

نقش باکتریهای افزایش دهنده رشد گیاهان (PGPR) در کشاورزی پایدار و کاهش کاربرد

سموم و کودهای شیمیایی

مرتضی قربانی*

ایران، بیرجند، دانشگاه بیرجند، پردیس علوم پایه، گروه زیست‌شناسی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴

چکیده

رشد گیاهان در خاکهای کشاورزی توسط تعداد زیادی فاکتورهای زنده و غیر زنده تحت تأثیر قرار می‌گیرد، ناحیه اطراف ریشه یعنی ریزوسفر از نظر مواد غذایی نسبتاً غنی است زیرا حدود ۴۰ درصد فرآورده‌های فتوسنتز از ریشه خارج می‌شوند در نتیجه در ریزوسفر جمعیت‌های میکروبی فعالی بوجود می‌آیند که برای رشد گیاهان ممکن است مفید، مضر یا بی‌تأثیر باشند. امروزه اهمیت جمعیت میکروبی ریزوسفر برای نگهداری سلامت ریشه، جذب مواد غذایی و تحمل استرس‌های محیطی شناخته شده است. دست‌کاری جمعیت میکروبی ریزوسفر از طریق تلقیح باکتریهای مفید جهت افزایش رشد گیاهان بطور قابل توجهی در مطالعات آزمایشگاهی و گلخانه‌ای مورد توجه قرار دارد. پتانسیل‌ها و فواید زیست‌محیطی این روش منجر به کاهش استفاده از سموم و کودهای شیمیایی و کمک به بهبود فرآیند کشاورزی پایدار می‌شود. پیشرفت‌های اخیر در دانش ما در مورد تعامل‌ها و برهمکنش‌های بیولوژیکی که در ریزوسفر اتفاق می‌افتند و پیشرفتهایی که در فرمولاسیون فرآورده‌های بیولوژیک صورت گرفته است استفاده تجاری از فرآورده‌های برهمکنش مفید را تسهیل می‌کند.

واژگان کلیدی: جمعیت میکروبی، ریزوسفر، سموم شیمیایی، کشاورزی پایدار، PGPR

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mghorbany@birjand.ac.ir

مقدمه

در این فرآیند تأثیر گذار هستند (۲۹). تولید موتانت‌هایی که این صفات را تغییر می‌دهند به ما کمک می‌کند که بتوانیم دقیقاً صفات و ژنهای را که در کلینزاسیون نقش دارند تعیین کنیم. این ژنها تحت عنوان ژنهای ریزوسفر شناخته می‌شوند (۲۰).

عوامل متعددی در توان کلونیزاسیون ریشه توسط باکتریهای افزایش دهنده رشد ایفای نقش می‌کنند شامل:

۱ - جلب شیمیایی (Chemotaxis): به معنی جلب شدن باکتریها به سمت ترکیبات ترشح شده از ریشه گیاه می‌باشد. یک سیستم دو جزئی پروتئینی بنام CheA/CheY مسئول تنظیم پدیده جلب شیمیایی است. CheA یک سنسوکیناز است که با سیگنال‌های محیطی واکنش می‌دهد و دومین انتقال فسفر دارد و فسفر را به CheY منتقل می‌کند و آنرا فعال می‌کند و این پروتئین با پروتئین M موتور تاژک واکنش می‌دهد. در باکتریها تاژک در جلو حرکت می‌کند و باکتری را به سمت خودش می‌کشد و

ریزو باکتریهای افزایش دهنده رشد گیاهان (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) باکتریهای خاکزی هستند که پس از تلقیح بر روی بذر، ریشه گیاه را کلونیزه می‌کنند و باعث افزایش رشد گیاه می‌شوند (۱۴).

مهمترین خصوصیت باکتریهای PGPR برای اینکه بتوانند با گیاه رابطه برقرار کنند و بر روی رشد آن تأثیر بگذارند داشتن توانایی کلونیزه کردن ریشه است. در فرآیند کلونیزاسیون موارد ذیل مهم است: توانایی بقای اینوکولوم بر روی بذر، تکثیر شدن در اسپرموسفر (ناحیه احاطه کننده بذر) در پاسخ به ترشحات بذر، چسبیدن به سطح ریشه، کلونیزه کردن سیستم ریشه در حال رشد و توانایی رقابت با میکرو ارگانیسمهای بومی همچنین صفات متنوع باکتریایی از جمله تحرک، جلب شیمیایی (chemotaxis) به ترشحات بذر و ریشه، تولید پیلی (Pili)، تولید ترکیبات سطحی ویژه در سلولها، توانایی استفاده از ترکیبات ترشحی ریشه و سیستم درک حد نصاب (Quorum sensing)

طریق ترشح آنزیمهای هیدرولیتیک و سرکوب پاسخهای دفاعی میزبان به کلونیزاسیون کمک می‌کنند. این سیستم توسط ژنهای مختلف از جمله ژنهای *hrp* کنترل می‌شود (۹).

