مجله ترویجی شورورزی
دوره اول، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۲

ویژگی‌های جامعه میکروبی خاک ریزوسفری زمین‌های شور

هوشنگ خسروی[1*]

۱. دانشیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

*. نویسنده مسئول: هوشنگ خسروی، پست الکترونیک: khosravi_1971@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

چکیده

شوری منابع خاک و آب یک از شرایط تنشی غیرزنده مهم حاکم بر کشاورزی ایران محسوب می‌شود. یکی از راه‌کارهای مبتنی بر کشاورزی پایدار برای افزایش کارایی تولید محصول در شرایط شور، استفاده از پتانسیل ریزجانداران سازگار با شرایط تنش شوری موجود در ریزوسفر گیاهان مناطق شور است. شوری بر جامعه میکروبی خاک تأثیرگذار است و در مقابل، ریزجانداران هم می‌توانند در شرایطی گیاه را در برابر اثرات مخرب شوری یاری کنند. پژوهش‌ها نشان داده است که مدیریت جامعه میکروبی ریزوسفر گیاهان رشد یافته در مناطق شور می‌تواند گزینه مناسبی برای حل بخشی از مشکلات شوری در کشاورزی باشد. در این مقاله به اثرات زیادی املاح بر نوع و ترکیب ریزجانداران خاک و ویژگی‌های محرک رشد باکتری‌های مفید خاک، محدوده توانایی تحمل ریزجانداران به درجات مختلف شوری و سازوکارهایی که جامعه میکروبی برای کمک به گیاهان در برابر تنش شوری اتخاذ می‌کند پرداخته می‌شود. در انتهای این نوشتار، پیشنهادها و توصیه‌هایی برای بهره‌گیری از این پتانسیل زیستی ارائه می‌شود.

کلمات کلیدی: هدایت الکتریکی، میکروبیوم، مایه تلقیح، نمک.

بیان مسئله

خاک یک محیط منحصربه‌فرد برای رشد و فعالیت انواع موجودات زنده و بستر اصلی رشد گیاهان است. ریزوسفر[1] ناحیه محدودی از خاک اطراف ریشه به ضخامت چند میلی‌متر است که تحت تأثیر سیستم ریشه‌ای گیاه بوده و علت آن‌هم ترشح مواد مختلف و غنی از عناصر غذایی توسط ریشه است. این ترشحات ریشه‌ای موجب تغییرات فیزیکی و شیمیایی خاک ریزوسفری ازجمله تغییر در pH، فشار جزئی اکسیژن و تغییر در پتانسیل آب نسبت به خاک غیر ریزوسفری می‌شوند. این وقایع باعث افزایش جمعیت و تراکم ریزجانداران در ناحیه ریزوسفر می‌شود. ریزجانداران خاک اگرچه کمتر از ۰/۵ درصد وزنی خاک را تشکیل می‌دهند اما نقش مهم و کلیدی در خواص و فرآیندهای خاک ایفا می‌کنند. مجموع ریزجانداران موجود در ناحیه ریزوسفر را جامعه میکروبی[2] یا میکروبیوم[3] ریزوسفر می‌گویند. مهم‌ترین گروه میکروبی خاک شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها و اکتینومیست‌ها هستند.

