

سازوکارهای مؤثر بر کارایی کودهای زیستی در حبوبات دیم مناطق خشک و نیمه خشک: تحلیل شکاف آزمایشگاه تا مزرعه

یاسر عظیم زاده^{*۱}

۱- موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران.

چکیده مبسوط

مقدمه: کودهای زیستی به عنوان یکی از ارکان کشاورزی پایدار، با هدف کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی و افزایش بهره‌وری اکوسیستم‌های زراعی مورد توجه می‌باشند. با این حال، یکی از چالش‌های مهم کاربرد این کودها، عملکرد ضعیف یا ناموفق آن‌ها در شرایط واقعی مزرعه در مقایسه با محیط‌های کنترل شده آزمایشگاهی است. این ناهماهنگی که در ادبیات علمی با عنوان شکاف آزمایشگاه تا مزرعه شناخته می‌شود، با پیچیدگی‌های ذاتی نظام‌های کشاورزی مرتبط است؛ به گونه‌ای که با انتقال میکروب‌های مفید از شرایط ایزوله و بهینه به درون سامانه پویای خاک-گیاه-اقلیم-مدیریت، کارایی آن‌ها کاهش می‌یابد. این مسئله در مناطق خشک و نیمه خشک که حبوبات دیم نقش کلیدی در امنیت غذایی و معیشت کشاورزان دارند، به دلیل وقوع تنش‌های همزمان محیطی، از حساسیت بیشتری برخوردار است. بنابراین، شناخت عمیق عوامل ایجادکننده این شکاف و ارائه چارچوبی تحلیلی برای شناسایی نقاط بحرانی، گامی اساسی در جهت افزایش قابلیت پیش‌بینی‌پذیری و موفقیت کودهای زیستی در چنین بوم‌نظام‌های شکننده است.

روش‌شناسی پژوهش: این مقاله با رویکرد مروری تحلیلی-تشخیصی و با بهره‌گیری از روش فراتحلیل کیفی مطالعات پیشین انجام شده است. بدین منظور، ابتدا کلیه مقالات نمایه شده در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ در پایگاه‌های معتبر علمی نظیر SID، Web of Science، Scopus و ScienceDirect با کلیدواژه‌های مرتبط با عملکرد کودهای زیستی در حبوبات دیم و تنش‌های زیستی و غیرزیستی استخراج گردید. سپس با اعمال معیارهای ورود و خروج، ۹۶ مطالعه انتخاب و از نظر سه مؤلفه اصلی ویژگی‌های سویه‌های میکروبی، شرایط محیطی و مدیریتی مزرعه و روش‌های فرمولاسیون و کاربرد مورد کاوش قرار گرفتند. در گام بعد، تمامی متغیرهای مؤثر در کاهش کارایی کود زیستی، در قالب سه دسته فیلتر محیطی، زیستی و فنی-مدیریتی دسته‌بندی شدند. برای هر یک از این فیلترها، بر اساس مرور نظام‌مند شواهد تجربی، مکانیسم‌های شکست شناسایی و اولویت‌بندی گردید. نهایتاً، الگوی تحلیلی-تشخیصی پیشنهادی (فیلترهای شکست) با هدف ارائه یک نقشه راه عملیاتی برای طراحی هدفمند سویه‌ها، فرمولاسیون‌ها و راهکارهای مدیریتی، تدوین و ساختاردهی گردید.

یافته‌های پژوهش: سازوکارهای سودمند کودهای زیستی (مانند تثبیت زیستی نیتروژن، حلالیت عناصر غذایی، تنظیم هورمونی و القای مقاومت سیستمیک) برای اثرگذاری در مزرعه باید به ترتیب از سه فیلتر



* نگارنده مسئول: y.azimzadeh@areeo.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۶

محیطی (تنش‌های خشکی، دما و شیمی خاک)، زیستی (رقابت با میکروبیوم بومی و شکارگری) و فنی-مدیریتی (مشکلات فرمولاسیون، روش کاربرد و ناسازگاری با نهاده‌ها) عبور کنند که به‌صورت هم‌افزا کارایی را کاهش می‌دهند. مهم‌ترین راهکار مستخرج از این تحلیل، گذار از رویکرد سویه‌محور آزمایشگاهی به طراحی سامانه‌محور مزرعه‌ای است؛ به‌این معنا که انتخاب سویه، فرمولاسیون و روش کاربرد نباید به‌صورت مجزا، بلکه هم‌زمان و بر اساس ویژگی‌های خاص هر مزرعه (خاک، اقلیم و مدیریت زراعی) صورت پذیرد. در این چارچوب، اولویت نخست، غربالگری سویه‌ها نه صرفاً بر اساس توانایی عملکردی در آزمایشگاه، بلکه بر اساس بقاپذیری و رقابت‌پذیری در شرایط واقعی مزرعه است. در گام بعد، فرمولاسیون‌های پیشرفته و راهکارهای مدیریت زراعی باید برای حفاظت از میکروب‌ها در برابر فیلترهای شناسایی‌شده، به‌طور هدفمند طراحی شوند. در نهایت، نقشه راه تحقیقاتی شامل به‌کارگیری فناوری‌های اومیکس برای شناسایی هوشمندانه سویه‌های مقاوم، توسعه ارزیابی‌های چندمرحله‌ای مزرعه‌ای و استفاده از کشاورزی دیجیتال برای کاربرد دقیق‌تر کود زیستی ترسیم می‌شود.

کلمات کلیدی: بقاپذیری میکروبی، تنش‌های محیطی، فیلترهای شکست، فرمولاسیون میکروبی، کشاورزی دقیق

مقدمه

راستا، به‌کارگیری روش‌های نوین کشاورزی برای افزایش بهره‌وری ضروری به نظر می‌رسد. تلقیح بذر با کودهای زیستی، به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای مقابله با این محدودیت‌های خاکی مطرح شده است (Nabati et al., 2025). این روش با بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌هایی که به‌طور مستقیم فعالیت زیستی خاک و روابط هم‌زیستی را تقویت می‌کنند، راهبردی چندوجهی ارائه می‌دهد. کودهای زیستی از طریق سازوکارهای متعددی ازجمله تثبیت زیستی نیتروژن، حل کردن ترکیبات کم‌محلول عناصر غذایی، تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه و افزایش تحمل به تنش‌ها، موجب تقویت رشد گیاه شده و هم‌زمان، کمبودهای غذایی و تنش خشکی را در شرایط پرتنش دیم تعدیل می‌کنند (Nabati et al., 2025; Zhao et al., 2024).

با اتکا بر این سازوکارها، مطالعات متعددی آثار مثبت انواع مختلف کودهای زیستی را در بهبود عملکرد نخود و عدس دیم در محیط‌های کنترل‌شده تا مزرعه گزارش کرده‌اند (Hynes et

نخود (*Cicer arietinum* L.) و عدس (*Lens culinaris* Medik.) با دارا بودن جایگاه ویژه در سبذ غذایی، نقش مؤثری در تحقق امنیت غذایی و کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارند. این گیاهان از طریق برقراری رابطه هم‌زیستی با ریزوبیوم‌ها، نیتروژن اتمسفری را تثبیت کرده و با بهبود حاصلخیزی خاک، نیاز به کودهای شیمیایی را کاهش می‌دهند. علاوه بر آن، قرارگیری این گیاهان در تناوب با غلات، چرخه زندگی آفات و علف‌های هرز را مختل کرده و مصرف سموم شیمیایی را کاهش می‌دهد. با این حال، کشت این گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک ازجمله در بسیاری از دیم‌زارهای ایران، به دلیل شرایط نامساعد محیطی با محدودیت‌های جدی مواجه است. ویژگی‌هایی همچون pH قلیایی، کربنات کلسیم زیاد و کمبود ماده آلی و رطوبت، سبب تضعیف فعالیت‌های زیستی و کاهش فراهمی عناصر غذایی در خاک‌های این مناطق می‌شود (Rahimi-Moghaddam et al., 2023). در این

پیچیده و متغیر مزارع دیم، با چالش‌هایی همراه است که کارایی این عوامل را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Naveed et al., 2015; Fadiji et al., 2024). تداوم این شکاف نه‌تنها باعث اتلاف منابع تحقیقاتی می‌شود، بلکه با کاهش اعتماد کشاورزان به فناوری‌های نوین زیستی، مانعی اساسی در مسیر گسترش کشاورزی پایدار و کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی در این مناطق حساس ایجاد می‌کند.

تحقیقات آزمایشگاهی در محیط‌های کنترل‌شده، اغلب پیچیدگی ذاتی نظام «خاک-گیاه-اقلیم-مدیریت» را نادیده می‌گیرند. در حالی که درک این شکاف مستلزم پذیرش این اصل است که کارایی کود زیستی در مزرعه، حاصل برهم‌کنش پیچیده سازوکارهای میکروبی با مجموعه پویایی از محدودیت‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در شرایط پرتنش محیطی است. این مسئله در خاک‌های آهکی مناطق دیم با تغییرپذیری زیاد عوامل محیطی و تعاملات زیستی پیچیده خاک، جدی‌تر است. اگرچه وجود این شکاف به طور گسترده در منابع مختلف نظیر (Nabati et al., 2025; Adeniji et al., 2024; Fadiji et al., 2024; Thakur et al., 2024; Kaur et al., 2023; Naveed et al., 2015) گزارش شده، اما تحلیل‌های نظام‌مند و جامع درباره آن اندک است. مرورهای پیشین عمدتاً به توصیف کلی محدودیت‌ها (Fadiji et al., 2024; Naveed et al., 2015) یا ثبت موارد شکست (Nabati et al., 2025; Thakur et al., 2024) پرداخته‌اند، بدون آنکه تحلیلی دقیق از سازوکارهای فعالیت میکروبی و ارتباط آن با محدودیت‌های مشخص در نظام پیچیده «خاک-گیاه-اقلیم-مدیریت» مناطق خشک آهکی ارائه دهند.

بنابراین، این مقاله مروری به جای ارائه روایت‌های صرفاً توصیفی، با تمرکز ویژه بر حبوبات دیم، تحلیلی ساختاریافته از علل این شکاف ارائه

Seyed Sharifi and Seyed Sharifi, al., 1995 Shirui et al., Taheri et al., 2022)؛ (2020) Debnath Omid Gargari et al., 2025؛ 2023 et al., 2025). به‌عنوان نمونه، نتایج یک فراتحلیل بر روی ۹۷ مقاله منتشرشده در فاصله سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، نشان داد که مهم‌ترین نقش کودهای زیستی در افزایش عملکرد گیاهان، تعدیل تنش‌های زیستی و غیرزیستی است، در حالی که بهبود فراهمی عناصر غذایی گیاه نیز نقش قابل‌توجه، اما ثانویه در افزایش عملکرد ایفا می‌کند. در این میان، جنس سودوموناس^۱ به‌عنوان مؤثرترین تلقیح‌کننده میکروبی مرتبط با کاهش تنش‌ها و افزایش عملکرد محصول گزارش شد، در حالی که جنس انتروباکتر^۲ بیشترین ارتباط را با بهبود دسترسی گیاه به عناصر غذایی نشان داد. با در نظر گرفتن هم‌زمان هر دو سازوکار، جنس‌های سودوموناس، انتروباکتر و باسیلوس^۳ به‌عنوان مهم‌ترین گروه‌های میکروبی مؤثر در افزایش عملکرد محصولات شناسایی شدند (Li et al., 2022). با این حال، کاربرد عملی این دستاوردهای پژوهشی در شرایط واقعی مزرعه با چالش‌های جدی مواجه بوده و معمولاً انتقال کامل و مستقیم موفقیت‌های آزمایشگاهی به عرصه‌های زراعی به طور کامل محقق نمی‌شود. از این رو، یک شکاف قابل‌توجه بین نتایج پایدار و تکرارپذیر محیط‌های کنترل‌شده و عملکرد غیرقابل پیش‌بینی و غالباً پایین این کودها در شرایط واقعی مزرعه وجود دارد که به «شکاف آزمایشگاه تا مزرعه» معروف است (Adeniji et al., 2024; Fadiji et al., 2024; Thakur et al., 2024; Kaur et al., 2023). این ناهم‌انگهی حاکی از آن است که انتقال از محیط‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی به محیط‌های

¹ *Pseudomonas*

² *Enterobacter*

³ *Bacillus*

⁴ Lab to land gap

دفاعی (القای مقاومت سیستمیک) را پوشش می‌دهند. این جامعیت، امکان تحلیل نظام‌مند شکاف عملکرد را در تمامی سطوح تعامل میکروب-گیاه فراهم می‌آورد. با این حال، خلأ اساسی که مقاله در صدد پر کردن آن است، نبود چارچوبی یکپارچه برای تبیین برهم‌کنش هم‌افزای این فیلترهاست؛ از این رو، پرسش اصلی این است که این عوامل چگونه و با چه اولویت‌هایی کارایی کودهای زیستی را کاهش می‌دهند و گذار به طراحی سامانه‌محور چه راهکارهایی برای غلبه بر آن‌ها ارائه می‌دهد؟ پاسخ به این پرسش، نقشه‌راهی عملیاتی برای طراحی هدفمند سویه‌ها، فرمولاسیون‌ها و راهکارهای مدیریتی متناسب با مزارع دیم را فراهم می‌آورد.

