

اهمیت پروبیوتیک‌های گیاهی در کشاورزی پایدار: چالش‌ها و راهکارها^۱

ساره هاشمی^۲ و مسعود احمدزاده^۳

چکیده

برای حرکت بسوی کشاورزی مولد و سالم باید افزون بر تولید خوراک سالم، همزمان از یکپارچگی محیط‌زیست برای نسل‌های آینده محافظت شود. برخی از میکروارگانیسم‌ها در خاک با سازوکارهایی مانند جذب و افزایش حلالیت مواد معدنی، کنترل زیستی بیمارگرهای گیاهی و حفاظت از تنش‌های نازیوا، موجب افزایش رشد گیاه می‌شوند. آن‌ها همچنین موجب بهبود کیفیت مواد گیاهی می‌شوند. این میکروارگانیسم‌ها که به نام پروبیوتیک گیاهی شناخته می‌شوند، می‌توانند به عنوان حاصلخیزکننده‌های زیستی در تولید محصول‌های گیاهی به کار روند. پروبیوتیک‌های گیاهی با هر سیستم کشاورزی از جمله سیستم ارگانیک سازگار هستند و در حفاظت از محیط‌زیست، کاهش نیاز به مصرف سم‌های شیمیایی، حفظ و اصلاح ساختار خاک و تولید غذای مورد نیاز برای جمعیت رو به افزایش جهان نقش ویژه‌ای دارند. آگاهی و درک بهتر از عملکردهای پروبیوتیک‌های گیاهی به پذیرش سریع سودمندی‌ها و کاربرد این میکروارگانیسم‌ها انجامیده و قابلیت‌های برای چیرگی بر دشواری‌های پذیرش این فرآیند مدیریتی ایجاد می‌دهند. برخی از راهکارها برای سرعت بخشیدن به پذیرش این موضوع عبارتند از افزایش آموزش و آگاهی کشاورزان و بهره‌وران کشاورزی در زمینه نمونه‌های کاربردی موفق؛ نشان‌دادن سودمندی‌های مادی و محیط‌زیستی کنترل زیستی نسبت به کنترل شیمیایی و همچنین، سیاست‌ها و تشویق کاربرد پروبیوتیک‌های گیاهی از راه حمایت‌های دولتی و خصوصی. در مقاله حاضر، افزون بر پرداختن به اهمیت پروبیوتیک‌های گیاهی و کاربرد آن‌ها برای رسیدن به سیستم کشاورزی سازگار با محیط‌زیست و پایدار، به چالش‌های پیش رو در زمینه کاربرد این شیوه مدیریتی و راهکارهای رفع این چالش‌ها نیز پرداخته شده است.

کلیدواژه: باکتری‌های پروبیوتیک، خوراک سالم، محیط‌زیست، کنترل زیستی.

مقدمه

کشاورزی بخش اقتصادی مهم در بسیاری از کشورها است. با توجه به گزارش سازمان خواربار و کشاورزی جهانی، ۳۷٪ از مساحت سطح زمین به کشاورزی اختصاص دارد (FAO, 2020). در سیستم‌های کشاورزی سنتی از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها برای افزایش محصول و تولید استفاده می‌شود که این استفاده بر تعادل بوم‌شناختی و ایمن مواد غذایی تأثیر می‌گذارد و اصلی‌ترین عامل ایجاد آلودگی خاک و آب است. در سال‌های اخیر کشاورزی ارگانیک، توجه جامعه جهانی را به خود جلب کرده است. سلامت خاک، محیط زیست و تعامل بین گیاهان و میکروب‌ها بخشی جدایی‌ناپذیر از کشاورزی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲۱

۲- نویسنده مسئول، پست الکترونیک: hashemi.sa@ut.ac.ir

۳- به ترتیب، دانشجوی دکتری و استاد دانشگاه تهران، تهران.

ارگانیک هستند. بنابراین، اقدامها و پیشرفت‌های کشاورزی بر پایه استفاده از میکروارگانیسم‌های سازگار با محیط زیست و گیاهان، می‌تواند سلامت گیاه و حاصلخیزی خاک را ارتقا دهد. در واقع، این رویکرد می‌تواند تولید غذا را تضمین نماید و سود و سلامت جهانی را تضمین کند. کشاورزی همراه با میکروب‌های مرتبط با گیاه (پروبیوتیک‌های گیاهی) و کاربرد آن‌ها برای به کمینه رساندن بیماری‌ها و آفت‌ها با افزایش حاصلخیزی خاک، فراهم کردن مواد غذایی کافی برای گیاهان و افزایش تولید و کیفیت مواد غذایی مرتبط است. در این مقاله به کاربرد، سودمندی‌ها و دشواری‌ها استفاده از پروبیوتیک‌های گیاهی در سیستم کشاورزی پرداخته شده و راهکارهایی جهت رفع این دشواری‌ها پیشنهاد می‌شود.

پروبیوتیک‌های گیاهی چه هستند؟

مفهوم پروبیوتیک برای اولین بار توسط Elie Metchnikoff در نخستین سال‌های قرن بیستم، برای برخی از باکتری‌های مفیدی که می‌توانند روده انسان را اشغال نمایند، به کار برده شد. امروزه واژه پروبیوتیک هنوز برای جمعیت میکروبی^۱ روده به کار برده می‌شود، با این وجود در گزارش سازمان خواربار جهانی و سازمان بهداشت جهانی^۲ آمده است که پروبیوتیک‌ها میکروارگانیسم‌های زنده‌ای هستند که وقتی به مقدار مناسب تجویز شوند، برای سلامتی میزبان مفید هستند. بنابراین، این تعریف برای میکروارگانیسم‌هایی که عامل بهبود رشد گیاه یا محافظت در برابر عامل‌های بیمارگر هستند نیز قابل استفاده است (Hill *et al.*, 2014). این میکروارگانیسم‌ها شامل تأمین‌کنندگان مواد مغذی مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، قارچ‌ها یا باکتری‌های القاکننده مقاومت سیستمیک و آن‌هایی که به طور مستقیم از گیاهان در برابر عامل‌های بیمارگر محافظت می‌کنند، می‌باشند.

کاربرد پروبیوتیک‌های گیاهی در سیستم‌های کشاورزی

الف) نقش پروبیوتیک‌های گیاهی در افزایش رشد گیاهان

چهل سال پیش، اصطلاح ریزوباکتری‌های فرازنده رشد گیاه^۳، برای طبقه‌بندی میکروارگانیسم‌هایی که موجب بهبود رشد گیاه می‌شوند، پیشنهاد شد (Kloepper & Schroth, 1980). این میکروارگانیسم‌ها با سازوکارهای مختلف، وضعیت تغذیه و سلامت خاک و گیاه را بهبود می‌بخشند میکروارگانیسم‌های ریشه‌گاه^۴ و درون رستی^۵ هر دو می‌توانند به عنوان محرک رشد گیاه عمل نمایند. میکروارگانیسم‌های خارج یاخته‌ای^۶ در ریشه‌گاه، محیط اطراف ریشه^۷ و در فضاهای بین یاخته‌های ریشه مستقر هستند و میکروارگانیسم‌های درون یاخته‌ای^۸ درون یاخته‌های ریشه و در ساختارهای گره مانند تخصصی، وجود دارند (Walker *et al.*, 2020). در ادامه به تفصیل به برخی از سازوکارهای پایه‌ای اعمال شده توسط پروبیوتیک‌های گیاهی به منظور کمک به افزایش رشد گیاهان اشاره شده است.