به‌طورکلی ترکیب میکروبیوم تحت تأثیر عوامل خاکی و اقلیمی مختلفی ازجمله تنش‌ها است. یکی از مهم‌ترین تنش‌های تعیین‌کننده ترکیب جامعه میکروبی خاک، تنش شوری است که از دیگر عوامل فیزیکی و شیمیایی مانند دما و pH، از اهمیت بیشتری برخوردار است. شوری در خاک عبارت است از غلظت بالای نمک‌های محلول در ناحیه اطراف ریشه که موجب کاهش جذب آب توسط بذر و کاهش قدرت جوانه‌زنی آن، جذب نامتعادل عناصر غذایی توسط ریشه و درنهایت کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود. غلظت بالای نمک‌ها در منابع خاک و آب یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در ایران است. عمده‌ترین نمک‌های محلول در خاک شامل کاتیون‌های سدیم، کلسیم، منیزیم، پتاسیم و آنیون‌های کلر، سولفات، کربنات، بی‌کربنات و نیترات هستند. سطح کل زمین‌های مبتلا به شوری در ایران حدود ۳٤ میلیون هکتار است (۳). از ۱۸ میلیون هکتار زمین‌های قابل‌کشت در ایران حدود ٦/۸ میلیون هکتار آن دارای درجات مختلفی از شوری هستند (۲). همچنین منابع آب شور با سطوح مختلف شوری در کشور به‌وفور یافت می‌شود. شناخت توان تولیدی منابع خاک و آب، مدیریت درست و بهره‌برداری اصولی از این منابع، در راستای تولید پایدار بوده و امنیت غذایی و سلامت جامعه را فراهم خواهد نمود. در این رابطه، شناخت سازوکارهای تأثیر شوری بر جامعه میکروبی خاک و اثر متقابل این جامعه بر افزایش تحمل گیاه به تنش شوری دارای اهمیت زیادی است. در سال‌های اخیر پژوهش‌های مرتبط با مدیریت ترکیب میکروبی و تغییر در میکروبیوم برای بهبود رشد گیاه افزایش یافته است. میکروبیوم مناطق تحت تنش شوری با ریزوسفر گیاه سازگاری پیدا کرده بطوریکه در اغلب موارد، ترکیب میکروبی در ریزوسفر گیاهان مختلف، خاص و منحصربه‌فرد است، بنابراین ناحیه ریزوسفری ذخیره ژنتیکی مناسبی برای پژوهش در این زمینه است. در این مقاله به مهم‌ترین سازوکارهای متقابل گیاه–ریزجاندار و مدیریت زیستی ناحیه ریزوسفر برای افزایش بهره‌وری تولید محصولات کشاورزی در شرایط شور پرداخته می‌شود.

معرفی راهکارها

اثرات شوری بر میکروبیوم خاک

تأثیر شوری خاک بر میزان فرآیند میکروبی مناطق تحت تأثیر نمک از منظر حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا ریزجانداران برای چرخه عناصر غذایی و حفظ مواد مغذی در خاک ضروری هستند. پژوهش‌های زیادی نشان داده است که شوری سبب کاهش فعالیت میکروبی، کاهش توده زنده و تغییرات در ساختار جامعه میکروبی خاک می‌شود. مطالعات نشان داده است که با افزایش شوری، تنفس

1 -Rhizosphere
2 - Microbial community
3 -Microbiome

میکروبی خاک کاهش می‌یابد. معمولاً تخریب اراضی[1] در اثر شوری خاک می‌تواند منجر به تغییر در تنوع گیاهی شود که این مسئله، مستقیماً تنوع میکروبی را هم تحت تأثیر قرار می‌دهد. شوری خاک به دو روش اثر اسمزی و اثر ویژه یونی بر ریزجانداران و جامعه میکروبی خاک تأثیر می‌گذارد. ریزجانداران می‌توانند با تنظیم متابولیسم فیزیولوژیک خود به تنش شوری پاسخ داده و از طریق تجمع مواد اسمولیت با شرایط فشار اسمزی منفی سازگار شوند. سازگاری با شرایط شور، نیاز به انرژی زیادی دارد که سبب کاهش رشد و فعالیت ریزجانداران می‌شود تا جایی‌که حتی در فشارهای اسمزی خیلی منفی و شوری‌های بالا، سلول‌های ریزجانداران در اثر پلاسمولیز از بین خواهند رفت و رشد میکروبی متوقف خواهد شد. زیست‌توده میکروبی خاک و رشد میکروبی دو شاخص زیستی مهم در ارزیابی سلامت خاک هستند. اندازه زیست‌توده میکروبی یکی از شاخص‌هایی است که اغلب در مطالعات اثرات زیست‌محیطی بر ریزجانداران ارزیابی شده است. اثر بازدارندگی شوری بر رشد میکروبی نیز به‌طور غیرمستقیم ناشی از مقدار در دسترس بودن رطوبت و مواد آلی خاک است. در نمونه‌های میدانی، فعالیت میکروبی که به‌صورت تنفس یا فعالیت آنزیمی اندازه‌گیری می‌شود با شوری همبستگی معکوس دارد. گزارش شده که بین انتشار کربن تجمعی و شوری، همبستگی منفی قوی وجود دارد زیرا افزایش شوری مستقیماً سرعت رشد میکروبی را مهار کرده و درنهایت منجر به کاهش تجزیه کربن آلی می‌شود (۱۳). در یک مطالعه، اثر شوری بر ساختار جامعه میکروبی خاک شامل شاخص‌های کربن بیوماس میکروبی، تجزیه اسیدهای چرب فسفوفولیپیدی و جمعیت نماتدها در دو گروه خاک‌های نسبتاً شور (٤-۲ دسی‌زیمنس بر متر) و غیر شور (کمتر از ۱ دسی‌زیمنس بر متر) بررسی شد. نتایج نشان داد که در خاک‌های نسبتاً شور نسبت به خاک‌های کم شور فراوانی گروه میکروبی بالاتر است. در مقابل، فراوانی نماتدها در خاک‌های نسبتاً شور کمتر بود و همچنین نتیجه‌گیری شد که خاک‌های شور دارای ویژگی‌های بیولوژیک منحصربه‌فردی هستند که دلالت بر عملکرد کلی خاک در شرایط شور دارد (١٤).

تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده بر اساس روش 16S rRNA از یک خاک شور طبیعی نشان داد که ترکیب و تنوع جامعه باکتریایی در آن متفاوت بوده و ادعای اینکه در خاک‌های شور یک گروه یا گروهی از باکتری‌ها غالب هستند دشوار است (۱۳). به نظر می‌رسد که گروه‌بندی و توزیع ریزجانداران در یک محیط با شرایط سخت همانند شوری بستگی به میزان کلونیزاسیون و پراکندگی آن‌ها دارد و بررسی همبستگی بین جمعیت ریزجانداران و شاخص‌های محیطی مانند ماده آلی، pH و شوری به کشف اطلاعات مهمی در مورد سازوکارهای تشکیل و ساختار جوامع باکتریایی کمک می‌کند. به‌طورکلی پذیرفته شده است که در مقابله با تنش اسمزی، قارچ‌ها توانایی بیشتری نسبت به باکتری‌ها دارند، بااین‌حال این مسئله در شوری‌های بالا به‌خوبی تبیین نشده است. همچنین گزارش شده در خاک‌های بیابانی شور تعداد باسیلوس‌های گرم مثبت اسپوردار بیشتر از اکتینومیست‌ها می‌باشد که علت آن از نظر اکولوژیک، مقاومت بیشتر اسپور به شرایط شور عنوان شده است. تولید آنزیم‌های نمک دوست هم در خاک‌های شور ثابت شده است. برخی مطالعات نشان داده است که تنش شوری اثرات مضری بر جوانه‌زنی اسپور قارچ‌های میکوریز آربوسکولار (AMF)، رشد هیف‌ها و کلونیزه شدن گیاهان و درنهایت تشکیل یک همزیستی مؤثر دارد. برخلاف این مسئله، گزارش شده که شوری سبب افزایش جوانه‌زنی اسپور و کلونیزه شدن قارچ‌های میکوریز گردیده است. همه این مسائل حاکی از پیچیدگی خاص جامعه میکروبی ریزوسفر خاک‌های شور است. به‌طورکلی تاکنون تعداد زیادی از گونه‌های میکروبی مقاوم به نمک در اکوسیستم‌های مختلف بومی کشور جداسازی و شناسایی شده‌اند که می‌توانند به‌عنوان منابع ژنتیکی مهمی در نظر گرفته شوند (۸، ۷، ٤).

1 -Soil degradation

حدود تحمل ریزجانداران مفید خاک به سطوح تنش شوری

به‌منظور مشخص شدن حدود تحمل ریزجانداران مفید خاک به شوری، به پژوهش‌های انجام‌شده در این مورد با تأکید بر انواع بومی کشور اشاره می‌شود. در یک پژوهش، سویه‌های بومی *Azotobacter* جداسازی شده از مناطق خشک ایران از نظر توان تحمل به شوری در مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰، ٤۰ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر مطالعه شدند. نتایج نشان داد که رشد این سویه‌ها تا شوری ٤۰ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد با شاهد بدون تلقیح با باکتری داشتند (٤). نتایج مربوط به شوری ٤۰ دسی‌زیمنس بر متر در جدول یک نشان داده شده است.