می‌دهد. برای دستیابی به این هدف، ابتدا سازوکارهای شناخته‌شده اصلی میکروارگانیسم‌های موجود در کودهای زیستی بررسی شده و سپس عوامل متنوع محیطی، زیستی و زراعی محدودکننده این سازوکارها (فیلترهای شکست) در شرایط خاص دیم تشریح می‌شوند (شکل ۱). انتخاب چهار سازوکار تثبیت نیتروژن، حل‌کنندگی عناصر، تنظیم هورمونی/کاهش تنش و القای مقاومت سیستمیک به‌عنوان محورهای اصلی تحلیل، مبتنی بر دو دلیل است: ۱- پرتکرارترین مکانیسم‌های گزارش‌شده در منابع علمی کودهای زیستی هستند؛ ۲- به‌طور هم‌زمان هر سه مسیر اصلی تأثیر میکروبی بر گیاه یعنی مسیر تغذیه‌ای (تثبیت نیتروژن و حل‌کنندگی عناصر)، فیزیولوژیکی (تنظیم هورمونی و کاهش تنش) و



شکل ۱- چارچوب مفهومی تحلیل شکاف آزمایشگاه تا مزرعه برای کودهای زیستی در حبوبات دیم مناطق خشک.

Figure 1. Conceptual framework for lab-to-farm gap analysis of biofertilizers in dryland legume crops in arid regions.

مقالات نمایه‌شده در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ در پایگاه‌های معتبر علمی نظیر^۱ SID، Web of Science، Scopus و ScienceDirect با کلیدواژه‌های مرتبط با عملکرد کودهای زیستی در حبوبات دیم و تنش‌های زیستی و غیرزیستی

روش تحقیق

این مقاله با رویکرد مروری تحلیلی-تشخیصی و با بهره‌گیری از روش فراتحلیل کیفی مطالعات پیشین انجام شده است. بدین منظور، ابتدا کلیه

^۱ Scientific Information Database

2025) و «تحلیل شکست» در مهندسی سیستم‌ها (Sharma and Srivastava 2018) اقتباس شده است. فیلتر در اینجا به عوامل محدودکننده پویا اطلاق می‌شود که به صورت متوالی کارکرد عامل زیستی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عدم عبور موفق عامل زیستی از این فیلترها منجر به شکست در تحقق پتانسیل آزمایشگاهی آن در مزرعه می‌شود. بنابراین، «فیلترهای شکست» در این پژوهش، عواملی هستند که در هر یک از مراحل تولید، فرمولاسیون، کاربرد، استقرار و کارایی کودهای زیستی، عملکرد نهایی میکروب را محدود می‌سازند.

سازوکارها و آسیب‌پذیری‌های ذاتی

در کودهای زیستی مورد استفاده در حبوبات دیم، سازوکارهای زیستی متعددی برای بهبود رشد و تغذیه گیاه گزارش شده است؛ با این حال، شواهد موجود نشان می‌دهد که تنها تعداد محدودی از این سازوکارها، بیشترین سهم را در کارایی داشته و هم‌زمان، بیشترین میزان شکست آن‌ها در شرایط واقعی مزرعه‌ای ثبت شده است (Nabati et al., 2025; Adeniji et al., 2024; Fadiji et al., 2024; Thakur et al., 2024; Kaur et al., 2023; Li et al., 2022; Naveed et al., 2015). از این‌رو،

استخراج گردید. سپس ۹۶ مطالعه با موضوع حبوبات دیم (مزرعه‌ای و گلخانه‌ای) انتخاب و از نظر سه مؤلفه اصلی مورد کاوش قرار گرفتند: (۱) ویژگی‌های سویه‌های میکروبی (شامل میزان بقا، توانایی کلونیزاسیون ریشه و کارایی عملکردی در شرایط کنترل‌شده)، (۲) شرایط محیطی و مدیریتی مزرعه (شامل رژیم آبی، بافت و شیمی خاک، دما و تاریخ کاشت) و (۳) روش‌های فرمولاسیون و کاربرد (نظیر نوع حامل، غلظت تلقیح، زمان و عمق مصرف). اولویت‌بندی فیلترها بر اساس سه معیار زیر انجام شد: ۱- شدت تأثیر هر فیلتر بر کاهش عملکرد (بر اساس داده‌های کمی موجود)، ۲- توالی زمانی وقوع در مسیر انتقال میکروب از آزمایشگاه به مزرعه، و ۳- قابلیت مداخله‌پذیری از طریق مدیریت زراعی یا اصلاح فرمولاسیون. در گام بعدی، با بهره‌گیری از رویکرد سیستم دینامیک و مدل‌سازی مفهومی، تمامی متغیرهای مؤثر در کاهش کارایی کود زیستی، به‌صورت زنجیره‌ای منظم در قالب سه دسته فیلتر محیطی، زیستی و فنی-مدیریتی دسته‌بندی شدند. برای هر یک از این فیلترها، بر اساس مرور نظام‌مند شواهد تجربی، مکانیسم‌های شکست (مانند کاهش جمعیت میکروب در اثر تنش اسمزی، مهار زیستی توسط آنتاگونیست‌های بومی خاک، یا عدم پراکنش یکنواخت کود به دلیل محدودیت‌های تجهیزات کاربرد) شناسایی و اولویت‌بندی گردید. نهایتاً، الگوی تحلیلی-تشخیصی پیشنهادی «فیلترهای شکست» با هدف ارائه یک نقشه راه عملیاتی برای طراحی هدفمند سویه‌ها، فرمولاسیون‌ها و راهکارهای مدیریتی، تدوین و ساختاردهی گردید. اصطلاح «فیلترهای شکست» از دو مفهوم «فیلتر محیطی» در بوم‌شناسی میکروبی (Feng et al.,

¹ Failure filters

² Environmental filter

جدول ۱- آسیب‌پذیری سازوکارهای کلیدی کودهای زیستی در برابر فیلترهای شکست در نظام‌های دیم.

Table 1. Vulnerability of key biofertilizer mechanisms to failure filters in dryland farming systems.

منبع	آسیب‌پذیری در برابر فیلتر فنی - مدیریتی (اجرایی)	آسیب‌پذیری در برابر فیلتر زیستی (رقابتی)	آسیب‌پذیری در برابر فیلتر غیرزیستی (محیطی)	عملکرد اصلی در شرایط بهینه	سازوکار کلیدی
Yeremko et al., 2025; Zahran, 1999	فرمولاسیون ناپایدار: کاهش تعداد سلول‌های زنده پیش از رسیدن به خاک. ناسازگاری با آفت‌کش‌ها: سمیت پوشش بذر برای سلول‌های ریزوبیومی.	رقابت سویه‌های بومی: سویه‌های تلقیحی غیربومی ممکن است در جذب جایگاه ریشه شکست بخورند. شکارگری: پروتوزوآها ^۱ جمعیت ریزوبیوم معرفی‌شده را کاهش می‌دهند.	خشکی: تأمین کربن و انرژی برای گره‌زایی و تثبیت نیتروژن را محدود می‌کند. pH قلیایی: سلامت میزبان و کارایی آنزیم نیتروژناز را مختل می‌کند. دمای شدید: تشکیل گره را متوقف می‌سازد.	ایجاد رابطه همزیستی با ریشه و تبدیل N ₂ به (NH ₄ ⁺)	تثبیت زیستی نیتروژن
Pradhan et al., 2025; Pan and Cai, 2023; Silva et al., 2023; Alleman and Peters, 2023	روش کاربرد نامناسب (مثلاً پوشش بذر): جداسازی یا مرگ میکروب‌ها قبل از تماس با خاک. عدم تلفیق با کود آلی: نبود ماده آلی به عنوان منبع کربن برای تولید اسید.	رقابت بر سر آهن: میکروفلورای بومی با سیدروفورهای خود، آهن را سریع‌تر کلات می‌کنند. جایگاه اکولوژیک: سویه‌های حل‌کننده فسفات ممکن است نتوانند در ریزوسفر مستقر شوند.	ظرفیت بافری بالای خاک آهکی اسیدهای آلی را سریعاً خنثی می‌کند. غلظت بالای کلسیم فسفات حل‌شده را مجدداً رسوب می‌دهد. خشکی انتشار متابولیت‌ها و حرکت میکروب‌ها را محدود می‌کند.	ترشح اسیدهای آلی و سیدروفور برای رهاسازی عناصر غذایی از کانی‌های خاک	افزایش حلالیت عناصر غذایی
Ferreira et al., 2025; Ahmad et al., 2022; Aloo et al., 2023; Bouremani et al., 2023	سازگاری نداشتن با تاریخ کشت: اگر تلقیح با دوره تنش همزمان شود، کارایی خود را از دست می‌دهد. کیفیت متغیر محصول: پایداری باکتری‌های تولیدکننده هورمون در انبارداری طولانی‌مدت.	فشار برای بقا: در محیط رقابتی، سرمایه‌گذاری انرژی بر سازوکارهای مفید برای گیاه، از نظر تکاملی به صرفه نیست.	کمبود کربن (ناشی از خشکی): گیاه ترشحات ریشه را کاهش می‌دهد، بنابراین انرژی برای تولید متابولیت‌های مفید میکروبی فراهم نیست. تنش شدید: میکروب مسیرهای متابولیکی بقا را به جای همکاری فعال می‌کند.	تولید IAA برای رشد ریشه و ACC دآمیناز برای کاهش اتیلن تنش	تنظیم هورمونی و کاهش تنش
Bouremani et al., 2023; Zhao et al., 2023; Priyadarshini et al., 2025	تداخل با مدیریت تلقیحی آفات: ناسازگاری با قارچ‌کش‌های رایج. نیاز به زمان: الفای ISR نیاز به زمان دارد و ممکن است با چرخه سریع بیماری در مزرعه هماهنگ نباشد.	رقابت شدید: سویه آنتاگونیست ^۲ ممکن است هرگز به تراکم جمعیتی لازم برای تولید مؤثر آنتی‌بیوتیک نرسد. تخریب متابولیت‌ها: آنزیم‌های میکروبی بومی ممکن است آنتی‌بیوتیک‌ها را تجزیه کنند.	تنش غذایی: گیاه فاقد منابع برای فعال‌سازی واکنش‌های دفاعی تقویت‌شده است. خشکی تولید سیگنال‌های باکتریایی و آنتی‌بیوتیک‌ها را متوقف می‌کند.	فعال‌سازی دفاع گیاه و تولید مستقیم مواد ضد میکروبی علیه پاتوژن‌ها ^۳	مقاومت سیستمیک الفایی (ISR) و آنتاگونیسم

¹ Protozoa

² Siderophore

³ Microflora

⁴ Ecological niche

⁵ Indoleacetic acid (IAA)

⁶ ACC deaminase (1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase)

⁷ Induced systemic resistance (ISR)

⁸ Pathogen

⁹ Antagonist

تشکیل شده (به‌ویژه عملکرد آنزیم نیتروژناز) را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (Nabati et al., 2025).

افزایش حل‌پذیری عناصر غذایی بومی خاک

افزایش حل‌پذیری عناصر غذایی کم‌تحرک مانند فسفر و آهن، از امیدبخش‌ترین کارکردهای کودهای زیستی در خاک‌های آهکی کم‌حاصلخیز به شمار می‌رود. این فرآیند عمدتاً از طریق دو مسیر بیوشیمیایی اصلی صورت می‌گیرد: (۱) ترشح اسیدهای آلی (مانند اسید گلوکونیک^۶، سیتریک^۷ و اسید اگزالیک^۸) توسط میکروارگانیسم‌ها به‌ویژه حل‌کنندگان فسفات که با کلات کردن کاتیون‌های کلسیم (Ca^{2+}) یا کاهش موضعی pH، کانی‌های مختلف از جمله فسفات‌های کلسیم را حل می‌کنند (Pan and Cai, 2023)؛ و (۲) تولید سیدروفورها که با کلات کردن انتخابی و قدرتمند آهن سه‌ظرفیتی (Fe^{3+})، آن را از ترکیبات نامحلول خاک آزاد می‌سازند (Pan and Cai, 2023; Ding et al., 2021). در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی، محیط بهینه و تراکم بالای سلول‌های میکروبی، کارایی این متابولیت‌های برون‌سلولی را افزایش می‌دهد. با این حال، انتقال این موفقیت به مزرعه با چالش‌های بنیادین مواجه است. خاک‌های آهکی با ظرفیت بافری بالا، اسیدهای ترشح‌شده را به سرعت خنثی می‌کنند و اثر آنها را به محدوده‌ای بسیار کوچک و گذرا در اطراف سلول میکروبی محدود می‌سازند (Pradhan et al., 2025; Silva et al., 2023). افزون بر این، غلظت بالای کاتیون Ca^{2+} نه‌تنها فسفات‌های حل‌شده را مجدداً رسوب داده و تثبیت می‌کند، بلکه می‌تواند خود سیدروفورها را نیز غیرفعال کند (Cheng et al., 2023). عامل تعیین‌کننده دیگر، تنش

در این مقاله تمرکز بر چهار سازوکار کلیدی است که آسیب‌پذیری ذاتی آن‌ها در اکوسیستم‌های دیم، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری شکاف آزمایشگاه تا مزرعه دارد (جدول ۱).

