‌های Bj11 و E109) جوانه‌زنی را ۱۸-۱۲ درصد بهبود بخشید و رشد ریشه را ۵-۳ سانتی‌متر افزایش داد (Miljaković *et al*., 2022).

در کنار این فناوری‌ها، مدیریت زراعی هوشمند، با رویکردهایی مانند استفاده هدفمند از کودهای آلی و زیستی، تناوب کشت، کاهش شخم عمیق و بهره‌برداری از فناوری‌های دیجیتال، سنسورها و داده‌کاوی کشاورزی می‌تواند تنوع و فعالیت میکروبیوم بذر در خاک را تقویت کرده و تعادل اکوسیستم خاک را حفظ نماید. این اقدامات بهبود کارایی جذب عناصر غذایی، افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی و کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی می‌شود (Sun *et al*., 2023; Truyens *et al*., 2015). با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، مشکلاتی مانند عدم پایداری میکروبیوم در شرایط مزرعه، تغییرات ناگهانی در اقلیم و تعاملات پیچیده بیولوژیک میان میکروارگانیسم‌ها هنوز پابرجاست. لذا استانداردسازی روش‌های مهندسی میکروبیوم، انجام ارزیابی‌های بلندمدت عملکرد، اثرات زیست‌محیطی مربوطه و همچنین استفاده از فناوری‌های پیشرفته چند-امیکس برای درک جامع‌تر ساختار و عملکرد میکروبیوم امری ضروری به نظر می‌رسد (Li *et al*., 2025). همچنین ویرایش ژنتیکی در میکروارگانیسم‌های مرتبط با بذر به عنوان فناوری نوین و پیشرفته، نقش بنیادینی در توسعه کشاورزی زیستی پایدار ایفا می‌کند. سامانه کریسپر-کَس یکی از پیشرفته‌ترین و دقیق‌ترین ابزارهای ویرایش ژنوم است که از سازوکار ایمنی پروکاریوت‌ها اقتباس شده و امکان اصلاح هدفمند توالی‌های DNA را با دقت بالا و هزینه کم فراهم می‌کند. این فناوری، با هدف حذف، اصلاح یا جهش‌دهی انتخابی در ژن‌های کلیدی، قادر است صفات مفید میکروارگانیسم‌های بذر از جمله مقاومت به تنش‌های آب و هوایی مانند خشکی و شوری، بهبود کیفیت رشد گیاه و مقاومت در برابر بیماری‌ها را بهینه‌سازی نماید. برخلاف روش‌های سنتی اصلاح ژنتیکی که غالباً فاقد دقت و پایداری کافی بودند، ویرایش با سامانه کریسپر-کَس تحولی اساسی در مهندسی دقیق و پایدار ژنوم ایجاد کرده است (Wang *et al*., 2025; Yang *et al*., 2025; Kimotho and Maina, 2024).

جوامع میکروبی مصنوعی به عنوان یک فناوری پیشرفته و هدفمند در مهندسی میکروبیوم، به مجموعه‌ای هدفمند از گونه‌های میکروبی گفته می‌شود که با عملکردهای مکمل به طور هماهنگ کنار هم قرار می‌گیرند تا اکوسیستم فراریشه را بهبود بخشیده و تعادل زیستی آن را حفظ کنند. این جوامع، با ایجاد تعاملات هم‌افزا و پیچیده، پتانسیل زیستی و عملکرد متابولیکی اکوسیستم فراریشه را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. هم‌افزایی فیزیولوژیکی در این جوامع، به معنای بهبود فرایندهای متابولیک مشترک می‌باشد، که می‌توان به افزایش تولید آنزیم‌های

[3] *Cuminum cyminum*
[4] *Triticum aestivum*
[5] *Zea mays*
[6] *Oryza sativa*
[7] *Glycine max*

