اولین کنفرانس بین‌المللی
علمی پژوهشی
در علوم پایه، انسانی، تجربی، آموزش و پرورش،
تربیت بدنی، مدارس دولتی، فنی و حرفه‌ای،
کاردانش و غیرانتفاعی در عصر نوین- بوشهر

MDOI-01-2026.0176
MNR--1-0F5C46

کاربرد باکتری‌های مفید در افزایش رشد و مقاومت گیاهان در برابر خشکی

علی مجدی و مالک سام

کارشناسی ارشد میکروبیولوژی

دکتری فیزیولوژی گیاهی

چکیده

خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی در محیط‌های کشاورزی است که با کاهش دسترسی گیاهان به آب، اختلال در فرایندهای فیزیولوژیکی و کاهش فعالیت‌های فتوسنتزی، رشد و عملکرد محصولات زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش شدت تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع آب، ضرورت استفاده از روش‌های نوین و سازگار با محیط زیست را برای کاهش خسارت‌های ناشی از کم‌آبی دوچندان کرده است. در این میان، باکتری‌های مفید خاکزی به دلیل توانایی تأثیرگذاری بر رشد و سازوکارهای دفاعی گیاهان، جایگاه ویژه‌ای در پژوهش‌های کشاورزی پایدار پیدا کرده‌اند. این میکروارگانیسم‌ها با استقرار در اطراف ریشه یا درون بافت‌های گیاهی، از طریق مجموعه‌ای از فعالیت‌های زیستی می‌توانند تحمل گیاه را در برابر تنش خشکی افزایش دهند. تولید هورمون‌های محرک رشد، تثبیت نیتروژن، افزایش قابلیت جذب فسفر و بهبود توسعه ریشه از جمله مهم‌ترین عملکردهای آن‌ها به شمار می‌رود. برخی باکتری‌ها با تولید آنزیم ACC دآمیناز، میزان اتیلن ناشی از تنش را کنترل کرده و از محدود شدن رشد ریشه جلوگیری می‌کنند. همچنین تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی به حفظ رطوبت اطراف ریشه، بهبود ساختمان خاک و افزایش پایداری خاکدانه‌ها کمک می‌کند. از دیگر سازوکارهای مهم این باکتری‌ها می‌توان به تنظیم تعادل اسمزی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب‌های ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن اشاره کرد. باکتری‌هایی مانند باسیلوس، سودوموناس و آزوسپیریلوم از جمله جنس‌های مهم در زمینه افزایش رشد و تحمل خشکی گیاهان محسوب می‌شوند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که کاربرد سویه‌های سازگار با گیاه میزبان می‌تواند موجب بهبود رشد ریشه، افزایش زیست‌توده و حفظ بهتر عملکرد گیاه در شرایط محدودیت آب شود. با این حال، میزان تأثیرگذاری این میکروارگانیسم‌ها به عواملی مانند نوع گیاه، ویژگی‌های خاک، شرایط اقلیمی و توانایی استقرار باکتری بستگی دارد. بنابراین، شناسایی سویه‌های کارآمد و بررسی سازگاری آن‌ها با شرایط محیطی مختلف، از ضرورت‌های توسعه این فناوری زیستی به شمار می‌رود. پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش باکتری‌های مفید در افزایش رشد و مقاومت گیاهان در برابر خشکی و تبیین مهم‌ترین سازوکارهای فیزیولوژیکی و زیستی مرتبط با آن انجام شده است. نتایج بررسی منابع نشان می‌دهد که استفاده هدفمند از این باکتری‌ها می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای مکمل در مدیریت تنش خشکی و دستیابی به کشاورزی پایدار مورد توجه قرار گیرد.

واژگان کلیدی :باکتری‌های مفید، تنش خشکی، رشد گیاه، مقاومت به خشکی، کشاورزی پایدار.

بیان مسئله

آب از مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر رشد و تکامل گیاهان است و تقریباً تمام فعالیت‌های حیاتی آن‌ها به وجود مقدار کافی از این منبع وابستگی دارد. جذب عناصر غذایی از خاک، انتقال مواد معدنی، حفظ فشار تورژسانس سلولی، انجام فرایند فتوسنتز و تنظیم دمای اندام‌های گیاهی، همگی تحت تأثیر وضعیت آبی گیاه قرار دارند. هنگامی که میزان رطوبت خاک کاهش پیدا می‌کند، ریشه‌ها با محدودیت بیشتری در جذب آب مواجه می‌شوند و این مسئله به‌تدریج تعادل طبیعی فعالیت‌های گیاه را بر هم می‌زند. در چنین شرایطی، گیاه برای مقابله با کمبود آب، مجموعه‌ای از واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را فعال می‌کند. با وجود این، در صورت تداوم یا افزایش شدت تنش، ظرفیت سازگاری گیاه محدود شده و رشد طبیعی آن با اختلال مواجه می‌شود. کاهش رشد اندام‌های هوایی، محدود شدن توسعه ریشه، کاهش تولید ماده خشک و افت عملکرد محصول از جمله پیامدهای مهم این شرایط هستند. این مسئله به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بارندگی نامنظم و منابع آبی محدود دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند(ارزانش و همکاران، ۱۳۹۱).

تنش خشکی علاوه بر کاهش میزان آب موجود در بافت‌های گیاهی، بر بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی نیز اثر می‌گذارد. یکی از نخستین واکنش‌های گیاه به کمبود آب، بسته شدن روزنه‌ها برای کاهش میزان تعرق است. اگرچه این واکنش به حفظ آب در بافت‌ها کمک می‌کند، اما ورود دی‌اکسیدکربن به برگ‌ها را نیز محدود کرده و در نتیجه می‌تواند شدت فتوسنتز را کاهش دهد. کاهش فتوسنتز به معنای محدود شدن تولید مواد آلی مورد نیاز برای رشد، تشکیل اندام‌های جدید و تکمیل مراحل زایشی است. از طرف دیگر، تنش خشکی ممکن است موجب افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن شود. تجمع بیش از اندازه این ترکیبات می‌تواند به غشاهای سلولی، پروتئین‌ها، رنگیزه‌های فتوسنتزی و سایر اجزای حیاتی آسیب برساند. بنابراین، مقاومت گیاه در برابر خشکی تنها به توانایی جذب آب محدود نمی‌شود، بلکه مجموعه‌ای از سازوکارهای دفاعی، تنظیمی و متابولیکی را در بر می‌گیرد(چیب و همکاران، ۲۰۲۳).

با توجه به اهمیت پیامدهای خشکی، روش‌های مختلفی برای کاهش آثار این تنش در کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اصلاح ارقام مقاوم، مدیریت صحیح آبیاری، افزایش مواد آلی خاک، استفاده از مالچ و بهبود روش‌های زراعی از جمله راهکارهایی هستند که می‌توانند در کاهش خسارت ناشی از کم‌آبی مؤثر باشند. با این حال، هر یک از این روش‌ها محدودیت‌هایی دارند و در تمام شرایط قابل اجرا نیستند. برای نمونه، تولید ارقام مقاوم به خشکی به زمان و سرمایه‌گذاری قابل‌توجه نیاز دارد و مدیریت آبیاری نیز در مناطقی که با کمبود شدید منابع آب مواجه هستند، همیشه پاسخگوی نیاز گیاهان نیست. از سوی دیگر، استفاده نامتعادل از برخی نهاده‌های شیمیایی ممکن است هزینه‌های تولید را افزایش داده و پیامدهای نامطلوبی برای محیط زیست ایجاد کند. به همین دلیل، توجه به روش‌هایی که بتوانند با استفاده از ظرفیت‌های طبیعی خاک و گیاه، مقاومت محصولات کشاورزی را افزایش دهند، اهمیت بیشتری یافته است. خاک تنها محیطی برای نگهداری ریشه و تأمین عناصر غذایی نیست، بلکه زیستگاه مجموعه گسترده‌ای از باکتری‌ها، قارچ‌ها و سایر موجودات میکروسکوپی است. بسیاری از این موجودات در ارتباط مستقیم با ریشه گیاهان زندگی می‌کنند و از ترکیبات آلی ترشح‌شده توسط ریشه استفاده می‌کنند. در مقابل، برخی از آن‌ها خدمات مفیدی مانند افزایش دسترسی به عناصر غذایی، تحریک رشد ریشه و محافظت از گیاه در برابر تنش‌های محیطی ارائه می‌دهند. ناحیه اطراف ریشه که ریزوسفر نامیده می‌شود، از نظر

فعالیت میکروبی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا در این محدوده، ارتباط متقابل میان ریشه و میکروارگانیسم‌ها با شدت بیشتری برقرار است. حضور باکتری‌های سودمند در این ناحیه می‌تواند ویژگی‌های زیستی و شیمیایی محیط اطراف ریشه را تغییر دهد و شرایط مناسب‌تری برای رشد گیاه فراهم کند.

