نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
(مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب)
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
(Holistic and Smart soil and water management) 19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

باکتری‌های آزادکننده پتاسیم به‌عنوان کود زیستی: تحلیل چالش‌های کلیدی از آزمایشگاه تا مزرعه و چشم‌اندازهای نوآورانه

بهمن خوشرو[1*] و هوشنگ خسروی[2]
۱- محقق پسادکتری موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۲- دانشیار موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
نویسنده مسئول: E-mail: bahmankhoshru@yahoo.com

۱ چکیده

باکتری‌های آزادکننده پتاسیم (KRB) پتانسیل عظیمی برای افزایش فراهمی پتاسیم از کانی‌های خاک دارند، اما کاربرد عملی آن‌ها به دلیل شکاف عمیق بین نتایج آزمایشگاهی و عملکرد مزرعه‌ای با چالش‌های جدی مواجه است. این مقاله مروری، ضمن بررسی سازوکارهای عملکردی KRBها، به تحلیل انتقادی موانع کلیدی می‌پردازد که مانع تجاری‌سازی موفق آن‌ها می‌شوند؛ این موانع شامل بقای ضعیف در خاک، پیچیدگی‌های فرمولاسیون و رقابت با میکروب‌های بومی است. در این راستا، راهکارهای فناورانه و نوین برای غلبه بر این چالش‌ها، از جمله فرمولاسیون‌های پیشرفته مبتنی بر نانوتکنولوژی و مهندسی متابولیک سویه‌ها، مورد بحث قرار می‌گیرد. این مقاله نتیجه‌گیری می‌کند که موفقیت آینده KRBها در گرو یک تغییر پارادایم از صرفاً جداسازی سویه‌ها به سمت یک رویکرد مهندسی‌شده و یکپارچه برای تضمین کارایی آن‌ها در اکوسیستم واقعی خاک است.

۲ کلمات کلیدی: آزادسازی، زیست‌فراهمی، کاربرد میدانی، کود زیستی، میکا، هوازدگی زیستی.

۳ مقدمه

پتاسیم (K) به‌عنوان یکی از عناصر پرمصرف اصلی گیاه، نقش‌های حیاتی متعددی در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان ازجمله فعال‌سازی آنزیم‌ها، سنتز پروتئین و نشاسته، انتقال مواد فتوسنتزی و تنظیم تعادل آبی ایفا می‌کند (Kuzin and Solovchenko, 2021). تأمین کافی پتاسیم منجر به بهبود رشد، افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی و درنهایت افزایش عملکرد کمی و کیفی محصولات می‌شود (Johnson et al., 2022)، درحالی‌که کمبود آن رشد و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (Abbas et al., 2021). بخش اعظم پتاسیم خاک (بیش از ٪۹۰) به‌صورت غیرتبادلی (ساختمانی) در درون ساختار کانی‌های سیلیکاتی اولیه (فلدسپارها و میکاها) و کانی‌های رسی (ایلیت و ورمیکولیت) تثبیت شده است (Yadav and Sidhu, 2016). آزادسازی پتاسیم از این کانی‌ها از طریق هوازدگی فیزیکی و شیمیایی بسیار کند است و اغلب پاسخگوی نیاز گیاهان در سیستم‌های کشاورزی متراکم نیست. این مسئله، منجر به وابستگی به کودهای شیمیایی می‌شود که منابع محدودی داشته و می‌توانند پیامدهای زیست‌محیطی در پی داشته باشند (Rawat et al., 2016). در این میان، باکتری‌های آزادکننده پتاسیم (KRB[1] یا KSB[2]) به‌عنوان راهکاری زیستی برای افزایش فراهمی پتاسیم از منابع معدنی خاک مطرح شده‌اند (Sarikhani and Ebrahimi, 2024). این مقاله، ضمن مرور اجمالی بر دانش موجود در زمینه KRBها، به بررسی چالش‌ها و چشم‌اندازهای کاربرد آن‌ها به‌عنوان کود زیستی می‌پردازد.