آنتی‌اکسیدانی، بهینه‌سازی چرخه‌های انرژی و تنظیم دقیق متابولیسم هورمون‌های گیاهی مانند اکسین اشاره کرد. این تعاملات نه تنها باعث بهبود جذب و انتقال عناصر غذایی می‌شوند، بلکه توانمندی گیاه در مقابله با تنش‌های زیستی و غیرزیستی به طور قابل توجهی تقویت می‌شود (Zhu *et al*., 2025; Sahoo *et al*., 2025; Wang *et al*., 2025) (جدول ۱). جدیدترین مطالعات در این زمینه نشان داده‌اند که جوامع میکروبی مصنوعی می‌توانند با بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده تعاملی میان میکروارگانیسم‌ها، به طور قابل توجهی تنوع و تراکم گونه‌های بازدارنده پاتوژن را در فرایشه افزایش دهند که این امر منجر به بهبود رشد و افزایش عملکرد گیاه، حتی در شرایط سخت اقلیمی خواهد شد. به این ترتیب، جوامع میکروبی مصنوعی، به عنوان پل

جدول ۱- مقایسه مزایای جوامع میکروبی مصنوعی بر گونه‌های گیاهی بر اساس مطالعات مختلف

Table 1. Comparative summary of the benefits of synthetic microbial communities (SynComs) for different plant species based on various studies

میکروارگانیسم‌ها Microorganisms	نمونه محصول Sample Crop	عملکرد متابولیکی Metabolic Function	مزایای زیستی برای گیاه Biological Benefits for Plant	اثرات کمی (بر اساس مطالعات) Quantitative Effects (Based on Studies)	منبع Reference
Enterobacteriaceae + *Bacillaceae*	ذرت Maize (*Zea mays* L.)	حل مواد مغذی و تولید هورمون Nutrient solubilization and hormone production	بهبود جوانه زنی و تحمل به تنش Enhanced germination and abiotic stress tolerance	افزایش جذب فسفر تا ۵۰-۳۰ درصد، بهبود رشد تا ۱۵-۱۰ درصد، سهم تا ۸۰ درصد در میکروبیوتا 30–50% increase in phosphorus uptake; 10–15% growth improvement; up to 80% contribution to microbiota	Yang *et al*. (2025); Arnault *et al*. (2024); Torres-Cortés *et al*. (2024)
Pseudomonas spp. + *Trichoderma consortia*	گندم Wheat (*Triticum aestivum* L.)	تولید متابولیت های ضد قارچی و کلونیزاسیون ریشه Antifungal metabolite production and root colonization	سرکوب بیمارگرها (کاهش ۷۰ درصد) Pathogen suppression (70% reduction)	کاهش عفونت *Fusarium* تا ۹۱-۷۰ درصد، افزایش زیست‌توده تا ۲۵ درصد، بهبود کلونیزاسیون ریشه تا ۶۰ درصد 70–91% reduction in *Fusarium* infection; 25% biomass increase; 60% root colonization enhancement	Matilla (2025); Ajijah *et al*. (2024); Swain *et al*. (2021)
Azospirillum spp. + *Burkholderia* spp.	برنج Rice (*Oryza sativa* L.)	تثبیت نیتروژن و تشکیل بیوفیلم Nitrogen fixation and biofilm formation	مقاومت به خشکی و افزایش عملکرد ۱۵ درصد Drought resistance and 15% yield enhancement	افزایش عملکرد بذر تا ۲۰-۱۵ درصد، کاهش آسیب خشکی تا ۳۰-۲۰ درصد، تثبیت نیتروژن تا ۵۰ کیلوگرم در هکتار 15–20% seed yield increase; 20–30% drought damage reduction; 50 kg N ha^{-1} fixation	Jha *et al*. (2025); Bao *et al*. (2013); Isawa *et al*. (2010)
Bradyrhizobium spp. + *Streptomyces* spp.	سویا Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.)	نودولاسیون و حل فسفات Nodulation and phosphate solubilization	کارایی مغذی در سیستم‌های کم‌نهاده Nutrient efficiency in low-input systems	افزایش نودولاسیون تا ۴۰ درصد، بهبود جذب نیتروژن تا ۳۰-۲۰ درصد، افزایش زیست‌توده تا ۱۸ درصد 40% nodulation increase; 20–30% nitrogen uptake improvement; 18% biomass increase	Dubey *et al*. (2025); Htwe *et al*. (2019); Miljaković *et al*. (2022)
Trichoderma harzianum	زیره سبز Cumin (*Cuminum cyminum* L.)	تولید متابولیت های ضد قارچی و کلونیزاسیون ریشه Antifungal metabolite production and root colonization	بهبود جوانه زنی کاهش شدت بیماری Improved germination and disease severity reduction	افزایش شاخص جوانه زنی و قوه نامیه 22% germination index increase; 50% vigor improvement	Khaledi *et al*. (2021)