جدول ۱– مقایسه میانگین رشد باکتری *Azotobacter* در EC=40 دسی‌زیمنس بر متر (٤)

ردیف	تیمار تلقیح باکتری	میانگین*	گروه‌های همگن
۱	Az62	۱/٤۹	a
۲	Az22	۱/۸۳	b
۳	Az26	۱/۰۲	c
٤	Az66	۰/۹۵	c
۵	Az12	۰/۷۳	d
٦	Az69	۰/۳٦	e
۷	Az11	۰/۰۰	f
۸	**Blank	۰/۱٤	f

میزان کدورت رشد باکتری با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر جذبی در OD_{600}

** کدورت در نمونه شاهد بدون تلقیح

در یک پژوهش، تحمل سویه‌های مختلف باکتری‌های محرک رشد گیاه به سطوح مختلف تنش شوری در شرایط آزمایشگاهی بررسی شد و نتایج نشان داد که جمعیت یک سویه باکتری *Pseudomonas* تا شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر هیچ کاهش رشدی نشان نداد و در شوری ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر فقط ۱٤ درصد نسبت به شاهد کاهش رشد نشان داد. اگرچه با افزایش سطح شوری سایر سویه‌ها دچار کاهش رشد شدند اما توقف رشدی در هیچ‌کدام از سویه‌ها مشاهده نشد (۷). در مطالعه‌ای دیگر باکتری‌های برگزیده ریزوسفری در شرایط آزمایشگاهی و در سطوح مختلف شوری حداکثر تا ٦۰۰ میلی‌مولار (٦٤ دسی‌زیمنس بر متر) رشد قابل‌توجهی از خود نشان دادند گزارش شده است که باکتری‌های *P. fluorescens* تحمل زیادی به شوری تا ٦۰۰ میلی‌مولار (معادل ۵۵ دسی‌زیمنس بر متر) در محیط دارای کلرید سدیم در شرایط آزمایشگاهی داشتند (۹). موارد مذکور نشان می‌دهد جامعه میکروبی خاک‌های مناطق تحت تنش، دارای تحمل بالایی نسبت به شرایط تنش محیط زندگی خود هستند و نسبت به این شرایط، سازگار شده‌اند که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

تأثیر شوری بر ویژگی‌های محرک رشدی باکتری‌های مفید خاک

اگرچه باکتری‌های ریزوسفری توان تحمل به شوری را تا شوری‌های بالاتر از حد معمول خاک‌ها از خود نشان داده‌اند اما آیا خصوصیات محرک رشدی باکتری‌ها هم در شرایط شور مانند شرایط غیر شور است؟ بر اساس مطالعات انجام شده غلظت‌های بالای نمک بر ویژگی‌های

منسوب به محرک رشد باکتری‌های مفید خاک اثرات منفی دارند. به‌عنوان مثال در یک پژوهش تعداد ۲۰ سویه *Azotobacter* در شرایط آزمایشگاهی در شوری‌های تا ٤٠ دسی‌زیمنس بر متر در کشت درون شیشه‌ای توانایی رشد از خود نشان دادند اما در شرایط گلخانه‌ای و در محیط خاک و گیاه حتی در شوری ۳ و ٦ دسی‌زیمنس بر متر، اثر معنی‌داری بر شاخص‌های رشد ذرت نداشتند و عدم توفیق جدایه‌ها در کاهش اثرات تنش شوری را بایستی در موضوعاتی غیر از توانایی رشد آن‌ها در شرایط شور جستجو کرد (٤).

در یک مطالعه، مایه‌زنی با سویه‌هایی از باکتری‌های محرک رشد برگزیده که در شرایط آزمایشگاهی به‌خوبی در شوری ۲۰ دسی‌زیمنس رشد کرده بودند تأثیر معنی‌داری بر هیچ‌کدام از شاخص‌های رشد گندم نارین در شرایط شوری‌های ٦، ۱۰ و ١٤ نشان ندادند (۷). نکته قابل‌توجه این‌که سویه‌های مورداستفاده در این مطالعه، در پژوهش‌های پیشین اثرات معنی‌داری بر رشد گندم رقم رخشان در شرایط تنش خشکی نشان دادند به‌طوری‌که وزن خشک دانه به‌عنوان مهم‌ترین شاخص رشد گندم در تنش مربوط به ٦٠ درصد ظرفیت مزرعه در اثر تلقیح با *P. fluorescens* P187 نسبت به شاهد بدون تلقیح ۷۰ درصد افزایش نشان داد. تلقیح در تنش مربوط به ٤٠ درصد ظرفیت مزرعه، تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک دانه نداشت اما وزن خشک اندام هوایی و ریشه را به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد (۱).

