

میکرواورگانیسم‌ها راهکاری نوین در مدیریت تنش‌های غیرزنده در گیاهان

کامبیز مویتاب^۱، مجید قربانی جاوید، ایرج اله دادی، الیاس سلطانی^۲

۱. دانشجوی دکترای اکولوژی گیاهان زراعی دانشکده فناوری کشاورزی دانشگاه تهران (ابوریحان)

۲. اعضای هیئت علمی گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات دانشکده فناوری کشاورزی دانشگاه تهران (ابوریحان)

چکیده

مصرف کودهای شیمیایی به منظور افزایش مقدار تولید در واحد سطح به شدت افزایش یافته است، که علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، پیامدهای نامطلوبی در افزایش آلودگی منابع آب و خاک نیز به همراه داشته است، همچنین مصرف بی رویه کودهای شیمیایی موجب عدم تعادل عناصر و مواد غذایی موجود در خاک، کاهش بازده محصولات کشاورزی و به خطر افتادن سلامت انسان‌ها و دیگر موجودات زنده شده است. این در حالی است که مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد محصولات کشاورزی، تنش‌های غیرزنده محسوب می‌شوند که به طور میانگین با توجه به خصوصیات ژنتیکی گیاه، تنش‌های غیرزنده سبب کاهش ۵۰ تا ۸۲ درصدی عملکرد گیاهان از بعد کمی و کیفی می‌شوند، که این موضوع نیازمند ارائه راهکارهای نوین در مدیریت تنش‌های غیرزنده در گیاهان می‌باشد. در همین راستا امروزه استفاده از میکرواورگانیسم‌ها با منشاء باکتری، قارچ، جلبک یا دیگر موجودات خاکی مورد توجه قرار گرفته است که مکانیسم عمل آنها قابلیت جذب عناصر غذایی گیاه در خاک را افزایش می‌دهد. میکرواورگانیسم‌ها نه تنها از مزایای اقتصادی و زیست محیطی فراوانی برخوردارند، بلکه علاوه بر ایجاد و حفظ پایداری منابع موجود در خاک، توان تولید در بلندمدت را افزایش داده و راهکاری نوین در مدیریت تنش‌های غیرزنده در گیاهان محسوب می‌شوند. در این مقاله مکانیسم‌ها و نقش باکتری‌های فراریشه محرک رشد گیاه (PGPR) و قارچ‌های میکوریزا در مدیریت تنش‌های غیرزنده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: باکتری‌های فراریشه محرک رشد گیاه (PGPR)، تنش‌های غیرزیستی، عملکرد، قارچ‌های میکوریزا، مدیریت

Microorganisms a new solution in managing abiotic stresses in plants

Abstract

The use of chemical fertilizers to boost production per unit area has risen significantly, leading to higher production costs and negative effects on water and soil pollution. Furthermore, the overuse of these fertilizers disrupts the balance of nutrients in the soil, resulting in decreased agricultural yields and posing risks to the health of humans and other organisms. Currently, the primary factor hindering the performance of agricultural products is abiotic stresses. Based on the genetic traits of the plants, these stresses can lead to a reduction of 50 to 82 percent in both the quantity and quality of plant Yield. This situation necessitates the development of innovative solutions for managing non-living stresses in plants. In this context, the utilization of microorganisms such as bacteria, fungi, algae, and other soil organisms is being recognized for their ability to enhance the uptake of nutrients by plants from the soil. These microorganisms offer numerous economic and environmental advantages, as they help to create and sustain soil resource stability, boost long-term production capacity, and provide a novel approach to managing abiotic stresses in plants. This article examines how Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and mycorrhizal fungi function and contribute to managing abiotic stresses.

Key words: abiotic stresses, Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR), plant Yield, Management, Mycorrhizal fungi

مقدمه

براساس گزارش سازمان غذا و کشاورزی (FAO¹) و به نقل از بانک جهانی (WBG²) پیش‌بینی شده است که جمعیت جهان به ۹/۶ میلیارد نفر در سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت (FAO, 2023). از مهم‌ترین چالش‌ها و مشکلات افزایش جمعیت در جهان تأمین امنیت غذایی است (Balasundram *et al.*, 2023). در سطح ملی نیز نیاز روزافزون کشور به غذا که ناشی از افزایش جمعیت و تغییر الگوهای مصرف است، افزایش تولید غذا را ضروری کرده است. از رویکردهای اساسی در امنیت غذایی، توسعه و مدیریت نظام‌های کشاورزی و حفظ منابع آب و خاک است (Johnson, 2024).

از طرفی کمیت و کیفیت عملکرد در کشاورزی بسیار متغیر است که این امر ناشی از تأثیرپذیری شدید تولید آن از شرایط مدیریتی و محیطی می‌باشد. تنش‌های زیستی (آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز) و غیرزیستی (خشکی، شوری، کمبود عناصر غذایی، فلزات سنگین، غرقاب، گرما، سرما و غیره) (شکل ۱)، مهم‌ترین عوامل کاهش‌دهنده عملکرد محصولات کشاورزی در سطح جهان هستند. چنانچه تنش‌های زیستی و غیرزیستی حادث نمی‌شدند، عملکردهای واقعی باید برابر با عملکردهای پتانسیل گیاهان می‌بود. در حالیکه در بسیاری از گیاهان متوسط عملکرد واقعی، ۲۰-۱۵ درصد عملکرد پتانسیل آنان است (Saijo & Loo, 2020). در نواحی از کره زمین به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی، عوامل تنش‌زا در تولید محصولات کشاورزی تأثیر منفی به مراتب بیشتری دارند و کشاورزی در آن مناطق با تحمل هزینه بیشتر و بازده کمتر صورت می‌گیرد. ایران یکی از این کشورهاست که در اکثر نقاط آن تنش‌ها موجب کاهش عملکرد از بعد کمی و کیفی و در مواردی عدم امکان تداوم کشاورزی گردیده است. این در حالی است که ویژگی‌های اقلیمی کشور نظیر بارندگی بسیار اندک سالیانه، رطوبت بسیار ناچیز، نوسان درجه حرارت بسیار زیاد در طول شبانه روز، پراکنش نامناسب باران و نزولات جوی، کم بودن پوشش گیاهی، تبخیر زیاد و وزش باد موجب شده است تا کشاورزی کشور نیز با محدودیت منابع به‌ویژه آب و خاک مناسب (عدم حاصلخیزی خاک و کمبود تنوع میکروبی خاک) قرار بگیرد. متأسفانه به همین دلیل اختلاف بسیار زیاد و معناداری در متوسط راندمان تولید در جهان و کشور وجود دارد (Khanchezar *et al.*, 2020; Gull *et al.*, 2019).