ارتباطی قوی میان زیست‌شناسی سیستم‌ها، میکروب‌شناسی کاربردی و مهندسی زیستی عمل می‌کنند و چشم‌اندازهای نوینی را برای کشاورزی پایدار و کاهش وابستگی به کودها و سموم شیمیایی فراهم می‌آورند (Portal-Gonzalez *et al*., 2025; Garrido-Sanz and Keel, 2025). ترکیب فناوری کریسپر–کَس برای ویرایش دقیق میکروارگانیسم‌ها با توسعه جوامع میکروبی مصنوعی به‌صورت سیستم‌های زیستی هوشمند، افق تازه‌ای برای کشاورزی مقاوم به تغییرات اقلیمی ایجاد می‌کند. این رویکرد با افزایش عملکرد و سلامت گیاه، کاهش مصرف کودها و سموم شیمیایی و تقویت پایداری زیست‌محیطی همراه است. کاربرد عملی این فناوری‌ها در قالب بذرهای پوشش‌داده‌شده با میکروب‌های اصلاح‌شده به‌عنوان بذرهای زیستی نسل جدید، گامی مؤثر در جهت امنیت غذایی جهانی و توسعه کشاورزی هوشمند محسوب می‌شود (Singh *et al*., 2025; Paravar *et al*., 2023; Hanif *et al*., 2024).

فناوری‌های نوین در مهندسی میکروبیوم بذر

فناوری‌های چند-امیکس (مانند متاژنومیکس *16S rRNA* و متابولومیکس) امکان شناسایی مسیرهای متابولیکی کلیدی مانند تولید سیدروفورها (برای جذب آهن) و اکسین‌ها را فراهم می‌کنند (Kimotho and Maina, 2024). جوامع میکروبی مصنوعی، عملکرد را در شرایط تنش افزایش می‌دهند (Arnault *et al*., 2024). برای مثال، جوامع میکروبی مصنوعی در برنج مقاومت به فوزاریوم را تا ۴۰ درصد بهبود بخشیده است (Ajijah *et al*., 2024). سامانه کریسپر-کَس برای ویرایش ژن‌های مقاومت (مانند ژن‌های پپتید سنتتاز برای تولید آنتی‌بیوتیک‌ها) استفاده می‌شود و پایداری را در محیط‌های میدانی افزایش می‌دهد (Figueredo *et al*., 2023). چالش اصلی، ناپایداری جوامع میکروبی مصنوعی در خاک‌های متغیر است که نیازمند پوشش‌دهی با نانوذرات (مانند نانوکیتوزان) برای حفاظت است (Paravar *et al*., 2023). علی‌رغم پتانسیل‌های موجود، چالش‌هایی مانند کاهش تنوع میکروبی در کشاورزی تک‌کشتی (Mäder *et al*., 2002) و تأثیر تغییرات اقلیمی بر تعاملات (Wang *et al*., 2025) وجود دارد (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسه فناوری‌های مهندسی میکروبیوم بذر

Table 2. Comparison of seed microbiome engineering technologies

فناوری Technology	مزایا Advantages	چالش‌ها Challenges	مثال کاربردی Practical Example	منبع Reference
بیوپرایمینگ Biopriming	افزایش جوانه زنی ۲۵-۱۵ درصد Increases germination by 15-25%	ناپایداری در خاک Instability in soil	گندم و برنج Wheat and rice	(Lastochkina *et al*. (2023
جوامع میکروبی مصنوعی SynComs	مقاومت چند جانبه به تنش‌ها Multi-faceted stress resistance	رقابت با میکروب‌های بومی Competition with native microbes	ذرت و سویا Corn and soybean	(Arnault *et al*. (2024
سامانه کریسپر-کَس CRISPR-Cas	ویرایش دقیق ژنتیکی Precise genetic editing	مسائل اخلاقی و مقرراتی Ethical and regulatory issues	*Bacillus* در ذرت *Bacillus* in corn	(Figueredo *et al*. (2023
پوشش دهی نانو Nano-coating	حفاظت طولانی مدت Long-term protection	هزینه بالا High cost	سویا در خاک شور Soybean in saline soil	(Paravar *et al*. (2023