تثبیت زیستی نیتروژن

تثبیت زیستی نیتروژن، یک سازوکار حیاتی اما شکننده در بهبود تغذیه حبوبات دیم محسوب می‌شود. این فرآیند پیچیده متکی بر یک رابطه هم‌زیستی اختصاصی و تنظیم‌شده بین ریزوبیوم و ریشه گیاه میزبان است که با تبادل سیگنال‌های مولکولی (مانند فلاونوئیدها^۱ و فاکتور^۲ Nod) آغاز و به تشکیل گره‌هایی برای محافظت از آنزیم نیتروژناز^۳ که حساس به اکسیژن است، ختم می‌شود. موفقیت این هم‌زیستی در گرو سلامت متابولیک گیاه میزبان و یک محیط ریزوسفری مطلوب است (Yeremko et al., 2025). افزون بر این، طیف وسیعی از دی‌آزوتروف‌های غیرهم‌زیست^۴ (مانند آزوسپریلیوم^۵) نیز با استقرار در اطراف یا درون ریشه، از طریق تثبیت نیتروژن و تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه، نقش مکمل حیاتی در رشد گیاه ایفا می‌کنند (Flora et al., 2021). با این حال، این سازوکار حیاتی شدیداً به ثبات شرایط محیطی و تأمین انرژی کافی وابسته بوده و بسیار شکننده است.

با این حال، این پیش‌نیازها در شرایط پرتنش و ناپایدار دیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک با خاک‌های آهکی و کمبود رطوبت و مواد آلی غالباً فراهم نمی‌شوند؛ شواهد مروری نشان می‌دهد که تنش خشکی فرآیند گره‌زایی را مختل می‌کند (Zahran, 1999) و نتایج یک مطالعه مزرعه‌ای نیز تأیید کرده است که این تنش، فعالیت گره‌های

¹ Flavonoid

² Nod factor

³ Nitrogenase

⁴ Free-living diazotrophs

⁵ Azospirillum

⁶ Gluconic acid

⁷ Citric acid

⁸ Oxalic acid

رطوبتی است که هم انتشار متابولیت‌های برون سلولی و هم مهاجرت میکروارگانیسم‌ها به سمت ریشه را محدود کرده و در نهایت، ارتباط بیوشیمیایی ضروری بین میکروب و گیاه را قطع می‌کند (Alleman and Peters, 2023). در نتیجه، این سازوکار که در آزمایشگاه به خوبی عمل می‌کند، در محیط پیچیده مزرعه وارد یک رقابت شیمیایی و فیزیکی نابرابر شده و اغلب نمی‌تواند عناصر غذایی کافی و قابل توجهی را برای گیاه فراهم کند.

تنظیم هورمونی و کاهش تنش

تنظیم فیزیولوژی گیاه از طریق سیگنال‌های میکروبی، یکی از پیچیده‌ترین و در عین حال شکننده‌ترین سازوکارهای کودهای زیستی برای افزایش تحمل به تنش در حبوبات دیم است. این راهبرد، به جای تأمین مستقیم عنصر غذایی، واکنش‌های درونی گیاه را در برابر تنش‌های محیطی تعدیل می‌کند. مهم‌ترین روش‌های این تنظیم، تولید اکسین^۱ (به‌ویژه ایندول استیک اسید) و فعالیت آنزیم آمینوسیکلوپروپان کربوکسیلات دامیناز (آنزیم ACC دامیناز) هستند (Aloo et al., 2023). نتایج یک مطالعه گلخانه‌ای نشان داده است که اکسین‌های میکروبی با تحریک تقسیم و طول‌شدن سلول‌های ریشه، توسعه سیستم ریشه‌ای را تسریع کرده و به جذب بهتر آب و عناصر غذایی کمک می‌کنند. آنزیم ACC دامیناز با تجزیه پیش‌ساز هورمون اتیلن، از انباشت این هورمون تنش در ریشه جلوگیری می‌کند. کاهش سطح اتیلن، مانع از توقف رشد ریشه و پیری زودرس بافت‌ها در شرایط خشکی می‌شود و در نتیجه، توانایی گیاه برای تحمل دوره‌های کم‌آبی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Fatehi et al., 2021). افزون بر این، تولید

ترکیباتی مانند اگزوپلی ساکاریدها^۲ (برای حفظ رطوبت ریزوسفر) و ترکیبات آلی فرار (برای فعال‌سازی دفاع سیستمیک گیاه) نیز در این شبکه حمایتی نقش دارند. با این حال، کارایی این سامانه تنظیمی، خود در گرو ثبات شرایط محیطی است. این سازوکارهای مفید برای میکروب‌ها از نظر انرژی و منابع، فعالیتی پرهزینه محسوب می‌شود (Ahmad et al., 2022; Bouremani et al., 2023). در محیط کنترل‌شده آزمایشگاهی که انرژی و مواد اولیه به‌وفور یافت می‌شود، میکروب این هزینه را تقبل کرده و گیاه را از مزایای آن بهره‌مند می‌سازد؛ اما در شرایط پیچیده و پرتنش مزرعه به‌ویژه در شرایط دیم، اولویت متابولیکی میکروب به سرعت از «همکاری» به «بقا» تغییر می‌یابد؛ به طوری که در مواجهه با کمبود کربن ناشی از کاهش ترشحات ریشه تحت تنش و فشارهای فیزیولوژیک، سلول میکروبی منابع خود را منحصراً به فرآیندهای پایه‌ای حیاتی خود اختصاص داده و عملاً ژن‌های مرتبط با تنظیم رشد گیاه و کاهش تنش را خاموش می‌کند. بدین ترتیب، در زمانی که گیاه به علت مواجه شدن با تنش خشکی شدید، به بیشترین کمک فیزیولوژیک نیاز دارد، همان تنش باعث خاموش شدن سازوکارهای میکروبی می‌شود (Ferreira et al., 2025).

القای مقاومت سیستمیک و آنتاگونیسم مستقیم

ارتقای سلامت گیاه و حفاظت از آن در برابر پاتوژن‌ها از طریق القای مقاومت سیستمیک (ISR) و آنتاگونیسم مستقیم، از دیگر سازوکارهای مهم و پیچیده کودهای زیستی محسوب می‌شود. این دو راهبرد به‌صورت هم‌افزا^۳ عمل کرده و یک سامانه

^۲ Exopolysaccharide

^۳ Synergistic

^۱ Auxin

متابولیک واکنش دفاعی را نداشته باشد. در نتیجه، این سازوکارهای دفاعی قدرتمند با وجود اثربخشی بالا در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی، در محیط مزرعه اغلب کارایی مورد انتظار را نشان نمی‌دهند. بدین ترتیب، همان کمبود آب و مواد غذایی که قرار بود با آن مقابله شود، خود باعث تضعیف یا خاموش شدن این سازوکارها می‌گردد و در زمانی که گیاه به علت مواجه شدن با تنش خشکی شدید، مورد حمله پاتوژن قرار گرفته و به کمک بیشتری نیاز دارد، این سیستم دفاعی به شدت تضعیف می‌گردد یا از کار می‌افتد (Ferreira et al., 2025; Jung et al., 2024).

فیلترهای شکست

در این مقاله، برای تحلیل نظام‌مند موانع کارایی کودهای زیستی و درک علل کاهش کارایی آن‌ها در شرایط پیچیده مزارع دیم، از مفهومی به نام «فیلترهای شکست» استفاده می‌شود. منظور از فیلتر در این بررسی، عوامل محدودکننده پویا هستند که به صورت متوالی کارکرد عامل زیستی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. عدم عبور موفق عامل زیستی از این فیلترها منجر به شکست در تحقق پتانسیل آزمایشگاهی آن در مزرعه می‌شود. در این بخش، با تشریح این فیلترها، استدلال می‌کنیم که مزرعه، یک اکوسیستم متشکل از لایه‌های فعال محیطی، زیستی و فنی-مدیریتی است که به تدریج یا ناگهانی، ظرفیت‌های مفید میکروارگانیسم‌ها را محدود یا خنثی می‌سازد. تحلیل این فیلترها نه تنها توضیح می‌دهد که چرا منافع مورد انتظار محقق نمی‌شوند، بلکه نقاط بحرانی شکست را شناسایی کرده و راه را برای طراحی راهبردهای هدفمند برای عبور از این گسست هموار می‌سازد.

دفاع دوجبه‌ای برای گیاه ایجاد می‌کنند؛ به طوری که از یک سو باکتری‌های سودمند با ترشح محرک‌های ویژه‌ای مانند لیپوپلی‌ساکاریدها^۱ یا سیدروفورها، سیستم هشدار دفاعی گیاه را فعال می‌کنند. این مولکول‌ها توسط ریشه گیاه شناسایی شده و زنجیره‌ای از واکنش‌های هورمونی مبتنی بر جاسمونیک اسید^۲ و اتیلن را به راه می‌اندازند (Bouremani et al., 2023; Zhu et al., 2023). این فرآیند منجر می‌شود که گیاه از پیش آماده شده و در رویارویی بعدی با پاتوژن، واکنش سریع‌تر و قوی‌تری از خود نشان دهد (Jung et al., 2024). از سوی دیگر، نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی نشان داده است که بسیاری از این باکتری‌ها با تولید مستقیم مواد ضد میکروبی (مانند آنتی‌بیوتیک ۲۰۴-دی‌استیل‌فلوئوروگلوکوسینول (DAPG) یا آنزیم‌های تجزیه‌کننده دیواره سلولی) به مقابله بیولوژیک با عوامل بیماری‌زا می‌پردازند (Dutta et al., 2020). در شرایط کنترل شده و ایده‌آل آزمایشگاهی، این سازوکار هوشمندانه بازدهی قابل توجهی در کنترل بیماری‌ها نشان می‌دهد. با این حال، فعال‌سازی و حفظ این سپر دفاعی نیز همانند تولید و تنظیم فیتوهورمون‌ها^۴ که در بخش قبل اشاره شد، برای میکروب‌ها از نظر انرژی و منابع، بسیار پرهزینه است. در محیط واقعی مزرعه، منابع انرژی و پیش‌سازهای لازم برای تولید این سیگنال‌ها و آنتی‌بیوتیک‌ها، به ویژه تحت تنش خشکی و فقر غذایی ریزوسفر، به شدت محدود است. در چنین شرایطی، اولویت سلول میکروبی به سرعت از «تولید متابولیت‌های دفاعی» به «ذخیره انرژی» تغییر می‌یابد. افزون بر این، خود گیاه تحت تنش نیز ممکن است ظرفیت فیزیولوژیک لازم برای پرداخت هزینه‌های

¹ Lipopolysaccharide

² Jasmonic acid

³ 2,4-diacetylphloroglucinol (DAPG)

⁴ Phytohormone

فیلتر محیطی

فیلتر محیطی، به عنوان نخستین لایه، مستقیماً فیزیولوژی میکروارگانیسم‌ها و سازوکارهای مفید آنها را مورد هدف قرار می‌دهد. شرایط نامساعد غیرزیستی در مناطق خشک، نه تنها رشد را محدود می‌کند، بلکه به طور فعال محدودیت‌های فیزیولوژیک زیر را ایجاد می‌نماید که راه گریز از آنها برای موجودات تک سلولی بسیار دشوار است:

الف) خشکی و توقف متابولیک: نوسان و کاهش طولانی مدت رطوبت خاک، باعث دهیدراته شدن^۱ سلول‌های باکتریایی می‌شود. این شرایط، تعامل‌های شیمیایی بین ریشه و میکروب را قطع می‌کند؛ به طوری که هم حرکت ترشحات برون سلولی ریشه (منبع اصلی کربن) متوقف می‌شود و هم انتشار مواد مؤثر میکروبی (مانند اسیدهای آلی و سیدروفورها) به شدت محدود می‌گردد. در نتیجه، میکروب‌ها در مکانی غیرقابل دسترس برای گیاه به دام افتاده و از هدف خود دور می‌شوند (Alleman and Peters, 2023; Flora et al., 2021). در این رابطه، عبادی و همکاران (Ebadi et al., 2019) با بررسی اثر کاربرد ازتوباکتر و میکوریزا به صورت منفرد و تنها بر روی جو رقم سهند در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی در مزرعه، گزارش کردند که کاربرد کودهای زیستی تحت شرایط دیم، به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتیاکسیدانی، پرولین و قندهای محلول منجر شد. کودهای زیستی مورد مطالعه در شرایط آبیاری تکمیلی اثر بیشتری نسبت به شرایط دیم داشتند.