باکتری‌های محرک رشد گیاه که با عنوان PGPR شناخته می‌شوند، از مهم‌ترین گروه‌های میکروبی مفید در خاک هستند. این باکتری‌ها می‌توانند به شکل مستقیم یا غیرمستقیم بر رشد و سلامت گیاه تأثیر بگذارند. تولید هورمون‌های گیاهی، تثبیت زیستی نیتروژن، حل‌سازی فسفات و افزایش قابلیت جذب برخی عناصر معدنی از جمله فعالیت‌های مستقیم آن‌ها محسوب می‌شود. در مقابل، تولید ترکیبات ضدبیماری، تحریک سامانه دفاعی گیاه و رقابت با عوامل بیماری‌زا از جمله سازوکارهای غیرمستقیم این میکروارگانیسم‌ها هستند. اهمیت این گروه در شرایط خشکی بیشتر مشخص می‌شود؛ زیرا در چنین شرایطی، فعالیت ریشه، جذب مواد غذایی و تعادل هورمونی گیاه دچار تغییر می‌شود. باکتری‌های مفید می‌توانند با اثرگذاری بر این فرایندها، بخشی از اختلالات ناشی از کمبود آب را کاهش دهند(میر جلیلی، ۱۳۹۵). یکی از موضوعات مهم در بررسی نقش باکتری‌های مفید، شناخت سازوکارهایی است که از طریق آن‌ها مقاومت گیاه در برابر خشکی افزایش پیدا می‌کند. برخی سویه‌های باکتریایی با تولید اکسین موجب افزایش رشد و انشعاب ریشه می‌شوند و در نتیجه، سطح تماس ریشه با خاک افزایش می‌یابد. گروهی دیگر با تولید آنزیم ACC دآمیناز، میزان پیش‌ساز اتیلن را کاهش می‌دهند و از افزایش بیش از اندازه این هورمون در شرایط تنش جلوگیری می‌کنند. تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی نیز می‌تواند به حفظ رطوبت پیرامون ریشه و پایداری خاکدانه‌ها کمک کند. علاوه بر این، برخی باکتری‌ها با تحریک فعالیت آنزیم‌های دفاعی گیاه، اثر مخرب ترکیبات اکسیدکننده را کاهش می‌دهند. مجموعه این فعالیت‌ها نشان می‌دهد که ارتباط میان باکتری و گیاه تنها به تأمین مواد غذایی محدود نیست و می‌تواند در تنظیم پاسخ‌های دفاعی گیاه نیز نقش داشته باشد. با وجود نتایج امیدوارکننده پژوهش‌های انجام‌شده، عملکرد باکتری‌های مفید در همه گیاهان و شرایط محیطی یکسان نیست. ممکن است یک سویه باکتریایی در خاکی مشخص موجب افزایش رشد گیاه شود، اما در خاکی دیگر به دلیل تفاوت در اسیدیته، شوری، بافت خاک یا رقابت با میکروارگانیسم‌های بومی، عملکرد مطلوبی نداشته باشد. همچنین نوع گیاه میزبان و میزان سازگاری آن با باکتری مورد استفاده، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت تلقیح دارد. از طرف دیگر، شدت و مدت تنش خشکی نیز می‌تواند میزان اثرگذاری باکتری‌ها را تغییر دهد. بنابراین، نمی‌توان انتظار داشت که یک گونه یا سویه باکتریایی در تمام شرایط محیطی نتیجه مشابهی ایجاد کند. این موضوع ضرورت بررسی دقیق ویژگی‌های زیستی باکتری‌ها و انتخاب سویه‌های متناسب با شرایط کشت را نشان می‌دهد(مقبلی و همکاران، ۱۴۰۴).

با توجه به مطالب مطرح‌شده، مسئله اصلی پژوهش حاضر بررسی چگونگی تأثیر باکتری‌های مفید بر رشد و مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی است. در این راستا، شناخت مهم‌ترین گروه‌های باکتریایی، بررسی سازوکارهای مؤثر بر افزایش تحمل کم‌آبی و ارزیابی پیامدهای کاربرد آن‌ها بر شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیکی گیاه اهمیت دارد. همچنین بررسی محدودیت‌های استفاده از این میکروارگانیسم‌ها می‌تواند به شناخت بهتر شرایط لازم برای کاربرد موفق آن‌ها کمک کند. هدف نهایی آن است که مشخص شود چگونه می‌توان از ظرفیت باکتری‌های مفید برای کاهش خسارت ناشی از خشکی و بهبود پایداری تولید محصولات کشاورزی استفاده کرد.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر ماهیت، مطالعه‌ای مروری و از نظر شیوه گردآوری اطلاعات، کتابخانه‌ای با رویکرد توصیفی ـ تحلیلی است. در این روش، اطلاعات مورد نیاز از طریق مطالعه و بررسی منابع علمی معتبر شامل مقاله‌های پژوهشی، مقاله‌های مروری، کتاب‌های تخصصی و گزارش‌های علمی مرتبط با موضوع باکتری‌های مفید، رشد گیاهان و تنش خشکی گردآوری شده است. در فرایند بررسی منابع، مطالب مرتبط با سازوکارهای اثرگذاری باکتری‌های محرک رشد گیاه، نقش آن‌ها در جذب عناصر غذایی، تنظیم هورمون‌های گیاهی، افزایش فعالیت سامانه آنتی‌اکسیدانی و بهبود تحمل کم‌آبی مورد توجه قرار گرفته‌اند. سپس اطلاعات استخراج‌شده بر اساس موضوعات اصلی دسته‌بندی و با رویکرد تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند تا ضمن شناسایی یافته‌های مشترک پژوهش‌ها، تفاوت‌ها و محدودیت‌های گزارش‌شده نیز مشخص شوند. در نهایت، نتایج مطالعات پیشین در قالب یک چارچوب منسجم برای تبیین نقش باکتری‌های مفید در افزایش رشد و مقاومت گیاهان در برابر خشکی ارائه شده است. این پژوهش فاقد آزمایش میدانی یا آزمایشگاهی مستقل بوده و نتایج آن بر پایه تحلیل و جمع‌بندی شواهد موجود در منابع علمی است.

