

Comparing the role of inoculating C3 and C4 cereal seeds with *Streptomyces* growth-promoting bacteria in increasing yield and plant defense power under environmental stresses

Parisa Koobaz^{1*}, Sheyda Hashtroudi

1. Professor Assistant, Department of Molecular Physiology, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

2. Bachelor Graduated, Department of Microbiology, Faculty of Basic Sciences, Islamic Azad University, Shahr-e-Quds Branch, Iran.

Correspondence:
Parisa Koobaz
Email: pkooobaz@abrii.ac.ir

Received: 5/Oct/2025
Accepted: 22/Apr/2026

How to cite:

Koobaz, P., & Hashtroudi, S. (2025). Comparing the role of inoculating C3 and C4 cereal seeds with *Streptomyces* growth-promoting bacteria in increasing yield and plant defense power under environmental stresses. *Crop Biotechnology*, 15 (3), ??-??. (DOI: [10.30473/cb.2026.76031.2021](https://doi.org/10.30473/cb.2026.76031.2021))

ABSTRACT

Climate change is a major challenge with widespread impacts including biotic and abiotic stresses. Increasing temperatures, decreasing precipitation, and drought exert pressure on water resources, soil, and vegetation, leading to reduced yields, especially in two group cereals. It is crucial to utilize novel strategies to mitigate these impacts, especially yield reduction. One of these strategies is the use of biological growth promoters such as plant growth-promoting bacteria (PGPR) such as *Streptomyces* spp. These bacteria enhance plant growth and resistance through direct and indirect mechanisms. C3 and C4 cereals respond to growth-promoting bacteria in a similar manner despite different photosynthetic mechanisms. Inoculation with *Streptomyces* modulates the plant's physiological, biochemical, and molecular processes, resulting in improved water and nutrient uptake, increased growth and yield, enhanced activity of antioxidant enzymes, and accumulation of osmolytes. It also modulates the expression of genes related to growth hormones and specific plant metabolites. The role of growth-promoting strains of *Streptomyces* in conditions of abiotic stresses (drought and salinity) and biotic stresses (pests and diseases) by antioxidant enzymes production, the secretion of antimicrobial compounds such as antibiotics and siderophores, activation of plant defense pathways and the production of secondary metabolites including volatile organic compounds, phytohormones such as Indole Acetic Acid improve plant growth and protect against environmental stresses. Investigation of these mechanisms in two groups of C3 and C4 cereals will provide a deeper understanding of the role of *Streptomyces* in ensuring food security and its use as a beneficial growth promoter.

KEY WORDS

C3 Cereal, C4 Cereal, Stress, Growth promoter, *Streptomyces*.



«مقاله مروری»

مقایسه نقش تلقیح بذر غلات سه کربنه و چهار کربنه با باکتری‌های محرک رشد استرپتومایسی در افزایش عملکرد و قدرت دفاعی گیاه تحت تنش‌های محیطی

پریسا کوباز^{۱*}، شیدا هشترودی^۲

چکیده

تغییر اقلیم چالشی اساسی با اثرات گسترده شامل تنش‌های زیستی و غیرزیستی است. افزایش دما، کاهش بارش، و خشکسالی به منابع آبی، خاک و پوشش گیاهی فشار آورده و منجر به کاهش عملکرد به‌ویژه در هر دو گروه غلات سه و چهار کربنه می‌شود. بهره‌گیری از راه‌کارهای نوین برای تعدیل این اثرات، به ویژه کاهش عملکرد، حیاتی است. یکی از این راه‌کارها، استفاده از محرک‌های رشد زیستی مانند باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) نظیر استرپتومایسس است. این باکتری‌ها با مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم رشد و مقاومت گیاه را بهبود می‌بخشند. غلات سه و چهار کربنه با وجود مکانیسم متفاوت فتوسنتزی به شکل مشابهی نسبت به باکتری‌های محرک رشد واکنش نشان می‌دهند. تلقیح با استرپتومایسس، مکانیسم‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این تغییرات موجب بهبود جذب آب و مواد مغذی، افزایش رشد و عملکرد گیاه، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت و تولید اسمولیت‌ها، تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با هورمون‌های رشد و متابولیت‌های خاص گیاهی است. نقش سوبیه‌های محرک رشد استرپتومایسی در شرایط تنش‌های غیرزیستی (خشکی و شوری) و تنش‌های زیستی (آفت و بیماری) با تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، ترشح ترکیبات ضد میکروبی مانند آنتی‌بیوتیک‌ها، فعال‌سازی مسیرهای دفاعی گیاه و تولید متابولیت‌های ثانویه از جمله مواد آلی فرار و فیتوهورمون‌هایی نظیر ایندول استیک اسید موجب بهبود رشد و محافظت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی می‌شود. بررسی این مکانیسم‌ها در دو گروه غلات سه و چهار کربنه با ساختار و عملکرد فتوسنتزی متفاوت، درک عمیق‌تری از نقش استرپتومایسس در تضمین امنیت غذایی و استفاده از آن به‌عنوان محرک رشد سودمند ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

استرپتومایسس، تنش، غلات سه کربنه، غلات چهار کربنه، محرک رشد.

۱. استادیار بخش فیزیولوژی مولکولی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۲. فارغ‌التحصیل کارشناسی گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس، تهران، ایران.