کمک به افزایش جذب عناصر موردنیاز توسط گیاه

برخی از پروکاریوت‌ها توانایی تبدیل نیتروژن جو به شکل‌های آلی را دارند که می‌توانند توسط گیاهان جذب شوند. ۶۵٪ از نیتروژن مورد نیاز در کشاورزی توسط آنزیم نیتروژناز باکتری‌های هم‌زیست با گیاه از تثبیت نیتروژن جو تأمین می‌شود (Tejera *et al.*, 2005). مایه‌زنی حیوانات با باکتری‌های ریزوبیوم^۹، اولین نمونه از فراورده‌های میکروبی تجاری شده در کشاورزی برای تثبیت نیتروژن بودند. از ابتدای قرن بیست و یکم، استفاده از باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن به صورت

| | | |
|----------------|--|--|
| 1. Microbiota | 2. World Health Organization (WHO) | 3. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) |
| 4. Rhizosphere | 5. Endophyte | 6. Extracellular plant growth promoting microorganisms (ePGPM) |
| 7. Rhizoplane | 8. Intracellular plant growth promoting microorganisms (iPGPM) | 9. Rhizobium |

تجاری افزایش یافت (Vessey, 2003). برخی باکتری‌ها با افزایش رشد ریشه گیاهان، می‌توانند کارایی مصرف نیتروژن را افزایش دهند بدین صورت که به گیاهان اجازه می‌دهند به قسمت‌های بیشتری از خاک دسترسی داشته باشند (Beattie, 2015) و نیتروژن را به راحتی جذب نمایند. فسفر محدودترین ماده غذایی برای گیاهان زراعی پس از نیتروژن است. با وجود این واقعیت که مقدار فسفر در خاک به طور کلی بسیار زیاد (بین ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) است، بیشتر این فسفر نامحلول است و برای رشد در دسترس گیاه نیست. فسفر نامحلول به صورت معدنی مانند آپاتیت یا بصورت یکی از شکل‌های آلی از جمله اینوزیتول فسفات^۱ (فیتات^۲ خاک)، فسفومونواسترها^۳ و فسفوتری استرها^۴ وجود دارد (Khan et al., 2022). افزون بر این، بسیاری از کودهای شیمیایی دارای ترکیب‌های فسفر معدنی محلول مدت کوتاهی پس از استفاده، بی‌حرکت شده و برای گیاهان غیرقابل دسترس می‌شوند. بنابراین، میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفر^۵ می‌توانند به گیاهان کمک کنند تا فسفر را از شکل‌های غیرقابل جذب، به فسفر قابل دسترس گیاه تبدیل نمایند. فسفر معدنی پیوندشده با کلسیم، آهن یا آلومینیوم می‌تواند توسط اسیدهای آلی یا یون‌های هیدروژن (H⁺) تولیدشده توسط میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفر، حل شود. همچنین، فیتاز^۶ تولیدشده توسط میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفر می‌تواند فسفر فعال را از ترکیب‌های آلی آزاد کند. *Bacillus megaterium* با نام تجاری بیوفس^۷ توسط شرکت بیوپاورلانکا^۸ واقع در کشور سری‌لانکا تجاری شده است و می‌تواند نیاز به کود فسفات در محصول‌های زراعی را تا ۷۵٪ کاهش دهد (Mehnaz, 2016). بنابراین با کاربرد پروبیوتیک‌های گیاهی به طور موثری می‌توان نیاز غذایی گیاهان به فسفر را تامین نمود. پتاسیم از دیگر عناصر غذایی بسیار مهم برای رشد گیاهان است. جنس‌های متنوعی از باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم^۹ وجود دارند. در میان *Firmicutes*، نمونه‌های زیادی از باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم وجود دارند. برخی از گونه‌های جنس‌های *Bacillus* و *Pseudomonas* نیز از KSB هستند (Sheng & He, 2006). افزون بر عناصر یاد شده، کمبود عناصر ریزمغذی مانند آهن و روی نیز از عامل‌های محدودکننده رشد گیاه هستند. هم میکروارگانیسم‌ها و هم گیاهان به مقدار زیادی از آهن نیاز دارند و به دست آوردن آهن کافی از محیط اطراف ریشه که گیاه، باکتری و قارچ برای آهن با هم رقابت می‌کنند، مشکل‌سازتر است. بسیاری از سویه‌های باکتریایی، آهن را از راه تولید اسیدهای آلی یا سیدروفورها^{۱۰} در دسترس گیاه قرار می‌دهند (Ahmed & Holmstrom, 2014). سیدروفورها ترکیباتی با جرم مولکولی کم (به تقریب ۱۵۰۰-۴۰۰ دالتون) هستند که میل ترکیبی بسیار زیادی با یون آهن (Fe³⁺) دارند. ترکیب حاصل از اتصال آهن به سیدروفور توسط گیرنده‌های غشایی یاخته دریافت و آهن جذب می‌شود (Hider & Kong, 2010). اثر سودمند و مستقیم سیدروفورهای باکتریایی بر رشد گیاهان در مطالعه‌های مختلف به خوبی اثبات شده است. علاوه بر این سیدروفورها می‌توانند با محروم کردن میکروارگانیسم‌های بیمارگر از آهن آن‌ها را کنترل نمایند (Mehnaz, 2016). بررسی‌ها همچنین نشان دادند که سازوکارهایی که به حلالیت عنصر روی انجامیده و جذب آن را توسط گیاه بالا می‌برند، شبیه به سازوکارهای میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفر و جذب آهن بوده و با تولید عامل‌های کلاته‌کننده، سیدروفورها و اسیدهای آلی ایجاد می‌شود (Shakeel et al., 2015). در جدول ۱ اسامی و نحوه اثر برخی از پروبیوتیک‌های گیاهی در افزایش رشد گیاهان آورده شده است.

حفظ تعادل هورمونی در گیاه

یکی دیگر از سازوکارهای تحریک مستقیم رشد گیاه توسط میکروارگانیسم‌ها، اثر این عامل‌های بر تعادل هورمون‌های گیاهی است (Dobbelaere et al., 2003). فعال‌ترین اکسین از نظر فیزیولوژیک در گیاهان ایندول - ۳ - استیک اسید^{۱۱}

| | | | |
|--|------------|----------------------|----------------------------------|
| 1. Inositol phosphate | 2. Phytate | 3. Phosphomonoesters | 4. Phosphotriesters |
| 5. Phosphorus solubilizing microorganisms (PSMs) | | 6. Phytase | 7. BioPhos |
| 9. Potassium solubilizing bacteria (KSB) | | 10. Siderophore | 11. Indole -3 -Acetic Acid (IAA) |

است که موجب تحریک پاسخ‌های سریع (مانند افزایش طول یاخته) و پاسخ‌های بلندمدت (مانند تقسیم و تمایز یاخته‌ای) در گیاهان می‌شود. به صورت تخمینی، ۸۰٪ باکتری‌های ریشه‌گاه می‌توانند IAA تولید کنند (Spaepen *et al.*, 2007). افزون بر IAA، باکتری‌هایی مانند *Paenibacillus polymyxa* و *Azospirillum* ترکیب‌های دیگری مانند ایندول -۳- بوتیریک اسید^۱ و تریپتوفول^۲ (ایندول -۳- اتانول^۳) را تولید می‌کنند که می‌توانند به طور غیرمستقیم رشد گیاه را بهبود بخشند (El-Khawas & Adachi, 1999). پروبیوتیک‌های گیاهی می‌توانند بر بیان ژن‌های گیاهی که مسئول ساخت، انتقال یا پیام‌رسانی اکسین هستند، نیز تأثیر بگذارند، همچنین غلظت اکسین گیاهان میزبان را نه تنها با ساخت آن، بلکه با تجزیه آن تغییر دهند. برای نمونه، *Pseudomonas putida* 1290 می‌تواند از IAA به عنوان یک بستر غذایی استفاده کند و یا باکتری *B. phytofirmans* PsJN می‌تواند IAA را تخریب کند (Zuniga *et al.*, 2013). تعادل اکسین و سایتوکینین عملکرد مریستم‌ها، معماری سیستم ریشه، تشکیل اندام‌های جانبی ساقه و رشد اندام‌های زاینده را تعیین می‌کند. سایتوکینین‌ها همچنین زیست‌ساخت کلروفیل و کلروپلاست را تنظیم می‌کنند و در ایجاد مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و نازیوا نیز موثرند (Cortleven & Schmulling, 2015). گیاهان و میکروارگانیسم‌های مرتبط با گیاهان دارای بیش از ۳۰ ترکیب محرک رشد از گروه سایتوکینین هستند. مشخص شده است که ۹۰٪ از میکروارگانیسم‌های موجود در ریشه‌گاه، سایتوکینین‌ها را در شرایط کشت آزمایشگاهی تولید می‌کنند. بر پایه بررسی‌های انجام شده بسیاری از پروبیوتیک‌های گیاهی می‌توانند سایتوکینین را تولید کنند و سازوکارهای مختلفی را برای تغییر غلظت سایتوکینین در گیاهان به کار می‌گیرند (Tahir *et al.*, 2017). پروبیوتیک‌های گیاهی با تولید این هورمون می‌توانند رشد شاخه‌های گیاه میزبان و تشکیل میوه را تحریک کنند (Ortiz-Castro *et al.*, 2008). اتیلن به عنوان هورمونی موثر در رسیدن میوه شناخته می‌شود و در تحریک و تشکیل ریشه‌های موئین، تحریک جوانه‌زنی و شکستن خفتگی بذر موثر است. با این حال، اگر غلظت اتیلن زیاد باشد، تندش، افزایش طول ریشه و همچنین تثبیت نیتروژن توسط باکتری‌های هم‌زیست در گیاهان مهار می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بسیاری از باکتری‌های محرک رشد می‌توانند رشد گیاه را با کاهش مقدار اتیلن افزایش دهند، این ویژگی به فعالیت آنزیم ۱- آمینو سیکلوپروپان -۱- کربوکسیلیک اسید (ACC) دآمیناز^۴ نسبت داده می‌شود که ۱- آمینو سیکلوپروپان -۱- کربوکسیلیک اسید که پیش‌ساز اتیلن در گیاهان است را به آمونیاک و آلفا- کتوبوتیرات^۵ تبدیل می‌کند و این ترکیبات توسط باکتری به عنوان منبع نیتروژن و کربن برای رشد مصرف می‌شوند. به این ترتیب، باکتری مقدار اتیلن را در گیاهان کاهش می‌دهد و از برخی از پیامدهای منفی حاصل از غلظت زیاد اتیلن جلوگیری می‌کند (Saleem *et al.* 2007). به طور خلاصه، برای کاربرد موثر پروبیوتیک‌های گیاهی در کشاورزی، درک سازوکارهای مولکولی که از راه آن سویه بر مقدار هورمون‌های گیاهی در شرایط مختلف تأثیر می‌گذارد، ضروری است.