خصوصیات منسوب به محرک رشد باکتری‌ها مطابق روش‌های مرسوم و در شرایط محیط کشت باکتری و بدون اعمال تنش اندازه‌گیری می‌شوند و سپس بر روی گیاه و در شرایط تنشی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند؛ بنابراین در مرحله آزمایشگاهی اگر سویه‌ای دارای توانایی تولید هورمون محرک رشدی را نشان دهد ممکن است در شرایط تنشی ازجمله شوری این ویژگی را بروز ندهد. در تأیید این موضوع تعداد ۱۰۰ سویه از ریزوسفر دو گیاه متحمل به شوری جداسازی و خصوصیات محرک رشدی آن‌ها در شرایط آزمایشگاهی بررسی و ۲۲ سویه منتخب در شرایط شور به جو تلقیح شدند، نتایج نشان داد که بهترین سویه‌ها که در شرایط آزمایشگاهی بالاترین مقادیر را در خصوصیات محرک رشدی نشان داده بودند هیچ تأثیری بر رشد گیاه نشان ندادند. برعکس سویه‌ای که در شرایط آزمایشگاهی خصوصیات محرک رشدی خوبی نشان نداده بود باعث افزایش قابل‌توجه رشد گیاه شد. درهرحال برخی از سویه‌های ریزجانداران مفید در کاهش اثرات تنشی در گیاهان موفقیت‌هایی نشان داده‌اند (۱۲). در پژوهشی اثر تلقیح گندم با سویه‌های ریزوبیوم در شرایط تنش شوری ۷ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بر رشد و جذب عناصر غذایی معنی‌دار گزارش شده است (۷). در پژوهشی اثر مایه‌زنی *Pseudomonas fluorescens*، *P. putida* و *Azotobacter vinelandii* در شرایط تنش شوری بر رشد ذرت معنی‌دار گزارش شده است (۱۱). در پژوهش دیگری، تأثیر مایه‌زنی باکتری‌های برگزیده محرک رشد در تعدیل اثرات زیان‌بار شوری در دوره رشد رویشی گندم رقم قدس در شرایط گلخانه‌ای مثبت گزارش شده است (۱۰).

سازوکارهای حمایتی میکروبیوم از گیاهان در برابر تنش شوری

این ایده که جوامع میکروبی که قبلاً شرایط تنشی را تجربه کرده‌اند باعث افزایش تحمل گیاهان به آن تنش خاص می‌شوند را فرضیه "هم‌زیستی سازگار با زیستگاه"[1] می‌نامند. باکتری‌های مقاوم به خشکی به گیاهان تحمل خشکی می‌دهند ولی قادر نیستند که این تحمل را به گیاه در شرایط تنش شوری بدهند، برعکس باکتری‌های مقاوم به تنش شوری به گیاه تحمل شوری داده اما در ایجاد تحمل به خشکی مؤثر نیستند. به‌عبارت‌دیگر، یک جامعه میکروبی که تحت شرایط محیطی خاصی به وجود آمده و سازگاری پیداکرده در مقایسه با جامعه میکروبی که تحت شرایط دیگری بوده و