نویسنده مسئول:

پریسا کوباز

رایانامه: pkobaz@abrii.ac.ir

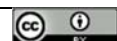
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲

استناد به این مقاله:

کوباز، پریسا و هشترودی، شیدا (۱۴۰۵). مقایسه نقش تلقیح بذر غلات سه کربنه و چهار کربنه با باکتری‌های محرک رشد استرپتومایسی در افزایش عملکرد و قدرت دفاعی گیاه تحت تنش‌های محیطی، *فصلنامه علمی زیست‌فناوری گیاهان زراعی*، ۱۵ (۳)، ۳۳-۳۴.

(DOI: 10.30473/cb.2026.76031.2021)



مقدمه

تغییرات جهانی اقلیم منجر به بروز تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی، شوری و گرما می‌شود که به‌طور مستقیم بر گیاهان اثر گذاشته و موجب کاهش بهره‌وری می‌شوند. تنش‌های غیرزیستی در رشد و توسعه گیاهان اختلال ایجاد کرده و جوانه‌زنی بذرها و فعالیت‌های آنزیمی را به تأخیر می‌اندازند (Meena et al., 2017; Khan et al., 2020). علاوه، تنوع میکروبی خاک و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک را مختل کرده و منجر به کاهش بهره‌وری و از دست رفتن محصول می‌شوند (Goswami et al., 2020). برای مقابله با تأثیرات منفی تنش بر گیاهان زراعی، سیاست‌های کشاورزی بر ترویج سیستم‌های پایدار تولید با تأکید بر استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید موجود در ریشه اتخاذ شده است. منطقه ریزوسفر لایه‌ای از خاک است که ریشه‌های گیاه را احاطه کرده و به‌عنوان کانونی برای میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها، نماتدها و جلبک‌ها شناخته می‌شود و یکی از پیچیده‌ترین اکوسیستم‌های روی زمین است (Raaijmakers et al., 2013; Mendes et al., 2009). کل جامعه میکروبی موجود در ریزوسفر ریزومیکروبیوم نامیده می‌شود که به‌عنوان یک حلقه اصلی در رونق زیستی محیط است. در داخل ریزومیکروبیوم، تعدادی باکتری خاکی به نام باکتری‌های محرک رشد گیاه سطح سیستم ریشه را کلونیزه می‌کنند و از طریق تعاملات متضاد و هم‌افزایی، رشد و سلامت گیاه را تحریک می‌نمایند (Bhat et al., 2020; Dos Santos et al., 2020). باکتری‌های محرک رشد معمولاً با ایجاد روابط همزیستی با گیاه و بهره‌گیری از مکانیسم‌های گوناگون، فرایند رشد و توسعه را تسهیل می‌کنند (Shepherdson et al., 2023). ویژگی‌هایی نظیر توانایی استقرار روی ریشه، رقابت با میکروارگانیسم‌های مضر و تقویت رشد از جمله

شاخص‌هایی هستند که این باکتری‌ها را متمایز می‌سازد (Ojuederie et al., 2019). شدت و نوع ارتباط باکتری‌های PGPR با گیاه می‌تواند بسته به گونه باکتری و شرایط گیاه متفاوت باشد. باکتری‌های محرک رشد گیاهی می‌توانند آزادی، همزیست، انگلی یا ساپروفیت باشند و نقش‌های قدرتمندی در تقویت رشد و بازده گیاهان ایفا می‌کنند. گونه‌های ریزوباکتریایی آزادی، مجتمع و همزیست با ریشه‌ها، در جنس‌های باسیلوس^۱، سودوموناس^۲، آروسپریلیوم^۳، ازتوباکتر^۴، کلبسیلا^۵، انتروباکتر^۶، آلكاليجينز^۷، آرتروباکتر^۸، بورخوردریا^۹ و سراشیابله‌عنوان PGPR گزارش شده‌اند (Kumari et al., 2018). بر پایه ارتباط آنان با ریشه‌های گیاه، PGPR می‌توانند به دو دسته تقسیم شود: باکتری‌های ریزوباکتریایی خارج سلولی^{۱۰} و باکتری‌های ریزوباکتریایی داخل سلول^{۱۱} (Figueiredo et al., 2011). باکتری‌های خارج سلولی، ریزوباکتریایی آزادی هستند که در ریزمحیط ریشه^{۱۲} در سطح ریشه^{۱۳} یا در فواصل بین سلول و غشای ریشه وجود دارند. از نمونه‌های ePGPR می‌توان به آگروباکتریوم، سراتیا، آروسپریلیوم، باسیلوس، آروینیا، میکروکوکوس و سودوموناس اشاره کرد. باکتری‌های همزیست مانند ریزوبیوم و فرانکیا^{۱۴} درون سلولی ریشه عموماً در ساختارهای گره‌ای تخصصی وجود دارند (Verma, 2010). همچنین باکتری‌های اکتینومیستی مانند *Micromonospora* spp.، *Streptomyces* spp.، *Thermobifida* spp. و *Streptosporangium* spp. غالباً ناحیه ریزوسفری را اشغال کرده و به بهبود رشد گیاهان کمک کرده و پاتوژن‌های قارچی ریشه را مهار می‌کنند (Martinez-Viveros et al., 2010). یکی از گروه‌های PGPRها میکروارگانیزم‌های خاک‌زی مانند اکتینومیست‌ها^{۱۵}، به‌ویژه جنس استرپتومایسس^{۱۶} هستند که نقش مهمی در حفظ پایداری جامعه میکروبی ریزوسفر ایفا

1 *Bertratia* spp.
2 PGPR
3 PGPR
4 Rhizosphere
5 Rhizoplane
6 Frankia spp.
7 Actinomycete
8 Streptomyces spp.