۵ - یکی دیگر از عوامل دخیل در کلونیزاسیون سیستم *sss* می‌باشد ژن *sss* منجر به تولید پروتئین‌های آنزیمی *Site specific recombinases* می‌شود که از نوع *integrase* λ میباشند و عمل نوترکیبی خودبخودی را در داخل سلول باکتری کنترل می‌کنند. موتاسیون در این ژن قدرت کلونیزاسیون را کاهش می‌دهد این سیستم باعث فرآیند تنوع فازی *Phase variation* می‌شود که در نتیجه فنوتیپ‌های متفاوت از باکتری ایجاد می‌شوند. وجود فنوتیپ‌های متفاوت به باکتری این امکان را می‌دهد که در ریزوسفر جایگاههای متنوعی را اشغال کنند و جهت کلونیزاسیون و اشغال مکانی ریشه رقابت بهتری با سایر عوامل داشته باشند (۱۷).

مکانیزمهای افزایش رشد گیاهان توسط باکتریها

ریزو باکتریهای افزایش دهنده رشد گیاهان با روشهای مستقیم و غیر مستقیم باعث تقویت و افزایش رشد گیاه می‌شوند اما تمامی مکانیزمهای مربوط به برهم کنش آنها با گیاهان مشخص نشده است. مکانیزمهای مستقیم شامل کمک به تثبیت نیتروژن، جذب آهن و تولید هورمونهای گیاهی است در حالیکه مکانیزمهای غیر مستقیم منجر به کاهش اثرات مضر پاتوژنهای گیاهی می‌شوند از آن جمله می‌توان از توانایی تولید سیدروفورهای که آهن را جذب می‌کنند و آنرا از دسترس پاتوژن خارج می‌کنند، تولید متابولیت‌های ضد قارچی مانند آنتی‌بیوتیک‌ها و آنزیم‌های لیزکننده دیواره سلولی قارچها، تولید سیانید هیدورژن که سبب توقف رشد پاتوژنهای قارچی می‌شود و توانایی القاء مقاومت سیستمیک در گیاهان نام برد (۱۶).

تثبیت نیتروژن

بهترین مثال از مطالعات تبادل سیگنال در ریزوبیوم‌های همزیست لگومینوز مشاهده می‌شود که در آنجا گیاه ترکیبات فلاونوئید (Flavonoid) آزاد می‌کند که این ترکیبات بعنوان پیام‌ها یا سیگنال‌هایی برای باکتریها عمل می‌کنند که در پاسخ، باکتریها فاکتورهای گره زایی را ترشح می‌کنند. فاکتورهای گره زایی توسط ریشه‌های مویین گیاه دریافت می‌شوند و با عملی مشابه هورمون‌ها ایجاد گره در ریشه را

حرکت آن خلاف جهت عقربه‌های ساعت است. پس از واکنش *CheY* با پروتئین *M*، حرکت تاژک بر عکس و ساعت گرد می‌شود در نتیجه باکتری به سمت سیگنال مورد نظر تغییر جهت می‌دهد در اثر واکنش، *CheY* فسفر خودش را از دست می‌دهد و دوباره حرکت تاژک به حالت عادی برمی‌گردد. ۶ ژن جلب شیمیایی را کنترل می‌کنند و جهش در هر کدام کلونیزاسیون را متوقف می‌کند (۶).

۲ - تشخیص و اتصال (*Attachment*): بعد از جلب شیمیایی مرحله بعد پدیده تشخیص و اتصال است که به معنی اتصال باکتریها به سلولهای سطح ریشه می‌باشد و نقش مهمی در کلونیزاسیون دارد پروتئین‌های زیادی در این مورد شناخته شده اند. معروفترین آنها آگلوتینین (*agglutinin*) است که محصول ژن *agg* است. موتاسیون در این ژن کلونیزاسیون را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از خصوصیات دیگر مهم در اتصال باکتری به میزبان *O-antigene* موجود در لایه لیپو پلی ساکاریدی غشای خارجی است (۲۷).