[1] Potassium-Releasing Bacteria
[2] Potassium Solubilizing Bacteria

۴ باکتری‌های آزادکننده پتاسیم (KRB) و سازوکارهای عملکردی آن‌ها

ریزجانداران خاکزی متنوعی شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها و اکتینوباکتری‌ها قادر به هوازدگی زیستی کانی‌های پتاسیم‌دار هستند. در این میان، باکتری‌های آزادکننده پتاسیم به دلیل تنوع و سرعت رشد بالا، بیشترین توجه را به خود جلب کرده‌اند و جنس‌های متعددی از آن‌ها با این قابلیت شناسایی شده‌اند (Sarikhani and Ebrahimi, 2024). این باکتری‌ها از طریق چندین سازوکار اصلی، پتاسیم را از ساختار کانی‌ها آزاد می‌کنند. یک تحلیل انتقادی از این سازوکارها، شامل شواهد کلیدی، محدودیت‌ها و اهمیت هر یک در شرایط مختلف خاک، در جدول ۱ ارائه شده است. این مکانیسم‌ها عمدتاً شامل تولید اسیدهای آلی (اسیدولیز)، کلات‌سازی با سیدروفورها و تولید پلی‌ساکاریدهای خارج‌سلولی (EPS) می‌باشند، در حالی که نقش آنزیم‌های تخصصی هنوز در حد فرضیه است.

جدول ۱: تحلیل انتقادی سازوکارهای آزادسازی پتاسیم توسط باکتری‌ها (KRB)

سازوکار	شواهد کلیدی	محدودیت‌ها	اهمیت در شرایط مختلف خاک	منبع
تولید اسیدهای آلی[۳]	همبستگی قوی بین افت pH و آزادسازی K؛ شناسایی اسیدهای گلوکونیک، اگزالیک و سیتریک در محیط کشت.	کارایی در خاک‌های آهکی با بافر بالا محدود است؛ آزادسازی فلزات سمی (مانند Al^{3+}) در خاک‌های اسیدی.	سازوکار غالب و اثبات‌شده در شرایط آزمایشگاهی؛ بیشترین تأثیر در خاک‌های اسیدی تا خنثی با ماده آلی کافی.	Saeed et al. (۲۰۲۱)
تولید سیدروفور[۴]	هوازدگی کانی‌های آهن‌دار (مانند بیوتیت) با کلات کردن Fe^{3+} و Al^{3+} ساختاری و ناپایدار کردن شبکه بلوری.	سازوکار غیرمستقیم؛ سهم کمی آن در آزادسازی کل پتاسیم در مقایسه با تولید اسید، هنوز نامشخص است.	اهمیت در خاک‌های قلیایی و آهکی با فراهمی کم آهن؛ مؤثر برای کانی‌های فرومنیزین.	Sarikhani & Ebrahimi (۲۰۲۴)
تولید پلی‌ساکاریدهای خارج‌سلولی (EPS)	تشکیل بیوفیلم بر سطح کانی‌ها؛ ایجاد ریزمحیط اسیدی و به دام انداختن کاتیون‌ها توسط گروه‌های عاملی EPS.	نقش اصلی EPS، چسبندگی و محافظت است؛ آزادسازی مستقیم پتاسیم یک اثر ثانویه و کمتر مطالعه‌شده است.	در تمام خاک‌ها برای استقرار و بقای باکتری حیاتی است؛ کارایی سایر مکانیسم‌ها را از طریق متمرکز کردن فعالیت میکروبی، افزایش می‌دهد.	Khoshru et al(۲۰۲۰).
نقش آنزیم‌های تجزیه‌کننده سیلیکات	شواهد مستقیم بسیار محدود؛ مطالعات عمدتاً فرضی هستند و به آنزیم‌های ناشناخته "سیلیکاز" اشاره دارند.	انرژی‌بر بودن تولید این آنزیم‌ها آن را به یک استراتژی متابولیکی نامحتمل تبدیل می‌کند؛ شواهد موجود عمدتاً همبستگی هستند.	نقش آن در شرایط واقعی خاک در حد فرضیه باقی مانده و اهمیت عملی آن نامشخص است؛ نیازمند تحقیقات پیشرفته.	Meena et al. (۲۰۱۵)