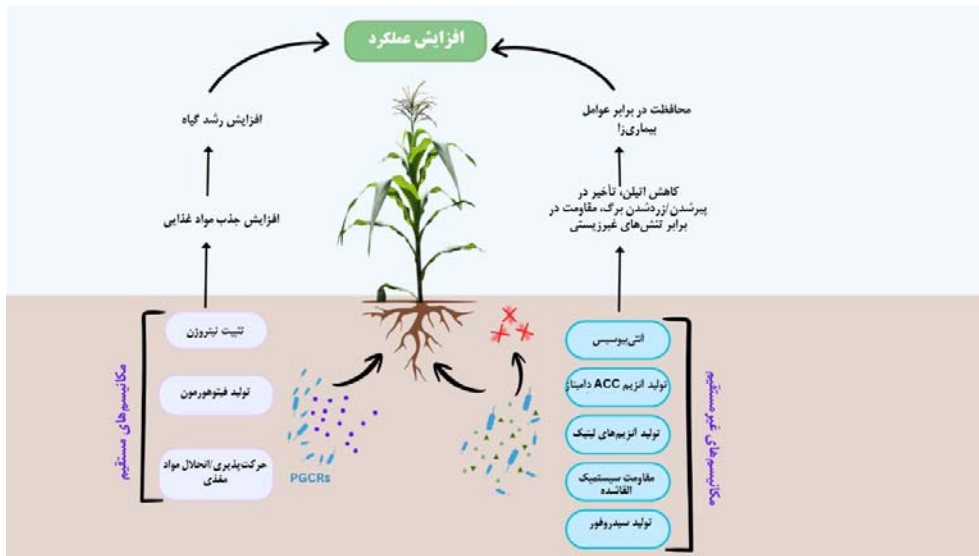
1. PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria)
2 Bacillus spp.
3 Pseudomonas spp.
4 Azospirillum spp.
5 Azotobacter spp.
6 Klebsiella spp.
7 Enterobacter spp.
8 Alcaligenes spp.
9 Arthrobacter spp.
10 Burkholderia spp.

می‌کنند. این باکتری‌ها علاوه بر کمک به رشد گیاهان، ترکیبات ضد میکروبی و آنزیم‌های تجزیه‌کننده نیز تولید می‌کنند که موجب پاک‌سازی فضای ریشه از عوامل بیماری‌زا می‌شوند (Subrahmanyam *et al.*, 2020). مطالعات مروری متعددی صفات مفید و متنوع باکتری‌های محرک رشد و کاربرد آن‌ها به‌عنوان عوامل افزایش رشد و کنترل زیستی (بیولوژیک) را بررسی کرده‌اند، اما استفاده از آن‌ها در کشاورزی همچنان با چالش‌هایی روبه‌رو است. همچنین تاکنون بررسی کاملی روی جنس استرپتومایسس و تأثیر آن در کاهش اثرات تغییر اقلیمی در غلات سه‌کربنه و چهارکربنه و مقایسه فعالیت استرپتومایسس در این دو گروه انجام نشده است. این مسئله ممکن است به دلیل کمبود پژوهش در درک مکانیسم‌های تعامل PGPR گیاه باشد. بنابراین این مرور سعی دارد با روشن‌تر کردن مکانیسم‌های نشان‌داده شده توسط PGPR برای افزایش رشد گیاه و نقش آن در مقابله با انواع تنش‌های غیر زیستی و زیستی، استراتژی‌هایی برای پایداری کشاورزی در آینده ارائه دهد. این مقاله مروری همچنین به بررسی مکانیسم‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی در دو گروه غلات می‌پردازد تا نقش باکتری محرک رشد با استفاده از روش‌های مختلف در بهبود رشد گیاهان سه و چهارکربنه را نشان دهد و در نهایت مقایسه بین دو گروه را ارائه می‌دهد.

استرپتومایسس، باکتری چندانظوره برای کشاورزی پایدار

جنس استرپتومایسس گروهی از باکتری‌های گرم‌مثبت، هوازی و رشته‌ای متعلق به شاخه اکتینوباکتری^۲ است که توانایی تولید اسپور دارند (Khadayat *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2020). این باکتری‌ها در مراحل اولیه رشد میسلیم‌های رویشی ایجاد می‌کنند که با گذشت زمان به هیف‌های هوایی تبدیل شده و در انتهای آن‌ها اسپورهایی مقاوم تولید می‌شود. اسپورها به دلیل تحمل بالا در برابر شرایط نامساعد، در گسترش و کلنیزاسیون این باکتری در