¹ Food and Agriculture Organization

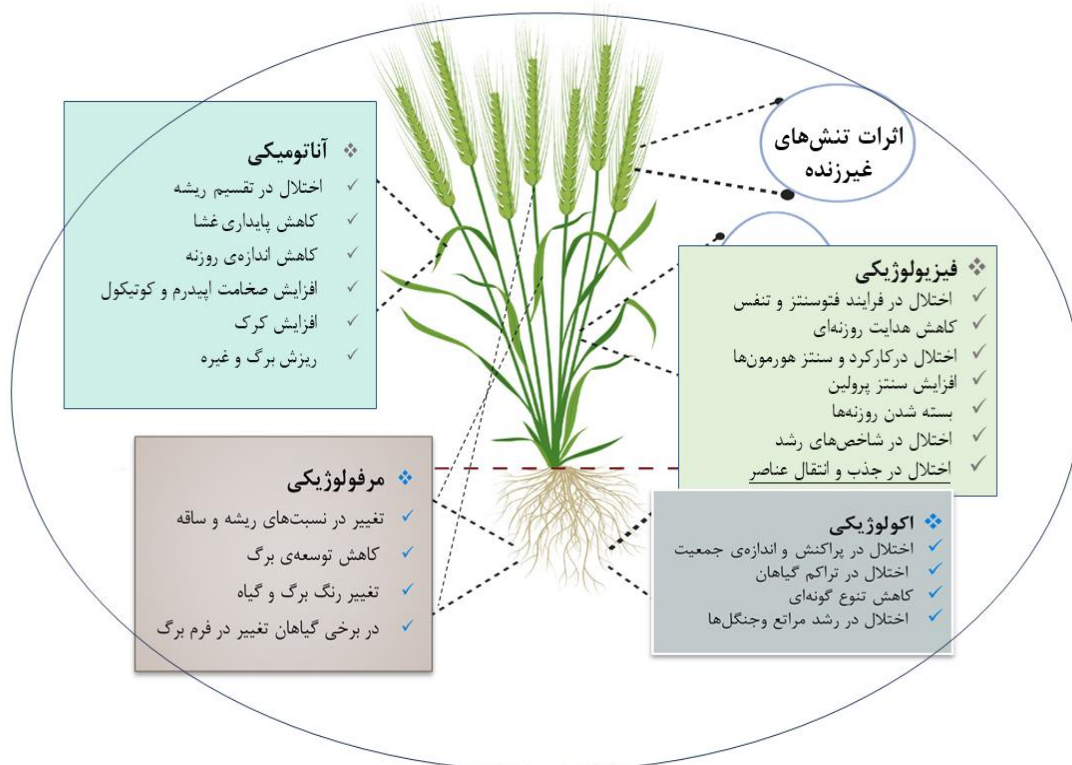
² World Bank Group

خاک محیطی زنده و فعال است که در آن موجودات زنده (میکروارگانیسمها) مختلفی در حال فعالیت و رقابت دائم با یکدیگر هستند. بسیاری از این موجودات زنده با فعالیت‌های خود و با تاثیر بر فعالیت سایر موجودات خاک، محیط را برای رشد گیاهان مساعد نموده و در حقیقت موجودات مفیدی محسوب می‌گردند، گروه‌های مهمی از میکروارگانیسمها با ریشه گیاهان همکاری نزدیکتری داشته و روابط متقابل مفید آنها در شرایط تنش‌های غیرزیستی تشدید می‌شود. این میکروارگانیسمها می‌توانند با استفاده از مکانیسم‌های متعددی باعث کاهش اثرات سوء تنش و افزایش مقاومت گیاه و بهبود رشد گیاهان شوند (Koza *et al.*, 2022; Das *et al.*, 2022). در این مقاله سعی خواهد شد تا اثرات تنش‌های غیرزیستی بر گیاهان، نقش و سازوکار میکروارگانیسمها در افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های غیرزنده به عنوان راهکاری نوین در گسترش کشاورزی پایدار و ارگانیک مورد بررسی قرار گیرد.

اثرات تنش‌های غیرزنده در گیاهان و مدیریت آنها

اثرات تنش‌ها بر گیاهان و پاسخ آن‌ها به نوع، شدت، مدت زمان تنش، گونه گیاهی (خصوصیات ژنتیکی) و مرحله وقوع تنش بستگی دارد (Kopecká *et al.*, 2023). این اثرات را می‌توان در چهار گروه کلی آناتومیکی، فیزیولوژیکی، مرفولوژیکی و اکولوژیکی که به صورت مستقیم و غیرمستقیم رشد و نمو گیاهان و عملکرد آنان را تحت تاثیر قرار می‌دهد، تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱).