انتقال افقی میکروبیوم ممکن است به ورود پاتوژن‌ها منجر شود (Rochefort *et al*., 2021). ارزیابی‌های بلندمدت میدانی ضروری است تا اثرات بر اکوسیستم خاک بررسی شود (Hanif *et al*., 2024). بحث ادغام میکروبیوم بذر با کشاورزی دقیق می‌تواند بهره‌وری را پایدار کند. مطالعات نشان می‌دهند که جوامع میکروبی مصنوعی در ترکیب با سنسورهای IoT برای نظارت فرایشه، عملکرد را تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهد (Singh *et al*., 2025). با این حال، تفاوت‌های ژنوتیپی (مانند در گندم دوروم و گندم نان) نیاز به رویکردهای سفارشی دارد (Sun *et al*., 2023). فیتورمدیاسیون با میکروبیوم مهندسی‌شده، آلودگی خاک را کاهش می‌دهد (Portal-Gonzalez *et*

al., 2025). آینده بر پایه هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تعاملات متمرکز است (Wang *et al*., 2025).

میکروارگانیسم‌های کلیدی همراه بذر و فراریشه، از طریق مجموعه‌ای از سازوکارهای فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش مقاومت گیاهان زراعی به تنش‌های زیستی و غیرزیستی ایفا می‌کنند. این میکروارگانیسم‌ها با استقرار مؤثر در مراحل اولیه رشد گیاه، ظرفیت تطبیقی گیاه را در برابر تنش‌هایی نظیر خشکی، شوری، کمبود عناصر غذایی و فشار بیمارگرها به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. باکتری *Bacillus subtilis* از طریق تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز، موجب کاهش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش خشکی و شوری می‌شوند و از تخریب غشاهای سلولی جلوگیری می‌کنند. این سازوکارها در نهایت منجر به افزایش پایداری متابولیک و بهبود رشد گیاه تحت شرایط تنش می‌گردد. همچنین، برخی باکتری *Pseudomonas* spp. با تولید سیدروفورها و ترکیبات ضدمیکروبی، دسترسی گیاه به آهن را افزایش داده و از طریق رقابت زیستی، شدت بیماری‌های قارچی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند. قارچ‌های مفیدی مانند *Trichoderma* spp. با توانایی کمپلکس‌سازی فلزات سنگین و فعال‌سازی مسیرهای دفاعی گیاه، نقش مهمی در کاهش سمیت فلزات و افزایش تحمل گیاه در خاک‌های آلوده ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، باکتری‌های همزیست نظیر *Bradyrhizobium* spp. از طریق تثبیت بیولوژیک نیتروژن و بهبود نودولاسیون ریشه، کارایی جذب نیتروژن را در شرایط کم‌نهاده افزایش داده و به‌طور غیرمستقیم مقاومت گیاه را به تنش‌های تغذیه‌ای تقویت می‌کنند. همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، هر یک از این میکروارگانیسم‌ها با سازوکارهای عملکردی متفاوت، موجب افزایش عملکرد گیاه بین ۱۰ تا ۴۵ درصد در شرایط تنش می‌شوند. این تفاوت‌ها بیانگر اهمیت انتخاب هدفمند میکروارگانیسم‌ها متناسب با نوع تنش و گونه گیاهی است. بهره‌برداری از این میکروارگانیسم‌های کلیدی، به‌ویژه در قالب بیوپرایمینگ بذر و جوامع میکروبی مصنوعی، می‌تواند به‌عنوان راهبردی مؤثر برای افزایش تاب‌آوری محصولات زراعی و کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۳- نقش میکروارگانیسم‌های کلیدی در مقاومت به تنش

Table 3. Roles of key microorganisms in enhancing plant stress tolerance

میکروارگانیسم Microorganism	تنش Stress	سازوکار مقاومتی Resistance Mechanism	افزایش عملکرد (درصد) Yield Increase (%)	منبع Referance
Bacillus subtilis	خشکی و شوری Drought and Salinity	تولید آنتی‌اکسیدان‌ها Production of Antioxidants	۳۰-۴۵ 30-45	(Yang *et al*. (2025
Pseudomonas spp.	بیمارگرهای قارچی Fungal Pathogens	تولید سیدروفورها Production of Siderophores	۲۰-۳۰ 20-30	(Ajijah *et al*. (2024
Trichoderma spp.	فلزات سنگین Heavy Metals	کمپلکس‌سازی Complexation	۱۵-۲۵ 15-25	(Jha *et al*. (2025
Bradyrhizobium spp.	کمبود نیتروژن Nitrogen Deficiency	تثبیت نیتروژن Nitrogen Fixation	۱۰-۲۰ 10-20	(Bao *et al*. (2013