زیستگاه‌های متنوع نقش مهمی ایفا می‌کنند. جنس *استرپتومایسس* در طیف وسیعی از زیستگاه‌ها از جمله نواحی خشک، مناطق دریایی، جنگل‌های حرا و اکوسیستم‌های کمتر شناخته شده یافت می‌شود. در حال حاضر تا سال ۲۰۲۴ حدود ۷۲۲ زیرتاکسون از جنس‌های استرپتومایسس با نام‌های معتبر و صحیح منتشر شده‌است (Deng *et al.*, 2025). به‌طور متوسط، در هر گرم خاک حدود یک میلیون سلول باکتریایی وجود دارد که اکتینوباکتری‌ها سهم قابل‌توجهی دارند (Harir *et al.*, 2018). این فراوانی نشان‌دهنده اهمیت اکولوژیک این گروه از میکروارگانیسم‌ها در چرخه‌های زیستی خاک است. یکی از ویژگی‌های قابل‌توجه استرپتومایسس توانایی برقراری روابط همزیستی با گیاهان و ایفای نقش به‌عنوان PGPR است. این باکتری‌ها قادرند در ناحیه ریزوسفر یا بافت‌های داخلی گیاه مستقر شده و با آن وارد تعاملات سودمند شوند که می‌تواند در ارتقای رشد، سلامت و مقاومت گیاه نقش مؤثری داشته باشد. استرپتومایسس با بهره‌گیری از مکانیسم‌های گوناگون در افزایش تحمل گیاه به تنش‌های زیستی و غیرزیستی نقش دارند. ترشح ترکیبات ضد میکروبی مانند آنتی‌بیوتیک‌ها و سیدروفورها، فعال‌سازی مسیرهای دفاعی گیاه و تولید متابولیت‌های ثانویه از جمله مواد آلی فرار (VOCs)، آنزیم‌ها و فیتوهورمون‌ها، از جمله فعالیت‌های این باکتری‌هاست که موجب بهبود رشد و محافظت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی می‌شود (Liu *et al.*, 2024). استرپتومایسس علاوه بر اثرات مستقیم بر رشد گیاه، نقش مهمی در حفظ تعادل میکروبی ریزوسفر و باروری خاک ایفا می‌کند. این باکتری‌ها با شرکت در فرایندهایی مانند چرخه عناصر غذایی، معدنی‌سازی مواد آلی و تنظیم فلزات سنگین، موجب بهبود سلامت خاک می‌شوند. همچنین با تنظیم شبکه میکروبی، به پایداری زیستی اکوسیستم‌های زراعی کمک می‌کنند (Shan *et al.*, 2025). در شکل (۱) نمودار سازگار مستقیم و غیرمستقیم باکتری‌های محرک رشد آورده شده است.



شکل ۱. سازوکار مستقیم و غیر مستقیم عملکرد باکتری‌های محرک رشد (Liu et al., 2024; Shan et al., 2025)

Figure 1. Direct and indirect mechanisms of action of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (Liu et al., 2024; Shan et al., 2025)

آوندی است. در ذیل مزایای عملکردی هر گروه از گیاهان آورده شده است:

گیاهان C4 دارای مزایای فیزیولوژیکی متعددی هستند که ناشی از سازوکار تغلیظ دی‌اکسیدکربن در اطراف آنزیم روبیسکو است. این ویژگی باعث می‌شود آنزیم کارآمدتر عمل کرده و از پدیده تنفس نوری جلوگیری شود. در نتیجه، گیاهان C4 راندمان مصرف آب بالاتری دارند، زیرا می‌توانند فتوسنتز را با کارایی بیشتری انجام دهند، درحالی‌که روزه‌های خود را بیشتر بسته نگه می‌دارند و آب کمتری از دست می‌دهند. این کارایی در دمای بالا و نور شدید محیط‌های گرم و خشک (مانند ذرت، سورگوم و نی‌شکر) بسیار چشمگیر است و باعث می‌شود راندمان فتوسنتزی آن‌ها بالاتر باشد. همچنین، این گیاهان به‌دلیل نیاز کمتر به پروتئین روبیسکو، نیتروژن را به‌طور مؤثرتری مصرف می‌کنند.

در مقابل، گیاهان C3 (مانند برنج، گندم و سویا) نیز مزایای خاص خود را دارند و در شرایط متعادل عملکرد بهتری نشان می‌دهند. تولید یک مولکول گلوکز در گیاهان C3 نیاز به انرژی کمتری (۱۸ مولکول ATP در مقابل ۳۰ مولکول ATP در C4) دارد که باعث می‌شود

گیاهان سه کربنه و چهار کربنه: تفاوت‌های ساختاری و عملکردی

بیشتر گیاهان جزو گیاهان سه کربنه بوده و برخی از آن‌ها چهار کربنه هستند. تفاوت ساختاری اصلی بین گیاهان سه کربنه (C3) و چهار کربنه (C4) در آناتومی برگ آن‌ها است. گیاهان C4 دارای یک ساختار تخصصی به نام آناتومی کراژ هستند که در گیاهان C3 وجود ندارد. در گیاهان سه کربنه سلول‌های غلاف آوندی کوچک و فاقد کلروپلاست‌های بزرگ هستند. ولی در گیاهان C4 سلول‌های غلاف آوندی بزرگ بوده و به شکل حلقه‌ای در اطراف دسته‌های آوندی قرار گرفته‌اند و حاوی کلروپلاست‌های بزرگ و فراوان هستند. در گیاهان سه کربنه فتوسنتز (از جمله چرخه کالوین) تنها در سلول‌های میانبرگ (مزوفیل) این سلول‌ها انجام می‌شود. در گیاهان چهار کربنه ابتدا تثبیت اولیه CO₂ در این سلول‌ها انجام شده، سپس ترکیب چهار کربنه به سلول‌های غلاف آوندی منتقل می‌شود. همچنین محل تولید و ذخیره نشاسته در گیاهان سه کربنه در سلول‌های میانبرگ است ولی در گیاهان C4 در سلول‌های غلاف

در شرایط نور محدود، کارایی بیشتری داشته باشند. علاوه بر این، در آب و هوای خنک‌تر و با غلظت بالای دی‌اکسیدکربن اتم‌سفر، مسیر فتوسنتزی C3 می‌تواند کارآمدتر باشد (Upadehyay et al., 2020).