مبانی نظری و یافته‌های پژوهش

تنش خشکی و تأثیر آن بر رشد و فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاهان

خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که در اثر کاهش میزان آب قابل‌دسترس برای گیاه ایجاد می‌شود. این شرایط ممکن است در نتیجه کاهش بارندگی، افزایش تبخیر و تعرق، محدودیت منابع آبی یا ویژگی‌های نامناسب خاک به وجود آید. هنگامی که رطوبت خاک به میزان قابل‌توجهی کاهش پیدا می‌کند، توانایی ریشه برای جذب آب محدود شده و وضعیت آبی اندام‌های مختلف گیاه تغییر می‌کند. شدت اثرات این تنش به عواملی مانند مرحله رشد، گونه گیاهی، مدت زمان کم‌آبی و شرایط محیطی بستگی دارد. برخی گیاهان در برابر کاهش تدریجی رطوبت خاک توانایی سازگاری بیشتری دارند، در حالی که گروهی دیگر حتی در مواجهه با تنش‌های نسبتاً کوتاه‌مدت نیز با کاهش رشد روبه‌رو می‌شوند. به همین دلیل، شناخت واکنش‌های گیاه به خشکی از موضوعات اساسی در فیزیولوژی گیاهی و مدیریت تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شود. یکی از مهم‌ترین پیامدهای خشکی، کاهش فشار تورژسانس سلول‌های گیاهی است. فشار تورژسانس برای حفظ استحکام بافت‌ها، توسعه سلولی و رشد اندام‌های مختلف اهمیت دارد. هنگامی که آب کافی در دسترس نباشد، سلول‌ها بخشی از آب خود را از دست می‌دهند و توانایی آن‌ها برای گسترش و تقسیم کاهش می‌یابد. این وضعیت به‌ویژه در بافت‌های جوان و در حال رشد اهمیت دارد؛ زیرا توسعه سلولی در این نواحی به وضعیت مناسب آب وابستگی زیادی دارد. در نتیجه، رشد برگ‌ها، ساقه و ریشه ممکن است محدود شود. کاهش سطح برگ نیز می‌تواند به‌عنوان واکنشی برای کاهش میزان تعرق رخ دهد، اما در عین حال ظرفیت جذب نور و انجام فتوسنتز را کاهش می‌دهد. بنابراین، کمبود آب از چند مسیر مختلف بر رشد گیاه اثر می‌گذارد و در صورت تداوم می‌تواند موجب کاهش زیست‌توده و عملکرد اقتصادی شود(دابی و همکاران، ۲۰۲۴)

از دیگر آثار مهم تنش خشکی، اختلال در فرایند فتوسنتز است. کاهش دسترسی به آب معمولاً موجب بسته شدن نسبی یا کامل روزنه‌ها می‌شود تا میزان خروج آب از سطح برگ کاهش پیدا کند. این واکنش اگرچه از نظر حفظ آب اهمیت دارد، اما

ورود دی‌اکسیدکربن به فضای بین‌سلولی برگ را محدود می‌کند. کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن در دسترس آنزیم روبیسکو می‌تواند سرعت تثبیت کربن را کاهش دهد. در شرایط تنش شدیدتر، علاوه بر محدودیت روزنه‌ای، آسیب‌های غیرروزنه‌ای نیز ممکن است در دستگاه فتوسنتزی ایجاد شوند. تغییر در فعالیت آنزیم‌های مرتبط با چرخه کالوین، کاهش پایداری رنگیزه‌های فتوسنتزی و اختلال در انتقال الکترون از جمله این تغییرات هستند. در نتیجه، میزان تولید مواد آلی کاهش یافته و انرژی لازم برای رشد و تکمیل مراحل رشدی گیاه محدود می‌شود(ورکوندا و همکاران، ۲۰۱۶).

تنش خشکی همچنین بر تعادل هورمونی گیاه تأثیر می‌گذارد. اسید آبسزیک یا ABA یکی از مهم‌ترین هورمون‌هایی است که در پاسخ به کمبود آب افزایش می‌یابد. این هورمون با تأثیر بر سلول‌های نگهبان روزنه، موجب کاهش باز بودن روزنه‌ها و کنترل تعرق می‌شود. از سوی دیگر، تغییر در میزان اکسین، سیتوکینین و اتیلن می‌تواند الگوی رشد اندام‌های مختلف را تحت تأثیر قرار دهد. افزایش بیش از اندازه اتیلن در شرایط تنش، در برخی گونه‌ها موجب پیری زودرس، کاهش رشد ریشه و محدود شدن توسعه اندام‌های گیاهی می‌شود. بنابراین، حفظ تعادل هورمونی یکی از عوامل مهم در سازگاری گیاه با شرایط کم‌آبی است. باکتری‌های مفید از طریق تأثیرگذاری بر تولید و تنظیم این ترکیبات می‌توانند در بهبود واکنش گیاه به خشکی نقش داشته باشند. یکی دیگر از پیامدهای مهم کم‌آبی، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن است. این ترکیبات در مقادیر کنترل‌شده در پیام‌رسانی سلولی نقش دارند، اما تجمع بیش از اندازه آن‌ها می‌تواند موجب تنش اکسیداتیو شود. پراکسید هیدروژن، سوپراکسید و رادیکال هیدروکسیل از جمله ترکیباتی هستند که در شرایط تنش ممکن است افزایش پیدا کنند. این مواد در صورت کنترل نشدن می‌توانند به لیپیدهای غشایی، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و رنگیزه‌های فتوسنتزی آسیب وارد کنند. گیاهان برای مقابله با این وضعیت از سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی استفاده می‌کنند که شامل آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز است. افزایش کارایی این سامانه می‌تواند به کاهش آسیب‌های اکسیداتیو و حفظ عملکرد سلولی کمک کند.

از نظر رشد ریشه، تنش خشکی معمولاً موجب تغییر در نحوه تخصیص مواد فتوسنتزی می‌شود. در برخی شرایط، گیاه با اختصاص سهم بیشتری از مواد تولیدشده به ریشه تلاش می‌کند توانایی جذب آب را افزایش دهد. با این حال، در صورت شدید بودن تنش، رشد ریشه نیز محدود خواهد شد. کاهش طول ریشه، افت تعداد ریشه‌های جانبی و تغییر در تراکم ریشه‌ها می‌تواند توانایی گیاه برای استفاده از آب موجود در لایه‌های مختلف خاک را تحت تأثیر قرار دهد. این تغییرات در مراحل اولیه رشد اهمیت زیادی دارند؛ زیرا توسعه مناسب سیستم ریشه‌ای می‌تواند به استقرار بهتر گیاه کمک کند. در چنین شرایطی، عواملی که موجب تحریک رشد ریشه و افزایش دسترسی آن به منابع آبی می‌شوند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در مجموع، تنش خشکی مجموعه‌ای از تغییرات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و رشدی را در گیاه ایجاد می‌کند که شدت آن‌ها به شرایط محیطی و ویژگی‌های ژنتیکی گیاه وابسته است. کاهش فتوسنتز، اختلال در تعادل هورمونی، افزایش تنش اکسیداتیو و محدود شدن رشد اندام‌ها از جمله مهم‌ترین پیامدهای این شرایط هستند. درک ارتباط میان این فرایندها می‌تواند به شناسایی راهکارهای مؤثر برای افزایش مقاومت گیاهان کمک کند. یکی از راهکارهای مورد توجه در این زمینه، استفاده از باکتری‌های مفید خاکزی است که می‌توانند از طریق تأثیرگذاری هم‌زمان بر چندین سازوکار دفاعی، ظرفیت تحمل گیاه را در برابر کم‌آبی افزایش دهند(تفرجی و همکاران، ۱۴۰۴).



شناسایی و ویژگی‌های باکتری‌های مفید محرک رشد گیاه

باکتری‌های محرک رشد گیاه گروهی از میکروارگانیسم‌های سودمند هستند که با استقرار در محیط اطراف ریشه یا درون بافت‌های گیاهی، موجب بهبود رشد و سلامت گیاه می‌شوند. این باکتری‌ها از نظر ویژگی‌های زیستی و نحوه ارتباط با گیاه میزبان تنوع زیادی دارند. برخی از آن‌ها در خاک آزادانه زندگی می‌کنند و در نزدیکی ریشه فعالیت دارند، در حالی که گروهی دیگر توانایی ورود به بافت‌های داخلی گیاه را پیدا می‌کنند. محیط ریزوسفر به دلیل وجود ترشحات ریشه، شرایط مناسبی برای رشد و فعالیت بسیاری از این باکتری‌ها فراهم می‌کند. ترکیباتی مانند قندها، اسیدهای آمینه و اسیدهای آلی که از ریشه ترشح می‌شوند، منابع غذایی مناسبی برای میکروارگانیسم‌ها هستند. در مقابل، باکتری‌های سودمند می‌توانند با انجام فعالیت‌های متابولیکی مختلف، شرایط رشد گیاه را بهبود بخشند. از جنس‌های مهم باکتریایی مورد توجه در این زمینه می‌توان به باسیلوس اشاره کرد. گونه‌های مختلف این جنس به دلیل توانایی تشکیل اندوسپور، از پایداری مناسبی در برابر برخی شرایط نامساعد محیطی برخوردار هستند. برخی سویه‌های باسیلوس می‌توانند هورمون‌های محرک رشد تولید کنند، دسترسی گیاه به عناصر غذایی را افزایش دهند و با تولید ترکیبات زیستی فعال، در بهبود سلامت ریشه نقش داشته باشند. تشکیل زیست‌لایه و تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی نیز از ویژگی‌هایی است که در برخی سویه‌های این جنس مشاهده می‌شود. این خصوصیات می‌توانند به استقرار باکتری در اطراف ریشه و بهبود شرایط محیطی آن کمک کنند. البته میزان اثرگذاری به گونه و سویه مورد استفاده وابسته است و نمی‌توان همه اعضای این جنس را از نظر عملکرد زیستی یکسان در نظر گرفت(کومار و همکاران، ۲۰۲۴).