با تحمیل تنش‌های غیرزیستی از سوی محیط، مسیرهای چندگانه پیام‌رسانی در گیاهان فعال می‌شوند که میان‌کنش و اثرات متقابل پیچیده‌ای با هم دارند. این پیام‌ها موجب بیان دسته خاصی از ژن‌های دفاعی می‌شوند که سبب واکنش‌های دفاعی در کل سلول شده و عملکرد محصولات این ژن‌ها، تحمل به تنش‌ها را فراهم می‌سازد. این مسیرهای چندگانه پیام‌رسانی می‌تواند به صورت نشان دادن اثرات مختلف در قالب پیام‌های آناتومیکی، فیزیولوژیکی، مرفولوژیکی و اکولوژیکی اتفاق بیفتد (Ashapkin *et al.*, 2020).



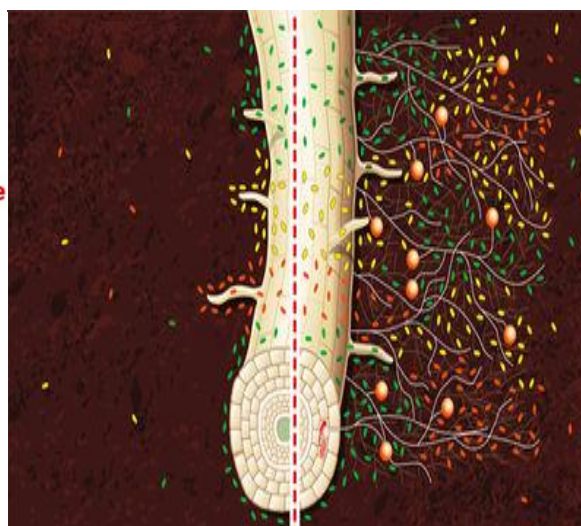
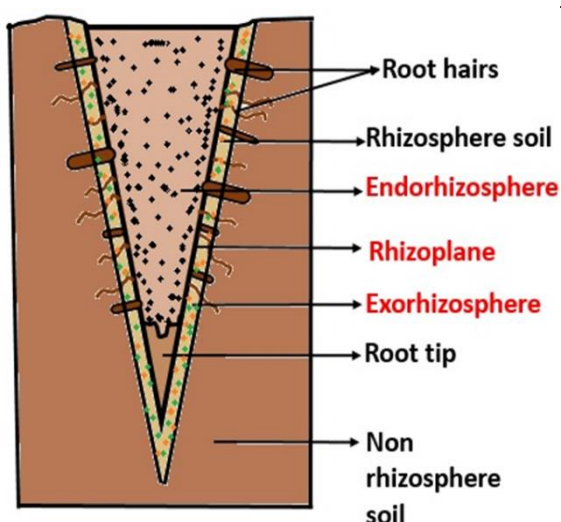
شکل ۱. تصویر شماتیک از تقسیم‌بندی اثرات تنش‌های غیرزیستی در گیاهان

در گذشته اولین رهیافت برای کاهش اثرات تنش‌ها به طور کلی استفاده از کودها و مواد شیمیایی، اصلاح خاک و مدیریت آبیاری بود. در برخی مناطق، کاربرد گسترده مواد شیمیایی در کشاورزی منجر به شکنندگی اکوسیستم، کاهش ثبات کیفیت فراورده‌ها و اثرات مخرب زیست‌محیطی شده است. شوری خاک و آب خصوصاً در مناطقی که آبیاری اجتناب‌ناپذیر است، یک مشکل فزاینده است. چنین رهیافت‌هایی اکنون به عنوان عوامل بی‌ثباتی اکوسیستم تلقی شده است و مسلماً گزینه‌ای برای رفع این محدودیت‌ها نخواهد بود (Imran et al., 2021). امروز روش‌های مختلفی از جمله استفاده از مهندسی ژنتیک و ایجاد گیاهان تراریخته مقاوم به تنش، اصلاح نباتات و تولید ارقام مقاوم، استفاده از مواد شیمیایی، اسید شویی کردن و تیمار حرارتی خاک (در فرایند پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین) پیشنهاد شده است که به دلیل زمان‌بر بودن، هزینه‌ی بالا و اثرات منفی بر محیط زیست و سلامت موجودات زنده، اغلب استفاده از آن‌ها خسارات جبران‌ناپذیری را به دنبال دارد (Gaur & Sharma, 2014). این در حالی است که پژوهش‌های مختلفی نشان داده است که میکرواورگانیزم‌ها می‌توانند به عنوان راهکاری نوین و کاربردی، نقش مهمی در مدیریت تنش‌های

غیرزیستی و زیستی ایفا کنند که از جمله‌ی این میکروارگانیسم‌ها می‌توان به باکتری‌های فراریشه محرک رشد گیاهان^۳ (PGPR) و قارچ‌های مایکوریزا^۴ اشاره کرد (Chaudhary *et al.*, 2022).

باکتری‌های فراریشه محرک رشد گیاه (PGPR)

به طور کلی، میکروارگانیسم‌های مستقر در ناحیه ریزوسفر با توجه به تأثیر بر روی گیاه، می‌توانند به عنوان مفید، مضر یا بی اثر طبقه‌بندی شوند. تخمین زده شده است که حدود دو تا پنج درصد از باکتری‌های موجود در ریزوسفر دارای خصوصیات فیزیولوژیکی هستند که می‌توانند در تقویت رشد گیاه و یا بهبود سلامت گیاهان نقش داشته باشند. به باکتری‌های ریزوسفری مفید که قادرند بطور مستقیم یا غیر مستقیم با یک یا چند مکانیسم رشد و نمو گیاه را در شرایط مختلف بهبود بخشند، باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) گفته می‌شود (Khajeeyan *et al.*, 2024; Gupta *et al.*, 2020). جمعیت ریزجاندارانی که در ناحیه فراریشه زندگی می‌کنند، بسیار بیشتر از سایر نواحی خاک می‌باشند. ریشه گیاهان منبع غذایی مهمی برای آن‌ها فراهم می‌سازد. تعدادی از باکتری‌های که در ناحیه‌ی فراریشه استقرار دارند، توانایی کلنیزه کردن سطح ریشه و نفوذ به درون بافت پوست ریشه را دارند و با سازوکارهای متنوعی سبب افزایش رشد و بهبود مکانیسم‌های گیاه می‌شوند (Sayyed, 2019). بعضی از مهمترین جنس‌های باکتری‌های فراریشه که به عنوان محرک رشد شناخته می‌شوند عبارتند از: *Arthrobacter*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Enterobacter*, *Bacillus*; (Kabiraj *et al.*, 2020; Khajeeyan *et al.*, 2024).