اثر استریتومایسیسی بر رشد و عملکرد، تحمل به تنش‌های زیستی و غیرزیستی در غلات سه‌کربنه اثرات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی تلقیح باکتری استریتومایسیسی روی عملکرد گیاه گندم در تحمل به تنش‌های محیطی

باکتری‌های استریتومایسیسی به‌عنوان ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه PGPR از طریق مکانیسم‌های متعدد فیزیولوژیکی موجب بهبود رشد، افزایش زیست‌توده و ارتقای تحمل به تنش‌های محیطی در گندم می‌شوند. در مطالعه‌ای که بذرها و ریشه‌های گندم با روش‌ناورنگااصل از کشت استریتومایسیس تیمار شدند، رشد طولی ساقه، وزن تر و خشک ساقه و ریشه افزایش یافت. این افزایش به‌دلیل ترشح ترکیبات تنظیم‌کننده رشد، به‌ویژه اکسین‌ها و سیتوکینین‌هاست که موجب تحریک تقسیم و طویل شدن سلول‌های گیاهی شده و به توسعه سیستم ریشه‌ای کمک می‌کنند اگرچه عمق سیستم ریشه‌ای در آن کاهش یافت (Liu et al., 2024). در یک مطالعه دیگر، کاربرد ترکیبی *Streptomyces rochei* D74 و *Streptomyces pactum* Act12 گندم، بازده فتوسنتز (Fv/Fm) II را تا ۴۳ درصد و عملکرد دانه را تا ۲۶/۱۹ درصد بهبود داد. این افزایش عملکرد بیشتر ناشی از بهبود اجزای عملکردی از جمله تعداد دانه در خوشه، سنبله‌های مؤثر و توسعه سیستم ریشه‌ای است (Shan et al., 2025).

مطالعات دیگر نیز نشان داده‌اند که تلقیح با *Streptomyces pactum* می‌تواند به تنظیم مسیرهای مولکولی متعددی از جمله مسیرهای سیگنال‌دهی فیتوهورمون‌ها، گلیکولیز، چرخه اسید سیتریک و متابولیسم فسفولیپیدها کمک کرده و از این طریق توسعه ریشه و

پایداری غشاهای سلولی را در غلات بهبود بخشد (Nazir et al., 2018). گونه‌های استریتومایسیسی موجود در ریزوسفر گندم از طریق تولید طیف وسیعی از آنزیم‌ها مانند آمیلاز، کیتیناز، سلولاز، اینورتاز، لیپاز، کراتیناز، پراکسیداز، پکتیناز، پروتاز، فیتاز و زایلاناز، ترکیبات آلی پیچیده را به اشکال معدنی قابل جذب برای گیاه تبدیل می‌کنند و به این ترتیب چرخه عناصر غذایی در خاک را تسهیل می‌نمایند (Chen et al., 2023). همچنین، گونه‌هایی نظیر *S. thermophilacinus* و *S. carpinensis* توانایی تولید سیدروفور، سنتز ایندول-۳-استیک‌اسید^{۲۴} و حل‌کنندگی فسفات را دارند (Jog et al., 2016). برخی دیگر مانند *S. olivaceoviridis* و *S. rochei* قادر به سنتز هورمون‌های گیاهی از جمله اکسین، جیبرلین و سیتوکینین بوده و از این طریق رشد و توسعه گندم را در شرایط مختلف بهبود می‌بخشند (Cao et al., 2023). علاوه بر این، سویه *Streptomyces pratensis* S10 به‌عنوان یک عامل زیستی و کود زیستی دارای پتانسیل بالا در گندم شناسایی شد. این سویه توانایی تولید IAA و سیدروفورها، فعالیت ACC دامیناز^{۲۵}، حل‌کنندگی فسفات معدنی و تثبیت نیتروژن را دارا بوده و در عین حال ژن‌های متعددی مرتبط با تنظیم رشد گیاه در ژنوم آن شناسایی شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش بیان ژن‌های مسیر سالیسیلیک‌اسید^{۲۶} (*PR1.1*, *PR2*, *PR5* و *PAL1*) و نیز ژن‌های مسیر جاسمونیک/اتیلین^{۲۷} (*PDF1.2* و *PR9*, *PR4a*, *PR3*) در گیاهچه‌های گندم شدند که بیانگر نقش کلیدی استریتومایسیسی در القای مقاومت سیستمیک اکتسابی است. در واقع این سویه *S10* حتی در شرایط نرمال با فعال کردن سیستم‌های مقاومت گیاه موجب ایجاد آمادگی آن نسبت به تغییرات محیطی احتمالی شده و توان گیاه را افزایش می‌دهد (Tian et al., 2024) (شکل ۲).