ب) محدودیت‌های ناشی از شیمی خاک: ویژگی‌های ذاتی خاک‌های آهکی شامل pH قلیایی و ظرفیت بافری زیاد فعالیت میکروبی را محدود می‌کنند. شرایط قلیایی می‌تواند تعادل اسیدی-قلیایی درون سلول را که برای تولید انرژی حیاتی است، مختل کند، در حالی که ظرفیت

بافری بالا، اسیدهای آلی ترشح شده توسط میکروب‌های حل کننده فسفات را خنثی کرده و اثر آنها را به حوزه‌ای بینهایت کوچک و بی‌ثمر محدود می‌کند (Pan and Cai, 2023). افزون بر این، غلظت بالای کاتیون کلسیم (Ca^{2+})، هرگونه فسفات حل شده را به سرعت به شکل نامحلول بازمی‌گرداند و چرخه بی‌حاصل «حل شدن و رسوب مجدد» را تکمیل می‌کند (Cheng et al., 2023). جیانلی و همکاران (Giannelli et al., 2023) بیان کردند که غلظت بالای یون‌های سدیم و کلر، نه تنها بر گیاه میزبان، بلکه بر متابولیسم و یکپارچگی غشای سلولی میکروارگانیسم‌ها نیز اثر مستقیم و بازدارنده دارد و با افزایش شوری، ویژگی‌های محرک رشد مانند تولید IAA، حل کنندگی فسفات، ACC-deaminase و EPS در برخی از سویه‌ها کاهش می‌یابد. این پژوهشگران خاطرنشان کردند که بسیاری از سویه‌های PGPR تجاری، فاقد مکانیسم‌های کارآمد دفع یا تحمل نمک هستند.

ج) آسیب دمایی: سلول‌های میکروبی موجود در مایه تلقیح پوشش دهنده بذر، پیش از استقرار در ریزوسفر، در معرض دو حمله فیزیکی متضاد در محیط خاک قرار می‌گیرند: دمای بالای خاک (بیش از ۴۵ درجه سانتی‌گراد) که منجر به فروپاشی ساختار^۲ پروتئین‌ها و آنزیم‌های حیاتی می‌شود و یخبندان که با تشکیل کریستال‌های یخ درون سلولی، به غشاها و ساختارهای سلولی آسیب فیزیکی وارد کرده و باعث مرگ سلول می‌گردد. این تنش‌ها، جمعیت میکروبی کارآمد را پیش از آغاز هرگونه رقابت یا تعامل سودمند با گیاه، به شدت کاهش داده و از بین می‌برند (Asik et al., 2025). محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2022) در یک مطالعه گلخانه‌ای گزارش کردند که افزایش دمای خاک می‌تواند به کاهش معنی‌دار کلونیزاسیون ریشه منجر شود.

² Denaturation

¹ Dehydration

این سویه در رقابت برای اتصال به ریشه و جذب کربن معمولاً شکست خورده و پیش از رسیدن به تراکم مؤثر، از بین می‌رود (Jiménez-Mejía et al., 2022). در این رابطه، رومانو و همکاران (Romano et al., 2020) گزارش کردند که موفقیت یک تلقیح‌کننده به رقابت بین میکروارگانیسم‌های ریزوسفر به‌ویژه رقابت با میکروارگانیسم‌های بومی خاک وابسته است.

ب) شکار شدن و حمله ویروسی: ورود ناگهانی جمعیت متراکم و اغلب یکنواخت ژنتیکی از باکتری‌ها (سویه تلقیحی)، یک منبع غذایی قابل‌توجه برای شکارگران طبیعی خاک مانند پروتوزوئیدها و باکتریوفاژها ایجاد می‌کند. این شکارگران می‌توانند جمعیت باکتری معرفی‌شده را به سرعت مصرف کرده و یک کنترل جمعیتی قوی اعمال نمایند. این پویایی به طور مداوم مانع از غلبه هر سویه خارجی بر جامعه میکروبی بومی می‌شود (Mawarda et al., 2022).

ج) فقدان همکاری واقعی در اجتماعات میکروبی طراحی شده: اگرچه اجتماعات میکروبی چندسویه‌ای در آزمایشگاه با هدف ایجاد همکاری و هم‌افزایی طراحی می‌شوند، ولی این همکاری و هم‌افزایی لزوماً در محیط پیچیده خاک رخ نمی‌دهد. تعاملات آنتاگونیستی (مانند تولید آنتی‌بیوتیک توسط یک عضو علیه عضو دیگر) یا شکست جمعی در رقابت با میکروفلورای بومی خاک می‌تواند باعث فروپاشی اجتماع میکروبی شود. ایجاد یک اجتماع میکروبی هم‌افزا و پایدار، نیازمند هم‌سازگاری بوم‌شناختی است که به ندرت از طریق اختلاط مکانیکی سویه‌ها حاصل می‌آید (Niu et al., 2020).

فیلتر فنی-مدیریتی

فیلتر فنی-مدیریتی، آخرین حلقه و اغلب عامل تعیین‌کننده در شکست انتقال یافته از آزمایشگاه

این فیلترها، هر یک به تنهایی می‌توانند تأثیرات مخربی بر عملکرد کودهای زیستی در مزارع دیم داشته باشند، اما قدرت اصلی و ویرانگر آن‌ها در پدیده هم‌افزایی اثرات نهفته است. به‌عنوان مثال، تنش خشکی نه‌تنها مستقیماً بر میکروارگانیسم‌ها فشار وارد می‌کند، بلکه با کاهش فعالیت متابولیکی گیاه و میکروب، اثرات منفی تنش شیمیایی (مانند قلیائیت و سمیت عناصر) را تشدید می‌کند. به‌طور هم‌زمان، دمای بالا می‌تواند با افزایش تبخیر و تعرق، آثار تنش خشکی را تشدید کرده و حتی منجر به تخریب ساختار پروتئین‌ها و آنزیم‌های کلیدی در سلول‌های میکروبی شود.

فیلتر زیستی

سویه تلقیح‌شده حتی در صورت عبور از سد اولیه تنش‌های غیرزیستی محیط خاک، برای تحقق بخشیدن پتانسیل واقعی خود، با مهم‌ترین و پیچیده‌ترین چالش که رقابت برای بقا و تثبیت در اکوسیستم زنده و پویای خاک است، مواجه می‌شود. موفقیت در عبور از این فیلتر زیستی شرط لازم برای بروز هرگونه تأثیر مطلوب بوده و شکست در آن، علت اصلی عدم استقرار و عدم اثر در کاربردهای مزرعه‌ای محسوب می‌شود. اصلی‌ترین موانع و محدودیت‌های مربوط به فیلتر زیستی شامل موارد زیر می‌باشد:

الف) رقابت برای جایگاه و غذا: اجتماعات میکروبی (کنسرسیوم) بومی خاک طی سال‌ها سازگاری با شرایط سخت بومی، در بهره‌برداری از منابع محدود (مانند ترشحات ریشه و عناصر غذایی) بسیار کارآمد شده‌اند. یک سویه منتخب آزمایشگاهی که معمولاً برای رشد سریع در محیط‌های غنی بهینه‌سازی شده، اغلب فاقد تاکتیک‌های تخصصی لازم برای رقابت در چنین محیط پرتنشی است.

² Bacteriophage

¹ Consortium

لایه میکروبی را از بین برده یا آن را از بذر جدا می‌کند. اگرچه روش‌های جایگزین مانند کاربرد گرانول در شیار کشت می‌تواند مؤثرتر باشد، اما به دلیل نیاز به تجهیزات خاص، هزینه بیشتر و پیچیدگی عملیاتی، عمدتاً مورد استقبال قرار نمی‌گیرد (Rocha et al., 2019).

ج) ناسازگاری با نهاده‌های ضروری: شاید مهم‌ترین مانع، ناسازگاری ذاتی بین کودهای زیستی و سایر نهاده‌های ضروری کشاورزی باشد. کاربرد پوشش‌های شیمیایی بذر (مانند قارچ‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها) برای حفاظت از گیاهچه در برابر آفات و بیماری‌ها در مراحل اولیه رشد، کاملاً ضروری هستند. با این حال، بسیاری از این ترکیبات شیمیایی برای سلول‌های میکروبی موجود در کود زیستی سمی هستند. کشاورز در عمل، بین پوشش‌دهی بذر با سموم شیمیایی برای ایجاد محافظت مطمئن از بذر و تلقیح بذر با کود زیستی برای افزایش سود احتمالی، به‌طور طبیعی گزینه اول را برمی‌گزیند (Mawarda et al., 2022). این انتخاب، عملاً کود زیستی را پیش از آغاز رشد گیاه، بی‌اثر می‌سازد. این ناسازگاری حیاتی، اغلب در مراحل تحقیق و توسعه محصول نادیده گرفته می‌شود.

راهکارهای افزایش تاب‌آوری

تحلیل بخش قبل نشان داد که شکاف آزمایشگاه-مزرعه امری تصادفی نیست، بلکه ناشی از مجموعه‌ای از موانع مشخص و قابل‌شناسایی است. از این رو، برای پل زدن بر این شکاف، باید از روش قدیمی آزمون و خطا فراتر رفته و به سراغ مهندسی هدفمند برای ارتقای سازگاری رفت. این بخش با ارائه یک الگوی عملیاتی، راهکارهای مشخصی را در سه سطح به هم‌پیوسته از مهندسی و فرمولاسیون اجتماع میکروبی تا مدیریت زراعی

به مزرعه است. این مرحله، شکاف بین پتانسیل علمی و موانع عملی کشاورزی را نشان می‌دهد. حتی مؤثرترین سویه میکروبی نیز ممکن است به دلیل مشکلات فرمولاسیون، روش کاربرد یا ناسازگاری با نهاده‌های رایج در این مرحله بی‌اثر شود. مهم‌ترین عوامل محدودکننده مربوط به این فیلتر شامل موارد زیر می‌باشد:

الف) فرمولاسیون ناپایدار: یک کود زیستی صرفاً یک سویه نیست، بلکه یک محصول فرموله‌شده است و تبدیل یک سویه میکروبی کشت‌شده در آزمایشگاه به یک محصول تجاری پایدار و مؤثر، خود یک چالش فنی بزرگ است. بسیاری از فرمولاسیون‌های رایج از مواد حامل ارزان (مانند پیت) استفاده می‌کنند که محافظت کافی در برابر خشکی، گرما و فشار اسمزی در طول انبارداری و پس از کاربرد ارائه نمی‌دهند. در نتیجه، شمار سلول‌های زنده و فعال، حتی پیش از رسیدن به خاک، به‌صورت لگاریتمی کاهش یافته و از آستانه حیاتی لازم برای استقرار موفق پایین‌تر می‌رود. در حالی که فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند ریزپوشانی^۱ استفاده از پلیمرهای محافظ و افزودن اُسموپروتکتانت‌ها^۲ وجود دارند، این دانش اغلب به دلیل ملاحظات هزینه‌ای، به عرصه تولید انبوه راه نمی‌یابد (Kanishka et al., 2025).

ب) روش کاربرد ناسازگار: روش تلقیح بهینه‌شده در شرایط کنترل‌شده (مانند پوشش کامل و یکنواخت بذر) اغلب با واقعیت عملیات مزرعه و روش کاربرد کشاورزان متفاوت است. در کشاورزی دیم، دستگاه‌های بذرکار مرسوم هنگام قرار دادن بذر در عمق مناسب، سایش قابل‌توجهی به پوشش تلقیحی وارد می‌کنند. این سایش مکانیکی می‌تواند لایه میکروبی را از بذر جدا کرده یا سلول‌ها را از بین ببرد. سایش در دستگاه‌های بذرکار مرسوم،

^۱ Encapsulation

^۲ Osmoprotectants

ترکیب می‌کند تا به‌طور سیستماتیک از فیلترهای محیطی، زیستی و فنی عبور کند (جدول ۲).

جدول ۲- راهکارهای تاب‌آوری در مواجهه با فیلترهای شکست مورد هدف.

Table 2. Resilience-building strategies against targeted failure filters.