۵ کانی‌های سیلیکاتی پتاسیم‌دار

کانی‌های سیلیکاتی، منبع اصلی پتاسیم در درازمدت هستند (Srikanth, 2020). گروه‌های اصلی این کانی‌ها در خاک شامل فلدسپارهای پتاسیم (ارتوکلازو میکروکلین)، میکاها (موسکویت و بیوتیت) و کانی‌های رسی حاوی پتاسیم (ایلیت

[۳] Acidolysis
[۴] Chelation

و ورمیکولیت) می‌باشند (De and McHenry, 2012). مقاومت این کانی‌ها در برابر هوازدگی و سرعت آزادسازی پتاسیم از آن‌ها متفاوت است؛ به‌طورکلی، مقاومت کانی‌ها در برابر هوازدگی و آزادسازی پتاسیم، به ترتیب از کانی‌های رسی حاوی پتاسیم (کمترین مقاومت) به میکاها و سپس فلدسپارهای پتاسیم (بیشترین مقاومت) افزایش می‌یابد (Jena, 2021).

ساختار بلوری و ترکیب شیمیایی کانی‌ها بر مقاومت آن‌ها در برابر هوازدگی زیستی تأثیر می‌گذارد (Raj and Tembhurkar, 2024). در فلدسپارها، یون K^+ در شبکه سه‌بعدی مستحکمی قرار گرفته و آزادسازی آن دشوار است. در میکاها، یون‌های K^+ در فضای بین لایه‌های ۲:۱ قرار دارند و آزادسازی آن‌ها از طریق هوازدگی لبه‌ها یا جایگزینی یونی، سریع‌تر از فلدسپارها رخ می‌دهد (Raj and Tembhurkar, 2024). ایلایت[5] نیز پتاسیم بین‌لایه‌ای دارد که راحت‌تر از میکاهای اولیه آزاد می‌شود (Meena et al., 2015). فراهمی زیستی پتاسیم از این کانی‌ها برای ریزجانداران و گیاهان اغلب پایین است (Yadav and Sidhu, 2016). KRBها با تسریع هوازدگی زیستی، این پتاسیم تثبیت‌شده را به شکل های محلول یا تبادلی تبدیل کرده و فراهمی زیستی آن را، به‌ویژه در ریزوسفر، افزایش می‌دهند (Sindhu et al., 2016).

۶ کاربرد KRB به‌عنوان کود زیستی

استفاده از KRB به‌عنوان کود زیستی، رویکردی امیدوارکننده برای افزایش فراهمی پتاسیم در خاک و بهبود تغذیه گیاهی است. بااین‌حال، موفقیت این فناوری درگرو درک دقیق پتانسیل‌ها، چالش‌های پیش رو و اتخاذ راهکارهای مناسب برای بهبود عملکرد آن‌ها در شرایط واقعی مزرعه است.