²⁶Salicylic Acid
²⁷Jasmonic/Ethylene

²Supernatant
²⁴Indole Acetic Acid (IAA)
²⁵ACC deaminase

ریزوسفری و فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی آن ایفا می‌کنند. وجود اسیدهای فنولی نظیر فرولیک اسید در تمامی تیمارها نشان‌دهنده فعال شدن مسیرهای فنولیک است که علاوه بر نقش آنتی‌اکسیدانی، می‌تواند در تقویت دیواره سلولی و افزایش مقاومت گیاه در برابر عوامل بیماری‌زا مؤثر باشد. جالب توجه است که هیدروکسی‌بنزوئیک اسید نشان‌دهنده تغییرات اختصاصی در متابولیسم ثانویه تحت تأثیر کنسرسیون‌های متنوع استرپتومایسس است. از نظر رشد، تلقیح دوتایی (به‌ویژه ترکیب CLV104+CLV179) بیشترین تجمع بیوماس ریشه را به همراه داشت. افزایش بیوماس ریشه بیانگر تحریک تقسیم و گسترش سلول‌های ریشه و افزایش توانایی گیاه در جذب عناصر غذایی است. در مقابل، تلقیح سه‌تایی اگرچه رشد اندام هوایی را تقویت کرد، اما کاهش طول ریشه را به همراه داشت که می‌تواند ناشی از تغییر در اولویت‌های تخصیص متابولیت‌ها و انرژی گیاه باشد. بنابراین، استرپتومایسس‌ها نه تنها با تولید ترکیبات محرک رشد و تغییر در ترشحات ریشه، بلکه از طریق تعدیل مسیرهای فنولیک و متابولیت‌های ثانویه، مکانیسم‌های بیوشیمیایی ذرت را تحت تأثیر قرار داده و موجبات بهبود رشد و احتمالاً افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی را فراهم می‌کند (Neto *et al.*, 2025). تلقیح بذر ذرت با سویه‌های مؤثر استرپتومایسی قادر است بیان ژن‌های مرتبط با مسیرهای هورمونی و پاسخ به تنش خشکی را در گیاهان تقویت کنند. این تغییرات می‌تواند شامل فعال‌سازی ژن‌های مرتبط با مسیر اکسین برای توسعه ریشه، مسیر سیتوکینین برای حفظ رشد شاخساره و مسیر آبسزیک اسید برای تنظیم پاسخ های فیزیولوژیک به خشکی باشد. در نتیجه، حتی بدون اندازه‌گیری مستقیم، می‌توان نقش بالقوه استرپتومایسس را در تغییر بیان ژنی و افزایش تاب‌آوری ذرت در شرایط کم‌آبی استنباط کرد (Khosro *et al.*, 2023).

تحلیل بیان ژن‌ها با استفاده از qRT-PCR نشان داد که تلقیح برنج با سویه‌های استرپتومایسس تغییرات معنی‌داری در مسیرهای فیتوهورمونی ایجاد می‌کند (Thenappan *et al.*, 2024). در مسیر اکسین، بیان ژن‌های *OsYUCCA1*، *OsIAA1*، *OsAUX1* و *OsYUCCA3* افزایش یافت که این تغییرات به بهبود تقسیم سلولی، طول شدن سلول‌ها و توسعه سیستم ریشه‌ای منجر می‌شود. در مسیر جبریلین، ژن‌های *OsGA20ox-1* و *OsGID1* فعال شدند که در تحریک رشد طولی ساقه و تنظیم فرایندهای نمو اندام‌ها نقش کلیدی دارند. همچنین، در مسیر سیتوکینین، بیان ژن‌های *OsIPT3* و *OsIPT5* افزایش یافت که این امر با بهبود تقسیم سلولی و ارتقای رشد شاخساره‌ها مرتبط است. این تغییرات بیان ژنی، نه تنها بر رشد رویشی اثر می‌گذارند، بلکه از طریق تنظیم توازن هورمونی و هماهنگی رشد اندام‌های هوایی و زیرزمینی، می‌توانند بر عملکرد نهایی دانه، زیست‌توده و توان سازگاری گیاه در برابر تنش‌های محیطی تأثیرگذار باشند. به این ترتیب، استرپتومایسس با ایجاد تغییرات پایدار در بیان ژن‌های کلیدی، پلی میان سطح مولکولی و عملکرد فیزیولوژیکی گیاه برقرار کرده و نقش مهمی در بهینه‌سازی رشد و توسعه برنج ایفا می‌کند (Thenappan *et al.*, 2024).

اثر استرپتومایسس بر رشد و عملکرد، تحمل به تنش‌های زیستی و غیرزیستی در غلات چهارکربنه اثرات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی تلقیح باکتری استرپتومایسس روی عملکرد گیاه ذرت در تحمل به تنش‌های محیطی

مطالعات نشان داد که تلقیح با باکتری استرپتومایسس می‌تواند مسیرهای متابولیکی و ترشح ترکیبات در ریشه ذرت را تغییر دهد. همچنین تیمار بذور با این باکتری‌ها منجر به تغییر در غلظت قندهای کاهنده، اسیدهای آمینه، پروتئین‌ها و ترکیبات فنولی در ترشحات ریشه گردید. این ترکیبات نقش کلیدی در تغذیه گیاه، برهم‌کنش‌های

Na^+ / K^+ و بهبود جذب عناصر حیاتی مانند P و Fe نمود یافته است (Gopalakrishnan *et al.*, 2014; Yadav *et al.*, 2023). این مکانیسم‌ها در مجموع موجب افزایش رشد، عملکرد زیستی و مقاومت سورگوم در برابر طیف وسیعی از تنش‌های محیطی می‌شوند.