سودوموناس از دیگر جنس‌های مهم باکتریایی است که در پژوهش‌های مرتبط با افزایش رشد و تحمل تنش‌های محیطی مورد بررسی قرار گرفته است. برخی گونه‌های این جنس توانایی تولید اکسین، حل‌سازی فسفات و تولید سیدروفور را دارند. سیدروفورها ترکیباتی هستند که آهن را در محیط جذب و برای استفاده میکروبی قابل‌دسترس می‌کنند. این ویژگی علاوه بر نقش تغذیه‌ای، در رقابت با برخی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا نیز اهمیت دارد. برخی سویه‌های سودوموناس با تولید متابولیت‌های ثانویه و ترکیبات آنتاگونیستی می‌توانند رشد عوامل بیماری‌زا را محدود کنند. همچنین در تعدادی از سویه‌ها، وجود آنزیم ACC دآمیناز موجب کاهش اثرات منفی افزایش اتیلن در شرایط تنش می‌شود. به همین دلیل، این جنس در مطالعات مربوط به سلامت ریشه و سازگاری گیاهان با شرایط محیطی نامساعد جایگاه مهمی دارد.

آزوسپیریلوم نیز از گروه‌های شناخته‌شده باکتری‌های محرک رشد گیاه است که ارتباط نزدیکی با ریشه بسیاری از گیاهان، به‌ویژه گیاهان خانواده گندمیان، برقرار می‌کند. این باکتری‌ها می‌توانند از طریق تثبیت زیستی نیتروژن و تولید ترکیبات تنظیم‌کننده رشد، به توسعه سیستم ریشه‌ای کمک کنند. افزایش تعداد ریشه‌های جانبی و تغییر در معماری ریشه از جمله اثراتی است که در برخی مطالعات پس از تلقیح گیاه با سویه‌های مناسب آزوسپیریلوم گزارش شده است. توسعه بهتر ریشه می‌تواند سطح جذب آب و مواد غذایی را افزایش دهد و به استقرار مناسب‌تر گیاه در خاک کمک کند. البته نقش این باکتری در تثبیت نیتروژن به شرایط محیطی، سویه و نوع گیاه میزبان وابسته است و نباید آن را جایگزینی کامل برای تمام نیازهای نیتروژنی گیاه دانست. انتروباکتر از دیگر جنس‌هایی است که برخی اعضای آن در مطالعات مرتبط با تحریک رشد گیاه و افزایش تحمل تنش‌های محیطی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بعضی از سویه‌های این جنس قادر به تولید اکسین، حل‌سازی

فسفات و تولید آنزیم ACC دآمیناز هستند. این ویژگی‌ها می‌توانند در بهبود رشد ریشه و کاهش برخی آثار منفی تنش‌های محیطی نقش داشته باشند. با این حال، انتخاب سویه‌های مناسب از این جنس نیازمند بررسی دقیق ایمنی زیستی است؛ زیرا بعضی از گونه‌های انتروباکتر می‌توانند با بیماری‌های انسانی یا حیوانی ارتباط داشته باشند. بنابراین، کاربرد کشاورزی آن‌ها باید بر پایه شناسایی دقیق گونه، ارزیابی خطر و تأیید ایمنی سویه انجام شود(دابی وهمکاران، ۲۰۲۴).

ویژگی مهم دیگری که در ارزیابی باکتری‌های مفید باید مورد توجه قرار گیرد، توانایی استقرار و پایداری آن‌ها در محیط ریشه است. صرف داشتن ویژگی‌های محرک رشد در شرایط آزمایشگاهی برای موفقیت یک سویه در مزرعه کافی نیست. باکتری باید بتواند در برابر رقابت میکروبی، تغییرات رطوبت، دما و شرایط شیمیایی خاک مقاومت کند و جمعیت مناسبی را در ناحیه ریشه حفظ نماید. همچنین توانایی اتصال به سطح ریشه، استفاده از ترشحات ریشه و سازگاری با گیاه میزبان می‌تواند بر موفقیت استقرار تأثیر بگذارد. به همین دلیل، ارزیابی باکتری‌ها باید علاوه بر بررسی ویژگی‌های آزمایشگاهی، شامل مطالعه عملکرد آن‌ها در خاک و شرایط واقعی کشت نیز باشد(مقبلی و همکاران، ۱۴۰۴).

در مجموع، باکتری‌های محرک رشد گیاه از نظر ساختار، ویژگی‌های متابولیکی و نحوه تعامل با گیاه تنوع زیادی دارند. جنس‌هایی مانند باسیلوس، سودوموناس و آزوسپیریلوم از گروه‌های مهم مورد بررسی در این حوزه محسوب می‌شوند. هر یک از این باکتری‌ها می‌توانند از طریق سازوکارهای متفاوت بر رشد ریشه، جذب عناصر غذایی و پاسخ گیاه به تنش خشکی اثر بگذارند. با این حال، عملکرد نهایی آن‌ها به ویژگی‌های سویه و شرایط محیطی بستگی دارد. بنابراین، شناسایی و انتخاب سویه‌های سازگار با گیاه میزبان، یکی از مراحل اساسی در توسعه کودهای زیستی و استفاده کاربردی از این میکروارگانیسم‌ها در کشاورزی است(بورگوهاین و همکاران، ۲۰۲۴).

سازوکارهای باکتری‌های مفید در افزایش مقاومت گیاهان به تنش خشکی

یکی از مهم‌ترین راه‌های تأثیرگذاری باکتری‌های مفید بر مقاومت گیاهان در برابر خشکی، تولید و تنظیم هورمون‌های محرک رشد است. هورمون‌های گیاهی نقش اساسی در تنظیم تقسیم سلولی، توسعه ریشه، رشد اندام‌های هوایی و پاسخ به شرایط محیطی دارند. برخی باکتری‌های محرک رشد قادر به تولید اکسین، به‌ویژه ایندول استیک اسید(IAA) ، هستند. این ترکیب در غلظت مناسب می‌تواند موجب افزایش طول ریشه، تشکیل ریشه‌های جانبی و توسعه تارهای کشنده شود. در نتیجه، سطح تماس ریشه با خاک افزایش پیدا می‌کند و گیاه امکان دسترسی به منابع آب و عناصر غذایی بیشتری را به دست می‌آورد. اهمیت این موضوع در شرایط خشکی بیشتر است؛ زیرا توسعه مناسب ریشه می‌تواند توانایی گیاه را برای استفاده از رطوبت موجود در لایه‌های مختلف خاک افزایش دهد. البته اثر اکسین به غلظت تولیدشده و نوع گیاه میزبان وابسته است و مقادیر بیش از اندازه آن ممکن است اثرات نامطلوبی بر رشد داشته باشد. یکی دیگر از سازوکارهای مهم باکتری‌های مفید، تولید آنزیم ACCدآمیناز است. در شرایط تنش خشکی، میزان تولید اتیلن در گیاه ممکن است افزایش پیدا کند و تجمع بیش از اندازه این هورمون، رشد ریشه و توسعه اندام‌های گیاهی را محدود سازد. ترکیب ACC پیش‌ساز مستقیم تولید اتیلن در گیاه است. باکتری‌های دارای آنزیم ACC دآمیناز می‌توانند این ترکیب را تجزیه کنند و از تبدیل بیش از اندازه آن به اتیلن جلوگیری نمایند. در نتیجه، اثرات بازدارنده افزایش اتیلن در شرایط تنش کاهش می‌یابد و امکان ادامه رشد ریشه و اندام‌های هوایی

فراهم می‌شود. این سازوکار به‌ویژه در گیاهانی که در مراحل حساس رشد با کمبود آب مواجه می‌شوند، اهمیت دارد. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که باکتری‌های دارای این آنزیم می‌توانند برخی شاخص‌های رشد و وضعیت فیزیولوژیکی گیاهان را در شرایط تنش بهبود بخشند .

تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی از دیگر ویژگی‌های مهم برخی باکتری‌های محرک رشد است. این ترکیبات که با عنوان EPSشناخته می‌شوند، در اطراف سلول‌های باکتریایی تولید شده و می‌توانند به ایجاد محیطی محافظ در ناحیه ریشه کمک کنند. پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی با اتصال ذرات خاک و مشارکت در تشکیل خاکدانه‌های پایدار، بر ساختمان فیزیکی خاک تأثیر می‌گذارند. همچنین این ترکیبات می‌توانند در نگهداری آب و کاهش سرعت تغییرات رطوبتی اطراف ریشه نقش داشته باشند. در شرایط خشکی، وجود این مواد در محیط ریشه ممکن است به حفظ بهتر رطوبت و کاهش اثرات منفی کم‌آبی کمک کند. برخی باکتری‌ها از طریق تشکیل زیست‌لایه نیز ارتباط پایدارتری با سطح ریشه برقرار می‌کنند. این ویژگی علاوه بر افزایش پایداری جمعیت باکتریایی، می‌تواند در محافظت از ناحیه ریشه در برابر تغییرات نامساعد محیطی مؤثر باشد. بنابراین، تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی یکی از سازوکارهای مهم در ارتباط میان ویژگی‌های زیستی باکتری و شرایط فیزیکی خاک محسوب می‌شود(میر جلیلی، ۱۳۹۵).

تنظیم تعادل اسمزی از دیگر فرایندهایی است که باکتری‌های مفید می‌توانند در آن نقش داشته باشند. هنگامی که گیاه با کمبود آب مواجه می‌شود، پتانسیل آب سلول‌ها تغییر می‌کند و حفظ آب درون سلولی دشوارتر می‌شود. گیاه برای مقابله با این شرایط، ترکیباتی را در سلول تجمع می‌دهد که به آن‌ها اسمولیت‌های سازگار گفته می‌شود. پرولین، گلیسین بتائین، قندهای محلول و برخی آمینواسیدها از جمله این ترکیبات هستند. این مواد بدون ایجاد اختلال جدی در فعالیت طبیعی سلول، به تنظیم فشار اسمزی و حفظ آب در بافت‌ها کمک می‌کنند. برخی باکتری‌های مفید با تأثیرگذاری بر مسیرهای متابولیکی گیاه می‌توانند تجمع این ترکیبات را افزایش دهند. همچنین برخی سویه‌ها قادر به تولید یا تنظیم متابولیت‌های محافظتی هستند که در تحمل شرایط کم‌آبی نقش دارند. در نتیجه، گیاه تلقیح‌شده ممکن است در مقایسه با گیاهان فاقد باکتری، توانایی بیشتری برای حفظ تعادل آب سلولی داشته باشد. تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانی از دیگر آثار مهم ارتباط میان باکتری‌های مفید و گیاهان تحت تنش خشکی است. همان‌طور که اشاره شد، کمبود آب می‌تواند موجب افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن شود و در صورت تجمع بیش از اندازه، آسیب‌های اکسیداتیو ایجاد کند. گیاهان برای کنترل این وضعیت از مجموعه‌ای از آنزیم‌های دفاعی استفاده می‌کنند. سوپراکسید دیسموتاز نخستین مرحله دفاع آنزیمی در برابر رادیکال سوپراکسید را بر عهده دارد و آن را به پراکسید هیدروژن تبدیل می‌کند. سپس آنزیم‌هایی مانند کاتالاز و پراکسیداز در تجزیه پراکسید هیدروژن نقش دارند. برخی باکتری‌های محرک رشد با تحریک فعالیت این آنزیم‌ها می‌توانند ظرفیت دفاعی گیاه را افزایش دهند. علاوه بر آن، ترکیبات آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی مانند اسید آسکوربیک و گلوتاتیون نیز در حفظ تعادل اکسیداسیون و احیا اهمیت دارند. به این ترتیب، فعالیت باکتری‌های مفید می‌تواند در کاهش آسیب به غشاهای سلولی و حفظ عملکرد طبیعی بافت‌های گیاهی مؤثر باشد.(دابی و همکاران، ۲۰۲۴).

تولید ترکیبات فرار میکروبی نیز یکی از سازوکارهای مورد توجه در بررسی اثرات باکتری‌های محرک رشد گیاه است. برخی باکتری‌ها ترکیبات آلی فراری تولید می‌کنند که بدون نیاز به تماس مستقیم با سلول‌های گیاهی، قادر به تأثیرگذاری بر

فرایندهای رشدی و دفاعی هستند. این ترکیبات می‌توانند مسیرهای پیام‌رسانی سلولی را تحت تأثیر قرار دهند و در برخی شرایط موجب تغییر در بیان ژن‌های مرتبط با تحمل تنش شوند. ترکیبات فرار باکتریایی ممکن است بر توسعه ریشه، فعالیت فتوسنتزی و پاسخ‌های دفاعی گیاه تأثیر بگذارند. همچنین برخی از این مواد در تحریک مقاومت سیستمیک گیاه نقش دارند؛ به این معنا که حضور باکتری در ناحیه ریشه می‌تواند پاسخ‌های دفاعی را در بخش‌های دیگر گیاه نیز فعال کند. البته نوع ترکیب تولیدشده، غلظت آن و واکنش گیاه میزبان در تعیین نتیجه نهایی اهمیت دارند. بنابراین، ترکیبات فرار باکتریایی را می‌توان بخشی از شبکه پیچیده ارتباط میان میکروارگانیسم‌ها و گیاهان در شرایط تنش دانست. در مجموع، افزایش مقاومت گیاهان در برابر خشکی حاصل عملکرد یک سازوکار منفرد نیست، بلکه نتیجه تعامل چندین مسیر زیستی و فیزیولوژیکی است. تولید هورمون‌های محرک رشد، تنظیم میزان اتیلن، تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی، بهبود تعادل اسمزی و تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانی می‌توانند به‌صورت هم‌زمان در این فرایند مشارکت داشته باشند. اهمیت این موضوع در آن است که باکتری‌های مفید قادرند هم‌زمان بر وضعیت تغذیه‌ای، رشد ریشه و واکنش‌های دفاعی گیاه تأثیر بگذارند. به همین دلیل، استفاده از سویه‌هایی که چند ویژگی مفید را به‌طور هم‌زمان دارند، می‌تواند در توسعه راهکارهای زیستی مدیریت تنش خشکی مؤثر باشد. البته تعیین میزان اثرگذاری هر سازوکار به نوع باکتری، گیاه میزبان و شرایط محیطی وابسته است و برای نتیجه‌گیری قطعی، انجام آزمایش‌های اختصاصی ضروری خواهد بود(سینگ و همکاران، ۲۰۲۴).