شکل ۲. تصویر شماتیک از ریشه گیاه، خاک اطراف آن، بخش‌های مختلف ریزوسفر و نحوه‌ی قرارگیری باکتری‌های فراریشه

³ Plant Growth Promoting Rhizobacteria

⁴ Mycorrhizal fungi

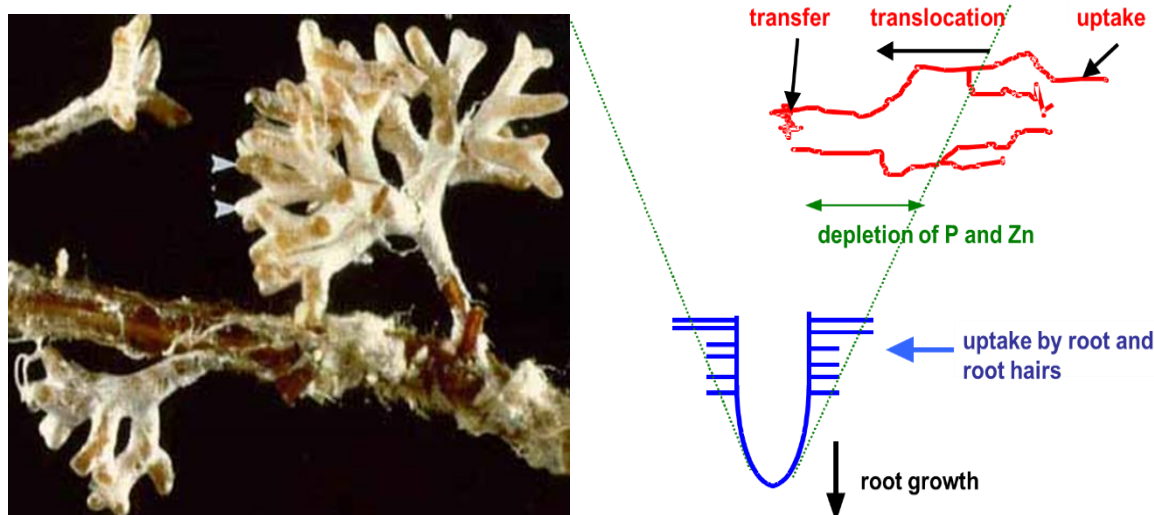
مایکوریزا

گسترده‌ترین رابطه‌ی همزیستی در طبیعت به شمار می‌رود. روابط همزیستی مایکوریزایی تحت واکنش‌های سه جانبه‌ای که بین گیاه‌میزبان، قارچ‌مایکوریزا و محیط وجود دارد، صورت می‌گیرد. قارچ‌های مایکوریزا بر اساس طرز قرار گرفتن در ریشه به انواع مختلفی اندومیکوریزا، اکتومیکوریزا، اکتندومیکوریزا، آربوتوئید، منوتروپوئید، اریکوئید و ورکید تقسیم می‌شوند (Mitra et al., 2021; Chandrasekaran et al., 2024). اثرات مفید قارچ‌های میکوریزا بر حسب نوع گیاه، نوع قارچ همزیست و شرایط محیطی متفاوت است و ممکن است یک قارچ میکوریزا در یک شرایط محیطی یا با یک گیاه معین بهتر در همزیستی شرکت کند و اثرات بیشتری بر گیاه میزبان داشته باشد (Mohan & Joshi, 2024). رابطه همزیستی قارچ‌های میکوریزا و ریشه گیاهان در مناطق خشک و نیمه خشک، خاک‌های شور و فقیر اهمیت بیشتری دارد. فراهم کردن عناصر غذایی، بهبود ساختمان خاک و خصوصیات خاکدانه (ترشح پروتئین گلومالین که موجب پایداری می‌گردد)، افزایش مقاومت گیاه در برابر آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز، مقاوت در برابر تنش‌های غیر زنده، افزایش روابط متقابل با موجودات زنده (افزایش تنوع) و در نهایت حفظ و افزایش عملکرد و بهبود رشد گیاه را در نتیجه این رابطه می‌توان ذکر کرد (Hayat et al. 2010; Begum et al., 2019).