۶-۱ بقا، استقرار و فعالیت KRB در خاک

پس از تلقیح کود زیستی حاوی KRB، این باکتری‌ها وارد اکوسیستم پیچیده و پویای خاک می‌شوند. در این محیط، آن‌ها برای بقا و استقرار موفق، با چالش‌های متعددی مواجه هستند. رقابت شدید با جوامع میکروبی بومی برای دستیابی به منابع غذایی و جایگاه‌های زیستی، یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها است. علاوه بر این، عوامل زیستی دیگری نظیر شکار توسط پروتوزوئرها و آلودگی به باکتریوفاژها نیز می‌توانند جمعیت باکتری‌های تلقیح شده را به‌شدت کاهش دهند (Esitken, 2011). توانایی سویه‌های KRB در تشکیل بیوفیلم[6] (زیست‌لایه) بر روی سطح ریشه یا ذرات کانی که یک ساختار محافظتی ایجاد کرده و دسترسی به مواد مغذی را تسهیل می‌کند و همچنین استقرار موفق در ناحیه اطراف ریشه که سرشار از ترشحات ریشه‌ای است (ریزوسفر)، برای فعالیت مؤثر و طولانی‌مدت آن‌ها و درنتیجه آزادسازی پایدار پتاسیم، حیاتی است (Khoshru et al., 2019; Khosravi et al., 2024). تنها سویه‌هایی که قادر به غلبه بر این موانع اکولوژیکی و حفظ جمعیت فعال خود در خاک هستند، می‌توانند نقش مؤثری به‌عنوان کود زیستی ایفا کنند.

۶-۲ عوامل مؤثر بر کارایی KRB در خاک

کارایی KRB در خاک به‌شدت تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی محیط قرار دارد (Gomez et al., 2020). pH خاک یکی از مهم‌ترین این عوامل است که هم بر حلالیت کانی‌ها و هم بر فعالیت آنزیم‌های باکتریایی و تولید اسیدهای آلی مؤثر است؛ اغلب سویه‌های KRB در محدوده pH خنثی تا کمی اسیدی فعالیت بهتری از خود نشان می‌دهند، اگرچه سویه‌های سازگار با خاک‌های قلیایی نیز شناسایی شده‌اند (Niu et al., 2022). رطوبت خاک برای فعالیت متابولیکی ریزجانداران و انتقال مواد محلول ضروری است و دما نیز به‌طور مستقیم بر سرعت واکنش‌های آنزیمی و رشد باکتری‌ها تأثیر می‌گذارد. بافت و ساختار خاک نیز از طریق تأثیر بر تهویه (تأمین اکسیژن برای سویه‌های هوازی)،

[5] Illite
[6] Biofilm

ظرفیت نگهداری آب و دسترسی باکتری‌ها به سطوح کانی‌ها، نقش مهمی ایفا می‌کنند. علاوه بر این، دسترسی به منابع کربن آلی قابل‌تجزیه (مانند مواد آلی خاک یا ترشحات ریشه‌ای)، به‌عنوان منبع انرژی برای تولید ترکیبات حل‌کننده پتاسیم، برای فعالیت KRBها حیاتی است (Gomez et al., 2020). درنهایت، نوع و ویژگی‌های کانی‌شناسی خاک، به‌طور مستقیم بر نوع کانی‌های پتاسیم‌دار موجود و سهولت نسبی آزادسازی پتاسیم از ساختار آن‌ها تأثیر می‌گذارد (Gomez et al., 2020) و این امر نیز باید در انتخاب سویه‌های مناسب KRB مدنظر قرار گیرد.

۶-۳ نتایج کاربرد و عملکرد KRB در شرایط گلخانه‌ای و مزرعه‌ای

بررسی مطالعات میدانی اخیر نشان می‌دهد که موفقیت کاربرد KRB به شدت به نوع خاک و مدیریت زراعی وابسته است و نتایج متغیر اغلب به یک الگوی مشخص اشاره دارند. در خاک‌های با ماده آلی پایین و حاصلخیزی کم، تلقیح KRB به تنهایی اغلب تأثیر محدودی بر رشد گیاه دارد یا با شکست مواجه می‌شود. در مقابل، کارایی این باکتری‌ها زمانی به اوج می‌رسد که کاربرد آن‌ها با افزودن مواد آلی همراه باشد. برای مثال، مطالعات متعدد نشان داده‌اند که استفاده همزمان KRB با کمپوست، کود دامی (FYM) یا بیوچار، به طور هم‌افزایی منجر به افزایش پتاسیم قابل دسترس خاک، بهبود جذب توسط گیاه و افزایش عملکرد محصولاتی مانند ذرت و سیب‌زمینی شده است (Saha et al., 2016; Zia et al., 2021). این الگو به وضوح نشان می‌دهد که بقا، استقرار و فعالیت متابولیکی KRB در مزرعه، که به شدت به دسترسی به منابع کربن و شرایط مطلوب خاک وابسته است، عامل محدودکننده‌تری نسبت به توانایی ذاتی آن‌ها برای آزادسازی پتاسیم می‌باشد. بنابراین، موفقیت تجاری KRBها احتمالاً در قالب فرمولاسیون‌های ترکیبی با استراتژی‌های تحریک زیستی خواهد بود.