تأثیر باکتری‌های مفید بر رشد، تغذیه و عملکرد گیاهان در شرایط کم‌آبی

یکی از مهم‌ترین آثار کاربرد باکتری‌های مفید، بهبود توسعه سیستم ریشه‌ای گیاهان است. ریشه نخستین اندامی است که با خاک و منابع آبی موجود در آن ارتباط برقرار می‌کند و نقش اصلی را در جذب آب و عناصر معدنی بر عهده دارد. در شرایط خشکی، توسعه مناسب ریشه می‌تواند به گیاه کمک کند تا از رطوبت موجود در بخش‌های عمیق‌تر خاک نیز استفاده نماید. برخی باکتری‌های محرک رشد از طریق تولید اکسین و سایر ترکیبات تنظیم‌کننده رشد، موجب افزایش طول ریشه، تعداد ریشه‌های جانبی و تشکیل تارهای کشنده می‌شوند. این تغییرات می‌توانند سطح جذب ریشه را افزایش داده و توانایی گیاه را برای دسترسی به آب بهبود بخشند. علاوه بر این، توسعه مناسب ریشه در مراحل اولیه رشد می‌تواند استقرار گیاه را در خاک تقویت کند. از این رو، استفاده از باکتری‌های مناسب در زمان کاشت بذر یا استقرار نشا می‌تواند به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود رشد اولیه مورد توجه قرار گیرد. تأمین عناصر غذایی یکی دیگر از زمینه‌هایی است که باکتری‌های مفید از طریق آن بر رشد گیاهان اثر می‌گذارند. کمبود آب معمولاً انتقال و جذب عناصر غذایی را با مشکل مواجه می‌کند؛ زیرا حرکت عناصر در محلول خاک و رسیدن آن‌ها به سطح ریشه به میزان رطوبت وابسته است. برخی باکتری‌ها با تثبیت زیستی نیتروژن، بخشی از نیاز گیاه به این عنصر را تأمین می‌کنند. گروهی دیگر از طریق تولید اسیدهای آلی و ترکیبات حل‌کننده فسفات، قابلیت استفاده گیاه از فسفر موجود در خاک را افزایش می‌دهند. همچنین تولید سیدروفورها می‌تواند در جذب آهن و بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه نقش داشته باشد. بهبود تغذیه معدنی در شرایط کم‌آبی اهمیت زیادی دارد؛ زیرا عناصر غذایی در فعالیت آنزیم‌ها، تنظیم اسمزی، تشکیل رنگیزه‌های فتوسنتزی و حفظ سلامت بافت‌ها مشارکت دارند. البته میزان تأمین عناصر غذایی از طریق باکتری‌ها به نوع خاک و ویژگی‌های سویه مورد استفاده بستگی دارد. (تفرجی و همکاران، ۱۴۰۴).

یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی اثر تنش خشکی، میزان کلروفیل و وضعیت رنگیزه‌های فتوسنتزی در برگ‌هاست. کاهش رطوبت خاک در بسیاری از گیاهان می‌تواند موجب کاهش مقدار کلروفیل و اختلال در عملکرد دستگاه فتوسنتزی شود. این تغییرات در نهایت بر میزان تولید مواد آلی و رشد گیاه تأثیر می‌گذارند. برخی باکتری‌های محرک رشد از طریق بهبود وضعیت تغذیه‌ای و کاهش تنش اکسیداتیو می‌توانند به حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی کمک کنند. همچنین بهبود جذب نیتروژن و منیزیم در شرایط کم‌آبی می‌تواند در پایداری ساختار و عملکرد کلروفیل مؤثر باشد. حفظ نسبی مقدار کلروفیل در برگ‌ها به گیاه اجازه می‌دهد که در شرایط محدودیت آب، بخشی از ظرفیت فتوسنتزی خود را حفظ کند. با این حال، این اثر به شدت تنش و میزان سازگاری باکتری با گیاه میزبان بستگی دارد و در تمام گونه‌ها یکسان نیست. حفظ وضعیت آبی گیاه یکی دیگر از پیامدهای مهم تلقیح با باکتری‌های مفید است. محتوای نسبی آب برگ یکی از شاخص‌هایی است که برای ارزیابی وضعیت آبی بافت‌های گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزایش توانایی جذب آب، بهبود توسعه ریشه و تنظیم فعالیت روزنه‌ها می‌توانند به حفظ بهتر این شاخص کمک کنند. برخی باکتری‌ها نیز با تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی، شرایط مناسب‌تری را در اطراف ریشه برای نگهداری آب ایجاد می‌کنند. حفظ وضعیت آبی مناسب به پایداری غشاهای سلولی و استمرار فعالیت‌های متابولیکی کمک می‌کند. از طرف دیگر، تنظیم بهتر تعرق و تبادل گازی می‌تواند در استفاده کارآمدتر از آب نقش داشته باشد. بنابراین، ارزیابی محتوای نسبی آب برگ در مطالعات مربوط به باکتری‌های محرک رشد، اطلاعات ارزشمندی درباره میزان تحمل گیاه به خشکی فراهم می‌کند(بورگوهایت و همکاران، ۲۰۲۴).

باکتری‌های مفید می‌توانند بر میزان رشد اندام‌های هوایی و تولید زیست‌توده نیز تأثیرگذار باشند. کاهش رشد ساقه و برگ یکی از واکنش‌های رایج گیاهان به تنش خشکی است؛ زیرا گیاه در چنین شرایطی تلاش می‌کند مصرف آب را کاهش دهد و منابع موجود را برای حفظ اندام‌های ضروری اختصاص دهد. با این حال، اگر این محدودیت شدید باشد، رشد عمومی و ظرفیت تولید محصول کاهش پیدا می‌کند. برخی باکتری‌های محرک رشد از طریق بهبود تغذیه، تنظیم هورمونی و افزایش تحمل فیزیولوژیکی، می‌توانند کاهش رشد اندام‌های هوایی را تعدیل کنند. افزایش وزن خشک ریشه و اندام هوایی، طول ساقه و سطح برگ از جمله شاخص‌هایی هستند که در ارزیابی این اثرات مورد بررسی قرار می‌گیرند. افزایش این شاخص‌ها در گیاهان تلقیح‌شده می‌تواند نشان‌دهنده بهبود شرایط رشد باشد، هرچند برای اثبات افزایش عملکرد اقتصادی باید شاخص‌های تولید محصول نیز بررسی شوند. تأثیر باکتری‌های مفید بر عملکرد نهایی محصولات کشاورزی از اهمیت اقتصادی ویژه‌ای برخوردار است. بهبود رشد رویشی لزوماً به معنای افزایش قطعی عملکرد دانه، میوه یا سایر اندام‌های اقتصادی نیست؛ زیرا مراحل زایشی گیاه نیز به شرایط آبی و تغذیه‌ای حساس هستند. در برخی محصولات، تنش خشکی در زمان گل‌دهی موجب کاهش تشکیل دانه یا میوه می‌شود و در مراحل بعدی نیز می‌تواند وزن و کیفیت محصول را کاهش دهد. اگر باکتری‌های مفید بتوانند وضعیت آبی، جذب عناصر غذایی و فعالیت فتوسنتزی را در این مراحل حفظ کنند، احتمال کاهش خسارت محصول وجود دارد. در مطالعات انجام‌شده روی گندم، برخی سویه‌های باکتریایی با بهبود وضعیت آبی و تغذیه معدنی گیاه، اثرات مثبتی بر رشد و کیفیت دانه نشان داده‌اند. با این حال، میزان افزایش عملکرد به شرایط آزمایش و محیط کشت وابسته است و نمی‌توان نتایج یک مطالعه را بدون بررسی به تمام محصولات تعمیم داد . از نظر مدیریت کشاورزی، زمان و روش کاربرد باکتری‌های مفید نیز در میزان موفقیت آن‌ها اهمیت دارد. تلقیح بذر، آغشته‌سازی ریشه نشا و استفاده از فرمولاسیون‌های زیستی در خاک از روش‌های رایج کاربرد این میکروارگانیسم‌ها هستند. در روش تلقیح بذر، باکتری در مراحل ابتدایی جوانه‌زنی در مجاورت ریشه

قرار می‌گیرد و فرصت بیشتری برای استقرار در ریزوسفر پیدا می‌کند. در روش آغشته‌سازی ریشه نیز باکتری مستقیماً با سطح ریشه تماس پیدا می‌کند و می‌تواند در مراحل اولیه انتقال نشا فعالیت خود را آغاز کند. انتخاب روش مناسب به نوع محصول، شرایط کشت و ویژگی‌های فرمولاسیون باکتریایی بستگی دارد. همچنین رعایت شرایط نگهداری فرآورده‌های زیستی اهمیت زیادی دارد؛ زیرا کاهش زنده‌مانی باکتری‌ها می‌تواند کارایی محصول را محدود کند. در نتیجه، کاربرد موفق این میکروارگانیسم‌ها نیازمند توجه هم‌زمان به کیفیت فرآورده و مدیریت صحیح مزرعه است(ارزانش و همکاران، ۱۳۹۱).