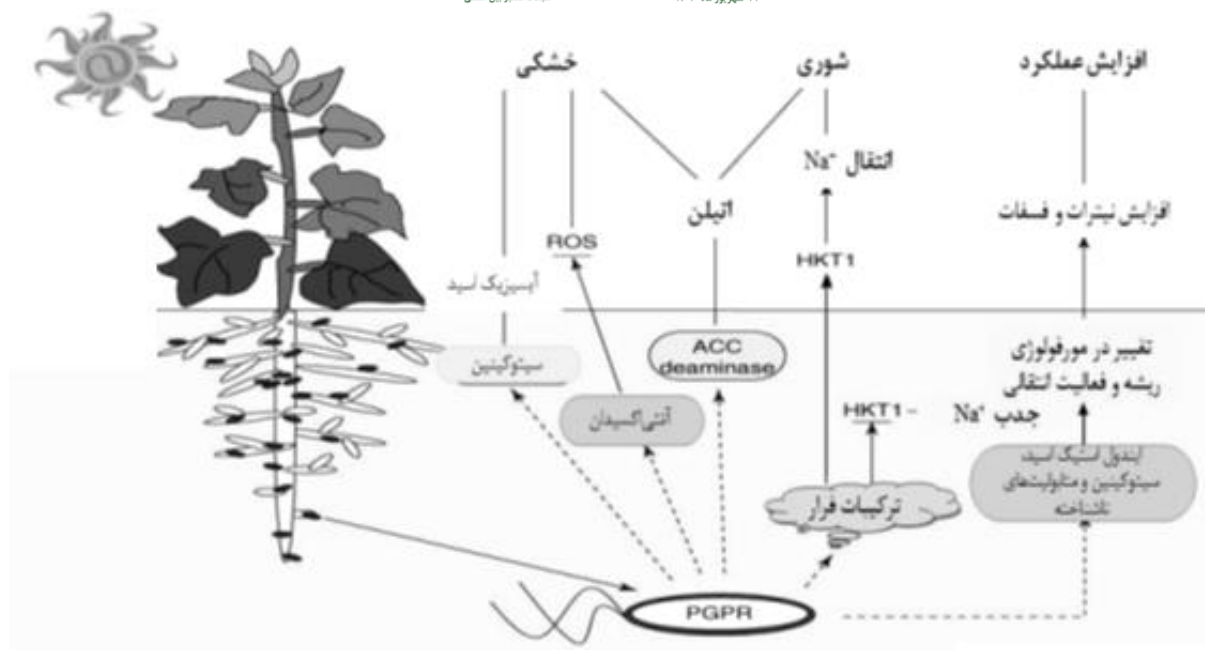
نقش میکرواورگانایسم‌ها در کاهش تنش‌های غیرزنده

(۱) افزایش میزان دسترسی گیاه به مواد غذایی (از طریق تثبیت نیتروژن، انحلال فسفر و تولید سیدروفور)، (۲) افزایش تولید فیتوهورمون‌های گیاهی (اکسین، سیتوکینین و جیبرلین)، (۳) تولید مواد پادزیستی (Antibiotic)، (۴) افزایش توان رقابتی گیاه نسبت به تنش‌های زنده از طریق القای مقاومت فراگیر، (۵) افزایش تحمل نسبت به تنش‌های محیطی غیرزنده از طریق القای تحمل فراگیر (Induced Systemic Tolerance = IST) در گیاهان از مهم‌ترین مکانیسم‌های همزیستی میکرواورگانایسم‌ها با گیاهان به شمار می‌روند (Sorty et al., 2018). به طور کلی می‌توان سازوکارهای افزایش تحمل و مقاومت گیاهان نسبت به تنش‌های غیرزنده با کاربرد این میکرواورگانایسم‌ها را به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول: تقویت سازوکارهای دفاعی گیاه در مقابله با تنش‌های

غیرزنده با تقویت سیستم دفاع آنزیم‌های آنتی اکسیدانی، افزایش تجمع ترکیبات حفاظت کننده در سلول (متابولیت‌های ثانویه)، افزایش تولید مواد (قندهای محلول)، افزایش تحریک و تولید پروتئین‌های درگیر در فرآیند مقاومت به تنش‌ها، تنظیم تولید و تعدیل سطوح فیتوهورمون‌های گیاهی. دسته دوم: شامل سازوکارهای اختصاصی تغییر در میزان بیان ژن‌های پاسخ به تنش (به عنوان مثال ژن *HKT1* که در ورود سدیم به ریشه نقش دارد)، بهبود و پایداری ساختار خاک (از طریق ترشحات پروتئینی) و کاهش جذب یون‌هایی مانند سدیم، کاهش تحرک فلزات سنگین با تولید سیدروفور و افزایش توان ریشه در دسترسی به عناصری از قبیل فسفر و نیتروژن (Mohan & Joshi, 2024; Mitra *et al.*, 2021; Chandrasekaran *et al.*, 2024; Khajeeyan *et al.*, 2024). به طور کلی شکل ۳ و ۴ نقش مایکوریزا و نقش باکتری‌های فرا ریشه را همراه با سازوکارهای مختلف، در کاهش و تعدیل اثرهای منفی تنش‌های غیرزنده در گیاهان نشان می‌دهد.



شکل ۳. تغییرات شدید مرفولوژی ریشه توسط کلنی‌سازی مایکوریزا و افزایش جذب عناصر غذایی ماکرو



شکل ۴. نقش باکتری‌های فراریشه محرک رشد در کاهش تنش‌های غیرزنده گیاهان

گیاه در پاسخ به تنش‌های غیرزیستی تولید مواد اسمولیت مانند پرولین، گلیسین، بتائین، مانیتول و سوربیتول را افزایش داده و از این طریق پتانسیل اسمزی در داخل گیاه حفظ می‌کند (Mantri et al., 2012; Zhanget al., 2023). پژوهش‌های مختلف نشان داده است که کاربرد بعضی باکتری‌های فراریشه محرک رشد و قارچ میکوریزا در گیاهان سبب خنثی‌شدن و یا کاهش تنش خشکی و شوری و بهبود رشد گیاهان تحت شرایط تنش می‌شود (Hossain et al., 2022) (جدول ۱ و ۲). تاثیر مستقیم تنش شوری بر رشد گیاه مربوط به ایجاد عدم توازن در میزان مواد غذایی است که به واسطه کاهش جذب عناصر غذایی در شرایط شوری ایجاد می‌شود. به عنوان مثال جذب و تجمع فسفر در گیاه هنگام تنش شوری کاهش می‌یابد و در نتیجه نشانه‌های کمبود فسفر در گیاه ایجاد می‌گردد. دلیل اصلی کمبود مواد غذایی در خاک، وجود مقادیر زیادی یونهای Na^+ و Cl^- در خاک است که موجب کاهش فعالیت سایر عناصر در خاک و کاهش جذب این عناصر به وسیله گیاه می‌شود (Shanker & Venkateswarlu, 2011). همچنین شوری خاک تاثیر منفی در رابطه همزیستی بین حبوبات و باکتری‌ها داشته و منجر به کاهش گره‌زایی و میزان تثبیت نیتروژن و در نتیجه کاهش عملکرد در گیاهانی مثل سویا، لوبیا و باقلا می‌شود. تنش شوری از تولید و فعالیت نیتروژنازی (*Azospirillum brasilense* nitrogenases) نیز جلوگیری می‌کند (Saharan & Nehra, 2011). در اکثر مطالعات انجام شده روی تنش آبی، تنش شوری نیز مورد بررسی قرار گرفته، زیرا هر دو سبب تنش اکسیداتیو می‌شوند و پاسخ گیاهان به آن‌ها تقریباً مشابه بوده و بین سازوکارهای آنها همپوشانی وجود دارد (Mahajan & Tuteja, 2005).