افزایش مقاومت گیاه به بیمارگرها

کارهای تحریک غیر مستقیم رشد گیاه توسط پروبیوتیک‌های گیاهی، با تأثیر بر مقامت گیاه به بیمارگرها مرتبط است. پروبیوتیک‌های گیاهی از راه افزایش بیان ژن‌های مرتبط با بیمارگری^۶، تحریک تولید مواد دفاعی مانند فنیل آلانین آمونیاک‌لیاز، پلی فنول اکسیداز، پراکسیداز، ۱ و ۳- گلوکاناز و کیتیناز و همچنین انباشت گونه‌های اکسیژن فعال^۷ موجب ایجاد مقاومت زود هنگام در گیاه می‌شوند (Guo *et al.*, 2015). اثبات شده است که پروبیوتیک‌های گیاهی توانایی ایجاد مقاومت انگیزشی سیستمیک^۸ را در گیاهان دارند (Yu *et al.*, 2022). بسیاری از مواد شیمیایی ضد میکروبی ساخته شده توسط پروبیوتیک‌های

1. Indole-3-Butyric Acid

2. Tryptophol

3. Indole-3-ethanol

4. 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase

5. α -ketobutyrate

6. Pathogenesis-related genes

7. Reactive Oxygen Species (ROS)

8. Induced systemic resistance (ISR)

گیاهی از جمله فنازین‌ها، سیدروفورهای شبه پایوردین^۱، ۲ و ۴- دی استیل فلوروگلوکوسینول^۲، پیروولنترین^۳، آسیل هموسرین لاکتون‌ها^۴، کونینجیک اسید^۵ و ترکیب‌های فرار مانند ۱- اوکتن-۳-ال^۶ و ۶- پنتیل- آلفا- پرون^۷ نیز می‌توانند موجب ایجاد مقاومت سیستمیک در گیاهان شوند (Djonovic *et al.*, 2007). اینکه حضور و استقرار پروبیوتیک‌های گیاهی در ریشه چگونه منجر به ایجاد مقاومت به بیمارگرها در بافت‌های هوایی می‌گردد، به طور کامل شناخته نشده است. نوسان‌های موادی مانند بوتاندیول، با حرکت مؤثر در گیاه، همانطور که برای آسیل هموسرین لاکتون نشان داده شده است، می‌تواند در ماهیت پاسخ‌های سیستمیک موثر باشد (Harman *et al.*, 2019). برخی از پروبیوتیک‌های گیاهی مواد آنتی‌بیوتیکی را می‌سازند که از رشد برخی از بیمارگرهای گیاهی جلوگیری می‌کند (Botelho & Mendonça-Hagler, 2006). آنتی‌بیوتیک‌ها به روشنی با سرکوب بیماری مرتبط هستند. با این حال، در بیشتر موردها سازوکارهای دیگری نیز ممکن است موثر باشند. آنزیم‌های تخریب کننده دیواره یاخته‌های میکروبی (سلولازها، کیتینازها و بتا-گلوکانازها) از جمله دیگر سازوکارهایی هستند که در کنترل زیستی بیمارگرها، به ویژه قارچ‌ها نقش دارند، زیرا سلولز، کیتین و بتا-گلوکان از اجزای اصلی دیواره یاخته‌ای قارچ‌ها هستند. باکتری‌های تولید کننده آنزیم‌های تخریب کننده دیواره یاخته‌ای، در صورت تولید آنتی‌بیوتیک‌های مختلف، قدرت و سرعت بیشتری در مهار بیمارگرها خواهند داشت. شمار زیادی از ژن‌ها، آنزیم‌ها و متابولیت‌ها در این برهمکنش دخالت دارند (Harman *et al.*, 2021).

چالش‌ها و راهبردها

کنترل زیستی، نخستین بار در سال ۱۸۸۴، جهت کنترل بندپایان مورد استفاده قرار گرفت. با این وجود، شکل جدید کاربرد کنترل زیستی در پایان قرن نوزدهم معرفی شد (Lenteren & Cock, 2020). کنترل زیستی از چهار نوع مختلف حفاظتی، طبیعی، سنتی و کنترل‌های تقویتی تشکیل شده است. این روش به طور گسترده‌ای مطلوب و دوستدار محیط زیست است و جایگزین امیدوارکننده‌ای برای کاهش استفاده از آفت‌کش‌های مصنوعی برای مدیریت آفت‌ها و بیماری‌های گیاهی در نظر گرفته می‌شود. با این وجود، این راهکار با چالش‌های زیادی روبه‌رو است که در ادامه به شماری از این چالش‌ها اشاره می‌گردد.

تأثیر محیط بر فعالیت کنترل زیستی

با وجود چندین دهه پژوهش، کاربرد کنترل زیستی در مدیریت سلامت گیاه با وجود تقاضا برای جایگزین‌های کنترل شیمیایی، رشد زیادی نداشته است. در شرایط آزمایشگاهی اثر کاربرد عامل‌های زیستی به طور چشمگیری بهتر از آزمایش‌های میدانی است. در مقایسه با مواد شیمیایی، حرکت از شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی به شرایط طبیعی، برای آفت‌کش‌های زیستی دشوارتر است. در حالی که کارایی میدانی عامل‌های کنترل زیستی می‌تواند با آفت‌کش‌های شیمیایی همخوانی داشته باشد یا از آن فراتر رود، این می‌تواند در طول زمان و از یک منطقه به منطقه دیگر متفاوت باشد. نوع عامل میکروبی، بیمارگر، میزبان، محیط و برهم‌کنش‌های پیچیده مانند جهش، تغییر ویژگی‌های فیزیکی، زیستی و شیمیایی همگی بر اثربخشی پروبیوتیک‌های گیاهی موثر هستند. تغییر آنتاگونیست می‌تواند در پاسخ به تغییرهای شرایط محیطی، جمعیت و حضور بیمارگرها در سیستم زیستی اتفاق بیوفتد (Alfiky & Weisskopf, 2021). برای نمونه، بسیاری از *Pseudomonas* های پروبیوتیک گیاهی در آزمایش‌ها عملکرد خوبی از خود نشان دادند، اما کاربرد آن‌ها، کنترل کارآمد بیماری در شرایط کشتزار را به دنبال نداشته است.