نتیجه‌گیری کلی

میکروبیوم بذر، به عنوان یک منبع زیستی حیاتی، جایگاه بنیادین و تأثیرگذاری در بهبود رشد و عملکرد گیاهان زراعی ایفا می‌کند. این اجتماع پیچیده میکروارگانیسم‌ها، با انتقال مؤثر به فراریشه و تعاملات متقابل با خاک، فرایندهای جذب عناصر غذایی، سلامت گیاه و جوانه‌زنی را به طور چشمگیر بهبود بخشیده و مقاومت گیاه را در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی افزایش می‌دهد. پیشرفت‌های اخیر در حوزه مهندسی میکروبیوم بذر و بهره‌برداری هدفمند از میکروارگانیسم‌های سودمند، موجب ارتقای مصرف بهینه عناصر غذایی، افزایش عملکرد محصولات و کاهش وابستگی مضر به نهاده‌های شیمیایی شده است؛ رویکردی که همگام با اهداف کشاورزی پایدار و دوستدار محیط زیست، می‌تواند امنیت غذایی جهانی را تضمین کند. با این حال، چالش‌هایی همچون پایداری محدود میکروبیوم بذر در شرایط مزرعه، تأثیرپذیری از عوامل محیطی، تفاوت‌های ژنوتیپی گیاهان و

پیچیدگی تعاملات میکروبی همچنان موانعی جدی در مسیر کاربرد گسترده این فناوری به شمار می‌روند. رفع این محدودیت‌ها مستلزم تحقیقات گسترده، میان‌رشته‌ای و استانداردسازی روش‌های مهندسی میکروبیوم است. ارزیابی‌های بلندمدت و کاربردی نیز برای تضمین تحقق پتانسیل‌های این فناوری اجتناب‌ناپذیر است. چشم‌انداز آینده این حوزه، بر پایه ادغام فناوری‌های پیشرفته چند-امیکس شامل ژنومیکس، ترانسکریپتومیکس، پروتئومیکس و متابولومیکس با کشاورزی هوشمند اقلیمی و مدیریت داده‌محور استوار است؛ رویکردی که می‌تواند زمینه‌ساز توسعه بذرهای زیستی مقاوم، کارآمد و سازگار با تغییرات اقلیمی شود. این بذرهای مهندسی‌شده، نه تنها ظرفیت ارتقای تاب‌آوری گیاه و بهبود عملکرد را دارند، بلکه رکن اساسی در کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی و تحقق نظام‌های کشاورزی پایدار آینده محسوب می‌شوند. در نهایت، بهره‌برداری علمی، هدفمند و کاربردی از میکروبیوم بذر، باعث ارتقای جایگاه بذر از نهاده‌ای فیزیکی به ابزار زیستی پیشرفته‌ای می‌شود که کلید موفقیت در تولید پایدار، افزایش بهره‌وری کشاورزی و حفظ سلامت محیط زیست به شمار می‌رود. برای دستیابی به این اهداف، همکاری میان‌رشته‌ای پژوهشگران، توسعه فناوری‌های نوین و توجه ویژه به شرایط محیطی و ژنتیکی ضروری است. در این چارچوب، بیوپرایمینگ بذر نه‌تنها یک فناوری مکمل، بلکه به‌عنوان ستون فقرات راهبردهای آینده مهندسی میکروبیوم بذر مطرح است که می‌تواند بذر را از یک نهاده فیزیکی به یک سامانه زیستی هوشمند ارتقا دهد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان مراتب قدردانی خود را از مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال اعلام می‌نمایند.