جدول ۱. باکتری‌ها و قارچ‌های کاهنده تنش خشکی در گیاهان

منبع	مکانیسم	گیاه	میکروارگانیسم
Timmusk and Wagner, 1999	القای ژن مقاومت به تنش	آرابیدوپسیس	<i>Paenibacillus polymyxa</i>
Figueiredo <i>et al.</i> , 2008	تغییر در میزان هورمون و تبادلات روزنه	لوبیا	<i>P. polymyxa</i> and <i>Rhizobium tropici</i>
Marulanda <i>et al.</i> , 2017	تولید اسید ایندول استیک و پرولین	شدر	<i>Bacillus megaterium</i> and <i>Glomus</i> sp.
Kohler <i>et al.</i> , 2008	بهبود وضعیت آنتیاکسیدانی	کاهو	<i>Pseudomonas mendocina</i> and <i>Glomus intraradices</i>
Creus <i>et al.</i> , 2004	بهبود روابط آبی	گندم	<i>Azospirillum</i> sp.
Amellal <i>et al.</i> , 1998	تشکیل خاکدانه و پایداری خاک	گندم	<i>Pantoea agglomerans</i>
Alami <i>et al.</i> , 2000	تشکیل خاکدانه	افتابگردان	<i>Rhizobium</i> sp.
Arshad <i>et al.</i> , 2008	کاهش تولید اتیلن	نخودفرنگی	<i>Pseudomonas</i> sp.
Dodd <i>et al.</i> , 2015	تولید ACC دامیناز	نخودفرنگی	<i>Variovorax paradoxus</i>
Mayak <i>et al.</i> , 2004	تولید ACC دامیناز	فلفل و نخودفرنگی	<i>Achromobacter piechaudii</i> ARV8
Sandhya <i>et al.</i> , 2019	تشکیل خاکدانه و پایداری خاک	افتابگردان	<i>Pseudomonas putida</i> P45

جدول ۲. میکروارگانیسم‌های کاهنده‌ی تنش شوری در گیاهان

منبع	مکانیسم	گیاه	میکروارگانیسم
Mayak <i>et al.</i> , 2004	تولید ACC دامیناز	گوجه‌فرنگی	<i>Achromobacter piechaudii</i>
Ashraf <i>et al.</i> , 2004	کاهش جذب یون سدیم	گندم	Strains of EPS-producing Bacteria
Zhang <i>et al.</i> , 2008	ترکیبات فرار	آرابیدوپسیس	<i>Bacillus subtilis</i> GB03
Saravan kumar & Samiyapan 2007	تولید ACC دامیناز	بادام زمینی	<i>P. fluorescens</i> TDKT
Nadeem <i>et al.</i> , 2007	تولید ACC دامیناز	ذرت	<i>P. syringae</i> , <i>P. fluorescens</i> , <i>Enterobacter aerogenes</i>
Kausar & shahbaz 2006	تولید ACC دامیناز	ذرت	<i>P. fluorescens</i>
Arshad <i>et al.</i> , 2009	تولید ACC دامیناز	نخودفرنگی	<i>Pseudomonas</i> sp.

گیاهان در معرض تغییرات دما هستند و نوسان دما منجر به برهم خوردن تعادل هورمونی گیاه و افزایش تولید اتیلن و در نتیجه کاهش رشد گیاه می‌شود (Saleem *et al.*, 2007; Mathur *et al.*, 2021; Bunn *et al.*, 2009). مطالعات نشان می‌دهد که برخی از باکتری‌های فرا ریشه توانایی افزایش تحمل گیاهان به تنش دمایی را دارند (Sarkar *et al.*, 2018; Mitra *et al.*, 2021) (جدول ۳).

جدول ۳. میکروارگانیسم‌های کاهنده‌ی تنش دمایی در برخی گیاهان

منبع	مکانیسم	گیاه	میکرواورگانیسم
Bensalim <i>et al.</i> , 1998	تولید ACC دامیناز	سیب زمینی	<i>Burkholderia phytofirmans</i> PsJN
Ali <i>et al.</i> , 2009	القای تولید پروتئین های شوک گرمایی	سورگوم	<i>Pseudomonas</i> sp. AMK-P6
Ait Bakra <i>et al.</i> , 2006	تولید ACC دامیناز	انگور	<i>B. phytofirmans</i> PsJN
Chang <i>et al.</i> , 2007	تولید ACC دامیناز	کلزا	<i>P. putida</i> uw4