| | | | |
|------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 1. Pyoverdine | 2. 2,4- Diacetylphloroglucinol | 3. Pyrrolnitrin | 4. Acyl homoserine lactone (AHSLs) |
| 5. Koningic acid | 6. 1-Octen-3-ol | 7. 6-pentyl-alpha-pyrone | |

جدول ۱- نحوه اثر برخی از پروبیوتیک‌های گیاهی در افزایش رشد گیاهان.

| منبع | نتیجه اثرگذاری عامل پروبیوتیک | نوع محصول | نام عامل پروبیوتیک گیاهی | سازوکار پایه‌ای |
|---|--|--|---|---|
| Tejera <i>et al.</i> , 2005 | افزایش عملکرد محصول | غلات، برخی از حبوبات، نیشکر | <i>Azospirillum</i> | تثبیت نیتروژن |
| Elbeltagy <i>et al.</i> , 2001 | | غلات، دانه‌های روغنی، چغندر، توتون، چای، قهوه | <i>Azotobacter</i> | |
| Habibi <i>et al.</i> , 2014 | | برنج | <i>Bacillus, Pseudomonas</i> | |
| Puri <i>et al.</i> , 2016 | | برنج، کلزا | <i>Paenibacillus</i> | |
| Garcia-Fraile <i>et al.</i> , 2012 | بهبود و افزایش عملکرد محصول | توت فرنگی | <i>Flavobacterium</i> | حلالیت فسفات |
| Liu <i>et al.</i> , 2014; Estrada <i>et al.</i> , 2013 | | نخل هندی، ^۱ برنج | <i>Burkholderia</i> | |
| Jog <i>et al.</i> , 2014 | | گندم | <i>Streptomyces</i> | |
| Mehnaz, 2016 | | محصولات زراعی | <i>Bacillus</i> | |
| Sheng & He, 2006 | بهبود و افزایش عملکرد | گندم | <i>Bacillus edaphicus</i> | حلالیت پتاسیم |
| Sangeeth <i>et al.</i> , 2012 | افزایش وزن خشک | فلفل سیاه | <i>Paenibacillus</i> | |
| Meena <i>et al.</i> , 2014 | افزایش زیست‌توده و محتوای کلروفیل | سورگوم ^۲ ، گندم، ذرت | <i>Bacillus mucilaginosus</i> | |
| Bargaz <i>et al.</i> , 2021 | افزایش رشد | بادمجان، فلفل، خیار | <i>Bacillus mucilaginosus, Bacillus megaterium</i> | |
| Zhang & Kong, 2014 | افزایش رشد | توتون، چای | <i>Pseudomonas, Microbacterium</i> | |
| Sharma & Johri 2003 | افزایش رشد | ماش | <i>Pseudomonas</i> | جذب ریزمغذی‌های ضروری (آهن، روی) با تولید سیدروفور |
| Beneduzi <i>et al.</i> , 2012 | افزایش سطح کلروفیل | ذرت، فلفل، برنج | <i>Bacillus</i> | |
| Flores-Felix <i>et al.</i> , 2015 | افزایش عملکرد و کیفیت میوه | توت فرنگی | <i>Phyllobacterium</i> | |
| Boudjeko <i>et al.</i> , 2017 | افزایش رشد و مقاومت گیاه | کاکائو | <i>Streptomyces</i> | |
| Menendez & Garcia-Fraile, 2017 | تولید اکسین، بهبود رشد | برنج، جو، گندم | <i>Paenibacillus</i> | زیست‌ساخت و حفظ تعادل فیتوهورمون (اکسین، جیبرلین، سیتوکینین، اتیلن و زیست‌ساخت آمیناز)- د ACC |
| Menendez & Garcia-Fraile, 2017 | تولید اکسین و جیبرلین، بهبود رشد | فلفل، گوجه‌فرنگی، توت‌فرنگی | <i>Rhizobium</i> | |
| Ortiz-Castro <i>et al.</i> , 2008 | تولید سایتوکینین، بهبود رشد | آرابیدوسیس | <i>Bacillus</i> | |
| Joo <i>et al.</i> , 2005 | تولید سایتوکینین، افزایش رشد | خیار | <i>Azotobacter chroococcum</i> | |
| Chen <i>et al.</i> , 2013 | - دامیناز، افزایش رشد، فعالیت کاهش تولید اتیلن گیاهی در برگ‌ها | آرابیدوسیس | <i>Variovorax paradoxus</i> | |
| Pallai <i>et al.</i> , 2012 | تولید اکسین و سایتوکینین، افزایش زاتین ریبوزید ^۳ و اپروپنتیل آدنوزین ^۴ در ریشه‌گاه و افزایش طول ریشه | کلزا | <i>Pseudomonas fluorescens</i> | |
| Liu <i>et al.</i> , 2021 | افزایش رشد، ایجاد مقاومت اکتسابی سیستمیک در مقابل قارچ عامل پوسیدگی فوزاریومی ریشه (<i>Fusarium pseudograminearum</i>) | گندم | <i>Stenotrophomonas maltophilia</i> | افزایش مقاومت گیاه به بیمارگرها |
| Botelho & Mendonça-Hagler, 2006 | تولید آنتی‌بیوتیک و ایجاد مقاومت به قارچ عامل پاخوره گندم (<i>Gaeumannomyces graminis var. tritici</i>) | گندم | <i>Klebsiella, Bacillus, Acinetobacter, Paenibacillus</i> | |
| Silo-Suh <i>et al.</i> , 2023 | تولید آنتی‌بیوتیک و ایجاد مقاومت به بیمارگرهای بذری | یونجه، سویا | <i>Bacillus</i> | |
| Harman <i>et al.</i> , 2021 | ایجاد تولید آنتی‌بیوتیک گلیوتوکسین ^۵ سمیت برای زئوسپور بیمارگرهای <i>Aphanomyces</i> و <i>Phytophthora</i> | نخود فرنگی | <i>Trichoderma virens</i> | |
| Sadeghi <i>et al.</i> , 2017 | تولید آنزیم سلولاز، کنترل زیستی قارچ عامل بیماری میرایی خیار (<i>Pythium aphanidermatum</i>) | خیار | <i>Actinobacte</i> | |

| | | | | |
|--|---|------------------------|---|----------------------------------|
| Sadeghi <i>et al.</i> , 2017 | تحریک مقاومت سیستمیک در مقابل قارچ <i>Botrytis cinerea</i> , تولید آنزیم‌های هیدرولیتیک | گوجه‌فرنگی | <i>Micromonospora, Actinobacter</i> | |
| Kim & J. Anderson, 2018 | تحریک مقاومت گیاه به باکتری عامل بافت مردگی (<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>tabaci</i>) ۴- آمینو کرینیل فنیل استات ^۱ | توتون | <i>pseudomonads</i> | |
| Rajkumar & Freitas, 2008 | تولید سیدروفور، ACC- دامیناز و هورمون‌های گیاهی، بهبود رشد گیاه در خاک‌های آلوده به نیکل | خردل هندی ^۲ | <i>Pseudomonas, Bacillus</i> | کمک به رشد گیاه در شرایط نامساعد |
| Dimkpa <i>et al.</i> , 2008 | تولید سیدروفور و جذب نیکل، کمک به رشد گیاه در خاک‌های آلوده به نیکل | لوبیا چشم بلبلی | <i>Streptomyces acidiscabies</i> | |
| Carrillo- Castaneda <i>et al.</i> , 2002 | حفاظت بذرها یونجه در خاک‌های آلوده به مس | یونجه | <i>Pseudomonas, Azospirillum, Rhizobium</i> | |

سویه‌های آنتاگونیست *Candida oleophila*، تفاوت معنی‌داری در فعالیت آنزیمی بین کاربردهای آزمایشگاهی و مزرعه‌ای نشان می‌دهند (Mark *et al.*, 2006). با وجود این واقعیت که عامل‌های کنترل زیستی از نظر ژنتیکی بایستی پایدار باشند، استفاده از آن‌ها به دلیل تغییرهای اقلیمی مداوم چندان موفقیت‌آمیز نبوده است. در نتیجه، گزینش عامل‌های زیستی برای تأثیرگذاری موثر در موقعیت‌های مختلف محیطی (بافت خاک، دما، رطوبت، تابش و مانند این‌ها) و درک شیوه برهمکنش عامل پروبیوتیک با گیاهان، سایر میکروارگانیسم‌ها، الگوی فضایی توزیع عامل‌های کنترل زیستی در ریشه‌گاه و محیط کاربردی مورد نظر، برای توسعه و پیاده‌سازی راهکارهای حفاظتی بر پایه کنترل زیستی ضروری است (Alfiky & Weisskopf, 2021). پژوهش‌های زیست‌شناسی خاک باید ویژگی‌های مهم موجودهای مختلف را به ویژه در ریشه‌گاه گیاهی با شناخت سهم نسبی آن‌ها در فرآیند کنترل زیستی شناسایی نماید. افزون بر این، بررسی‌های زیست محیطی باید تمام عنصرهای زیوا و نازیوا را که بر عامل‌های پروبیوتیک تأثیر می‌گذارند، در نظر بگیرد. در نتیجه، برای کنترل زیستی موثر، سویه‌های بومی از میکروارگانیسم‌های مفید باید جمع‌آوری شوند و برای دستیابی به نتایج کنترل زیستی مربوطه غربالگری شوند (Nicot *et al.*, 2012). زمانی که یک رابطه بهینه حاکم باشد، عامل کنترل زیستی موثرتر خواهد بود.