منبع	هدف‌گیری فیلتر فنی-مدیریتی (فرمولاسیون، کاربرد، ناسازگاری)	هدف‌گیری فیلتر زیستی (رقابت، شکارگری، عدم استقرار)	هدف‌گیری فیلتر محیطی (خشکی، شوری، دمای شدید، pH)	راهکار
Mataranyika) et al., 2024; da Silva et al., (2025	انتخاب سویه‌هایی با پایداری ذاتی بالا تر برای زنده‌مانی در فرآیند فرمولاسیون. توجه به امکان تولید انبوه و تکثیر اقتصادی سویه منتخب	شایستگی بوم‌شناختی ذاتی برای رقابت موفق با میکروفلورای بومی. هم‌سازی در اجتماع میکروبی برای جلوگیری از آنتاگونیسم داخلی. گزینش سویه‌های مقاوم به شکارگران/پاکتیروفاژهای محلی	استفاده از سویه‌های بومی متحمل به خشکی، شوری و pH بالا. طراحی اجتماع میکروبی با برهم‌کنش‌های هم‌افزا برای شرایط تنش ترکیبی.	انتخاب سویه و طراحی اجتماع میکروبی (مهندسی عامل زیستی)
Kabir et al.,) 2023; Pereira et al., 2023	تضمین پایداری و عمر انبارداری محصول. طراحی برای روش کاربرد خاص (مثلاً گرانول برای کاربرد در شیار). محافظت در برابر سمیت نهاده‌های شیمیایی همراه (مانند پوشش بذر)	ریزپوشانی به عنوان پناهگاهی فیزیکی در برابر شکارگران. پیش‌تغذیه کپسول‌ها برای تأمین انرژی اولیه و برتری در شروع رقابت	ریزپوشانی برای محافظت فیزیکی در برابر خشکی، UV و دمای شدید. افزودن آسموپروتکتانت‌ها (مانند تره‌آلوز) برای بقای سلول. حامل‌های نگهدارنده رطوبت (مانند زیست‌زغال)	فرمولاسیون پیشرفته (مهندسی سیستم رهاسازی و محافظت)
Araujo et al.,) 2025; El- Hamid et al., 2013; Campo et al., 2010	تطبیق روش کاربرد با ماشین‌آلات و عادات کشاورزان (مثلاً گرانول جایگزین پوشش بذر). آموزش و مشارکت کشاورز برای اجرای صحیح. تدوین دستورالعمل‌های مدیریت تلفیقی برای اجتناب از ناسازگاری با نهاده‌ها	کودهای آلی به عنوان بستر برای توسعه یک جامعه میکروبی عمومی حمایت‌گر. ایجاد زیستگاه مساعد ریزوسفر، جذب و حفظ جمعیت میکروبی معرفی‌شده را تقویت می‌کند.	کاربرد کودهای آلی برای بهبود ظرفیت نگهداشت آب و تعدیل دما. زمان‌بندی دقیق تلقیح با رطوبت خاک یا بارندگی. اصلاح نبات برای صفات متحمل به تنش (ریشه‌دهی بهتر)	یکپارچه‌سازی زراعی (مهندسی زیستگاه و مدیریت)

¹ Trehalose

انتخاب سویه و طراحی اجتماع میکروبی

انتخاب سویه و طراحی اجتماع میکروبی، سنگ بنای توسعه کودهای زیستی کارآمد برای شرایط مزرعه است. موفقیت در این مرحله مستلزم تغییر معیار انتخاب از تمرکز بر عملکرد حداکثری در شرایط آزمایشگاهی به اولویت‌دهی شایستگی بوم‌شناختی برای بقا، استقرار و بروز فعالیت مفید در محیط واقعی مزرعه است. مستقیم‌ترین راه برای یافتن سویه‌های با شایستگی بوم‌شناختی بالا، جست‌وجو در خود اکوسیستم هدف است. جداسازی میکروارگانیسم‌ها از ریزوسفر گیاهان متحمل به خشکی یا پوشش گیاهی بومی که در خاک‌های آهکی دیم رشد می‌کنند، سویه‌هایی را شناسایی می‌کند که از پیش با شرایط سخت (مانند pH بالا، خشکی، شوری و نوسان دما) سازگاری یافته‌اند. این میکروارگانیسم‌های بومی اغلب دارای سازوکارهای ذاتی مقابله با تنش، مانند ساختار مقاوم غشای سلولی، تولید کارآمد مواد محافظت‌کننده (نظیر تره‌آلوز) و سازوکارهای مقاومت در برابر شکارگران بومی هستند (Mataranyika et al., 2024). گام بعدی، طراحی اجتماعات میکروبی بر پایه اصول بوم‌شناختی است. در این طراحی باید دو اصل کلیدی رعایت شود: اول، تفکیک جایگاه اکولوژیک (تا میکروب‌ها برای منابع یکسان با هم رقابت نکنند) و دوم، هم‌افزایی عملکردی (تا فعالیت‌های آن‌ها یکدیگر را تقویت کند). رعایت این اصول، رقابت زیان‌بار داخلی را کاهش داده و همکاری پایدار و سودمند بین اعضای اجتماع میکروبی را تضمین می‌نماید. به‌عنوان مثال، یک الگوی کاربردی برای مناطق خشک آهکی می‌تواند متشکل از سه عضو مکمل باشد: یک سویه سودوموناس تولیدکننده آنزیم ACC دآمیناز که به عنوان باکتری کمک‌کننده، استقرار اولیه گیاه را در شرایط تنش تسهیل می‌کند؛ یک قارچ حل‌کننده فسفر (مانند

پنی‌سیلیوم) متحمل به غلظت بالای کلسیم که فراهمی فسفر را بهبود می‌بخشد و یک ریزوبیوم متحمل به خشکی که مسئول تثبیت بیولوژیک نیتروژن است. به این ترتیب، باکتری کمک‌کننده بستر لازم برای فعالیت دو عضو دیگر را فراهم می‌سازد و بهبود تغذیه فسفوری نیز به‌طور مستقیم بازدهی فرآیند تثبیت نیتروژن را افزایش می‌دهد (da Silva et al., 2025). گام نهایی و ضروری، ارزیابی سازگاری متقابل اعضای این اجتماع میکروبی پیش از کاربرد است تا از بروز آنتاگونیسم و شکست احتمالی آن در محیط واقعی جلوگیری شود.

دانش پیشرفته فرمولاسیون

برای عبور دادن سویه‌های میکروبی آسیب‌پذیر از میان فیلترهای سخت مورد بحث، فرمولاسیون باید از یک حامل ساده به یک سامانه هوشمند محافظت، تحریک و رهاسازی هدفمند تکامل یابد. این فرمولاسیون‌های پیشرفته همچون یک پشتیبان حیات عمل کرده و قابلیت زیستی و عملکرد میکروارگانیسم‌ها را از آزمایشگاه تا ریزوسفر حفظ می‌کنند. یکی از راهکارهای کلیدی، ریزپوشانی سلول‌ها در ماتریس‌های زیست‌پلیمری^۱ (مانند آلژینات^۲ و کیتوزان^۳) است که سدی فیزیکی در برابر پرتوهای فرابنفش، دمای شدید و خشکی ایجاد می‌کند. درون این ریزکپسول‌ها^۴ می‌توان عناصر غذایی و آسموپروتکتانت‌ها (نظیر تره‌آلوز) را قرار داد تا سلول‌ها در دوره بحرانی پیش از جوانه‌زنی پایدار بمانند. این فناوری نه‌تنها امکان رهایش کنترل‌شده و هم‌گام با توسعه ریشه یا رویداد بارندگی را فراهم می‌آورد، بلکه می‌تواند محافظتی در برابر سمیت

¹ Penicillium

² Biopolymer matrices

³ Alginate

⁴ Chitosan

⁵ Microcapsules

تدریجی منابع کربنی، زیستگاه کلی خاک را ارتقاء داده و جامعه میکروبی عمومی را تقویت می‌کند که این امر به‌عنوان یک ضربه‌گیر در برابر تنش خشکی عمل می‌نماید. از سوی دیگر، ماده آلی می‌تواند یک محیط میکروبی مهارکننده برای پاتوژن‌های خاک‌زاد ایجاد کرده و زیستگاه میکروارگانیسم‌های مفید را مستحکم‌تر نماید. این عمل در واقع شرایط محیط خاک را بهبود داده و پیشاپیش آن را برای پذیرش جمعیت میکروبی معرفی‌شده مستعد می‌سازد (El-Hamid et al., 2013).

محور دوم، طراحی روش‌های اختصاصی برای کاربرد کود زیستی در شرایط دیم و مناطق خشک است که با این شرایط ویژه هماهنگ باشد. به عنوان مثال، در این نظام‌ها که بذرها برای دستیابی به رطوبت عمده‌تاً در اعماق بیشتر کشت می‌شوند، روش متداول پوشش‌دهی بذر اغلب کارایی چندانی ندارد. در مقابل، کاربرد فرمولاسیون گرانولی در داخل شیار کشت، تراکم بالایی از سلول‌های میکروبی محافظت‌شده را مستقیماً در ناحیه جوانه‌زنی مستقر ساخته و تماس اولیه مؤثر را تضمین می‌نماید. علاوه بر این، زمان‌بندی دقیق عملیات تلقیح و هماهنگ کردن آن با رطوبت موجود در خاک یا بارندگی پیش‌بینی شده، عامل تعیین‌کننده‌ای در موفقیت است. برای بهینه‌سازی این هماهنگی، می‌توان از فرمولاسیون‌های هوشمندی استفاده کرد که تنها در صورت وجود رطوبت کافی، میکروب‌ها را رها می‌سازند (Campo et al., 2010).

محور سوم و آینده‌نگر، اصلاح و انتخاب ارقام گیاهی میکروب‌پسند است. هدف این است که حیواناتی داشته باشیم که دارای صفات مطلوب برای جلب و پشتیبانی از میکروب‌های سودمند بوده و بتوانند به‌طور مؤثرتری با این میکروارگانیسم‌ها همکاری کنند. این ارقام دارای

مواد شیمیایی پوشش بذر نیز ایجاد کند (Pereira et al., 2023). به‌موازات این، ادغام اُسموپروتکتانت‌های برون‌زا (مانند تره‌آلوز یا گلیسین‌بتائین) در ساختار فرمولاسیون، به سلول‌ها کمک می‌کند تا پروتئین‌ها و غشاهای خود را در طول دوره‌های خشکی تثبیت کنند. همچنین، استفاده از حامل‌های هوشمند نگهدارنده آب مانند پلیمرهای ابرجاذب مبتنی بر نشاسته یا کامپوزیت‌های خاک‌رس-زیست‌زغال، یک ریزپناه هیدرولوژیک مطلوب در اطراف مایه تلقیح ایجاد می‌نماید. در این میان، زیست‌زغال به‌عنوان یک حامل متخلخل کربنی، نقش چندمنظوره ایفا می‌کند: ساختار متخلخل آن پناهگاهی فیزیکی در برابر شکارگران ایجاد می‌کند، در برابر نوسانات دما و رطوبت نقش بافری دارد و در صورت پیش‌تلقیح و غنی‌سازی با مواد مغذی و اجتماعات میکروبی، به یک اکوسیستم عملکردی زنده تبدیل می‌شود که هم بقا و هم ادغام مؤثر مایه تلقیح را در شبکه غذایی خاک افزایش می‌دهد (Kabir et al., 2023).

یکپارچه‌سازی راهبردی با روش‌های زراعی

آخرین و شاید مؤثرترین راهکار، مدیریت هوشمند مزرعه برای ایجاد شرایط مساعد برای کود زیستی است. این رویکرد، دیگر به کود زیستی به عنوان یک ماده کمکی مستقل نگاه نمی‌کند، بلکه آن را به عنوان بخشی از یک برنامه زراعی جدید در نظر می‌گیرد که به طور مستقیم عوامل محدودکننده (فیلترهای شکست) را هدف قرار می‌دهد و آن‌ها را تعدیل می‌کند. نخستین محور، ایجاد هم‌افزایی با اصلاح‌کننده‌های آلی خاک مانند کمپوست یا کود دامی پوسیده است. کاربرد هم‌زمان این مواد با کود زیستی، هدفی دوگانه را محقق می‌سازد: از یک سو با افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت و تأمین

¹ Glycine betaine

همکاری بین بخش‌ها نیز دگرگون شود. هدف این بخش پایانی، ارائه یک نقشه راه عملی است تا به جای بررسی شکست‌های گذشته، به سمت طراحی آینده‌نگر سامانه‌های کود زیستی حرکت کنیم. این نقشه راه به‌طور ویژه، چالش‌های مناطق خشک و خاک‌های آهکی را هدف قرار می‌دهد.

اکتشاف سویه با استفاده از فناوری‌های اُمیکس

برای گزینش سویه‌های کارآمد در آینده، باید فراتر از ارزیابی‌های متداول آزمایشگاهی (که عمدتاً بر مشاهدات ظاهری و تولید برخی متابولیت‌ها متمرکزند) رفت و مکانیسم‌های مولکولی و ژنتیکی زیربنای موفقیت میکروب در شرایط واقعی مزرعه را شناسایی کرد. این کار نیازمند استفاده هوشمندانه از مجموعه فناوری‌های پیشرفته موسوم به فناوری‌های جامع مولکولی یا «اُمیکس» است که در سه گام اساسی قابل اجرا است:

نخستین گام، شناسایی ژن‌های سازگاری است. با مقایسه کل ژنوم (ژنومیک) میکروب‌های بومی متحمل به خشکی و شوری با سویه‌های آزمایشگاهی، می‌توان ژن‌های حیاتی بقا در خاک‌های آهکی (مانند ژن‌های مرتبط با دفع کلسیم یا پاسخ به تنش) را کشف کرد. مهم‌تر از آن، بررسی ژن‌های فعال (ترانسکریپتومیک) در این میکروب‌ها تحت شرایط شبیه‌سازی شده تنش (مانند خشکی و گرما) است که مشخص می‌کند کدام مسیرهای متابولیکی در عمل و در شرایط مزرعه فعال می‌شوند (Mahdavi Mashaki et al., 2019).