عمده ترین و رایج ترین فلزات سنگین آلاینده خاک عبارتند از: کادمیم، کروم، مس، جیوه، سرب و نیکل، وجود یون های فلزات سنگین با غلظت های بالا در خاک، باعث افزایش جذب آنها به وسیله ریشه گیاه و انتقال به اندام های هوایی می شود که در متابولیسم گیاه تاثیر منفی داشته و در نهایت سبب کاهش رشد می گردد (Yin *et al.*, 2019). میکرواورگانیسم ها به سه روش سبب کاهش تحرکات فلزات سنگین می شوند، (۱) جذب فلزات سنگین به درون اجزای سلولی، (۲) تجزیه فلزات سنگین درون اندام های داخل سلول و (۳) رسوب دادن فلزات سنگین به عنوان ترکیبات غیر آلی. در تحقیقات ثابت شده که باکتری *P. putida* نسبت به غلظت های بالای فلزات سنگین مقاوم است که این ویژگی، باکتری را به گزینه ی مناسبی برای کاربرد در خاک های آلوده به فلزات سنگین تبدیل کرده است. سیدروفور تولید شده توسط باکتری *Streptomyces acidiscabies*، سبب افزایش رشد تیره بقولات در خاک آلوده به نیکل از طریق برقراری پیوند با آهن و نیکل شده است، بنابراین سیدروفور تولید شده دو نقش مهم، تأمین آهن برای گیاه و حفاظت از گیاه در مقابل سمیت نیکل ایفا می کند (Shanker & Venkateswarlu, 2011; Yin *et al.*, 2019; Tiwari & Lata, 2018). علاوه بر سازوکارهای گفته شده لازم به ذکر است که آلودگی به فلزات سنگین همانند سایر تنش ها سبب افزایش میزان اتیلن گیاه می شود که در این صورت با کاربرد استرین تولید کننده آنزیم ACC دامیناز تا حدودی می توان اثر اتیلن را کاهش داد (Saleem *et al.*, 2007).

نتیجه گیری

تنش های غیرزنده مهمترین عامل کاهش عملکرد گیاهان می باشند. توسعه ارقام زراعی متحمل به تنش از طریق اصلاح نباتات و یا مهندسی ژنتیک یکی از راهکارهای مبارزه با تنش های غیرزنده محسوب می شود، اما یک فرآیند طولانی و زمان بر می باشد. در حالی که استفاده از ریزجانداران برای کاهش تنش، مقرون به صرفه بوده و همچنین سازگار با محیط زیست می باشد. امکان کاهش خسارت تنش های غیرزنده با استفاده از ریزجانداران مفید، فصل جدیدی در کشاورزی باز کرده و می تواند گامی مهم در راستای رسیدن به سیستم کشاورزی پایدار و تولید محصولات ارگانیک محسوب شود. نکته بسیار مهم این است که باکتری های فراریشه محرک رشد و قارچ ها میکوریزا توانایی القای مقاومت در گیاهان در مقابل انواع تنش های زنده و غیرزنده را دارند، بنابراین شناسایی، غربالگری و کاربرد این میکرواورگانیسم ها، می تواند بسیار ارزشمند باشد.

منابع

- Mathur, S., Agnihotri, R., Sharma, M. P., Reddy, V. R., & Jajoo, A. 2021. Effect of high-temperature stress on plant physiological traits and mycorrhizal symbiosis in maize plants. *Journal of Fungi*, 7(10), 867.
- Bunn, R., Lekberg, Y., & Zabinski, C. 2009. Arbuscular mycorrhizal fungi ameliorate temperature stress in thermophilic plants. *Ecology*, 90(5), 1378-1388.
- Sarkar, J., Chakraborty, B., & Chakraborty, U. 2018. Plant growth promoting rhizobacteria protect wheat plants against temperature stress through antioxidant signalling and reducing chloroplast and membrane injury. *Journal of plant growth regulation*, 37(4), 1396-1412.
- Mitra, D., Rodriguez, A. M. D., Cota, F. I. P., Khoshru, B., Panneerselvam, P., Moradi, S. & Mohapatra, P. K. D. 2021. Amelioration of thermal stress in crops by plant growth-promoting rhizobacteria. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 115, 101679.
- Agrios G. N. 2005. *Plant Pathology*. 5th ed. Academic Press, NEW YORK, 942 p.
- Chinnusamy V., Jagendorf A. & Zhu J-K. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science* 45: 437-448.
- Dimpka C., Weinand T. & Asch F. 2009. Plant–rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. *Plant, Cell and Environment* 32: 1682-1694.
- Grover M., Ali Sk. Z., Sandhya V., Rasul A. & Venkateswarlu B. 2011. Role of microorganisms in adaptation of agriculture crops to abiotic stresses. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 27:1231–1240.
- Hayat R., Ali S., Amara U., Khalid R. & Ahmed I. 2010. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Annals of Microbiology* 60: 579-598.
- Jing Y., Hi Zh. & Yang X. 2007. Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Zhejiang University Science B* 8: 192-207.
- Mahaian S. & Tuteja. N. 2005. Cold salinity. & drought. stresses: an overview. *Archives of Biochemistry & Biophysics*. 444: 139-158.
- Saharan B. S. & Nehra V. 2011. Plant growth promoting rhizobacteria: A critical review. *Life Sciences & Medicine Research* 21: 1-30.
- 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 Indian Microbiology & Biotechnology* 34:635–648.
- Shanker A.K. & Venkateswarlu B. 2011. Abiotic Stress in Plants Mechanisms & Adaptations. In *Tech Croatia* 428 p.
- Wittenmayer L. and Merbach W. 2005. Plant responses to drought and phosphorus deficiency: contribution of phytohormones in root-related processes. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168: 531–540.
- Yang, J., Kloepper, J. W. & Ryu, C. M. 2009. Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. *Trends in Plant Science*. 14: 1-4.
- Koza, N. A., Adedayo, A. A., Babalola, O. O., & Kappo, A. P. 2022. Microorganisms in plant growth and development: Roles in abiotic stress tolerance and secondary metabolites secretion. *Microorganisms*, 10(8), 1528.
- Kopecká, R., Kameniarová, M., Černý, M., Brzobohatý, B., & Novák, J. 2023. Abiotic stress in crop production. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(7), 6603.