محدودیت‌ها، چالش‌ها و چشم‌انداز کاربرد باکتری‌های مفید در کشاورزی پایدار

با وجود ظرفیت قابل‌توجه باکتری‌های محرک رشد گیاه در افزایش تحمل خشکی، استفاده از آن‌ها با محدودیت‌هایی همراه است که باید پیش از کاربرد گسترده مورد توجه قرار گیرند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، تفاوت شرایط محیطی میان آزمایشگاه، گلخانه و مزرعه است. در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی، بسیاری از عوامل محیطی مانند دما، رطوبت و ترکیب خاک قابل‌کنترل هستند و باکتری‌ها فرصت مناسبی برای نشان دادن ویژگی‌های زیستی خود دارند. اما در مزرعه، تغییرات دمایی، نوسانات رطوبت، رقابت با جمعیت میکروبی بومی و تفاوت‌های شیمیایی خاک می‌توانند بر فعالیت باکتری‌ها اثر بگذارند. به همین دلیل، نتایج مثبت به‌دست‌آمده در شرایط آزمایشگاهی همیشه به همان میزان در محیط طبیعی تکرار نمی‌شوند. این مسئله نشان می‌دهد که ارزیابی سویه‌های باکتریایی باید در چند مرحله و تحت شرایط متنوع انجام شود.

یکی دیگر از چالش‌های مهم، اختصاصی بودن رابطه میان باکتری و گیاه میزبان است. همه باکتری‌های مفید توانایی برقراری ارتباط مؤثر با تمام گونه‌های گیاهی را ندارند. ممکن است یک سویه باکتریایی در یک گیاه موجب افزایش رشد و توسعه ریشه شود، اما در گیاه دیگر اثر مشخصی نداشته باشد. تفاوت در ترکیبات ترشح‌شده از ریشه، ویژگی‌های ژنتیکی گیاه و توانایی باکتری برای استفاده از منابع غذایی موجود در ریزوسفر می‌تواند بر این ارتباط تأثیر بگذارد. همچنین برخی گیاهان به دلیل ویژگی‌های فیزیولوژیکی خاص خود، واکنش متفاوتی به هورمون‌ها و متابولیت‌های تولیدشده توسط باکتری‌ها نشان می‌دهند. بنابراین، انتخاب باکتری باید با توجه به نوع محصول و شرایط کشت انجام شود و استفاده عمومی از یک سویه برای همه گیاهان توصیه نمی‌شود. پایداری و ماندگاری فرآورده‌های زیستی نیز از مسائل مهم در توسعه کاربرد کشاورزی باکتری‌های مفید است. باکتری‌ها برای حفظ فعالیت خود در طول دوره نگهداری و پس از ورود به خاک به شرایط مناسبی نیاز دارند. تغییرات دما، رطوبت، اسیدیته و تماس با برخی مواد شیمیایی می‌تواند موجب کاهش جمعیت زنده آن‌ها شود. از این رو، تولید فرمولاسیون‌های مناسب که بتوانند زنده‌مانی و فعالیت باکتری را حفظ کنند، اهمیت زیادی دارد. استفاده از مواد حامل مناسب، بسته‌بندی استاندارد و رعایت شرایط نگهداری می‌تواند در افزایش کیفیت فرآورده‌های میکروبی مؤثر باشد. همچنین سازگاری باکتری با کودها و سایر نهاده‌های کشاورزی باید بررسی شود تا کاربرد هم‌زمان آن‌ها موجب کاهش فعالیت میکروارگانیسم نشود. توسعه فناوری‌های تولید و نگهداری کودهای زیستی می‌تواند یکی از عوامل اصلی افزایش اعتماد کشاورزان به این محصولات باشد(سینگ و همکاران، ۲۰۲۴).

یکی دیگر از زمینه‌های مورد توجه، استفاده هم‌زمان از چند سویه باکتریایی در قالب کنسرسیوم‌های میکروبی است. در این روش، دو یا چند سویه با ویژگی‌های مکمل در یک فرآورده ترکیب می‌شوند تا از طریق فعالیت‌های متفاوت، اثرات گسترده‌تری

بر رشد و تحمل گیاه داشته باشند. برای مثال، یک سویه ممکن است توانایی تثبیت نیتروژن داشته باشد، در حالی که سویه دیگر در حل‌سازی فسفات یا تولید آنزیم ACC دآمیناز مؤثر باشد. چنین ترکیبی در صورت سازگاری سویه‌ها می‌تواند چندین نیاز گیاه را به‌طور هم‌زمان پوشش دهد. با این حال، ترکیب باکتری‌ها همیشه نتیجه مطلوب ایجاد نمی‌کند؛ زیرا احتمال رقابت غذایی، تولید ترکیبات بازدارنده و کاهش توانایی استقرار برخی سویه‌ها وجود دارد. بنابراین، پیش از تولید فرآورده‌های چندسویه‌ای باید سازگاری متقابل باکتری‌ها و عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف بررسی شود(مقبلی و همکاران، ۱۴۰۴).

از منظر زیست‌محیطی، استفاده از باکتری‌های مفید می‌تواند بخشی از راهبردهای کاهش وابستگی کشاورزی به نهاده‌های شیمیایی باشد. این میکروارگانیسم‌ها در صورت انتخاب و کاربرد صحیح می‌توانند به افزایش کارایی جذب عناصر غذایی و بهبود فعالیت زیستی خاک کمک کنند. همچنین برخی از آن‌ها با رقابت با عوامل بیماری‌زا و تولید ترکیبات بازدارنده، در حفظ سلامت گیاه نقش دارند. استفاده از کودهای زیستی در کنار مدیریت صحیح آبیاری و تغذیه می‌تواند به بهبود پایداری نظام‌های کشاورزی کمک کند. البته نباید چنین برداشت شود که باکتری‌های مفید به‌تنهایی قادرند تمام مشکلات ناشی از خشکی یا نیازهای تغذیه‌ای گیاه را برطرف کنند. کاربرد آن‌ها زمانی بیشترین اثربخشی را خواهد داشت که در قالب یک برنامه مدیریتی جامع و متناسب با شرایط خاک و محصول مورد استفاده قرار گیرند. در زمینه توسعه فناوری‌های آینده، شناسایی سویه‌های بومی سازگار با شرایط اقلیمی هر منطقه اهمیت زیادی دارد. باکتری‌هایی که به‌طور طبیعی در خاک‌های خشک و مناطق کم‌آب زندگی می‌کنند، ممکن است ویژگی‌هایی داشته باشند که به آن‌ها امکان فعالیت بهتر در شرایط تنش را بدهد. بررسی تنوع ژنتیکی و متابولیکی این جمعیت‌ها می‌تواند به شناسایی سویه‌های کارآمد کمک کند. همچنین استفاده از روش‌های مولکولی، توالی‌یابی ژنومی و بررسی بیان ژن‌ها می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری درباره سازوکارهای تحمل خشکی فراهم سازد. ترکیب این روش‌ها با آزمایش‌های گلخانه‌ای و مزرعه‌ای امکان انتخاب هدفمند باکتری‌ها را افزایش می‌دهد. در آینده، طراحی کنسرسیوم‌های میکروبی متناسب با نوع گیاه، ویژگی‌های خاک و شرایط اقلیمی می‌تواند یکی از مسیرهای مهم توسعه کشاورزی مقاوم به تغییرات آب‌وهوایی باشد .