1 -Coexistence compatible with the habitat

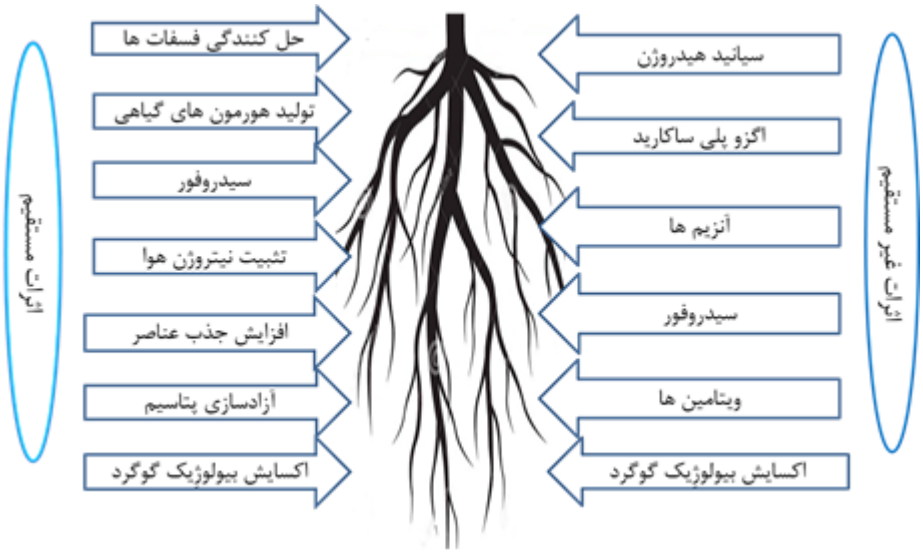
به گیاه معرفی می‌شود به تحمل گیاه در آن شرایط محیطی خاص بیشتر کمک می‌کند. بااین‌حال، این مسئله که آیا شرایط شوری پیشین تجربه‌شده توسط یک جامعه میکروبی بر تحمل گیاهان تأثیر می‌گذارد یا خیر به‌طور کامل مشخص نشده و به پژوهش‌های بیشتری نیاز دارد. ریشه گیاهان از طریق تولید مواد مختلف در شرایط تنشی ممکن است در جذب یک میکروبیوم مفید ریزوسفر در حضور نمک تأثیر بگذارند. اگرچه میکروب‌های مختلفی از شاخه‌های مختلف در حمایت از رشد گیاه در شرایط شور نقش دارند. با این‌حال مشخص نیست کدام شاخه از این میکروب‌ها تأثیرات بیشتری بر رشد گیاه می‌گذارند. درهرحال همانطوری‌که اشاره شد میکروبیوم خاک متأثر از شوری خاک بوده و خاک‌های شور به‌عنوان زیستگاه‌های خاص، منابع و ذخایر ژنتیکی مهمی از ریزجانداران مقاوم به شوری هستند. ریزجانداران خاک در شرایط شور از طریق سازوکارهای مختلف بر گیاهان تأثیر گذاشته و تصور می‌شود که برخی از اثرات منفی شوری خاک بر رشد گیاهان را کاهش دهند. گزارش‌شده که ریزجانداران خاک ابزار مهمی در برابر تهدید فراگیر شوری در جهان به‌حساب آمده و مشخص‌شده که گیاهان تحت تنش شوری در حضور میکروب‌های خاک بهتر از عدم وجود میکروب‌ها رشد می‌کنند.

ریزجانداران در میکروبیوم ریزوسفری از طریق سازوکارهای مختلف به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر رشد گیاهان تأثیر می‌گذارند. سازوکارهای تأثیر ریزجانداران خاک در حمایت از گیاه برای مقابله با تنش شوری را می‌توان به دو دسته سازوکارهای عمومی و اختصاصی تقسیم‌بندی کرد.

از سازوکارهای عمومی می‌توان موارد زیر را نام برد (۵ و ٦):

۱. تثبیت نیتروژن مولکولی
۲. توانایی حل‌کنندگی فسفر نامحلول
۳. تولید سیدروفور و افزایش قابلیت جذب آهن
٤. اکسایش بیولوژیک گوگرد و کاهش pH و افزایش قابلیت جذب عناصر
۵. تجزیه سیلیکات‌ها و آزادسازی پتاسیم
٦. تولید هورمون‌های اکسین، جیبرلین و سیتوکینین و اثر بر مورفولوژی ریشه

در شکل یک به‌صورت شماتیک برخی سازوکارهای تأثیر ریزجانداران بر رشد گیاهان نشان داده شده است (۵).