۳ - توانایی سنتز و استفاده از مواد غذایی نیز در کلونیزاسیون مؤثر است. اصطلاح *Protrophy* برای اسیدهای آمینه بکار می‌رود فرضاً این که یک باکتری برای اسیدهای آمینه پروتروف است یعنی قادر است تمام اسیدهای آمینه مورد نیاز خودش را سنتز کند. در مقابل اصطلاح *Auxotroph* در مورد باکتریهایی بکار می‌رود که برای رشد به یک یا چند آمینو اسید نیاز دارند. اسیدهای آمینه موجود در خاک برای رفع نیازهای باکتری کافی نیست و *Auxotroph* بودن منجر به کاهش کلونیزاسیون و تکثیر می‌شود و باکتری کلونیزه کننده خوب باید برای اسیدهای آمینه و ویتامین‌ها *Protroph* باشد. قدرت استفاده از اسیدهای آلی نیز در فرایند کلونیزاسیون مهم است اسیدهای آلی مهم ترین ماده تشکیل دهنده تراوشات ریشه در ناحیه ریزوسفر هستند لذا قدرت استفاده از آنها در توان کلونیزاسیون باکتری نقش دارد (۴).

۴ - سیستم ترشحي نوع سوم یا *Type three secretory system* (*TTSS*): این سیستم ترشحي در باکتریهای گرم منفی چه مفید و چه بیماریزا وجود دارد و مسئول انتقال برخی مواد به خارج سلول می‌باشد و در ترشح پروتئین‌های خاص نقش دارد. در باکتریهای ریزوبیوم این سیستم در استقرار باکتری و ایجاد گره دخالت می‌کند و در سایر باکتریها از

۱- کمپلکس آهن را در اختیار گیاه قرار می دهند و در افزایش رشد گیاه نقش مستقیم ایفاء می کنند.

۲- عوامل بیماریزای گیاهی را از طریق خارج کردن آهن از دسترس آنها کنترل می کنند.

۳- در تجزیه آلاینده های شیمیایی دخالت دارند. اکثر میکروارگانیسمهای زیان آور سیانید ئیدروژن تولید می کنند که بازدارنده تنفس است و سیدروفور مانع تولید سیانید ئیدروژن توسط آنها می شود ، سیدروفورها به راحتی تتراکلرید کربن را تجزیه می کنند . بعضی از علف کش ها نیز توسط سیدروفورها تجزیه می شوند . برخی سیدروفورها یا فلزات سنگین کمپلکس تشکیل داده و در واقع به نوعی، از خاک سم زدایی می کنند (۲۳).

سنتز و تولید هورمونهای گیاهی :

یکی دیگر از مکانیسمهای مستقیم افزایش رشد توسط PGPR ، تأثیر گذاری بر مکانیزم های تنظیمی رشد گیاه از طریق تولید هورمونهای گیاهی است. گونه های باکتریایی زیادی قادر به تولید اکسین (auxin) و یا اتیلن هستند و سنتز جیبرلین ها (gibberellins) و سیتوکینین ها (cytokinins) نیز گزارش شده است (۳).

وارد کردن استرین رایزوباکتریایی WCS417 از *pseudomonas fluorescens* در خاک استریل باعث افزایش رشد *Arabidopsis thaliana* تا حد ۳۳ درصد و افزایش تشکیل ریشه های جانبی گردید که یک اثر طبیعی اکسین می باشد و توسعه ریشه های جانبی باعث افزایش ظرفیت جذب مواد غذایی می شود (۲۸).

باکتری *Azospirillum brasilense* با تولید اکسین باعث افزایش رشد گیاه می شود و موتانت های باکتریایی که ۷۰ درصد توانایی خودشان در تولید اکسین (Indole-acetic acid) را از دست داده اند رشد گیاه را افزایش نمی دهند (۵).

تولید آنتی بیوتیک

تولید مواد آنتی بیوتیک بعنوان یک عامل مهم در کاهش بسیاری از بیماریهای ریشه توسط باکتریهای افزایش دهنده رشد گیاهان می باشد . تاکنون تعدادی از ترکیبات آنتی بیوتیک که به وسیله سودوموناسهای فلئورسنت تولید می شوند از نظر ساختمان شیمیایی شناسایی شده اند ، اغلب آنها از گروه فنازین ها ، پیرول ها و مشتقات آندول می باشند

القاء می کنند که در آن باکتریهای ریزوبیوم می توانند نیتروژن را تثبیت کنند . باکتریها توسط کربوهیدراتهای تولید شده توسط گیاه رشد می کنند اما نیتروژن تثبیت شده جهت بیوسنتز آمینواسیدها را در اختیار گیاه قرار می دهند (۸).