منابع

Ajijah, N., Fiodor, A., Kazimierczuk, K., Urbaniak, M., Enow, E., Stasiuk, R., Stepien, L., Dziewit, L. and Pranaw, K. 2024. *Pseudomonas protegens* ML15 and *Trichoderma koningiopsis* Tr21 co-culture: A potent strategy for suppressing *Fusarium cerealis* infections in wheat through augmented antifungal metabolite production. Biological Control, 198: 105621. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105621 **(Journal)**

Arnault, G., Marais, C., Préveaux, A., Briand, M., Poisson, A.S., Sarniguet, A., Barret, M. and Simonin, M. 2024. Seedling microbiota engineering using bacterial synthetic community inoculation on seeds. FEMS Microbiology Ecology, 100(4): fiae027. https://doi.org/10.1093/femsec/fiae027 **(Journal)**

Bao, Z., Sasaki, K., Okubo, T., Ikeda, S., Anda, M., Hanzawa, E., Kakizaki, K., Sato, T., Mitsui, H. and Minamisawa, K. 2013. Impact of *Azospirillum* sp. B510 inoculation on rice-associated bacterial communities in a paddy field. Microbes and Environments, 28(4): 487-90. https://doi.org/10.1264/jsme2.me13049 **(Journal)**

Berendsen, R.L., Pieterse, C.M.J., and Bakker, P.A.H.M. 2012. The rhizosphere microbiome and plant health. Trends in Plant Science, 17(8): 478-486. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001 **(Journal)**

Berg, G., and Raaijmakers, J.M. 2018. Saving seed microbiomes. International Society for Microbial Ecology, 12: 1167-1170. https://doi.org/10.1038/s41396-017-0028-2 **(Journal)**

Chin, J.M., Lim, Y.Y. and Ting, A.S.Y. 2022. Biopriming *Pseudomonas fluorescens* to vegetable seeds with biopolymers to promote coating efficacy, seed germination and disease suppression. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 21(8): 493-505. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.02.002 **(Journal)**

Dubey, A., Malla, M.A., Vimal, S.R., Kumar, A., Prasad, S.M. and Khan, M.L. 2005. Plant-microbiome engineering: synergistic microbial partners for crop health and sustainability. Plant Growth Regulation, 105: 1825-1839. https://doi.org/10.1007/s10725-025-01385-5 **(Journal)**

Fadiji, A.E., Lanrewaju, A.A., Omomowo, I.O., Parra-Cota, F.I. and de los Santos-Villalobos, S. 2025. Harnessing seed endophytic microbiomes: A hidden treasure for enhancing sustainable agriculture. Plants, 14(15): 2421. https://doi.org/10.3390/plants14152421 **(Journal)**

Figueredo, E.F., Batista, B.D., de Oliveira, M.E., Andrade, J.S., Ferrari, A.S., Schwan, R.F., da Silva, C.C. and Quecine, M.C. 2023. The key role of indole-3-acetic acid biosynthesis by *Bacillus*

thuringiensis RZ2MS9 in promoting maize growth revealed by the ipdC gene knockout mediated by the CRISPR-Cas9 system. Microbiological Research, 266: 127218. https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127218 **(Journal)**

Garrido-Sanz, D. and Keel, C. 2025. Seed-borne bacteria drive wheat rhizosphere microbiome assembly via niche partitioning and facilitation. Nature Microbiology, 10(5): 1130-1144. https://doi.org/10.1038/s41564-025-01973-1 **(Journal)**

Hanif, M.S., Tayyab, M., Baillo, E.H., Islam, M.M., Islam, W. and Li, X. 2024. Plant microbiome technology for sustainable agriculture. Frontiers in Microbiology, 15: 1500260. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1500260 **(Journal)**

Htwe, A. Z., Moh, S. M., Soe, K. M., Moe, K. and Yamakawa, T. 2019. Effects of biofertilizer produced from *Bradyrhizobium* and *Streptomyces griseoflavus* on plant growth, nodulation, nitrogen fixation, nutrient uptake, and seed yield of mung bean, cowpea, and soybean. Agronomy, 9(2): 77. https://doi.org/10.3390/agronomy9020077 **(Journal)**

Jha, R., Manonmani, V., Sundaralingam, K., Vanitha, S., Gnanachitra, M., Kalaiselvi, T. and Ali, A.S. 2025. The seed microbiome: microbial hashes for plant wellbeing. Journal of Environmental Biology, 10(1): 007-022. https://doi.org/10.17352/ojeb.000046 **(Journal)**

Khaledi, N., Dehshiri, A. and Hassani, F. 2021. Effects of seed biopriming with fungus *Trichoderma harzianum* on secondary metabolites production in cumin (*Cuminum cyminum* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 37(3): 513-529. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.352573.2897 (In Persian)**(Journal)**