گام بعدی، درک تعامل شیمیایی بین گیاه، کود زیستی و میکروب‌های خاک است. موفقیت یک کود زیستی به گفتگوی شیمیایی بین ریشه گیاه،

صفات مطلوبی همچون ریشه‌های توسعه‌یافته‌تر با تارهای کشنده فراوان، توانایی ترشح مواد جذاب برای میکروب‌های سودمند و مقاومت در حفظ این ترشحات حتی تحت تنش خشکی هستند. همچنین، ارقامی که در شرایط تنش، همچنان مقادیر قابل‌توجهی از مواد خاصی (مانند فلاونوئیدهای محرک تشکیل گره) را ترشح می‌کنند، از اهمیت بالایی برخوردارند. این رویکرد، یک همکاری دوطرفه تقویت‌شونده ایجاد می‌کند؛ به این صورت که گیاه به‌طور فعال، جمعیت میکروبی جدید را که برای حمایت از گیاه طراحی شده، جذب و حفظ می‌نماید و با ترشحات ریشه، آن را تغذیه می‌کند (Araujo et al., 2025).

راهبردهای تشریح‌شده در این بخش در عمل، بخش‌های جدایی‌ناپذیر یک طرح کلی هستند. این سه بخش با هم یک چارچوب یکپارچه برای سازگارسازی تشکیل می‌دهند که مستلزم عبور از رویکرد «محصول‌محور» به رویکرد «سامانه‌محور» است. در این رویکرد، به جای اینکه ابتدا یک میکروب قوی در آزمایشگاه پیدا کنیم و بعد امیدوار باشیم در مزرعه دوام بیاورد، از همان ابتدا کل سامانه (شامل میکروب، فرمولاسیون، روش مصرف و گیاه) را متناسب با شرایط سخت مزرعه طراحی می‌کنیم. در نتیجه، میکروب‌ها بر اساس توانایی بقا در شرایط واقعی مزرعه (و نه فقط در آزمایشگاه) انتخاب می‌شوند، در فرمولاسیون‌های پیشرفته و محافظت‌شده به خاک می‌رسند و در محیطی مساعد که برای آن‌ها آماده شده، مستقر می‌گردند.

چشم‌اندازهای آتی و نقشه راه تحقیقاتی

راهکارهای ارائه‌شده برای افزایش تاب‌آوری، اگرچه چارچوب تحلیلی روشنی برای شناخت و بهبود وضعیت کنونی ارائه می‌دهد، اما برای ایجاد تغییر واقعی در مزرعه، باید همزمان روش تحقیق و نحوه

¹ Omics

² Genomics

³ Transcriptomics

هر مرحله در نظر بگیرند. این رویکرد چهار مرحله ضروری دارد:

اول، تأیید سازوکارهای اصلی (مانند تثبیت نیتروژن یا تولید هورمون) در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی

دوم، ارزیابی عملکرد میکروب در خاک واقعی (غیراستریل) منطقه هدف تحت تنش‌های کنترل شده (مانند خشکی یا pH بالا)

سوم، اعتبارسنجی در مزرعه تحت شرایط مدیریت شده و در شرایط طبیعی محیطی منطقه (مثلاً در خاک‌هایی با درجات مختلف آهکی) با پایش دقیق پارامترها

چهارم، آزمون نهایی با مشارکت کشاورزان که معیارهای عملی و اجتماعی-اقتصادی پذیرش فناوری را نیز می‌سنجد (Tariq et al., 2025).

علاوه بر این، برای اینکه نتایج پژوهش‌های مختلف قابل مقایسه و قابل تعمیم باشند، گزارش‌های علمی باید فراتر از ثبت عدد عملکرد، یک مجموعه استاندارد از داده‌های کلیدی محیطی را نیز ارائه دهند. این داده‌ها باید شامل تعداد میکروب مفید در اطراف ریشه گیاه در مراحل مهم رشد، میزان رطوبت و دمای خاک هنگام کاشت و در طول دوره‌های خشکی یا تنش، ویژگی‌های شیمیایی خاک مانند میزان اسیدیته (pH) و آهک و نشانه‌های فیزیولوژیک از وضعیت گیاه مانند علائم تنش آبی باشند. ثبت این اطلاعات، امکان تحلیل‌های جامع‌تر را فراهم می‌کند تا بتوان دقیقاً فهمید کدام عوامل محیطی باعث موفقیت یا شکست یک کود زیستی شده‌اند (Mawarda et al., 2020).

در نهایت، باید نگاه به شکست‌های مستند شده در آزمایش‌های مزرعه‌ای تغییر کند و این گزارش‌ها به عنوان گنجینه‌ای برای افزایش یادگیری به رسمیت شناخته شوند. مجلات علمی و مراکز تحقیقاتی باید انتشار پژوهش‌هایی را که شکست کود زیستی

میکروب تلقیح شده و جامعه میکروبی طبیعی خاک بستگی دارد. با تجزیه و تحلیل همه مواد شیمیایی کوچک (متابولیت‌ها) موجود در ناحیه ریشه در مزارع موفق و ناموفق، می‌توان مولکول‌های سیگنال‌دهنده و تغذیه‌ای کلیدی که باعث استقرار موفق میکروب و سودرسانی به گیاه می‌شوند را شناسایی کرد (Ferreira et al., 2024).

در گام نهایی، باید آزمون‌های آزمایشگاهی استاندارد طراحی شوند که ویژگی‌های مرتبط با موفقیت در مزرعه مانند سرعت بازیابی میکروب پس از یک دوره خشکی، توانایی تشکیل لایه محافظ (بیوفیلم) در شرایط شوری و قدرت رقابت و استقرار در خاک غیراستریل (که میکروب‌های بومی رقیب وجود دارند) را به سرعت اندازه‌گیری کنند. سپس با استفاده از هوش مصنوعی (یادگیری ماشین)، این داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های ژنتیکی همان میکروب‌ها مرتبط شوند. نتیجه، ایجاد یک سیستم پیش‌بینی کننده است که می‌تواند تنها بر اساس آزمایش‌های اولیه، شانس موفقیت یک سویه میکروبی را در شرایط پیچیده واقعی مزرعه با دقت بالا پیش‌بینی کند (Bhattacharyya et al., 2023).

استانداردسازی ارزیابی‌های چندمرحله‌ای در مزرعه

متغیر بودن و غیرقابل پیش‌بینی بودن نتایج کاربرد کودهای زیستی در مزارع تا حد زیادی ناشی از نبود روش‌های استاندارد، جامع و حساس به شرایط خاص هر منطقه برای ارزیابی است. برای تولید داده‌های قابل اعتماد، مقایسه‌پذیر و قابل تفسیر، تحقیقات میدانی باید یک رویکرد پلکانی و چندسطحی را اتخاذ کنند که به‌طور صریح، فیلترهای محیطی معرفی شده در این مقاله را در

¹ Biofilm

شناسایی کرده و قبل از تلقیح، توصیه‌های اصلاحی لازم را انجام دهند. این رویکرد به‌ویژه در شرایط دیم که تنش‌های محیطی شدیدتری وجود دارد، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت تلقیح دارد (Ferreira et al., 2025; Yeremko et al., 2025; Zahran, 1999).

۲. فیلترهای زیستی (رقابتی): روش‌های نوین شناسایی میکروبی خاک، امکان شناخت جمعیت میکروب‌های بومی رقیب یا مهارکننده (آنتاگونیست) را پیش از تلقیح فراهم می‌سازد. بر این اساس، سیستم‌های پشتیبانی تصمیم می‌توانند توصیه کنند که استفاده از سویه‌های فرموله‌شده با حامل‌های محافظ (مثل بیوفیلیم‌های مصنوعی) در یک مزرعه ضرورت دارد یا خیر؛ این حامل‌ها میکروب را از رقابت سیدروفوری یا شکار شدن توسط پروتوزوآها در امان نگه می‌دارند. داده‌کاوی سوابق عملکرد کود زیستی در مزارع مشابه دارای جمعیت بومی رقابت‌کننده نیز می‌تواند پیش‌بینی کند که کدام سویه‌های میکروبی، سابقه استقرار موفق‌تری دارند. در این زمینه، نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که شناسایی ترکیب میکروبی بومی خاک پیش از تلقیح، شانس استقرار سویه‌های معرفی‌شده را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد (Mawarda et al., 2020; Mawarda et al., 2022; Kaminsky et al., 2019).

۳. فیلترهای فنی-مدیریتی (اجرایی): سیستم‌های هدایت خودکار و نرخ‌متغیر در ادوات کشاورزی دقیق، امکان توزیع یکنواخت و دقیق کود زیستی با عمق و غلظت متناسب با نیاز هر نقطه را فراهم می‌کنند که مستقیماً فیلتر «عدم پراکنش یکنواخت کود» را کاهش می‌دهد (Campo et al., 2010; Rocha et al., 2019). همچنین، پایش با حسگرهای طیفی می‌تواند شکست زود هنگام استقرار را در روزهای اولیه شناسایی کرده و امکان تلقیح مجدد یا اصلاحی را فراهم آورد. به‌عنوان

در مزرعه را نه‌تنها گزارش، بلکه تحلیل ریشه‌ای می‌کنند، فعالانه تشویق و پشتیبانی نمایند. چنین مطالعاتی بینش‌های منحصر به فردی ارائه می‌دهند که می‌توانند مبنای بازبینی معیارهای انتخاب سویه، بهبود فرمولاسیون و اصلاح دستورالعمل‌های مصرف قرار گیرند. از این رو، می‌توانند شکست‌های تکراری و پراکنده را به سرمایه‌ای دانش‌بنیان تبدیل کنند که پیشرفت کل این حوزه را شتاب می‌بخشد.

نقش کشاورزی دیجیتال در تلقیح زیستی دقیق

ادغام فناوری‌های کشاورزی دیجیتال و کشاورزی دقیق می‌تواند نقطه عطفی در به‌کارگیری کودهای زیستی ایجاد کند. این ابزارها امکان عبور از توصیه‌های کلی و ثابت که برای کل منطقه و هر فصل یکسان است، به مدیریت هوشمند، پویا و متناسب با شرایط لحظه‌ای هر نقطه از مزرعه را فراهم می‌کنند. چنین رویکردی مستقیماً با تغییرپذیری ذاتی عوامل محیطی که در قالب «فیلترهای شکست» معرفی شدند، مقابله کرده و شانس موفقیت را افزایش می‌دهد. شواهد تجربی و گزارش‌های متعدد نشان می‌دهند که فناوری‌های کشاورزی دیجیتال و دقیق، به‌طور خاص سه دسته از فیلترهای شکست را به شرح زیر کاهش می‌دهند:

۱. فیلترهای محیطی (غیرزیستی): حسگرهای خاک و سنجش از دور با پایش لحظه‌ای برخی از ویژگی‌های خاک ازجمله رطوبت، دما و شوری، امکان انتخاب زمان بهینه تلقیح را فراهم می‌کنند تا میکروب در شرایط حداقل تنش اسمزی و دمایی وارد خاک شود. همچنین، سیستم‌های توصیه‌گر مبتنی بر داده با تلفیق نقشه‌های بافت، pH و ماده آلی خاک، می‌توانند مناطق دارای محدودیت شیمیایی (مانند pH قلیایی یا کمبود کربن آلی) را

مثال، تصویربرداری فراطیفی قادر است تغییرات فیزیولوژیکی ظریف در گیاه (مانند بهبود وضعیت نیتروژن یا کاهش تنش آبی) را که بر اثر استقرار موفق میکروب‌های مفید ایجاد می‌شود، شناسایی و اندازه‌گیری کند (do Prado Ribeiro et al., 2018). پژوهش‌ها بر روی توسعه میکروب‌های گزارشگر مهندسی‌شده نیز متمرکز شده‌اند که طوری طراحی می‌شوند که تنها وقتی ژن‌های مرتبط با عملکرد مفیدشان فعال می‌شوند، یک سیگنال قابل ردیابی از خود ساطع کنند و اعتبارسنجی سریع و درون‌مزرعه‌ای از فعالیت واقعی کود زیستی را ممکن سازند (do Prado Ribeiro et al., 2018).

نسل آینده نرم‌افزارهای مدیریت مزرعه باید لایه‌های مختلف اطلاعات از قبیل نقشه‌های ثابت خاک (مانند بافت، آهک، ماده آلی)، داده‌های زنده و با جزئیات بالا از حسگرهای خاک (مثل رطوبت و دمای لحظه‌ای) و پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت آب‌وهوا را ترکیب کنند. چنین سیستم یکپارچه‌ای می‌تواند توصیه‌های دقیق و مختص هر نقطه از مزرعه برای تلقیح ارائه دهد. به این ترتیب که مثلاً با تحلیل شاخص تنش رطوبتی خاک در زمان کشت، نه تنها مشخص می‌کند که آیا در یک قطعه زمین خاص و در یک سال خاص، استفاده از کود زیستی ضروری است، بلکه پیشنهاد می‌دهد که کدام نوع یا فرمولاسیون خاص کود زیستی با توجه به سابقه عملکرد در شرایط محیطی مشابه، بیشترین شانس موفقیت را دارد. چنین رویکردی مستقیماً با توصیه‌های ایستا و کلی مقابله کرده و مسیر را برای تلقیح زیستی دقیق و هوشمند هموار می‌سازد (Kaminsky et al., 2019; Thakur et al., 2024).