در محیطهای دچار کمبود نیتروژن باکتریهای ریزوبیوم با تأمین آن سبب افزایش رشد گیاهان لگومینوز می شوند . . توانایی تثبیت نیتروژن اتمسفر در بسیاری گونه های باکتریایی که به صورت آزاد در خاک زندگی می کنند یا به صورت اندوفیت در ریشه گیاهان زندگی می کنند مشاهده شده است (۲۲).

تولید سیدروفور

سیدروفورها هم به صورت مستقیم و هم به صورت غیر مستقیم در افزایش رشد گیاهان توسط باکتری های PGPR نقش دارند، این ترکیبات با وزن ملکولی کم بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ دالتون در شرایط کمبود آهن تولید شده و با آهن تشکیل کمپلکس داده که این کمپلکس بطور اختصاصی توسط باکتری تولید کننده جذب می شود . سیدروفورها توسط تمام موجودات از جمله قارچها باکتریها و حتی برخی گیاهان (فیتوسیدروفور) تولید می شوند . هر موجودی که بتواند آهن غیر قابل دسترس را بدست آورد در رقابت موفق تر است . سودوموناس های فلئورسنت از نظر تولید سیدروفور به تمام میکروارگانیسمها برتری دارند (۱۰).

متخصصین معتقدند هر گونه، سیدروفور خاص خودش را دارد و اصطلاحی بنام Siderotyping معرفی شده و بعنوان یک مارکر جهت تشخیص گروه های سودوموناس می توان از آن استفاده کرد برخی می گویند برای استرین ها نیز سیدروفور اختصاصی است چون تفاوتها در زنجیره های جانبی باعث ایجاد ایزوفرم هایی از یک سیدروفور می شود. میل ترکیبی سیدروفور سودوموناس ها با آهن بالا است به عنوان مثال در pseudobactin سیدروفور با ۶ اکسیژن آهن را کلاته می کند (۱۸).

اهمیت سیدروفورها در کنترل برخی از میکروارگانیسم های خاک از جمله باکتری *Erwinia carotovora* عامل پوسیدگی نرم غده سیب زمینی از سال ۱۹۸۰ مطرح شده است (۲۴).

سیدروفورها ۳ نقش مهم بر عهده دارند.

القای مقاومت سیستمیک

باکتریهای افزایش دهنده رشد می‌توانند، با ایجاد مقاومت القایی سیستمیک منجر به مقاومت گیاهان نسبت به عوامل بیماریزا شوند این مقاومت ممکن است توسط یکی از دو مسیر ذیل ایجاد شود.

الف) مسیر مقاومت اکتسابی سیستمیک یا Systemic SAR (acquired resistance)

ب) مسیر مقاومت القایی سیستمیک یا Induced systemic ISR (resistance)

پیام رسانی SAR در گیاه به سالیسیلیک اسید (SA) و پروتئین تنظیمی NPR1 وابسته است افزایش توان و ظرفیت دفاعی ناشی از SAR معمولاً همراه تجمع پروتئین های مرتبط با بیماریزایی می‌باشد این پروتئینها در پاسخ به حمله پاتوژنها (قارچها، باکتریها، ویروسها) یا عوامل تنش زای محیطی در گیاهان تولید میشوند و تقویت ایمنی گیاه از طریق فعالیتهای ضد میکروبی، تجزیه دیواره سلولی پاتوژنها، و پیام رسانی دفاعی را برعهده دارند. PR-1 معمولاً بعنوان یک نشانگر القای SAR در نظر گرفته می‌شود (۱۳).