تأثیر رقم گیاهی و تنش‌های غیرزیستی در فعالیت استرپتومایسس‌های محرک رشد در گندم

در مطالعات متعدد نقش استرپتومایسس‌ها بر رشد و عملکرد گیاه گندم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیقات نشان داد که تلقیح برخی سویه‌های خاص روی بذر گندم می‌تواند نقش مثبتی در رشد برخی ارقام داشته اما در ارقام دیگر تأثیر معنی‌داری نشان داده نشده است (Akbari *et al.*, 2016). در واقع سویه‌های استرپتومایسس به صورت انتخابی با ارقام مختلف گندم عمل می‌کنند. همچنین شرایط محیطی می‌تواند بر واکنش گیاه و باکتری و اثرات مثبت آن در تحمل گیاه نسبت به تنش نقش مؤثری داشته باشد. سویه‌های استرپتومایسس متحمل به شوری نشان داده‌اند که می‌توانند در شرایط تنش شوری نقش مؤثرتری بر گیاه داشته باشند (Shan *et al.*, 2025; Akbari *et al.*, 2020). تأثیر رقم و محیط نقش بسیار مهمی در انتخاب سویه‌های باکتری برای تهیه کودهای زیستی در سطح تجاری دارد. بررسی‌ها در استفاده از کود زیستی ریزوتک پلاس^{۳۵} حاوی میکروارگانیسم‌های محرک رشد از جنس‌های گلموس^{۳۶}، سودوموناس، باسیلوس و استرپتومایسس در رشد و عملکرد ارقام مختلف گوجه فرنگی در شرایط نرمال و تنش خشکی نشان داد تلقیح با کود زیستی ریزوتک پلاس موجب افزایش عملکرد در سه رقم در شرایط نرمال و تنش خشکی شده است، اما در یک رقم هیچ تفاوتی در عملکرد در شرایط نرمال و خشکی در زمان استفاده کود مشاهده نشده است که این تفاوت به دلیل نقش انتخابی باکتری‌ها روی رقم گیاهی

اثرات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی تلقیح باکتری استرپتومایسس روی عملکرد گیاه سورگوم در تحمل به تنش‌های محیطی

در مطالعات محدودی، نقش باکتری‌های استرپتومایسس به عنوان محرک رشد و افزایش‌دهنده مقاومت سورگوم به خوبی مستند شده است. یکی از مکانیسم‌های حیاتی، تولید هورمون‌های گیاهی مانند اکسین و جیبرلین است که سبب افزایش طول و حجم ریشه و جذب بهتر آب و مواد غذایی می‌شود. جدایه‌های استرپتومایسس جدا شده از خاک ریزو سفری سورگوم توانستند جذب فسفر، آهن و نیتروژن را از طریق حل‌کنندگی فسفات، تولید سیدروفور و تثبیت نیتروژن بهبود دهند، که در نهایت منجر به افزایش وزن خشک، تولید کلروفیل و عملکرد بلال سورگوم شد. این مطالعه نشان می‌دهد که فعالیت ضدقارچی استرپتومایسس نیز با مهار عوامل بیماری‌زا مانند فوزاریوم توانست سلامت و رشد گیاه را ارتقا دهد (Gopalakrishnan *et al.*, 2013). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که گونه‌هایی مانند *Streptomyces rochei* و *Streptomyces mutabilis* می‌توانند تولید کلروفیل، کارایی فتوسنتزی و تجمع اسمولیت‌هایی مانند پرولین را در سورگوم افزایش دهند (Guo *et al.*, 2022). در سطح مولکولی، تلقیح با استرپتومایسس موجب تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با تحمل تنش مانند ژن‌های مسئول سنتز پروتئین‌های شوک حرارتی^{۳۱} (HSPs)، آکوپورین‌ها، و مسیرهای سیگنالینگ هورمونی (خصوصاً آبسزیک و جاسمونیک اسید) می‌شود. افزایش بیان ژن‌های آنتی‌اکسیدانی (مانند گلوکاتایون پراکسیداز^{۳۴}، آسکوربات پراکسیداز^{۳۵}، سوپراکسید دسموتاز^{۳۲}) و ژن‌های دخیل در تنظیم اسمزی نیز در سورگوم تحت تنش شوری و خشکی گزارش شده است. افزون بر این، استرپتومایسس با تولید سیدروفورها و حل‌کنندگی فسفات، دسترسی ریزمغذی‌ها را افزایش داده و تعادل یونی گیاه را در شرایط تنش بهبود می‌دهد، که این امر از طریق کاهش نسبت

³⁴Superoxide dismutase

³⁵Rizotech plus

³⁶*Glumus* spp.

³¹Heat shock proteins

³²Glutathione reductase

³³Ascorbate peroxidase

است. درک مکانیسم فیزیولوژیکی و ژنتیکی تأثیر ارقام مختلف بر باکتری محرک رشد در شرایط نرمال و تنش محیطی، پیش‌نیازی برای برنامه‌های اصلاحی گندم است. تأثیر رقم می‌تواند به دلیل تغییرات متابولیکی باشد که در ریشه پس از استقرار باکتری در سطح ریشه و یا با نفوذ در داخل ریشه رخ می‌دهد (Boubekri et al., 2021). نتایج استفاده از دو سویه استرپتومایسیس متحمل به شوری در چهار رقم گندم ایرانی نشان داد که یک سویه می‌تواند موجب افزایش رشد در هر چهار رقم در شرایط تنش شوری باشد ولی سویه دیگر روی ارقام به صورت انتخابی عمل کرده و روی رقم دیگر تأثیر معنی‌داری روی رشد در شرایط تنش شوری ندارد. بررسی میزان سدیم، پتاسیم و نسبت آن‌ها نشان داد که رقم زرین تلقیح شده با سویه C-2012 با افزایش محتوای نسبی آب در شرایط تنش شوری موجب کاهش جذب سدیم و در نهایت افزایش وزن تر گیاه شده است، درحالی‌که در شرایط نرمال هیچ افزایشی در وزن تر گیاه تیمار شده با سویه مذکور حاصل نشده است (Akbari et al., 2020).