۶-۴ چالش‌های فنی در تجاری‌سازی و کاربرد KRB

تبدیل یک سویه KRB مؤثر به یک محصول تجاری موفق، با موانع فنی قابل توجهی در فرمولاسیون و تولید انبوه مواجه است. فرمولاسیون‌های سنتی مبتنی بر حامل‌های ساده در برابر تنش‌های محیطی ناکافی بوده و از این رو، فناوری‌های نوین نقشی حیاتی دارند؛ میکروانکپسولاسیون با پلیمرهای زیستی (مانند آلژینات) بقای باکتری را در انبارداری افزایش داده و نانوحامل‌ها (مانند نانورس‌ها) رهایش کنترل‌شده آن را در خاک ممکن می‌سازند (Vassilev et al., 2015; Suman et al., 2022). در حوزه تولید، چالش مقیاس‌پذیری فرآیندهای فرمانتاسیون و هزینه‌های بالای استریل‌سازی حامل‌ها، تولید را محدود می‌کند. در نهایت، موفقیت تجاری محصول در گرو تضمین ماندگاری و حفظ حداقل جمعیت فعال باکتریایی (10^7 CFU/g) و اثبات صرفه اقتصادی آن از طریق یک تحلیل هزینه-فایده جامع برای رقابت با کودهای شیمیایی است (Bharti et al., 2017; Garcha, 2023).

۷ شکاف علمی و تحقیقات آینده

برای عبور از شکاف آزمایشگاه-مزرعه، تحقیقات آینده باید از غربالگری سنتی فراتر رفته و رویکردهای فناورانه و نوآورانه را در اولویت قرار دهد. این امر شامل مهندسی متابولیک سویه‌های برتر با ابزارهایی مانند CRISPR-Cas9 برای افزایش هدفمند تولید اسیدهای آلی و مقاومت به تنش است. همچنین، استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌تواند به پیش‌بینی بقای سویه‌ها در خاک‌های مختلف و طراحی کنسرسیوم‌های میکروبی با حداکثر هم‌افزایی کمک کند. درک عمیق‌تر عملکرد میدانی نیز نیازمند ادغام رویکردهای چند-اومیکسی (متاترانسکریپتومیکس و متامتابولومیکس) برای مشاهده

دینامیک فعالیت ژن‌ها و متابولیت‌ها در ریزوسفر است. این رویکردهای پیشرفته، در کنار فرمولاسیون‌های هوشمند مبتنی بر فناوری نانو، مسیر را برای تولید نسل جدیدی از کودهای زیستی KRB با کارایی قابل اعتماد در مزرعه هموار می‌سازد.

۸ نتیجه‌گیری

این مرور تحلیلی نتیجه‌گیری می‌کند که پتانسیل بالای باکتری‌های آزادکننده پتاسیم به دلیل شکاف عمیق میان عملکرد آزمایشگاهی و کارایی مزرعه‌ای، تا حد زیادی تحقق نیافته است. عبور موفقیت‌آمیز از این شکاف، نیازمند یک تغییر پارادایم از رویکردهای سنتی (غربالگری و جداسازی) به سمت یک رویکرد مهندسی‌شده و یکپارچه است. آینده این حوزه در گرو تلفیق زیست‌شناسی مصنوعی برای بهینه‌سازی سویه‌ها، فناوری نانو برای فرمولاسیون‌های هوشمند و هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تعاملات اکولوژیکی است تا بتوان بقا و فعالیت هدفمند KRB را در محیط پیچیده خاک تضمین نمود.