Kimotho, R.N. and Maina, S. 2024. Unraveling plant-microbe interactions: can integrated omics approaches offer concrete answers? Journal of Experimental Botany, 75(5): 1289-1313. https://doi.org/10.1093/jxb/erad448 **(Journal)**

Kwoji, I.D., Aiyegoro, O.A., Okpeku, M. and Adeleke, M.A. 2023. 'Multi-omics' data integration: applications in probiotics studies. NPJ Science Food 7, 25. https://doi.org/10.1038/s41538-023-00199-x **(Journal)**

Lastochkina, O., Yakupova, A., Avtushenko, I., Lastochkin, A. and Yuldashev R. 2023. Effect of seed priming with endophytic *Bacillus subtilis* on some physio-biochemical parameters of two wheat varieties exposed to drought after selective herbicide application. Plants (Basel), 12(8): 1724. https://doi.org/10.3390/plants12081724 **(Journal)**

Li, D., Chen, W., Luo, W., Zhang, H., Liu, Y., Shu, D. and Wei, G. 2025. Seed microbiomes promote Astragalus mongholicus seed germination through pathogen suppression and cellulose degradation. Microbiome, 13: 23. https://doi.org/10.1186/s40168-024-02014-5 **(Journal)**

Liu, S., Wu, J., Cheng, Z., Wang, H., Jin, Z., Zhang, X., Zhang, D. and Xie, J. 2025. Microbe-mediated stress resistance in plants: The roles played by core and stress-specific microbiota. Microbiome, 13(1): 111. https://doi.org/10.1186/s40168-025-02103-z **(Journal)**

Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P. and Niggli, U. 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. Science, 296(5573): 1694-1697. https://doi.org/10.1126/science.1071148 **(Journal)**

Matilla, A.J. 2025. Exploring the bacterial microbiota of seeds. Microbial Biotechnology, 18(9): e70230. https://doi.org/10.1111/1751-7915.70230 **(Journal)**

Miljaković, D., Marinković, J., Tamindžić, G., Đorđević, V., Tintor, B., Milošević, D., Ignjatov, M. and Nikolić, Z. 2022. Bio-priming of soybean with *Bradyrhizobium japonicum* and *Bacillus megaterium*: strategy to improve seed germination and the initial seedling growth. Plants, 11(15): 1927. https://doi.org/10.3390/plants11151927 **(Journal)**

Paravar, A., Piri, R., Balouchi, H. and Ma, Y. 2023. Microbial seed coating: An attractive tool for sustainable agriculture. Biotechnology Reports, 37: e00781. https://doi.org/10.1016/j.btre.2023.e00781 **(Journal)**

Portal-Gonzalez, N., Wang, W., He, W. and Santos-Bermudez, R. 2025. Engineering plant holobionts for climate-resilient agriculture. International Society for Microbial Ecology, 19(1): 158. https://doi.org/10.1093/ismejo/wraf158 **(Journal)**

Rochefort, A., Simonin, M., Marais, C., Guillerm-Erckelboudt, A.-Y., Barret, M. and Sarniguet, A. 2021. Transmission of seed and soil microbiota to seedlings. mSystems, 2021 6(3):e0044621. https://doi.org/10.1128/mSystems.00446-21 **(Journal)**

Romão, I.R., do Carmo Gomes, J., Silva, D. and Vilchez, J.I. 2025. The seed microbiota from an application perspective: an underexplored frontier in plant–microbe interactions. Crop Health, 3: 12. https://doi.org/10.1007/s44297-025-00051-6 **(Journal)**

Sahoo, A., Yadav, G., Mehta, T., Meena M. and Swapnil, P. 2025. Omics-driven insights into plant growth-promoting microorganisms for sustainable agriculture. Discover Sustainability, 6: 659. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01582-2 **(Journal)**

Singh, T., Garg, D., Kaur, K., Singh, R., Singh, S., Prasad, N. and Tripathi, M. 2025. Seed microbiomes: Guardians of plant growth and development. Journal of Pure and Applied Microbiology, 19(3): 1599-1613. https://doi.org/10.22207/JPAM.19.3.07 **(Journal)**

Sun, Z., Adeleke, B.S., Shi, Y. and Li, C. 2023. The seed microbiomes of staple food crops. Microbial Biotechnology, 16(12): 2236-2249. https://doi.org/10.1111/1751-7915.14352 **(Journal)**