شکل ۱- سازوکارهای تأثیر ریزجانداران بر رشد گیاهان (۵)

از سازوکارهای اختصاصی تأثیر ریزجانداران خاک در حمایت از گیاه برای مقابله با تنش شوری می‌توان موارد زیر را نام برد (۵):

۱. تولید آنزیم ACC-دآمیناز که موجب کاهش اثرات منفی اتیلن تنشی بر رشد گیاه می‌شود
۲. تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی (EPS)[1] که از طریق تشکیل بیوفیلم سبب خاصیت نگه دارندگی آب و حالت سیمانی شدن و همچنین نقش حیاتی در تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها و تنظیم جریان آب و عناصر غذایی به ریشه گیاه می‌باشند
۳. تولید آنتی‌اکسیدان‌ها که سبب تجزیه اکسیژن-های غیر واکنشی همانند رادیکال‌های سوپر اکسید، رادیکال‌های هیدروکسیل و پروکسید هیدروژن می‌شود. این رادیکال‌ها موجب تخریب اندام‌های فتوسنتزی و کاهش رشد گیاه می‌شوند
٤. تولید ترکیبات اسمولیت همانند K^+، گلوتامات و ترهالوز
۵. تولید سیتوکینین که موجب افزایش تولید آبسیزیک اسید در گیاه شده و درنتیجه روزنه‌ها بسته شده و تبخیر و تعرق گیاه کاهش می‌یابد
٦. افزایش تولید پرولین در اثر کاهش خروج الکترولیت‌ها باعث افزایش میزان نسبی آب برگ و جذب انتخابی K^+ و تحمل به تنش می-شود
۷. تولید هورمون‌های محرک رشد همانند اکسین‌ها و جیبرلین‌ها که موجب افزایش طول و ریشه-های موئین و درنتیجه جذب بیشتر آب و عناصر غذایی می‌شوند. عنصر پتاسیم مهم‌ترین اسمولیت معدنی و پرولین، گلیسین و بتایین مهم‌ترین اسمولیت های آلی هستند که توسط ریزجانداران متحمل به شوری در سلول آن‌ها تجمع می‌یابند.
۸. بالا نگه‌داشتن نسبت K/Na در گیاهان که در ریزجانداران خاک و به‌ویژه قارچ‌های میکوریزی (AMF) در شرایط تنش شوری گیاه را در برابر آسیب شوری کمک می‌کنند.
۹. تولید اندام‌های مقاوم مانند باکتری *Azotobacter* که دارای توانایی تشکیل کیست[2] مقاوم است و باکتری را در برابر شرایط نامساعد محیطی نسبت به سایر ریزجانداران فاقد این ویژگی حفظ می‌کند و بنابراین حضور آن‌ها در خاک به مقاومت گیاه نیز کمک می‌کند. در بین باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه، *Azotobacter* به دلیل توزیع گسترده در خاک‌ها و تولید طیف متنوعی از متابولیت‌ها به‌ویژه در ریزوسفر گیاهان دارای اهمیت ویژه‌ای است (۵).

توصیه ترویجی

جامعه میکروبی ریزوسفری (میکروبیوم) خاک‌های مناطق شور، منبع و ذخیره ژنتیکی ارزشمندی است که دارای پتانسیل خوبی برای کمک در جهت مقابله با تنش شوری در گیاهان می‌باشد. برای این منظور مطالعه این نوع میکروبیوم برای بازسازی چرخه‌های بیوژئوشیمیایی خاک‌های شور و پایداری آن‌ها ممکن است راه‌حل‌های کلیدی مبتنی بر طبیعت ارائه کند؛ بنابراین برای بهره‌مندی از این مواهب، نیاز است مطالعات دقیقی بر روی نوع و تعداد ریزجانداران ناحیه ریزوسفر گیاهان بومی مرتعی رویش یافته در خاک‌های شور کشور انجام و کلکسیونی از ریزجانداران برتر آن‌ها تهیه شود. نتیجه این مطالعات برای یافتن پاسخ سؤالات مهمی همچون چگونگی تغییر

1- Exopolysaccharides

2 -Cyst

و تنظیم شرایط محیطی برای تعامل میکروبی در خاک‌های شور راهگشا خواهد بود؛ بنابراین، در جمع‌بندی این مقاله توصیه به پژوهشگران و علاقه‌مندان این است که میکروبیوم انواع گیاهان شور پسند طبیعی از ابعاد مختلف اکولوژیک، فیزیولوژیک و مرفولوژیک بررسی تا زمینه برای شبیه‌سازی آن در ریزوسفر گیاهان موردنظر برای کشت در شرایط شور فراهم شود. با توجه به این‌که ممکن است همبستگی بالایی بین نتایج آزمایشگاهی، گلخانه‌ای و مزرعه‌ای در این مورد وجود نداشته باشد؛ بنابراین به‌منظور دستیابی به دانش فنی یک فرآورده زیستی مناسب برای کشت در مناطق شور، پژوهش‌های جامعی شامل انجام همه مراحل تحقیق و درنهایت اجرای آزمون‌های اثربخشی در قالب طرح‌های تحقیقی-ترویجی و آزمایش در شرایط زارع و بررسی روش‌های مصرف بذری، مصرف خاکی و یا استفاده در آب آبیاری توصیه و تأکید می‌شود.