منابع

Abbas, S., Amna, Javed, M. T., Ali, Q., Azeem, M., & Ali, S. (2021). Nutrient deficiency stress and relation with plant growth and development. In *Engineering Tolerance in Crop Plants Against Abiotic Stress* (pp. 239–262). CRC Press.

Bharti, N., Sharma, S. K., Saini, S., Verma, A., Nimonkar, Y., & Prakash, O. (2017). Microbial Plant Probiotics: Problems in Application and Formulation. In V. Kumar, M. Kumar, S. Sharma, & R. Prasad (Eds.), *Probiotics and Plant Health* (pp. 317–335). Springer.

De, G., & McHenry, M. E. (2012). *Structure of materials: an introduction to crystallography, diffraction and symmetry*. Cambridge University Press.

Esitken, A. (2011). Use of plant growth promoting rhizobacteria in horticultural crops. In D. K. Maheshwari (Ed.), *Bacteria in Agrobiology: Crop Ecosystems* (pp. 189–235). Springer.

Garcha, S. (2023). Present scenario: Status of the biofertilizer industry in India. In A. K. Singh, A. Kumar, & P. K. Singh (Eds.), *Metabolomics, Proteomes and Gene Editing Approaches in Biofertilizer Industry* (pp. 21–36). Springer.

Gomez, E. J., Delgado, J. A., & Gonzalez, J. M. (2020). Environmental factors affect the response of microbial extracellular enzyme activity in soils when determined as a function of water availability and temperature. *Ecology and Evolution*, *10*(18), 10105–10115.

Jena, S. K. (2021). A review on potash recovery from different rock and mineral sources. *Mining, Metallurgy & Exploration*, *38*, 47–68.

Johnson, R., Vishwakarma, K., Hossen, M. S., Kumar, V., Shackira, A. M., Puthur, J. T., ... & Hasanuzzaman, M. (2022). Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, *172*, 56–69.

Khoshru, B., Mitra, D., Khoshmanzar, E., Myo, E. M., Uniyal, N., Mahakur, B., ... & Rani, A. (2020). Current scenario and future prospects of plant growth-promoting rhizobacteria: an economic valuable resource for the agriculture revival under stressful conditions. *Journal of Plant Nutrition*, *43*(19), 3062–3092.

Khoshru, B., Sarikhani, M. R., & Aliasgharzad, N. (2019). Inoculation effect of some phosphatic microbial fertilizers on nutritional indices of *Zea mays* L. *Water and Soil Science*, *29*(1), 15–27.

Khosravi, H., Khoshru, B., Nosratabad, A. F., & Mitra, D. (2024). Exploring the landscape of biofertilizers containing plant growth-promoting rhizobacteria in Iran: Progress and research prospects. *Current Research in Microbial Sciences*, *7*, 100268.

Kuzin, A., & Solovchenko, A. (2021). Essential role of potassium in apple and its implications for management of orchard fertilization. *Plants*, *10*(12), 2624.

Meena, V. S., Maurya, B. R., Verma, J. P., Aeron, A., Kumar, A., Kim, K., & Bajpai, V. K. (2015). Potassium solubilizing rhizobacteria (KSR): Isolation, identification, and K-release dynamics from waste mica. *Ecological Engineering*, *81*, 340–347.

Niu, Y., Liang, W., Wei, X., & Han, Y. (2022). Factors affecting the natural regeneration of the *Larix principis-rupprechtii* Mayr plantations: Evidence from the composition and co-occurrence network structure of soil bacterial communities. *Processes*, *10*(9), 1771.