نتیجه‌گیری

مرور نظام‌مند پژوهش‌های انجام‌شده نشان داد که شکاف آشکار بین عملکرد مطلوب کودهای زیستی

در آزمایشگاه و نتایج ضعیف‌تر آن‌ها در مزارع حبوبات دیم، تصادفی یا ناشی از یک نقص فنی ساده نیست، بلکه پیامد مستقیم عبور ناقص از سه دسته فیلتر شکست شامل فیلترهای محیطی (خشکی، شوری، pH قلیایی، دمای شدید)، زیستی (رقابت با سویه‌های بومی، شکارگری و آنتاگونیسم میکروبی) و فنی-مدیریتی (فرمولاسیون ناپایدار، روش کاربرد نامناسب و همزمانی با دوره تنش) است. همچنین، یافته‌ها حاکی از آن است که اغلب پژوهش‌های موجود به‌جای پرداختن به تعاملات پیچیده این سه محدودیت، بر بهینه‌سازی مجزای برخی از این عوامل (مانند انتخاب سویه برتر یا بهبود فرمولاسیون) متمرکز بوده‌اند که این خلأ روش‌شناختی، یکی از دلایل اصلی تداوم شکاف یادشده به‌شمار می‌رود.

بر اساس یافته‌های فوق، نویسندگان بر این باورند که برای موفقیت پایدار کودهای زیستی در زراعت دیم، باید به جای جستجوی یک میکروب خاص، به دنبال طراحی یک سیستم انعطاف‌پذیر و یکپارچه بود. در این راستا، سه محور راهبردی زیر پیشنهاد می‌شود: ۱. طراحی کنسرسیوم‌های میکروبی سازگار با شرایط بومی هر منطقه، ۲. توسعه فرمولاسیون‌های هوشمند با حامل‌های محافظ (مانند بیوفیلیم‌های مصنوعی) و ۳. تلفیق تلقیح با مدیریت یکپارچه مزرعه و فناوری‌های کشاورزی دقیق. با این حال، دستیابی به این اهداف تنها به پیشرفت فنی وابسته نیست؛ موانع اقتصادی (هزینه بالای فرمولاسیون‌های جدید) و اجتماعی (نیاز به آموزش و بازگرداندن اعتماد کشاورزان پس از تجربیات ناموفق پیشین) نیز باید به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، موفقیت نهایی در گرو اجرای پروژه‌های مشارکتی است که از همان ابتدا، توسعه فناوری، توانمندسازی بهره‌برداران و تحلیل اقتصادی را به‌صورت هم‌زمان و با مشارکت کشاورزان دنبال کنند.

- Abtahi SM, Seyed Sharifi R, Qaderi F. 2015. Influence of nitrogen fertilizer rates and seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, fertilizer use efficiency, rate and effective grain filling period of Soybean (*Glycine max* L.) in second cropping. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production* 24(3): 112-129. (In Persian)
- Adeniji A, Fadiji AE, Li S, Guo R. 2024. From lab bench to farmers' fields: Co-creating microbial inoculants with farmer's input. *Rhizosphere* 31: 100920.
- Ahmad HM, Fiaz S, Hafeez S, Zahra S, Shah AN, Gul B, Wang X. 2022. Plant growth-promoting rhizobacteria eliminate the effect of drought stress in plants: a review. *Frontiers in Plant Science* 13: 875774.
- Ali A, Jabeen N, Farruhbek R, Chachar Z, Laghari AA, Chachar S, Yang Z. 2025. Enhancing nitrogen use efficiency in agriculture by integrating agronomic practices and genetic advances. *Frontiers in Plant Science* 16: 1543714.
- Alleman AB, Peters JW. 2023. Mechanisms for generating low potential electrons across the metabolic diversity of nitrogen-fixing bacteria. *Applied and Environmental Microbiology* 89(5): e00378-23.
- Aloo BN, Dessureault-Rompré J, Tripathi V. 2023. Signaling and crosstalk of rhizobacterial and plant hormones that mediate abiotic stress tolerance in plants. *Frontiers in Microbiology* 14.
- Araujo AS, Pereira AP, de Medeiros EV, Mendes LW. 2025. Root architecture and the rhizosphere microbiome: shaping sustainable agriculture. *Plant Science*: 112599.
- Asik E, Kashif SZ, Oztas O. 2025. Plant tolerance mechanisms to DNA-damaging UV stress. *Journal of Experimental Botany*: eraf272.
- Azimzadeh Y, Mohammadzadeh A, Hasanian Khoshroo H, Ghahramanian G. 2025. Investigating the response of rainfed chickpea to different nitrogen fertilizer levels in cold regions. *Iranian Journal Pulses Research* 16(1): 177-191. (In Persian)
- Baber K, Jones C, McPhee K, Miller PR, Lamb P. 2023. Nitrogen fixation among pea and lentil varieties in the Northern Great Plains. *Agronomy Journal* 115(5): 2325-2338.
- Bannayan Aval M, Yaghoubi F, Rashidi Z, Bardehji S. 2018. Effect of different nitrogen levels on phenology, growth indices and yield of two lentil cultivars under rainfed conditions in Mashhad. *Iranian Journal of Field Crops Research* 15(4): 939-956. (In Persian)
- Bao S, Chai X, Liao L, Li X, Shi L, Dong X, Li Q. 2025. Construction of nitrogen critical dilution curve and differences in nitrogen nutrition characteristics in different organs of maize varieties with contrasting nitrogen efficiencies. *Frontiers in Plant Science* 16: 1577962.
- Bhattacharyya A, Mavrodi O, Bhowmik N, Weller D, Thomashow L, Mavrodi D. 2023. Bacterial biofilms as an essential component of rhizosphere plant-microbe interactions. In *Methods in Microbiology* Vol. 53, pp. 3-48. Academic Press.
- Bouremani N, Cherif-Silini H, Silini A, Bouket AC, Luptakova L, Alenezi FN, ... Belbahri L. 2023. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): A rampart against the adverse effects of drought stress. *Water* 15(3): 418.
- Campo RJ, Araujo RS, Mostasso FL, Hungria M. 2010. In-furrow inoculation of soybean as alternative to fungicide and micronutrient seed treatment. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 34: 1103-1112.
- Cheng Y, Narayanan M, Shi X, Chen X, Li Z, Ma Y. 2023. Phosphate-solubilizing bacteria: Their agroecological function and optimistic application for enhancing agro-productivity. *Science of The Total Environment* 901: 166468.
- Dane JH, Topp CG (Eds.). 2020. *Methods of soil analysis, Part 4: Physical Methods*. John Wiley & Sons.
- da Silva AVR, Cunha IDCM, Pellegrinetti TA, Boleta EHM, Zagatto LFG, Zagatto SDSS, Mendes LW. 2025. Functional adaptations of the rhizosphere microbiome for drought-tolerance promotion in common bean. *Plant Stress*: 100860.
- Debnath S, Sorongpong S, Das N, Choure K, Agnihotri VK, Pandey P. 2025. Sustainable lentil intensification in rice-fallow systems through bioaugmentation with atypical rhizobia and

- endophytes modulates rhizosphere and nodule microbiome dynamics. *BMC Plant Biology* 25(1): 1237.
- Ding Y, Yi Z, Fang Y, He S, Li Y, He K, Jin Y. 2021. Multi-omics reveal the efficient phosphate-solubilizing mechanism of bacteria on rocky soil. *Frontiers in Microbiology* 12: 761972.
- do Prado Ribeiro L, Klock ALS, Filho JAW, Tramontin MA, Trapp MA, Mithöfer A, Nansen C. 2018. Hyperspectral imaging to characterize plant-plant communication in response to insect herbivory. *Plant Methods* 14(1): 54.
- Dutta S, Yu SM, Lee YH. 2020. Assessment of the contribution of antagonistic secondary metabolites to the antifungal and biocontrol activities of *Pseudomonas fluorescens* NBC275. *The Plant Pathology Journal* 36(5): 491.
- Ebadi N, Seyed Sharifi R, Sedghi M. 2019. Effects of biofertilizers on yield and some biochemical and physiological traits of Sahand barley cultivar under rainfed and supplementary irrigation. *Environmental Stresses in Crop Sciences* 12(4): 1141-1150. (In Persian) doi: 10.22077/escs.2019.1854.1439
- El-Hamid A, Azza R, AL-Kamar FA, Husein ME. 2013. Impact of some organic and biofertilizers soil amendments on the fertility status, some soil properties, and productivity of sandy soils. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering* 4(10): 989-1007.
- Ersikine W, Sarker A, Kumar S. 2011. Crops that feed the world 3. Investing in lentil improvement toward a food secure world. *Food Security* 3(2): 127-139.
- Fadiji AE, Xiong C, Egidi E, Singh BK. 2024. Formulation challenges associated with microbial biofertilizers in sustainable agriculture and paths forward. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment* 3(3): e70006.
- Fatehi F, Ebrahimi A, Maleki M. 2021. Efficacy of auxin-producing *Bacillus* strains on vegetative traits and relative expression of ARF15 gene in two genotypes of chickpea under salinity stress. *Genetic Engineering and Biosafety Journal* 10(1): 93-107. (In Persian)
- Feng K, Wang Q, Tao K, Zhang Y, Yuan J, Li Z, ... Hugueny B. 2025. Environmental versus biotic filtering: what if species traits contribute to both? *Oikos*: e11438.
- Ferreira JDP, Vidal MS, Baldani JI. 2025. Exploring ACC deaminase-producing bacteria for drought stress mitigation in *Brachiaria*. *Frontiers in Plant Science* 16: 1607697.
- Ferreira MJ, Veríssimo AC, Pinto DC, Sierra-Garcia IN, Granada CE, Cremades J, Cunha Â. 2024. Engineering the rhizosphere microbiome with plant growth promoting bacteria for modulation of the plant metabolome. *Plants* 13(16): 2309.
- Flora Y, Rabha P, Shinde A, Jha P, Jobby R. 2021. Non-symbiotic bacteria for soil nitrogen fortification. In *Sustainable Agriculture Reviews* 52 pp. 417-435. Springer International Publishing.
- Gaur PM, Jukanti AK, Samineni S, Chaturvedi SK, Basu PS, Babbar A, Laxmipathi Gowda CL. 2013. Climate change and heat stress tolerance in chickpea. In *Climate Change and Plant Abiotic Stress Tolerance* pp. 837-856.
- Giannelli G, Potestio S, Visioli G. 2023. The contribution of PGPR in salt stress tolerance in crops: Unravelling the molecular mechanisms of cross-talk between plant and bacteria. *Plants* 12(11): 2197.
- Hawkesford MJ, Griffiths S. 2019. Exploiting genetic variation in nitrogen use efficiency for cereal crop improvement. *Current Opinion in Plant Biology* 49: 35-42.
- Hynes RK, Craig KA, Covert D, Rennie RJ, Smith RS. 1995. Liquid rhizobial inoculants for lentil and field pea. *Journal of Production Agriculture* 8(4): 547-552.
- Jiménez-Mejía R, Medina-Estrada RI, Carballar-Hernández S, Orozco-Mosqueda MDC, Santoyo G, Loeza-Lara PD. 2022. Teamwork to survive in hostile soils: use of plant growth-promoting bacteria to ameliorate soil salinity stress in crops. *Microorganisms* 10(1): 150.
- Jung J, Ahn S, Kim DH, Riu M. 2024. Triple interactions for induced systemic resistance in plants. *Frontiers in Plant Science* 15: 1464710.
- Kabir E, Kim KH, Kwon EE. 2023. Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Frontiers in Environmental Science* 11: 1324533.