مسیر پیام رسانی در ISR مسیر جاسمونیک اسید - اتیلن (JA-ET) می‌باشد. در ISR هیچگونه تغییر ژنتیکی محسوسی در گیاه دیده نمی‌شود ولی برخلاف SAR طیف مقاومت آن بسیار وسیع است در این مسیر یک پروتئین تنظیمی تولید می‌شود که در تنظیم واکنشهای دفاعی گیاه نقش دارد. ترکیبات تولید شده توسط باکتری های PGPR یا به عبارتی الیستورهای باکتریایی در ایجاد مقاومت القایی نقش دارند که از آن جمله می‌توانیم از لیپوپلی ساکاریدها مانند لیپید A، سیدروفورها مانند سودوباکتین، تاژک، آنتی بیوتیک ها مانند ۲-۴ دی استیل فلوروگلوکوسینول و ترکیبات فرار مانند ۲ و ۳ بوتان دیول نام برد (۲۹).

بکارگیری عملی باکتریهای افزایش دهنده رشد گیاهان

انسان به طور ناخود آگاه مدتها یک عامل فعال در انتقال ارگانیزمها از یک خاک به خاکهای دیگر بوده است، استفاده از تجهیزات خاک‌ورزی و انتقال محموله‌های گیاهی از مهمترین عوامل این انتقال تصادفی است. نخستین انتقال آگاهانه یا تلقیح میکروارگانیزمهای مفید به خاک قرن‌ها قبل و زمانی اتفاق افتاد که زارعین دریافتند اگر خاک مزرعه‌ای را که در آن بقولات به خوبی عمل می‌آید

از آن جمله می‌توان از فنازین -۱- کربوکسیلیک اسید (phenazine-1-carboxylic acid) پایولوتئورین (pyoluteorin) و پیرول نیتترین (pyrrolnitrin) نام برد. تعدادی آنتی بیوتیک که حاوی ازت نیستند نیز شناخته شده که ترکیب ۲، ۴ - دی استیل فلوروگلوکوسینول (2,4-diacetyl phloroglucinol) از مهمترین آنها می‌باشد (۱۵).

تولید سیانید هیدروژن

تولید سیانید هیدروژن یک ویژگی آنتاگونیستی با ارزش است چون تولید آن از ثبات بالایی برخوردار است و اگر در آزمایشگاه تولید شود احتمال تولید آن در مزرعه و شرایط محیطی بالا است. سیانید هیدروژن را هم آنتی بیوتیک می‌دانند و هم سیدروفور چون قدرت کلاته کردن فلزات دو ظرفیتی را دارد دو ملکول سیانید هیدروژن یک فلز را کلاته می‌کنند، تولید سیانید هیدروژن تحت تأثیر پروتئین Anr (Anaerobic regulator) است که در شرایط غیرهوازی تولید می‌شود به همین دلیل در شرایط بی‌هوازی تولید آن افزایش می‌یابد تولید این متابولیت هم تحت تنظیم آهن است. شرایط بی‌هوازی در ریزوسفر معمولاً اتفاق می‌افتد و به دلیل وجود دیگر ارگانیزمها و تنفس ریشه محدودیت اکسیژن مهم است بنا براین برخی پروتئین های تنظیم کننده در شرایط کمبود اکسیژن فعال می‌شوند سیانید هیدروژن یک متابولیت ثانویه تولیدی توسط بسیاری از میکرو ارگانیزم ها بوده که مستقیماً از پرولین، گلیسین و یا گلیکوزیدهای سیانوزنیک ساخته می‌شود. همگی این مواد در ترشحات ریشه گیاهان دیده شده است. نکته قابل توجه اینکه تولید سیانید هیدروژن بوسیله سودوموناس های فلورسنت بستگی به حضور آهن سه ظرفیتی قابل جذب دارد لذا رقابت برای آهن بوسیله میکرو ارگانیزم‌ها روی تولید سیانید مؤثر است (۲۱).

سیانید هیدروژن یکی از متابولیت های مؤثر در کنترل برخی عوامل بیماریزای گیاهی می‌باشد. براساس یک کار تحقیقاتی، حداقل ۴۰٪ سودوموناس‌هایی که از ناحیه ریزوسفر سیب زمینی جدا شده بودند در شرایط آزمایشگاهی تولید سیانید هیدروژن کردند (۲۴). همچنین نقش سیانید هیدروژن تولید شده بوسیله استرین CHAO در کنترل بیماری پوسیدگی قهوه‌ای سیب زمینی به اثبات رسیده است (۱).

در موضوع امنیت غذایی، باید به مهندسی میکروارگانیسم‌های افزایش دهنده رشد گیاهان توجه شود. از این رو، استفاده از آنها در پاکسازی محیط زیست، انرژی‌های تجدیدپذیر و دستیابی به شیوه‌های کشاورزی پایدار توصیه می‌شود (۱۹).