فهرست منابع

۱- اوتادی، ا. (۱٤۰۰). پتانسیل کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه بر شاخصه‌ای رشد گندم در شرایط تنش کم‌آبی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک. ۹٦ صفحه.

۲- مؤمنی، ع. (۱۳۸۹). پراکنش جغرافیایی و سطوح شوری منابع خاک ایران. مجله پژوهش‌های خاک، ۲٤ (۳): ۲۱۵-۲۰۳.

۳- بی‌نام، (۱۳۸۱). نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ منابع خاک و کاربری اراضی ایران. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، تهران-ایران.

٤- خسروی، ه. (۱٤۰۰). بررسی خصوصیات محرک رشدی جدایه‌های بومی *Azotobacter* و تأثیر تلقیح آن‌ها در شرایط تنش شوری بر رشد ذرت. زیست‌شناسی خاک، ۹ (۲): ۱۸۸-۱۷۱.

۵- خسروی، ه. (۱٤۰۰). مروری بر پژوهش‌ها و کاربرد کودهای زیستی در زراعت گندم در ایران. نشریه علمی مدیریت اراضی، ۹ (۲): ۲۲۰-۲۰۵.

٦- خسروی، ه. (۱٤۰۱). ازتوباکتر و نقش آن در خاک و رشد گیاهان. انتشارات مؤسسه تحقیقات خاک و آب. ۱۷۷ صفحه.

۷- خسروی، ه. (۱٤۰۲). تأثیر مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد گیاه بر شاخص‌های رشد گندم در شرایط آبیاری با آب شور. زیست‌شناسی خاک، ۱۱ (۱): ۳۱-۱۷.

۸- خسروی، ه.، علیخانی، ح. و یخچالی، ب. (۱۳۸۷). بررسی اثر سویه‌های ریزوبیوم دارای آنزیم ACC-دآمیناز بر رشد گندم در شرایط تنش شوری. مجله تحقیقات آب و خاک ایران (مجله علوم کشاورزی ایران)، ۳۹ (۱): ۱۰۳-۹۳.

۹- سرچشمه پور، م.، ثواقبی، غ.، صالح راستین، ن.، علیخانی، ح. و پوربابایی، ا. (۱۳۸۸). جداسازی، غربالگری، شناسایی نسبی و تعیین تحمل به تنش شوری و خشکی جدایه های برتر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد (PGPR) درختان پسته. تحقیقات آب و خاک ایران، ٤۰ (۲): ۱۹۰-۱۷۷.

۱۰- صفدریان، م.، عسکری ح.، سلطانی‌نجف‌آبادی م. و نعمت‌زاده، ق. (۱۳۹۷). تأثیر باکتری‌های محرک رشد مقاوم به شوری بر رشد و مقاومت گندم تحت تنش شوری. علوم گیاهان زراعی ایران، ٤۹ (۱): ٥٦-٤٥.

11- Abd El-Ghany, T.M., Masrahi, Y.S., Mohamed, A., Abboud, A., Alawlaqi, M.M. & Elhussieny, A., (2015). Maize (*Zea mays* L.) growth and metabolic dynamics with plant growth-promoting rhizobacteria under salt stresses. Journal of Plant Pathology & Microbiology, 6(305), p.2.
12- Cardinale, M., Ratering, S., Suarez, C., Montoya, A.M.Z., Geissler-Plaum, R. & Schnell, S. (2015). Paradox of plant growth promotion potential of rhizobacteria and their actual promotion effect on growth of barley (*Hordeum vulgare* L.) under salt stress. Microbiological Research, 181:22-32.
13- Rath KM, & Rousk J. (2015). Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: a review. Soil Biol Biochem, 81: 108–23.
14- Ries, M.L. (2020). The Effect of Salinity on Soil Microbial Community Structure (Doctoral dissertation, North Dakota State University), 45p.