Raj, A., & Tembhurkar, A. R. (2024). Optimization of degradation of potassium ethyl xanthate using Fe2O3/TiO2/Flyash nanophotocatalyst using Taguchi statistical approach. *Minerals Engineering*, *216*, 108865.

Rawat, J., Sanwal, P., & Saxena, J. (2016). Potassium and its role in sustainable agriculture. In V. S. Meena, B. R. Maurya, J. P. Verma, & R. S. Meena (Eds.), *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture* (pp. 235–253). Springer.

Saeed, Q., Xiukang, W., Haider, F. U., Kučerik, J., Mumtaz, M. Z., Holatko, J., ... & Brtnicky, M. (2021). Rhizosphere bacteria in plant growth promotion, biocontrol, and bioremediation of contaminated sites: a comprehensive review of effects and mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(19), 10529.

Saha, M., Maurya, B. R., Meena, V. S., Bahadur, I., & Kumar, A. (2016). Identification and characterization of potassium solubilizing bacteria (KSB) from Varanasi soils. *Biotica*, *1*, 1-9.

Sarikhani, M. R., & Ebrahimi, M. (2024). Potassium releasing bacteria (KRB): role of KRB in horticultural crops. In G. Subramaniam, S. Arumugam, K. Rajkumar, & C. Egbuna (Eds.), *Bio-Inoculants in Horticultural Crops: Conventional and Omics Approaches* (pp. 175–195). Elsevier.

Sindhu, S. S., Parmar, P., Phour, M., & Sehrawat, A. (2016). Potassium-solubilizing microorganisms (KSMs) and its effect on plant growth improvement. In V. S. Meena, B. R. Maurya, J. P. Verma, & R. S. Meena (Eds.), *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture* (pp. 171–185). Springer.

Srikanth, P. (2020). Isolation and characterization of phosphorus solubilizing bacteria, potassium releasing bacteria and sulphur oxidizing bacteria in maize (*Zea mays* L.) rhizosphere soils of Andhra Pradesh. *International Journal of Chemical Studies*, *8*(2), 790–795.

Suman, A., Yadav, A. N., & Verma, P. (2022). Nano-formulations in promoting the efficacy of agriculturally important microorganisms. *Frontiers in Microbiology*, *13*, 969146.

Vassilev, N., Vassileva, M., & Martos, V. (2015). Immobilized cell technology applied in soil bioremediation: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *15*(2), 329-342.

Yadav, B. K., & Sidhu, A. S. (2016). Dynamics of potassium and their bioavailability for plant nutrition. In V. S. Meena, B. R. Maurya, J. P. Verma, & R. S. Meena (Eds.), *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture* (pp. 187–201). Springer.

Zia, R., Ahmed, W., Shakoor, A., & Aslam, Z. (2021). Biochar and potassium solubilizing bacteria improved potassium availability, growth, and yield of maize. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *21*(3), 1-13.

Potassium-Releasing Bacteria (KRB) as Biofertilizers: A Critical Review of Lab-to-Field Challenges and Innovative Prospects

Bahman Khoshru[1]* and Houshang Khosravi[2]

[1] Postdoctoral Researcher, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

[2] Research Associate Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Corresponding author: **E-mail:** bahmankhoshru@yahoo.com

Abstract

Potassium-releasing bacteria (KRB) hold immense potential for enhancing potassium (K) availability from soil minerals, yet their practical application is hampered by a significant gap between laboratory potential and field performance. While reviewing the functional mechanisms of KRBs, this article provides a critical analysis of the key bottlenecks that impede their successful commercialization, including poor survival in soil, formulation complexities, and competition with native microbiota. In this context, innovative technological solutions to overcome these challenges are discussed, such as advanced nanotechnology-based formulations and the metabolic engineering of strains. This review concludes that the future success of KRBs depends on a paradigm shift from mere strain isolation towards an engineered and integrated approach to ensure their efficacy in real soil ecosystems.

Keywords: Biofertilizer, Lab-to-field gap, Formulation, Bio-weathering, Potassium solubilization.