اثر گیاه بر فعالیت کنترل زیستی

کنترل زیستی می‌تواند به شدت زیر تأثیر گونه‌ها و نژادگان‌های^۳ گیاهی قرار گیرد. (Umer *et al.*, 2021). به طور گسترده‌ای اثر گیاه را بر فعالیت کنترل زیستی بررسی کردند. گیاه یک تأثیر دوگانه در کنترل زیستی دارد. به این صورت که گیاهان می‌توانند بر مقدار استعمار ریشه‌گاه و تولید آنتی‌بیوتیک توسط پروبیوتیک‌های گیاهی تأثیر بگذارند. همچنین، حساسیت یا مقاومت گیاه به بیمارگر می‌تواند در اثربخشی کنترل زیستی تأثیر بگذارد. میزبان‌های حساس نسبت به میزبان‌های مقاوم به عامل کنترل زیستی قوی‌تر و سرکوب بیشتر بیمارگر نیاز دارند. گیاه به عنوان محل عمل برای بیمارگرها و آنتاگونیست‌ها عمل می‌کند، جایی که آن‌ها برهم‌کنش دارند و این برهم‌کنش‌ها زیر تأثیر ترشح‌های خارجی میزبان، یون و جذب آب، تبادل گازی و دمای سطح قرار دارند. هنگامی که ژن‌های گیاهی بیان می‌شوند، بر جامعه میکروبی روی سطح گیاه و فضای پیرامون آن تأثیر می‌گذارند (Timper, 2014).

مدت ماندگاری

از آنجایی که عامل‌های کنترل زیستی ماندگاری محدودی دارند، بقای آن‌ها باید مدیریت شود. برای نمونه، *Trichoderma viride* برای ۴ ماه زنده است، در حالی که *Pseudomonas fluorescens* تنها می‌تواند به مدت ۳ ماه زنده بماند. از سویی، تکامل بیمارگرهای هدف با پایداری عامل‌های کنترل زیستی همبستگی منفی دارد. بیمارگرهای هدف عامل‌های کنترل زیستی با گوناگونی ژنتیکی بالاتر، اندازه جمعیت موثر بزرگ و توانایی پراکندگی طولانی انتظار می‌رود با سرعت بیشتری در برابر این عامل‌ها مقاوم گردند (Zhan & McDonald, 2013). افزون بر این، تخمین ویژگی سن و مرحله رشدی بیمارگرهای هدف، زمان کاربرد عامل‌های کنترل زیستی را دشوار می‌کند. برای کنترل زیستی موفق، استفاده از آنتاگونیست در زمان مناسب بسیار مهم است. وقتی که آنتاگونیست پیش از استقرار بیمارگر اعمال می‌شود، هدف‌های کنترل زیستی عملی می‌گردد. افزون بر این، برای دستیابی به کنترل بهینه بیماری، شناسایی پتانسیل خطرهای برای انسان یا محیط زیست و همچنین خطرهای افزایش مقاومت در برابر عامل‌های کنترل زیستی و درک شیوه عمل عامل‌های پروبیوتیک ضروری است. استفاده تجاری پیوسته از یک عامل میکروبی ممکن است بروز جمعیت‌های بیمارگر جدید و گاهی ایجاد آلودگی قوی‌تر شود که این موضوع به کاهش یا از بین رفتن کنترل زیستی بیانجامد (Prajapati et al., 2020). از سوی دیگر، وجود روش‌های مناسب برای تولید در مقیاس بزرگ، فناوری مناسب برای افزایش ماندگاری محصول، حفظ چگالی اسپور و دستیابی به راندمان بهینه اسپورزایی، از جمله عوامل موثر در کاربرد گسترده پروبیوتیک‌های گیاهی هستند به طوری که عدم توجه به یک فرمولاسیون مناسب برای تولید محصول سبب می‌شود که جمعیت باخته‌های زنده و فعال پروبیوتیک‌های گیاهی آن قدر کاهش یابند که با وارد شدن به خاک، بی‌اثر شوند و هدف مورد نظر برآورده نگردد. برای حفظ جمعیت عامل پروبیوتیک، استفاده از مواد حامل مناسب ضروری است که ویژگی‌های کلیدی آن‌ها داشتن ظرفیت نگهداری آب، هوادهی خوب و نگهداری شایسته از رشد میکروبی و ماندگاری است. افزون بر این، حامل باید ارزان، راحت و همچنین قابل آمیختن و بسته‌بندی بوده و به صورت پودر یا گرانول در دسترس باشد (O'Callaghan et al., 2022).

اثر بیمارگر بر فعالیت کنترل زیستی

رفتار بیمارگر یکی از مهم‌ترین عامل‌هایی است که در هنگام گزینش پروبیوتیک‌های گیاهی باید در نظر گرفته شود. هر بیمارگر یک ویژگی منحصر به فرد دارد. بنابراین، به دلیل گوناگونی ژنتیکی و بوم‌شناختی عامل‌های کنترل زیستی باید کنش رفتاری آن‌ها با میزبان مورد توجه قرار گیرد. تداوم اثربخشی کنترل زیستی به دو عامل بستگی دارد: ۱- فشار گزینشی که روی جمعیت‌های بیمارگر گیاهی اعمال می‌شود و ۲- توانایی بیمارگر برای سازگاری با شرایط نامطلوب، به طوری که برخی از بیمارگرها می‌توانند خود را با فشار انتخابی اعمال‌شده توسط عامل‌های کنترلی در شمار نسل‌های کمتری سازگار سازند و بنابراین از بین رفتن و یا کاهش اثربخشی کنترل زیستی می‌انجامد. از این رو فرض دوام بیشتر کنترل زیستی نسبت به کنترل شیمیایی ممکن است همیشه قابل توجیه نباشد. مقاومت چندین آفت به باکتری *Basillus thuringiensis* و همچنین بروز مقاومت کرم سیب^۱ به ویروس گرانولوزیس کرم سیب^۲ گزارش شده است. در مقابل مبارزه با آفت‌ها، تداوم مبارزه زیستی بیماری‌های گیاهی کمتر مورد توجه قرار گرفت و هیچ مقاله علمی که در عمل نشان‌دهنده از دست دادن اثربخشی عامل‌های کنترل زیستی علیه بیمارگرهای گیاهی باشد، هنوز ارائه نشده است.

1. *Cydia pomonella*2. *Cydia pomonella granulovirus*

(Bardin et al., 2015). بنابراین برای موفقیت عامل کنترل زیستی بایستی رفتار و فیزیولوژی بیمارگر و نقطه ضعف در چرخه زندگی بیمارگر را بخوبی شناخت و از این نقطه ضعف به عنوان پنجره فرصت جهت کنترل و اختلال در چرخه بیماری استفاده کرد (Umer et al., 2021).