- Kanishka S, Gnanachitra M, Kumutha K, Poorniammal R, Thiyageshwaari S. 2025. Formulation breakthroughs: The key to tackling biofertilizer shelf life and quality challenges. *Journal of Pure and Applied Microbiology*. 19(4), 2470. doi: 10.22207/JPAM.19.4.25
- Kaur A, Singh A, Kaur H. 2023. From lab to land: applications and challenges of biofertilizers. *International Journal of Creative Research Thoughts* 11(12): 1-8.
- Li C, Shi Y, Yu Z, Zhang Y, Zhang Z. 2025. Optimizing nitrogen application strategies can improve grain yield by increasing dry matter translocation, promoting grain filling, and improving harvest indices. *Frontiers in Plant Science* 16: 1565446.
- Li H, Zhu X, Wang J, Wei Y, Nai F, Yu H, Wang X. 2024. Unraveling differential characteristics and mechanisms of nitrogen uptake in wheat cultivars with varied nitrogen use efficiency. *Plant Physiology and Biochemistry* 206: 108278.
- Li J, Wang J, Liu H, Macdonald CA, Singh BK. 2022. Application of microbial inoculants significantly enhances crop productivity: a meta-analysis of studies from 2010 to 2020. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment* 1(3): 216-225.
- Liu L, Knight JD, Lemke RL, Farrell RE. 2019. A side-by-side comparison of biological nitrogen fixation and yield of four legume crops. *Plant and Soil* 442(1): 169-182.
- Mahdavi Mashaki K, Nasrollahnezhad Ghomi AA, Zaynali Nezhad K, Yamchi A, Soltanloo H, Thudi M, Kumar Varshney R. 2019. Transcription factors evaluation in a transcriptome analysis on chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Journal of Crop Breeding* 11(30): 133-141. (In Persian)
- Malusá E, Vassilev N. 2014. A contribution to set a legal framework for biofertilisers. *Applied Microbiology and Biotechnology* 98(15): 6599-6607.
- Mataranyika PN, Bez C, Venturi V, Chimwamurombe PM, Uzabakiriho JD. 2024. Rhizospheric, seed, and root endophytic-associated bacteria of drought-tolerant legumes grown in arid soils of Namibia. *Heliyon* 10(17).
- Mawarda PC, Mallon CA, Le Roux X, Van Elsas JD, Salles JF. 2022. Interactions between bacterial inoculants and native soil bacterial community: The case of spore-forming *Bacillus* spp. *FEMS Microbiology Ecology* 98(12): fiac127.
- Mawarda PC, Le Roux X, Van Elsas JD, Salles JF. 2020. Deliberate introduction of invisible invaders: a critical appraisal of the impact of microbial inoculants on soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry* 148: 107874.
- Moafi Pasha Kalai R, Rameeh V, Faraji A, Teymoori Shamooshak A. 2012. The effect of different amounts of nitrogen fertilizer and sowing date on phenology traits, seed and yield components of canola (*Brassica napus* L.). *Plant and Ecosystem* 8(32): 101-114. (In Persian)
- Mohammadi S, Sepehry A, Farzam M, Barani H. 2022. Effect of soil properties modifier on physiological responses of *Lycium depressum* Stocks to drought stress. *Water and Soil* 36(4): 477-491. (In Persian) doi: 10.22067/jsw.2022.76508.1163
- Nabati J, Nezami A, Yousefi A, Oskoueian E, Oskoueian A, Ahmadi-Lahijani MJ. 2025. Biofertilizers containing plant growth promoting rhizobacteria enhance nutrient uptake and improve the growth and yield of chickpea plants in an arid environment. *Scientific Reports* 15(1): 8331.
- Namvar A, Seyed Sharifi R, Khandan T. 2011. Growth analysis and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in relation to organic and inorganic nitrogen fertilization. *Ekologija* 57(3): 97-108.
- Naveed M, Mehboob I, Shaker MA, Hussain MB, Farooq M. 2015. Biofertilizers in Pakistan: initiatives and limitations. *International Journal of Agriculture and Biology* 17(3).
- Niri HH, Tobeh A, Gholipouri A, Zakaria RA, Mostafaei H, Jamaati-e-Somarin S. 2010. Effect of nitrogen and phosphorous on yield and protein content of lentil in dryland condition. *American Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Sciences* 8(2): 185-188.
- Niu B, Wang W, Yuan Z, Sederoff RR, Sederoff H, Chiang VL, Borriss R. 2020. Microbial interactions within multiple-strain biological control agents impact soil-borne plant disease. *Frontiers in Microbiology* 11: 585404.
- Nouri SH, Kashani Sh, Nabipour M, Mamghani R. 2005. Effect of nitrogen fertilizer application on yield and yield components of faba bean cultivars under Ahvaz climatic conditions. In:

- Proceedings of the First National Conference on Legumes of Iran. November 20, 2005. Ferdowsi University of Mashhad. pp. 419-422.
- Omidi Gargari V, Dabbagh Mohammadi Nasab A, Amini R. 2025. The effect of phosphate and Nitragin biofertilizers on yield and yield components of rain-fed lentil (*Lens culinaris* Medik). Journal of Agricultural Science and Sustainable Production 35(3): 139-151. (In Persian) doi: 10.22034/saps.2024.61390.3211
- Pan L, Cai B. 2023. Phosphate-solubilizing bacteria: advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects. Microorganisms 11(12): 2904.
- Pereira JF, Oliveira ALM, Sartori D, Yamashita F, Mali S. 2023. Perspectives on the use of biopolymeric matrices as carriers for plant-growth promoting bacteria in agricultural systems. Microorganisms 11(2): 467.
- Pourtaheri SN, Rahimi MM, Vaezi B, Ahmadikhah A. 2012. Effect of seed density and weed control on yield and yield components of two lentil dryland-specific cultivars in subtropical conditions. EJCP 5(4): 135-149. (In Persian with English Abstract)
- Pradhan N, Singh S, Saxena G, Pradhan N, Koul M, Kharkwal AC, Sayyed R. 2025. A review on microbe-mineral transformations and their impact on plant growth. Frontiers in Microbiology 16: 1549022.
- Priyadarshini C, Lal R, Yuan P, Liu W, Adhikari A, Bhandari S, Xia Y. 2025. Plant disease suppressiveness enhancement via soil health management. Biology 14(8): 924.
- Rahimi-Moghaddam S, Amiri S, Eyni-Nargeseh H. 2023. Assessing chickpea attainable yield and closing the yield gaps caused by agronomic and genetic factors. Field Crops Research 303: 109137.
- Rajabi R. 2015. Evaluation of genetic diversity for fertilizer use efficiency in bread wheat genotypes under rainfed conditions of Iran. Applied Field Crops Research 28(3): 24-34. (In Persian)
- Rocha I, Ma Y, Souza-Alonso P, Vosátka M, Freitas H, Oliveira RS. 2019. Seed coating: a tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops. Frontiers in Plant Science 10: 1357.
- Romano I, Ventrino V, Pepe O. 2020. Effectiveness of plant beneficial microbes: overview of the methodological approaches for the assessment of root colonization and persistence. Frontiers in Plant Science 11: 6.
- Sabaghpour SH, Shahbazi H, Rezakhanlou R. 2019. The effect of using biological and chemical nitrogen fertilizers on yield and yield components in lentil cultivars. Iranian Journal Pulses Research 10(1): 40-51. (In Persian)
- Sadiq M, Rahim N, Iqbal MA, Alqahtani MD, Tahir MM, Majeed A, Ahmed R. 2023. Rhizobia inoculation supplemented with nitrogen fertilization enhances root nodulation, productivity, and nitrogen dynamics in soil and black gram (*Vigna mungo* (L.) Hepper). Land 12(7): 1434.
- Seyed Sharifi R, Seyed Sharifi R. 2021. Effects of starter nitrogen, methanol and bio fertilizers application on yield, nodulation and grain filling period of rainfed lentil. Journal of Crop Improvement 22(3): 445-460. (In Persian)
- Shaban M, Mansourifar S, Ghobadi M, Sabaghpour SH. 2013. Investigation of phenological and morphological characteristics and correlation them with yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress and N fertilizer in Kermanshah province. Iranian Journal Pulses Research 4(1): 68-59. (In Persian)
- Sharma KD, Srivastava S. 2018. Failure mode and effect analysis (FMEA) implementation: a literature review. Journal of Advance Research in Aeronautics and Space Science 5(1): 1-17.
- Shilpha J, Song J, Jeong BR. 2023. Ammonium phytotoxicity and tolerance: An insight into ammonium nutrition to improve crop productivity. Agronomy 13(6): 1487.
- Shirui H, Hatami A, Zeidali E, Alizadeh Y. 2023. Effect of foliar application of salicylic acid and biofertilizers on yield and yield components of chickpea cultivars (*Cicer arietinum* L.) in dryland conditions. Plant Production and Genetics 4(1): 71-86. (In Persian) doi: 10.34785/J020.2022.017
- Shumilina J, Soboleva A, Abakumov E, Shtark OY, Zhukov VA, Frolov A. 2023. Signaling in legume-Rhizobia symbiosis. International Journal of Molecular Sciences 24(24): 17397.

- Silva LID, Pereira MC, Carvalho AMXD, Buttrós VH, Pasqual M, Dória J. 2023. Phosphorus-solubilizing microorganisms: a key to sustainable agriculture. *Agriculture* 13(2): 462.
- Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH (Eds.). 2020. *Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods*. John Wiley & Sons.
- Taheri A, Kafi M, Nabati J, Nezami A. 2022. Enhancement of plant growth and yields in chickpea (*Cicer arietinum* L.) desi type in response to seed priming and bio-fertilizer applications. *Iranian Journal of Field Crop Science* 53(3): 183-197. (In Persian) doi: 10.22059/ijfcs.2021.315293.654780
- Tariq A, Guo S, Farhat F, Shen X. 2025. Engineering synthetic microbial communities: diversity and applications in soil for plant resilience. *Agronomy* 15(3): 513.
- Thakur R, Dhar H, Mathew S, Gulati A. 2024. PGPR inoculants journey from lab to land: Challenges and limitations. *Microbiological Research* 289: 127910.
- Walley FL, Boahen SG, Hnatowich K, Stevenson C. 2005. Nitrogen and phosphorus fertility management for desi and kabuli chickpea. *Canadian Journal of Plant Science* 85: 73-79.
- Yeremko L, Czopek K, Staniak M, Marenych M, Hanhur V. 2025. Role of environmental factors in legume-rhizobium symbiosis: A review. *Biomolecules* 15(1): 118.
- Yokamo S, Irfan M, Huan W, Wang B, Wang Y, Ishfaq M, Wang H. 2023. Global evaluation of key factors influencing nitrogen fertilization efficiency in wheat: a recent meta-analysis (2000-2022). *Frontiers in Plant Science* 14: 1272098.
- Zahran HH. 1999. Rhizobium-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 63(4): 968-989.
- Zhao G, Zhu X, Zheng G, Meng G, Dong Z, Baek JH, Jia B. 2024. Development of biofertilizers for sustainable agriculture over four decades (1980–2022). *Geography and Sustainability* 5(1): 19-28.
- Zho L, Huang J, Lu X, Zhou C. 2023. Corrigendum: Development of plant systemic resistance by beneficial rhizobacteria: Recognition, initiation, elicitation and regulation. *Frontiers in Plant Science* 13: 1118073.



Mechanisms Affecting the Efficiency of Biofertilizers in Rainfed Legumes in Arid and Semi-Arid Regions: A Lab-to-Farm Gap Analysis

Yaser Azimzadeh^{1*}

1- Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research Education and Extension (AREEO), Maragheh, Iran.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Biofertilizers are considered one of the pillars of sustainable agriculture, aiming to reduce dependence on chemical inputs and enhance the productivity of agroecosystems. However, one of the major challenges in the application of these fertilizers is their poor or unsuccessful performance under real field conditions compared to controlled laboratory environments. This inconsistency, known in the scientific literature as the "lab-to-farm gap", is associated with the inherent complexities of agricultural systems; as beneficial microbes are transferred from isolated and optimal conditions into the dynamic "soil-plant-climate-management" system, their efficiency declines. This issue is of particular sensitivity in arid and semi-arid regions, where rainfed legumes play a key role in food security and farmers' livelihoods, due to the occurrence of concurrent environmental stresses. Therefore, an in-depth understanding of the factors creating this gap and the presentation of an analytical framework for identifying critical points is an essential step toward enhancing the predictability and success of biofertilizers in such fragile ecosystems.

Methodology: This article was conducted with an analytical-diagnostic review approach, utilizing a qualitative meta-analysis method of previous studies. For this purpose, all indexed articles published between 2015 and 2025 in reputable scientific databases such as SID, Web of Science, Scopus, and ScienceDirect were extracted using keywords related to biofertilizer performance in rainfed legumes and biotic and abiotic stresses. Subsequently, by applying inclusion and exclusion criteria, approximately 100 studies were selected and examined in terms of three main components: microbial strain characteristics, environmental and farm management conditions, and formulation and application methods. In the next step, all variables affecting the reduction of biofertilizer efficiency were categorized into three groups of environmental, biological, and technical-managerial filters. For each of these filters, based on a systematic review of empirical evidence, failure mechanisms were identified and prioritized. Finally, the proposed analytical-diagnostic model (failure filters) was developed and structured with the aim of providing an operational roadmap for the targeted design of strains, formulations, and management strategies.

Research findings: The beneficial mechanisms of biofertilizers (such as biological nitrogen fixation, nutrient solubilization, hormonal regulation, and induction of systemic resistance) must sequentially pass through three filters to be effective in the field: environmental filters (drought stress, temperature, and soil chemistry), biological filters (competition with native microbiome and predation), and technical-managerial filters (formulation problems, application method, and incompatibility with inputs). Together, these filters synergistically reduce the efficiency of biofertilizers. The central insight emerging from this analysis is the critical need for a paradigm shift—away from a laboratory-centric, strain-centric screening logic, and toward a systems-based, field-tailored design framework. In this revised approach, strain selection, formulation strategy, and application method are not treated as independent steps but as interdependent components that must be co-optimized according to the specific edaphic, climatic, and agronomic context of each target field. Within this framework, the primary criterion for strain prioritization shifts from maximal in vitro functionality to robust in situ survivability and competitive fitness under realistic field conditions. Concomitantly, advanced formulation technologies and complementary agronomic interventions should be purposefully engineered to shield microbial inoculants from the identified filters. As a forward-looking research agenda, this study advocates the integration of omics-based tools for intelligent strain discovery, the establishment of multi-tiered field-scale evaluation pipelines, and the adoption of digital agriculture platforms to enable site-specific and precision-guided biofertilizer deployment.

Keywords: Environmental stresses, Failure filters, Microbial formulation, Microbial survivability, Precision agriculture

* Corresponding author: y.azimzadeh@areeo.ac.ir
Submit date: 2026/07/16 Accept date: 2026/09/17