جهت خود کفایی در تولید مواد غذایی، بازنگری در رویه‌های جاری به ویژه در استفاده از مواد شیمیایی کشاورزی (کود، علف‌کش و آفت‌کش) حیاتی است. استفاده از فرآورده‌های بیولوژیکی به عنوان جایگزین، نه تنها به افزایش حاصلخیزی خاک کمک می‌کند، بلکه از طریق بهبود عملکرد و افزایش کیفیت محصولات، درآمد کشاورزان و تولید ناخالص داخلی را افزایش می‌دهد. همچنین اثرات مخرب مواد شیمیایی بر زیست بوم را نیز کاهش می‌دهد. برخی از سویه‌های PGPR از جمله گونه‌های شناخته شده *Agrobacterium radiobacter*، *Azospirillum lipoferum*، *Burkholderia cepacia*، *Bacillus subtilis*، *Bacillus licheniformis*، *Pseudomonas chlororaphis*، *Streptomyces lydicus*، *Pseudomonas fluorescens* و *Bacillus pumilus* اخیراً توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. استفاده کارآمد از زیست فناوری این میکروها برای تامین مواد غذایی جمعیت انسانی در حال افزایش زمین، بسیار مهم است (۷).

نتیجه‌گیری

انجام تحقیقات بومی و محلی به منظور شناسایی مناسب‌ترین سویه جهت کاربرد در شرایط بوم شناختی متفاوت حائز اهمیت است، همچنین اصلاح ژنتیکی این میکروارگانیسم‌ها جهت تجاری سازی و تحقیقات پیرامون فرمولاسیون برتر آنها می‌بایست مورد توجه قرار گیرد و علاوه بر آن تبلیغات، ترویج و آموزش مناسب جهت استقبال کشاورزان از میکروارگانیسم‌های اصلاح شده و درک بهتر آنها از اهمیت به کارگیری باکتریهای افزایش دهنده رشد گیاهان (PGPR) می‌تواند اعمال سیاستهای کلان در خصوص اصلاح خاکهای آلوده، کاهش مصرف سموم و کودهای شیمیایی و نیز افزایش عملکرد در بخش کشاورزی را تسهیل کند.

با خاک مزرعه جدید مخلوط کنند، بر روی ریشه گیاهان گره‌هایی تشکیل شده و رشد بقولات در مزرعه جدید افزایش می‌یابد. در اواخر دهه ۱۸۰۰ میلادی استفاده از خاکهایی که دارای اینوکولوم طبیعی بودند جهت تلقیح کردن بذره‌های بقولات و خاک امری طبیعی شده بود و در ۱۸۹۶ میلادی در آمریکا حق امتیازی برای تلقیح خاک توسط ریزوبیوم برای کاشت بقولات به ثبت رسید. در دهه‌های بعد با کشف مکانیزم تثبیت نیتروژن اضافه کردن سایر ارگانیسم‌های تثبیت کننده به خاک مانند گونه‌های مختلف جنسهای *Azotobacter*، *Frankia* و *Azospirillum* رایج شد (۲۶).

اضافه کردن میکرو ارگانیسم‌ها به خاک به دو دلیل اصلی صورت می‌گیرد:

الف) مبارزه با عوامل بیماری‌زای گیاهی که امروزه به عنوان کنترل بیولوژیک شناخته می‌شود و با میکروارگانیسم‌هایی نظیر *Trichoderma*، *Gliocladium*، *Bacillus*، *Pseudomonas*، *Streptomyces*، *Paecilomyces* و *Beauveria* صورت می‌گیرد.

ب) بهبود تغذیه و رشد گیاه که توسط مکانیزم‌های مختلف صورت می‌گیرد از جمله تثبیت نیتروژن در *Rhizobium* و بهینه کردن جذب آهن توسط سودوموناس‌های فلئورسنت.

در قرن گذشته، انسان چالش بزرگ تامین امنیت غذایی مواجه شده است، که در صورت عدم برنامه ریزی و چاره اندیشی مناسب، پیامدهای احتمالی آن کل نژاد بشر را تحت تأثیر قرار خواهد داد. غلبه بر این چالش نیز کار آسانی نخواهد بود زیرا تا کنون فعالیتهای کشاورزی فشار زیادی بر اکوسیستم و منابع طبیعی ما وارد کرده است (۱۲).

کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و فاضلاب آلوده اثری پاک‌نشدنی بر محیط خاک می‌گذارند و جمعیت میکروبی را که به رشد گیاه کمک می‌کنند، تغییر می‌دهند. استفاده از مواد شیمیایی و کودهای کشاورزی سنتز شده اگرچه مزایای فوری دارند، اما به دلایل مختلف از جمله ورود فلزات سنگین به زنجیره غذایی، مرگ حیات زیستی خاک، تخریب محیط زیست و تغییر یا آسیب به بافت خاک، تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامتی محسوب می‌شوند (۲).

منابع

- Abd El-Rahman AF, Shaheen HA. 2016 . Biological control of the brown rot of potato, *Ralstonia solanacearum* and effect of bacterization with antagonists on promotion of potato growth. *Egyptian J Biol Pest Control.*;26(4):733-9.
- Alalaoui AC.2007. Fertilisation minérale des cultures: les éléments fertilisants majeurs (Azote, Potassium et Phosphore). *Bull Mens Inform Liaison* 155:1-4.
- Asghar H, Zahir Z, Arshad M, Khaliq A.2002. Relationship between in vitro production of auxins by rhizobacteria and their growth-promoting activities in *Brassica juncea* L. *Biology and Fertility of Soils*;35:231-7.
- Barr M, East AK, Leonard M, Mauchline TH, Poole PS. 2008 . In vivo expression technology (IVET) selection of genes of *Rhizobium leguminosarum* biovar *viciae* A34 expressed in the rhizosphere. *FEMS microbiology letters* 282(2):219-227.
- Carrillo-Flores E, Arreola-Rivera J, Pazos-Solís DM, Bocanegra-Mondragón M, Fierro-Romero G, Mellado-Rojas ME, Beltrán-Peña E. 2022. Participation of auxin transport in the early response of the *Arabidopsis* root system to inoculation with *Azospirillum brasilense*. *Phyton.*;91(11):2383.
- Feng H, Fu R, Hou X, Lv Y, Zhang N, Liu Y, Xu Z, Miao Y, Krell T, Shen Q, Zhang R. 2021. Chemotaxis of beneficial rhizobacteria to root exudates: the first step towards root–microbe rhizosphere interactions. *International Journal of Molecular Sciences* 22(13):6655.
- Glick BR. 2012. *Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications*. Scientifica Volume 2012 (2012), Article ID 963401, 15 pages.
- Gray EJ, Smith DL. 2005. Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the plant–bacterium signaling processes. *Soil biology and biochemistry*. 1;37(3):395-412
- Gupta G, Chauhan PS, Jha PN, Verma RK, Singh S, Yadav VK, Sahoo DK, Patel A. 2024. Secretory molecules from secretion systems fine-tune the host-beneficial bacteria (PGPRs) interaction. *Frontiers in Microbiology* 15:1355750.
- Hider RC, Kong X. 2010. Chemistry and biology of siderophores. *Natural product reports*.27(5):637-57.
- Joshi V, Joshi N, Vyas A, Jadhav SK. 2021. Pathogenesis-related proteins: Role in plant defense. In *Biocontrol agents and secondary metabolites* (pp. 573-590). Woodhead Publishing.
- Jordanis Chatzipavlidis, Io Kefalogianni, Anastassia Venieraki1 and Wilhelm Holzapfel (2013). Status and trends of the conservation and sustainable use of microorganisms in agroindustrial processes. Commission on genetic resources for food and agriculture.
- Kessmann H, Staub T, Ligon JJ, Oostendorp M, Ryals J. 1994. Activation of systemic acquired disease resistance in plants. *European Journal of Plant Pathology.*;100:359-69.
- Kloepper JW, Schroth MN. 1981. Plant growth-promoting rhizobacteria and plant growth under gnotobiotic conditions. *Phytopathology* 71(6):642-4.
- Lahiri D, Nag M, Sayyed RZ, Gafur A, Ansari MJ, Ray RR. 2022 . PGPR in biofilm formation and antibiotic production. In *Antifungal Metabolites of Rhizobacteria for Sustainable Agriculture* (pp. 65-82). Cham: Springer International Publishing.
- Liu Y, Xu Z, Chen L, Xun W, Shu X, Chen Y, Sun X, Wang Z, Ren Y, Shen Q, Zhang R. 2024. Root colonization by beneficial rhizobacteria. *FEMS Microbiology Reviews* 48(1):fuad066.
- Mavrodi OV, Mavrodi DV, Weller DM, Thomashow LS. 2006. Role of *ptsP*, *orfT*, and *sss* recombinase genes in root colonization by *Pseudomonas fluorescens* Q8r1-96. *Applied and Environmental Microbiology* 72(11):7111-7122.
- Meyer JM, Geoffroy VA, Baida N, Gardan L, Izard D, Lemanceau P, Achouak W, Palleroni NJ.2002. Siderophore typing, a powerful tool for the identification of fluorescent and nonfluorescent *pseudomonads*. *Applied and Environmental Microbiology*;68(6):2745-53.
- Noumavo PA, Agbodjato NA, Baba-Moussa F, Adjanohoun A, Baba-Moussa L. 2016. Plant growth promoting rhizobacteria: Beneficial effects for healthy and sustainable agriculture. *Afr. J. Biotech.*15 (27): 1452-1463.
- Rodelas B, Lithgow JK, Wisniewski-Dye F, Hardman A, Wilkinson A, Economou A, Williams P, Downie JA. Analysis of quorum-sensing-dependent control of rhizosphere-expressed (*rhi*) genes in *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*. *Journal of Bacteriology*. 1999 Jun 15;181(12):3816-23.
- Sehrawat A, Sindhu SS, Glick BR. 2022 . Hydrogen cyanide production by soil bacteria: Biological control of pests and promotion of plant growth in sustainable agriculture. *Pedosphere.*;32(1):15-38.
- Sepp SK, Vasar M, Davison J, Oja J, Anslan S, Al-Quraishy S, Bahram M, Bueno CG, Cantero JJ, Fabiano EC, Decocq G. 2023 . Global diversity and distribution of nitrogen-fixing bacteria in the soil. *Frontiers in plant science*. 20;14:1100235.
- Schalk IJ. 2024 . Bacterial siderophores: diversity, uptake pathways and applications. *Nature Reviews Microbiology*. 5:1-7.
- Schippers B. 1988 . Biological control of pathogens with rhizobacteria. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences.*;318(1189):283-93.
- Sharma I, Sharma S, Sharma V, Singh AK, Sharma A, Kumar A, Singh J, Sharma A. PGPR-Enabled bioremediation of pesticide and heavy metal-contaminated soil: A review of recent advances and emerging challenges. *Chemosphere*. 2024 Jun 21:142678.
- Smith RS. 1992. Legume inoculant formulation and application. *Canadian journal of microbiology.*;38(6):485-92.