در نهایت، گسترش استفاده از باکتری‌های مفید در کشاورزی به همکاری میان پژوهشگران، تولیدکنندگان نهاده‌های زیستی و کشاورزان نیاز دارد. پژوهش‌های علمی باید علاوه بر شناسایی ویژگی‌های مفید باکتری‌ها، کارایی واقعی آن‌ها را در شرایط مختلف مزرعه بررسی کنند. از سوی دیگر، تولید فرآورده‌های زیستی استاندارد، تعیین روش صحیح مصرف و ارائه آموزش‌های لازم به کشاورزان می‌تواند زمینه استفاده مؤثرتر از این فناوری را فراهم سازد. همچنین ارزیابی اقتصادی کاربرد این محصولات اهمیت دارد؛ زیرا میزان افزایش عملکرد و کاهش هزینه‌های تولید باید در کنار هزینه تهیه و مصرف فرآورده بررسی شود. بنابراین، آینده کاربرد باکتری‌های مفید تنها به شناخت ویژگی‌های میکروبی وابسته نیست، بلکه به توسعه فناوری تولید، استانداردسازی، ارزیابی اقتصادی و تدوین برنامه‌های مدیریتی مناسب نیز بستگی دارد(کومار و همکاران، ۲۰۲۴).

نتیجه‌گیری



تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی است که با ایجاد اختلال در فعالیت‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و رشدی گیاهان، موجب کاهش رشد و عملکرد اقتصادی می‌شود. با توجه به محدودیت منابع آب و افزایش آثار تغییرات اقلیمی، استفاده از روش‌های زیستی برای افزایش مقاومت گیاهان در برابر کم‌آبی اهمیت فراوانی دارد. بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که باکتری‌های مفید خاکزی، به‌ویژه باکتری‌های محرک رشد گیاه، از ظرفیت مناسبی برای کاهش آثار منفی این تنش برخوردار هستند. این باکتری‌ها از طریق تولید هورمون‌های محرک رشد، افزایش توسعه ریشه، بهبود جذب عناصر غذایی و تنظیم تعادل هورمونی، شرایط مناسب‌تری برای رشد گیاه فراهم می‌کنند. همچنین تولید آنزیم ACC دآمیناز می‌تواند از افزایش بیش از اندازه اتیلن در شرایط تنش جلوگیری کند و تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی نیز در حفظ رطوبت اطراف ریشه و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک نقش داشته باشد. از سوی دیگر، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود تنظیم اسمزی می‌تواند آسیب‌های سلولی ناشی از کمبود آب را کاهش دهد. بر اساس یافته‌های بررسی‌شده، جنس‌هایی مانند باسیلوس، سودوموناس و آزوسپیریلوم از مهم‌ترین گروه‌های باکتریایی مورد توجه در زمینه افزایش تحمل خشکی هستند. با این حال، اثرگذاری این میکروارگانیسم‌ها به نوع سویه، گیاه میزبان، ویژگی‌های خاک و شرایط اقلیمی وابسته است. بنابراین، شناسایی سویه‌های سازگار با شرایط محیطی و بررسی عملکرد آن‌ها در آزمایش‌های مزرعه‌ای ضرورت دارد. همچنین استفاده از ترکیبات میکروبی سازگار و توسعه فرمولاسیون‌های زیستی پایدار می‌تواند زمینه افزایش کارایی این روش را فراهم سازد. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که باکتری‌های مفید ظرفیت مناسبی برای بهبود رشد و افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی دارند و استفاده اصولی از آن‌ها می‌تواند به‌عنوان بخشی از راهبردهای کشاورزی پایدار مورد توجه قرار گیرد. البته دستیابی به نتایج مطلوب مستلزم استفاده هم‌زمان از مدیریت صحیح آبیاری، تغذیه متعادل و انتخاب سویه‌های باکتریایی مناسب است. توسعه پژوهش‌های کاربردی در این زمینه می‌تواند به کاهش خسارت ناشی از کم‌آبی، افزایش بهره‌وری مصرف آب و حفظ پایداری تولید محصولات کشاورزی کمک کند.

پیشنهادهای پژوهش

- بررسی عملکرد سویه‌های مختلف باکتری‌های محرک رشد در گیاهان زراعی و باغی تحت شرایط متفاوت تنش خشکی.
- شناسایی و جداسازی باکتری‌های بومی از خاک مناطق خشک و نیمه‌خشک با هدف استفاده در تولید کودهای زیستی.
- بررسی اثر تلقیح هم‌زمان چند سویه باکتریایی بر رشد ریشه، جذب آب و عملکرد محصولات کشاورزی.
- مطالعه تأثیر باکتری‌های مفید بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و میزان تجمع ترکیبات اسمولیت‌ساز در گیاهان.
- ارزیابی اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از کودهای زیستی در مقایسه با روش‌های متداول مدیریت تنش خشکی.

منابع و مآخذ

- مقبلی گردینی، معصومه و جلالی، قباد و اعتمادزاده، شکوفه السادات،۱۴۰۴،بررسی کاربرد باکتریهای مقاوم به شوری در کشاورزی،سومین همایش بین المللی و چهارمین همایش ملی کشاورزی، محیط زیست و امنیت غذایی،جیرفت،https://civilica.com/doc/2347036
- ارزانش، محمدحسین، بنی عقیل، نوریه، قربانلی، مه لقا، و شهبازی، مریم. (۱۳۹۱). تاثیر باکتری های محرک رشد گیاه بر پارامترهای رشدی و غلظت عناصر کم مصرف در دو رقم کلزا تحت تنش شوری. مجله الکترونیک مدیریت خاک و تولید پایدار، ۲(۲)، ۱۵۳-۱۶۳. SID. https://sid.ir/paper/209758/fa
- تفرجی، سید حسن و مقتدری، قاسمعلی،۱۴۰۴،نقش میکروارگانیسم های مقاوم به خشکی در افزایش تاب آوری خاک های کشاورزی ایران در برابر تغییر اقلیم،اولین همایش ملی دانشجویی پیامدهای تغییر اقلیم در ایران،تهران،https://civilica.com/doc/2553895
- میرجلیلی، احمد و رشیدی اصل، ابوالفضل،۱۳۹۵،اثر تنش خشکی و روشهای مصرف باکتریهای محرک رشد PGPR بر میزان آنتوسیانین و گزانتوفیل گیاه دارویی بومادران Achillea millefolium L در منطقه شهرری،چهارمین کنفرانس بین المللی علوم و مهندسی،https://civilica.com/doc/538996
- Chieb, M., & Gachomo, E. W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. BMC Plant Biology, 23, 407.
- Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., & SkZ, A. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. Microbiological Research, 184, 13–24.
- Kumar, A., Naroju, S. P., Kumari, N., Arsey, S., Kumar, D., Gubre, D. F., Roychowdhury, A., Tyagi, S., & Saini, P. (2024). The role of drought response genes and plant growth promoting bacteria on plant growth promotion under sustainable agriculture: A review. Microbiological Research, 286, 127827.
- Singh, D., Thapa, S., Singh, J. P., Mahawar, H., Saxena, A. K., Singh, S. K., Mahla, H. R., Choudhary, M., Parihar, M., Choudhary, K. B., & Chakdar, H. (2024). Prospecting the potential of plant growth-promoting microorganisms for mitigating drought stress in crop plants. Current Microbiology, 81, 84.
- Buragohain, K., Tamuly, D., Sonowal, S., & Nath, R. (2024). Impact of drought stress on plant growth and its management using plant growth promoting rhizobacteria. Indian Journal of Microbiology, 64(2), 287–303. https://doi.org/10.1007/s12088-024-01201-0
- Dubey, A., Malla, M. A., Kumar, A., Khan, M. L., & Kumari, S. (2024). Seed bio-priming with ACC deaminase-producing bacterial strains alleviates impact of drought stress in soybean (Glycine max (L.) Merr.). Rhizosphere, 30, 100873. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100873