دیدگاه کشاورزان و شیوه‌های قانونی

جنبه دیگری که استفاده از کنترل زیستی را محدود می‌کند، شک و تردید در مورد اثر بخشی آن است. پذیرش کنترل زیستی توسط کشاورزان، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، زیر تأثیر شرایط اقتصادی، فناوری و ملاحظه‌های عملی شامل اثر بخشی، سود، در دسترس بودن و راحتی استفاده قرار دارد. تناوب زراعی، دوره‌های آیش، خاک‌ورزی، سم‌پاشی و مانند اینها همگی نمونه‌هایی از شیوه‌های مدیریتی مزرعه هستند که می‌توانند به طور مستقیم جمعیت موجودهای مفید را زیر تأثیر قرار دهند و منجر به عدم کارایی موثر عامل‌های زیستی، نارضایتی و دیدگاه منفی کشاورزان شوند. بنابراین، درک جامع از عامل‌های کنترل زیستی، بوم‌شناختی خاک و آگاهی از فنون و نحوه کاربرد تجاری پروبیوتیک‌ها می‌تواند کارایی و موفقیت این شیوه کنترلی را بهبود بخشد (Timper, 2014). بسیاری از کشاورزان به دلیل عدم آگاهی از روش‌های کنترل زیستی و ویژگی‌های فنی این روش از کاربرد این فناوری منصرف می‌شوند. در این مورد، آموزش و انجام تیمارهای میدانی برای تبادل اطلاعات بین کارشناسان و کاربران بسیار مهم است. از سوی دیگر، قانون‌های موجود و روش‌های ثبت فرآورده‌های کنترل زیستی مناسب نیستند و موجب توسعه آهسته این فناوری شده‌است. به طور خلاصه مهم‌ترین دلایلی که برآورده نشدن قابلیت کامل بهره‌گیری از عامل‌های کنترل زیستی انجامیده است مربوط به، تمرکز بیشتر بر پژوهش‌های آزمایشگاهی و توسعه نیافتن فرمولاسیون‌های تجاری مناسب آن‌ها است. افزون بر این، به دلیل کمبود اطلاعات در مورد شیوه استفاده از آن‌چه به صورت تجاری تولید شده است، کشاورزان بطور موثر از این روش کنترلی استفاده نمی‌کنند. در نتیجه، آموزش فنون کنترل زیستی برای رایج کردن این نوع مدیریت ضروری است (Sundh & Goettel, 2013).

نتیجه‌گیری و چشم اندازهای آتی کاربرد پروبیوتیک‌های گیاهی

امروزه کشاورزی در سراسر جهان با چندین چالش مواجه است: ۱- تولید غذای پایدار و کافی برای جمعیت انسانی در حال رشد؛ ۲- محدودیت منابع (خاک حاصلخیز، آب و مانند این‌ها)؛ ۳- مشکل‌های محیط‌زیستی ناشی از شیوه‌های سنتی کشاورزی فشرده و ۴- برآورده ساختن تقاضای مصرف کنندگان برای تولید مواد غذایی با کیفیت و سالم. باکتری‌های پروبیوتیک گیاهی سودمندی‌های فراوانی را برای گیاهان از راه‌های مختلف دارند. این سودمندی‌ها شامل تحریک رشد گیاه، فراهمی مواد غذایی و کنترل زیستی بیمارگرهای گیاهی است. افزون بر این، این گروه از باکتری‌های مفید ممکن است به کاهش تنش‌های ناشی از چندین عامل، مانند شوری یا انباشت فلزهای سنگین کمک کنند. بهبود و تقویت کیفیت تولیدات گیاهی از دیگر برتری‌های این عامل‌های زیستی است (Pretty et al., 2010). بنابراین، به نظر می‌رسد، باکتری‌های پروبیوتیک گیاهی بعنوان حاصلخیزکننده‌های زیستی فرموله‌شده با سویه‌های منفرد یا با گروهی از جدایه‌هایی که اثرهای مفید متفاوتی را نشان می‌دهند، می‌توانند راه‌حلی برای تامین غذای جهانی باشند و در عین حال محافظت از بوم‌نظام‌ها و بهبود کیفیت غذا را تضمین نمایند. در نتیجه، برقراری ارتباط بین دانشمندان، سیاستمداران و کشاورزان و همچنین وجود برنامه‌ها و سیاست‌های پژوهشی پی‌درپی برای توسعه فرآورده‌های موثر و ایمن مبتنی بر پروبیوتیک‌های گیاهی که سودمندی‌هایی را نه تنها برای تولیدکنندگان، بلکه برای تمام جامعه‌های بشری دارند ضروری است. ارزیابی شده است که جایگزینی کودهای شیمیایی با مایه‌زنی‌های ریزوبیومی، هزینه سالانه استفاده از کودهای

نیتروژن را از ۳۰ میلیون دلار در سال به حدود ۱ میلیون دلار کاهش می‌دهد (Malusá & Vassilev, 2014). این موضوع می‌تواند گواه این باشد که شناخت و ورود بیشتر پروبیوتیک‌های گیاهی در سیستم‌های کشاورزی، به کاهش هزینه‌های تولید، قیمت مناسب‌تر محصولات و گسترش بازارهای تولید محصول سالم و ارگانیک می‌انجامد و سلامت مصرف‌کنندگان و حفظ محیط زیست را به همراه خواهد داشت. این خود چشم‌اندازی از افزایش ظرفیت و آینده قابل توجه در رشد کودهای زیستی را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، توسعه و بهبود کیفیت کودهای زیستی به طور قابل توجهی الزامی است. موفقیت تجاری‌سازی موثر پروبیوتیک‌های گیاهی تا حد زیادی به گزینش سویه‌های قوی فیزیولوژیکی، شیوه فرمولاسیون محصول مورد نظر، شرایط کاربرد، ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی، زنجیره تولید و حمایت، مقدار محصول در کشتزار و رضایت کشاورزان بستگی دارد. از سوی دیگر گسترش برنامه‌های آموزشی از عامل‌های موثر در افزایش تمایل کشاورزان به خرید و استفاده از کودهای زیستی به عنوان جایگزینی برای کودهای شیمیایی گران قیمت است (Bharti *et al.*, 2017). دولت نیز می‌تواند بازار نوظهور کودهای زیستی را از راه برنامه‌های توسعه‌ای و بهبود سطح مدیریت کشتزار، کمک مالی به بهره‌برداران در برنامه‌ریزی و توسعه واحدهای عملکردی، یارانه در فروش و همچنین ارتباط مستقیم بخش دولتی با سازمان‌های تعاونی، دانشگاه‌ها و موسسه‌های پژوهشی جهت آموزش کشاورزان و بهبود فرآورده‌های زیستی، حمایت نماید. امید است که در آینده‌ای نزدیک با رفع چالش‌های موجود در تولید و استفاده از پروبیوتیک‌های گیاهی، بتوان به یک سیستم کشاورزی پایدار مبتنی بر کنترل زیستی دست یافت.

منابع

- Ahmed, E. & Holmstrom, S. J. (2014). Siderophores in environmental research: roles and applications. *Microbial Biotechnology*, 7: 196–208.
- Alfiky, A. & Weisskopf, L. (2021). Deciphering *Trichoderma*–Plant–Pathogen Interactions for Better Development of Biocontrol Applications. *Journal of Fungi*, 7(1): 61.
- Available online: <http://www.fao.org/faostat/en/#country> (accessed on 20 June 2023).
- Bardin, M., Ajouz, S., Comby, M., Lopez-Ferber, M., Graillot, B., Siegwart, M. & Nicot, P.C. (2015). Is the efficacy of biological control against plant diseases likely to be more durable than that of chemical pesticides? *Frontiers in Plant Science*, 6: 566.
- Bargaz, A., Elhaisoufi, W., Khourchi, S., Benmrid, B., Borden, K.A. & Rchiad, Z. (2021). Benefits of phosphate solubilizing bacteria on belowground crop performance for improved crop acquisition of phosphorus. *Microbiological Research*, 252.
- Beattie, G. A. (2015). Microbiomes: curating communities from plants. *Nature* 528: 340–341.
- Beneduzi, A., Ambrosini, A. & Passaglia, LM. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and Molecular Biology*, 35: 1044–1051.
- Bharti, N., K. Sharma, S., Saini, S., Verma, A. & S. Nimonkar, Y. (2017). Microbial Plant Probiotics: Problems in Application and Formulation. *Probiotics and Plant Health*, 317-335.
- Boudjeko, T., Tchinda, RAM., Zitouni, M., Nana, JA., Lerat, S. & Beaulieu, C. (2017). *Streptomyces cameroonensis* sp. nov., a Geldanamycin producer that promotes *Theobroma cacao* growth. *Microbes and Environments*, 32 (1): 24–31
- Botelho R., G. & Mendonça-Hagler, L.C. (2006). *Pseudomonads fluorescent* associated with the Rhizosphere of crops- an over view. *Brazilian Journal of Microbiology*, 37: 401- 416.
- Chen, L., Dodd, I.C., Theobald, J.C., Belimov, A.A. & Davies, W.J. (2013). The rhizobacterium *Variovorax paradoxus* 5C-2, containing ACC deaminase, promotes growth and development of *A. thaliana* via an ethylene-dependent pathway. *Journal of Experimental Botany*, 64: 1565– 1573.