Subramanyam S, Sardesai N, Babu CR. *Cenchrus setigerus* Vahl. secretes root agglutinins to promote colonization by plant growth-promoting rhizobacteria. *Brazilian Journal of Botany*. 2022 Jun;45(2):819-32.

Tanimoto E. 2005 . Regulation of root growth by plant hormones, roles for auxin and gibberellin. *Critical reviews in plant sciences*. 1;24(4):249-65.

Van Loon LC. 2007. Plant responses to plant growth-promoting rhizobacteria. *New perspectives and approaches in plant growth-promoting Rhizobacteria research* 243-54.

Zhu L, Huang J, Lu X, Zhou C. 2022 . Development of plant systemic resistance by beneficial rhizobacteria: Recognition, initiation, elicitation and regulation. *Frontiers in plant science*.;13:952397.

The role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in sustainable agriculture and reduction of pesticides and chemical fertilizers application

Ghorbani M.

Department of Biology, Faculty of Basic Science, University of Birjand, Birjand, I.R. of Iran

Abstract

Plant growth in agricultural soils is affected by a large number of biotic and abiotic factors. The area around the roots, the rhizosphere, is relatively rich in nutrients because about 40% of the products of photosynthesis are released from the roots. As a result, active microbial populations develop in the rhizosphere that may be beneficial, harmful, or ineffective for plant growth. Today, the importance of the rhizosphere microbial population for maintaining root health, nutrient absorption, and tolerance to environmental stresses is well known. Manipulation of the rhizosphere microbial population through inoculation of beneficial bacteria to enhance plant growth has received considerable attention in laboratory and greenhouse studies. The potential and environmental benefits of this method lead to a reduction in the use of Chemical pesticides and fertilizers and help improve sustainable agricultural processes. Recent advances in our knowledge of the biological interactions that occur in the rhizosphere and advances in the formulation of biological products facilitate the commercial use of beneficial interaction processes.

Keywords: chemical pesticides, Microbial population, PGPR, rhizosphere, sustainable agriculture