Swain, H., Adak, T., Mukherjee, A.K., Sarangi, S., Samal, P., Khandual, A., Jena, R., Bhattacharyya, P., Naik, S.K., Mehetre, S.T., Baite, M.S., Kumar, M.S. and Zaidi, N.W. 2021. Seed biopriming with trichoderma strains isolated from tree bark improves plant growth, antioxidative defense system in rice and enhance straw degradation capacity. Frontiers in Microbiology, 12: 633881. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.633881 **(Journal)**

Trivedi, P., Mattupalli, C., Eversole, K. and Leach, J.E. 2021. Enabling sustainable agriculture through understanding and enhancement of microbiomes. New Phytologist, 230(6): 2129-2147. https://doi.org/10.1111/nph.17319 **(Journal)**

Truyens, S., Weyens, N., Cuypers, A. and Vangronsveld, J. 2015. Bacterial seed endophytes: Genera, vertical transmission and interaction with plants. Environmental Microbiology Reports, 7(1): 40-50. https://doi.org/10.1111/1758-2229.12181 **(Journal)**

Wang, G., van der Putten, W.H., Klironomos, J., Zhang, F. and Zhang, J. 2025. Steering plant-soil feedback for sustainable agriculture. Science, 389: 6758. https://doi.org/10.1126/science.ads2506 **(Journal)**

Yang, P., Lu, L., Condrich, A., Muni, G. A., Scranton, S., Xu, S., Xia, Y. and Huang, S. 2025. Innovative approaches for engineering the seed microbiome to enhance crop performance. Seeds, 4(2): 24. https://doi.org/10.3390/seeds4020024 **(Journal)**

Zhou, X., Wang, J.T., Zhang, Z.F., Li, W., Chen, W. and Cai, L. 2020. Microbiota in the rhizosphere and seed of rice from northeast and central-south China. Frontiers in Microbiology, 11: 995. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00995 **(Journal)**

Exploiting seed and soil microbiomes: Innovations for enhancing crop resilience and productivity

Parisa Sharifi[1*], Nima Khaledi[2]

Received: October 21, 2025 Accepted: December 21, 2025

Abstract

The seed microbiome comprises a diverse assemblage of beneficial microorganisms, including bacteria and fungi, which inhabit either the internal tissues (endophytes) or the external surfaces (epiphytes) of plant seeds. These microorganisms play pivotal roles in seed germination, early seedling development, nutrient acquisition, and the enhancement of plant resistance to both biotic and abiotic stresses. In recent years, seed biopriming has emerged as one of the most efficient biological strategies for the targeted modulation and engineering of the seed microbiome. By promoting the early establishment of beneficial microorganisms, this approach enhances rhizosphere microbiome stability and improves plant resilience. This review provides a comprehensive overview of the composition, origin, and complex interactions of the seed microbiome with soil and the host plant, and critically examines recent advances in technologies such as seed biopriming, seed coating, multi-omics approaches, and synthetic microbial communities. Evidence from recent studies indicates that the rational design of the seed microbiome can increase crop productivity by 10–20% while reducing dependence on chemical inputs. The integration of seed microbiome engineering with climate-smart agriculture and genome-editing technologies offers a promising framework for the development of resilient bio-based seeds and for ensuring food security under changing climatic conditions.

Keywords: Agricultural sustainability, Rhizosphere, Seed microbiome, Stresses, Synthetic microbial communities

How to cite this article

Sharifi, P. and Khaledi, N. 2025. Exploiting Seed and Soil Microbiomes: Innovations for Enhancing Crop Resilience and Productivity. Iranian Journal of Seed Science and Research, 12(3): 53-64. (In Persian)(Journal)

DOI: 10.22124/jms.2025.9416

COPYRIGHTS

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to the Iranian Journal of Seed Science and Research

The content of this article is distributed under Iranian Journal of Seed Science and Research open access policy and the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY4.0) License. For more information, please visit http://jms.guilan.ac.ir/

1. Research Assistant Professor, Seed and Plant Certification and Registration Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. p-sharifi@areeo.ac.ir

2. Research Assistant Professor, Seed and Plant Certification and Registration Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. n_khaledi@areeo.ac.ir

*Corresponding author: p-sharifi@areeo.ac.ir