- Carrillo-Castaneda, G., Juarez, M.J., Peralta-Videa, J., Gomez, E. & Gardea-Torresdey, J.L. (2002). Plant growth-promoting bacteria promote copper and iron translocation from root to shoot in alfalfa seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, 26: 1801–1814.
- Cortleven, A. & Schmulling, T. (2015). Regulation of chloroplast development and function by cytokinin. *Journal of Experimental Botany*, 66: 4999–5013.
- Dobbelaere, S., Vanderleyden, J. & Okon, Y. (2003). Plant growth-promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22: 107–149.
- Djonovic, S., Vargas, W. A., Kolomiets, M. V., Horndeski, M., Weist, A. & Kenerley, C. M. (2007). A proteinaceous elicitor Sm1 from the beneficial fungus *Trichoderma virens* is required for systemic resistance in maize. *Plant Physiology*, 145: 875– 889.
- Dimkpa, C., Svatoš, A., Merten, D., Büchel, G. & Kothe, E. (2008). Hydroxamate siderophores produced by *Streptomyces acidiscabies* E13 bind nickel and promote growth in cowpea (*Vigna unguiculata* L.) under nickel stress. *Canadian Journal of Microbiology*, 54(3): 163-172
- El-Khawas, H. & Adachi, K. (1999). Identification and quantification of auxins in culture media of *Azospirillum* and *Klebsiella* and their effect on rice roots. *Biology and Fertility of Soils*, 28: 377– 381.
- Elbeltagy, A., Nishioka, K., Sato, T., Suzuki, H., Ye, B., Hamada, T., Isawa, T., Mitsui, H. & Minamisawa, K. (2001). Endophytic colonization and in planta nitrogen fixation by a *Herbaspirillum* sp. isolated from wild rice species. *Applied and Environmental Microbiology*, 67: 5285–5293.
- Estrada, G.A., Baldani, V.L.D. & de Oliveira, D.M. (2013). Selection of phosphate-solubilizing diazotrophic *Herbaspirillum* and *Burkholderia* strains and their effect on rice crop yield and nutrient uptake. *Plant and Soil*, 369: 115–129.
- Flores-Felix, J.D., Silva, L.R., Rivera, L.P., Marcos-García, M., García-Fraile, P., Martínez-Molina, E., Mateos, P.F., Velázquez, E., Andrade, P. & Rivas, R. (2015). Plants probiotics as a tool to produce highly functional fruits: the case of *Phyllobacterium* and vitamin C in strawberries. *PLoS One*, 10(4): e0122281.
- García-Fraile, P., Carro, L., Robledo M, Ramírez-Bahena, M.H., Flores-Félix, J.D., Fernández, M.T., F. Mateos, P., Rivas, R., Igual, J.M., Martínez-Molina, E., Peix, A. & Velázquez, E. (2012). Rhizobium promotes non-legumes growth and quality in several production steps: towards a biofertilization of edible raw vegetables healthy for humans. *PLoS One*, 7.
- Guo, H., Wang, Y., Liu, H., Hu, P., Jia, Y., Zhang, C., Gu, S., Yang, C. & Wang, C. (2015). Exogenous GA₃ application enhances xylem development and induces the expression of secondary wall biosynthesis related genes in *Betula platyphylla*. *International Journal of Molecular Sciences*, 16: 22960– 22975.
- Habibi, S., Djedidi, S., Prongjunthuek, K., Mortuza, M.F., Ohkama-Ohtsu, N., Sekimoto, H. & Yokoyama, T. (2014). Physiological and genetic characterization of rice nitrogen fixer PGPR isolated from rhizosphere soils of different crops. *Plant and Soil*, 379: 51– 66.
- Hider, R.C. & Kong, X. (2010). Chemistry and biology of siderophores. *Natural Product Reports*, 27: 637– 657.
- Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G.R., Merenstein, D.J., Pot, B., Morelli, L., Canani, R. B., Flint, H.J., Salminen, S., Calder, P.C. & Sanders, M.E. (2014). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 11: 506–514.
- Harman, G.E., Doni, F., Khadka, R.B. & Uphoff, N. (2019). Endophytic strains of *Trichoderma* increase plants' photosynthetic capability. *Journal of Applied Microbiology*, 130(2): 529-546.
- Harman, G., Khadka, R., Doni, F. & Uphoff, N. (2021). Benefits to Plant Health and Productivity From Enhancing Plant Microbial Symbionts. *Frontiers in Plant Science*, 11. DOI:10.3389/fpls.2020.610065
- Joo, G.J., Kim, Y.M., Kim, J.T., Rhee, I.K., Kim, J.H. & Lee, I.J. (2005). Gibberellins-producing rhizobacteria increase endogenous gibberellins content and promote growth of red peppers. *Journal of Microbiology*, 43: 510–515
- Jog, R., Pandya, M., Nareshkumar, G. & Rajkumar, S. (2014). Mechanism of phosphate solubilization and antifungal activity of *Streptomyces* spp. isolated from wheat roots and rhizosphere and their application in improving plant growth. *Microbiology*, 160: 778–788.

- Khan, M.Y., Nadeem, S.M., Sohaib, M., Waqas, M.R., Alotaibi, F., Ali, L., Zahir, Z.A. & Al-Barakah, F.N.I. (2022). Potential of plant growth promoting bacterial consortium for improving the growth and yield of wheat under saline conditions. *Frontiers in Microbiology*, 13: 958522
- Kloepper, J.W. & Schroth, M.N. (1980). Plant growth-promoting rhizobacteria and plant growth under gnotobiotic conditions. *Ecology and Epidemiology*, 71(6).
- Kim, Y.C. & J. Anderson, A. (2018). Rhizosphere *pseudomonads* as probiotics improving plant health. *Molecular plant pathology*, 19 (10): 2349- 2359
- Lenteren, J.C., Bueno, V. H. P., Luna, M. G., Colmenarez, Y. C. (2020). *Biological Control in Latin America and the Caribbean: Its Rich History and Bright Future*. CAB digital library.
- Liu, F.P., Liu, H.Q., Zhou, H.L. & Dong, Z.G. (2014). Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from betel nut (*Areca catechu*) and their effects on plant growth and phosphorus mobilization in tropical soils. *Biology and Fertility of Soils*, 50: 927– 937.
- Liu, Q.B., Ding, Y.L., Shi, Y.T., Ma, L., Wang, Y. & Song, C.P. (2021). The calcium transporter ANNEXIN1 mediates cold-induced calcium signaling and freezing tolerance in plants. *EMBO J.* 40(2).
- Malusá, E. & Vassilev, N. A. (2014). Contribution to set a legal framework for biofertilisers. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98: 6599– 6607.
- Mark, G.L., Morrissey, J.P., Higgins, P. & Gara, F.O. (2006). Molecular-based strategies to exploit *Pseudomonas* biocontrol strains for environmental biotechnology applications. *FEMS Microbiology Ecology*, 56: 167– 177.
- Meena, V.S., Maurya, B.R. & Verma, J.P. (2014). Does a rhizospheric microorganism enhance K⁺ availability in agricultural soils?. *Microbiological Research*, 169 (5–6): 337-347.
- Menendez, E. & Garcia-Fraile, P. (2017). Plant probiotic bacteria: Solutions to feed the world. *AIMS Microbiology*, 3: 502– 524.
- Mehnaz, S. (2016). An Overview of Globally Available Bioformulations. In: Arora, N., Mehnaz, S., Balestrini, R. (eds). *Bioformulations: for Sustainable Agriculture*. New Delhi: Springer, 267– 281.
- Nicot, P.C., Alabouvette, C., Bardin, M., Blum, B., Köhl, J. & Ruocco, M. (2012). Review of factors influencing the success or failure of biocontrol: Technical, industrial and socio- economic perspectives. *Biol. Control Fungal and Bact. Journal of Plant Pathology*, 78: 95– 98
- Ortiz-Castro, R., Valencia-Cantero, E. & Lopez-Bucio, J. (2008). Plant growth promotion by *Bacillus megaterium* involves cytokinin signaling. *Plant Signaling & Behavior*, 3: 263– 265
- O'Callaghan, M., A. Ballard, R. & Wright, D. (2022). Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities. *Soil use and management*, 38(3): 1340- 1369
- Pallai, R., Hynes, R.K., Verma, B. & Nelson, L.M. (2012). Phytohormone production and colonization of canola (*Brassica napus* L.) roots by *Pseudomonas fluorescens* 6-8 under gnotobiotic conditions. *Canadian Journal of Microbiology*, 58: 170–178.
- Pretty, J., Sutherland, w. j., Ashby, J., Auburn, J., Baulcombe, D., Bell, M., Bentley, J., Bickersteth, S., Brown, K., Burke, J., Campbell, H., Chen, K., Crowley, E., Crute, I., Dobbelaere, D., Edwards-Jones, G., Funes- Monzote, F., Godfray, H. C.j., Griffon, M., Gypmantisiri, P., Haddad, L., Halavatau, S., Herren, H., Holderness, M., Izac, A.M., Jones, M., Koohafkan, P., Lal, R., Lang, T., McNeely, J., Mueller, A., Nisbett, N., Noble, A., Pingali, P., Pinto, Y., Rabbinge, R., Ravindranath, N. H., Rola, A., Roling, N., Sage, C., Settle, W., Sha, J.M., Shiming, L., Simons, T., Smith, P., Strzepeck, K., Swaine, H., Terry, E., Tomich, T.P., Toulmin, C., Trigo, E., Twomlow, S., Vis, J.K., Wilson, J. & Pilgrim, S. (2010). The top 100 questions of importance to the future of global agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 8: 219– 236.
- Prajapati, S., Kumar, N., Kumar, S., Iakharan, L. & Maurya, S. (2020). Biological control a sustainable approach for plant disease management: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9: 1514– 1523.
- Puri, A., Padda, K.P. & Chanway, C.P. (2016). Evidence of nitrogen fixation and growth promotion in canola (*Brassica napus* L.) by an endophytic diazotroph *Paenibacillus polymyxa* P2b-2R. *Biology and Fertility of Soils*, 52: 119–125.