- Ashapkin, V. V., Kutueva, L. I., Aleksandrushkina, N. I., & Vanyushin, B. F. (2020). Epigenetic mechanisms of plant adaptation to biotic and abiotic stresses. *International journal of molecular sciences*, 21(20), 7457.
- Imran, Q. M., Falak, N., Hussain, A., Mun, B. G., & Yun, B. W. 2021. Abiotic stress in plants; stress perception to molecular response and role of biotechnological tools in stress resistance. *Agronomy*, 11(8), 1579.
- Chaudhary, P., Singh, S., Chaudhary, A., Sharma, A., & Kumar, G. 2022. Overview of biofertilizers in crop production and stress management for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13, 930340.
- Gaur, R. K., & Sharma, P. (Eds.). 2014. *Approaches to plant stress and their management* (pp. 1-396). New Delhi, India: Springer.
- Kabiraj, A., Majhi, K., Halder, U., Let, M., & Bandopadhyay, R. 2020. Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) for crop stress management. *Sustainable agriculture in the era of climate change*, 367-389.
- Khajeeyan, R., Salehi, A., Movahhedi Dehnavi, M., Hamidian, M., & Hazrati, S. 2024. Evaluation of the benefits of plant growth-promoting rhizobacteria and mycorrhizal fungi on biochemical and morphophysiological traits of Aloe barbadensis Mill under water deficit stress. *Scientific Reports*, 14(1), 14480.
- Gupta, A., Singh, S. K., Singh, M. K., Singh, V. K., Modi, A., Singh, P. K., & Kumar, A. 2020. Plant growth-promoting rhizobacteria and their functional role in salinity stress management. In *Abatement of environmental pollutants* (pp. 151-160). Elsevier.
- Sayyed, R. Z. (Ed.). 2019. *Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Sustainable Stress Management: Volume 2: Rhizobacteria in Biotic Stress Management* (Vol. 13). Springer Nature.
- Mitra, D., BE, G. S., Khoshru, B., De Los Santos Villalobos, S., Belz, C., Chaudhary, P., ... & Mohapatra, P. K. D. 2021. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on rice growth, development, and stress management with a particular emphasis on strigolactone effects on root development. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(14), 1591-1621.
- Chandrasekaran, M., Paramasivan, M., & Ahmad, S. 2024. Review on arbuscular mycorrhizal fungi mediated alleviation of arsenic stress. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 194, 105872.
- Mohan, V. K., & Joshi, S. R. 2024. Mycorrhizal Fungi as Ecofriendly Interventions for Crop Productivity. In *Industrial Microbiology and Biotechnology: An Insight into Current Trends* (pp. 663-677). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., ... & Zhang, L. 2019. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in plant science*, 10, 1068.
- Sorty, A. M., Bitla, U. M., Meena, K. K., & Singh, N. P. 2018. Role of microorganisms in alleviating abiotic stresses. *Microorganisms for Green Revolution: Volume 2: Microbes for Sustainable Agro-ecosystem*, 115-128.
- Mantri, N., Patade, V., Penna, S., Ford, R., & Pang, E. 2012. Abiotic stress responses in plants: present and future. *Abiotic stress responses in plants: metabolism, productivity and sustainability*, 1-19.
- Zhang, Y., Xu, J., Li, R., Ge, Y., Li, Y., & Li, R. (2023). Plants' response to abiotic stress: Mechanisms and strategies. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13), 10915.
- Hossain, A., Ali, M. E., Maitra, S., Bhadra, P., Rahman, M. M. E., Ali, S., & Aftab, T. 2022. The role of soil microorganisms in plant adaptation to abiotic stresses: Current scenario and future perspectives. In *Plant perspectives to global climate changes* (pp. 233-278). Academic Press.
- Yin, K., Wang, Q., Lv, M., & Chen, L. 2019. Microorganism remediation strategies towards heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 360, 1553-1563.
- Tiwari, S., & Lata, C. 2018. Heavy metal stress, signaling, and tolerance due to plant-associated microbes: an overview. *Frontiers in plant science*, 9, 452.

FAO. 2023. Fertilizer Requirements in 2015 and 2030. Food and Agriculture Organization on the United Nations, Rome.

Khanchezar, A., Izadpanah, K., & Mirtalebi, M. 2020. Biotic and abiotic factors associated with citrus progressive decline in Fars Province, Iran. *Journal of Phytopathology*, 168(7-8), 460-468.

Gull, A., Lone, A. A., & Wani, N. U. I. 2019. Biotic and abiotic stresses in plants. *Abiotic and biotic stress in plants*, 7, 1-9.

Das, P. P., Singh, K. R., Nagpure, G., Mansoori, A., Singh, R. P., Ghazi, I. A., ... & Singh, J. 2022. Plant-soil-microbes: A tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices. *Environmental Research*, 214, 113821.

Balasundram, S. K., Shamshiri, R. R., Sridhara, S., & Rizan, N. 2023. The Role of Digital Agriculture in Mitigating Climate Change and Ensuring Food Security: An Overview. *Sustainability* 2023, 15, 5325.

Johnson, D. 2024. Food security, the agriculture value chain, and digital transformation: The case of Jamaica's agricultural business information system (ABIS). *Technology in Society*, 77, 102523.

Tajima, Y., Loo, E. P. I., & Saijo, Y. 2020. Plant physiological and molecular mechanisms in cross-regulation of biotic-abiotic stress responses. In *Priming-mediated stress and cross-stress tolerance in crop plants* (pp. 21-34). Academic Press.

Koza, N., Adedayo, A., Babalola, O., & Kappo, A. 2022. Microorganisms in plant growth and development: Roles in abiotic stress tolerance and secondary metabolites secretion. *Microorganisms*. 2022; 10: 1528.