- Rajkumar, M. & Freitas, H. (2008). Effects of inoculation of plant-growth promoting bacteria on Ni uptake by Indian mustard. *Bioresource Technology* 99(9): 3491- 3498
- Saleem, M., Arshad, M., Hussain, S. & Bhatti, A.S. (2007). Perspective of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) containing ACC- deaminase in stress agriculture. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 34: 635– 648.
- Sadeghi, A., Koobaz, P., Azimi, H., Karimi, E. & Akbari, A.R. (2017). Plant growth promotion and suppression of *Phytophthora drechsleri* damping-off in cucumber by cellulase-producing *Streptomyces*. *BioControl*, 62(1): 1- 15.
- Silo-Suh, LA., Lethbridge, B.J., Raffae, S.J., He, H., Clardy, J. & Handelsman, J. (2023). Biological activities of two fungistatic antibiotics produced by *Bacillus cereus* UW85. *Applied and Environmental Microbiology*, 60(6): 2023- 30.
- Sangeeth, KP., Bhai, R.S. & Srinivasan, V. (2012). *Paenibacillus glucanolyticus*, a promising potassium solubilizing bacterium isolated from black pepper (*Piper nigrum* L.) rhizosphere. *Journal of Spices and Aromatic Crops*, 21(1).
- Sheng, X.F. & He, L.Y. (2006). Solubilization of potassium- bearing minerals by a wild- type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat. *Canadian Journal of Microbiology*, 52: 66– 72.
- Shakeel, M., Rais, A., Hassan, M.N. & Hafeez, F.Y. (2015). Root Associated *Bacillus* sp. improves growth, yield and zinc translocation for basmati rice (*Oryza sativa*) varieties. *Front Microbiol.* 6: 1286.
- Sharma, A. & Johri, BN. (2003). Combat of iron-deprivation through a plant growth promoting *Pseudomonas fluorescent* strain GRP3A in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilzeck). *Microbiological Research*, 158(1): 77-81.
- Sundh, I. & Goettel, M.S. (2013). Regulating biocontrol agents: A historical perspective and a critical examination comparing microbial and macrobial agents. *BioControl*, 58: 575– 593.
- Spaepen, S., Vanderleyden, J. & Remans R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, 31 (4): 425– 448.
- Tahir, H.A.S., Gui, Q., Wu, H., Raza, W., Hanif, A., Wu, L., Colman, M.V. & Gao, X. (2017). Plant growth promotion by volatile organic compounds produced by *Bacillus subtilis* SYST2. *Frontiers in Microbiology*, 8: 1– 11.
- Tejera, N., Lluch, C., Martínez-Toledo, MV. & González-López, J. (2005). Isolation and characterization of *Azotobacter* and *Azospirillum* strains from the sugarcane rhizosphere. *Plant and Soil*, 270: 223– 232.
- Timper, P. (2014). Conserving and Enhancing Biological Control of Nematodes. *Journal of Nematology*, 46: 75– 89
- Umer, M., Mubeen, M., Iftikhar, Y., Shad, M.A., Usman, H.M., Sohail, M.A., Atiq, M.N., Abbas, A. & Ateeq, M. (2021). Role of Rhizobacteria on Plants Growth and Biological Control of Plant Diseases: A Review. *Plant Protection*, 5: 59– 73.
- Vessey, JK. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil* 255: 571– 586.
- Walker, R., Pille, C., Gupta, S. & Roessner, U. (2020). Current perspectives and applications in plant probiotics. *Microbiology Australia*, 41(2).
- Yu, Y., Gui, Y., Li, Z., Jiang, C., Guo, J. & Niu, D. (2022). Induced Systemic Resistance for Improving Plant Immunity by Beneficial Microbes. *Plants (Basel)*, 11(3): 386.
- Zhan, J. & McDonald, B.A. (2013). Field-based experimental evolution of three cereal pathogens using a mark- Release- recapture strategy. *Plant Pathol*, 62: 106- 114.
- Zhang, C. & Kong, F. (2014). Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants. *Applied Soil Ecology*, 82: 18– 25.
- Zuniga A., Poupin, M.J., Donoso, R., Ledger, T., Guiliani, N., Gutierrez, R.A. & Gonzalez, B. (2013). Quorum sensing and indole-3- acetic acid degradation play a role in colonization and plant growth promotion of *A. thaliana* by *Burkholderia phytofirmans* PsJN. *Molecular Plant- Microbe Interactions*, 26: 546-553.

Importance of Plant Probiotics in Sustainable Agriculture: Challenges and Solutions

Hashemi, S.¹ and Ahmadzade, M.²

It is necessary to move towards a productive and environmentally friendly agricultural system. Some microorganisms known as plant probiotics, can be used as biological fertilizers in the production of crops. Plant probiotics are compatible with any agricultural system, including the organic system, and play a special role in protecting the environment, reducing the need to use chemical pesticides, maintaining and improving the soil structure, and producing food for the growing world population. A better awareness and understanding of the functions of plant probiotics leads to accelerate the acceptance of the advantages and use of these microorganisms and creates a potential to overcome the obstacles to the acceptance of this management process. Some of the solutions to accelerate the adoption of biological control are increasing the awareness of farmers and stakeholde in the field of successful applied examples, clarifying the economic and environmental benefits of biological control as compared to chemical control, as well as incentive policies for the use of plant probiotics through the government and private sectors. In this article, in addition to addressing the importance of plant probiotics and their application to achieve an environmentally friendly and sustainable agricultural system, the challenges of using this management method and the solutions to solve these challenges have also been discussed.

Keywords: Plant probiotics, Biological control, Probiotic bacteria, Sustainable agriculture.

1. Corresponding author, Email: hashemi.sa@ut.ac.ir

2. Ph.D. Student and Professor, University of Tehran, Tehran, respectively.