تأثیر تنش‌های غیرزیستی بر فعالیت میکروارگانیزم‌های محرک رشد در برنج

شوری و خشکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی هستند که به شدت بر رشد و بهره‌وری گیاهان زراعی اثر می‌گذارند و توسعه فناوری‌های زیست‌سازگار را برای افزایش تحمل به این تنش‌ها را ضروری می‌سازند. در این راستا، نقش چهار سویه استرپتومایسیس در کاهش اثرات منفی تنش و بهبود رشد برنج رقم سوارنا مورد بررسی قرار گرفت. گیاهان تلقیح شده با کنسر سیوم‌های مختلف استرپتومایسیس تحت شرایط شوری (۴۰ میلی‌مولار NaCl) و خشکی (۵۵ درصد ظرفیت زراعی خاک) قرار گرفتند. نتایج نشان داد که اعمال تنش به‌طور منفی بر شاخص‌های فیزیولوژیک گیاه اثر گذاشت و سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز گردید. با این حال، تلقیح

گیاهان با کنسر سیوم‌های استرپتومایسیس، رشد گیاه را ارتقا داده و اثرات منفی شوری و خشکی را نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. در میان تیمارها، کنسر سیوم چهار سویه (ABCD) بیشترین بهبود را نشان داد و پس از آن کنسر سیوم سه‌سویه (ABD) قرار گرفت. این تیمارها به‌طور معنی‌داری موجب افزایش طول ساقه، طول ریشه، کلروفیل کل و محتوای پروتئین شدند و همزمان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش بهبود یافت. افزایش تحمل گیاه برنج در حضور استرپتومایسیس از طریق ارتقای ظرفیت فتوسنتزی، تحریک سامانه دفاعی آنتی‌اکسیدانی، افزایش محتوای پروتئین و کاهش تجمع مالون‌دی‌آلدهید^{۳۷} تحقق یافت. اهمیت کنسر سیوم‌های چندسویه در این مطالعه آشکار شد، به‌طوری‌که تیمار شامل هر چهار سویه نسبت به ترکیبات دیگر اثرات بهتری در رشد و تحمل گیاه نشان داد (Nivedita et al., 2024). این نتایج اهمیت ترکیب‌های میکروبی خاص در بی‌شینه‌سازی رشد و پتانسیل عملکرد برنج را برجسته می‌سازد. این اثرات به‌واسطه تحریک فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، سنتز ترکیبات زیست‌فعال، افزایش جذب مواد غذایی و فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی گیاه حاصل شدند. علاوه بر این، ژنوتیپ گیاه می‌تواند از طریق تنظیم ترشح متابولیت‌ها بر انتخاب و کلنی‌زایی اندوفیت‌ها در ریزوسفر مؤثر باشد. برای مثال، تغییرات ژنتیکی در ژن تحمل به شوری در گیاهچه^{۳۸} نشان داده است که می‌تواند ساختار جوامع باکتریایی در ریزوسفر برنج تحت تنش شوری را تغییر دهد و در نهایت موجب افزایش تحمل به شوری شود. این یافته‌ها اهمیت مدیریت میکروبیوتای خاک و اندوفیت‌ها را به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای بهبود رشد و سازگاری برنج در شرایط تنش برجسته می‌سازد (Lian et al., 2020).

باعث افزایش رشد ریشه و برگ ذرت و کاهش اثرات منفی شوری شدند. کلنیزاسیون ریشه توسط این باکتری‌ها در گیاهان تحت تنش شوری تأیید گردید (Nozari *et al.*, 2021). ارزیابی‌های بعدی همین محقق نشان داد تحمل باکتری‌ها به شوری در غلظت‌های تا ۹۰۰ میلی‌مولار NaCl بررسی شد و رشد سلولی، زنده‌مانی و تولید متابولیت‌های ثانویه تحلیل شد. یافته‌ها نشان داد سویه‌های CLV97 و CLV179 متحمل به شوری بوده و توانایی حفظ ویژگی‌های PGPR در مواجهه با شوری متوسط و شدید را دارند و می‌توانند متابولیسم پاسخ گیاه را تعدیل کرده و رشد ذرت را در شرایط تنش بهبود بخشند (Nozari *et al.*, 2022).

تأثیر تنش‌های غیرزیستی بر فعالیت میکروارگانیزم‌های محرک رشد در سورگوم

باکتری‌های استرپتومایسس در سورگوم نیز با تولید متابولیت‌های محرک رشد از جمله اکسین‌ها، جیبرلین‌ها، و ترکیبات ACC دامیناز باعث کاهش تجمع اتیلن تنشی و افزایش رشد ریشه می‌شوند، که در نتیجه جذب آب و عناصر غذایی تحت تنش‌هایی مانند شوری و خشکی بهبود می‌یابد. در پاسخ به تنش، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند SOD، CAT و POD نیز در حضور استرپتومایسس به خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) کمک می‌کند. از منظر مقاومت به تنش، باکتری‌های استرپتومایسس تولید آنزیم ACC دامیناز را افزایش داده و در نتیجه از تولید بیش از حد اتیلن تولید شده تحت تنش جلوگیری می‌کنند. این فرایند به‌ویژه تحت شرایط تنش خشکی و شوری باعث پایداری فیزیولوژیکی گیاه می‌شود. مطالعات نشان داد که تلقیح سورگوم با *Streptomyces mutabilis* سطح فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها (SOD، CAT و POD) و میزان اسمولیت‌های محافظ مانند پرولین را افزایش می‌دهد که نقش مهمی در کاهش آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش دارد (Guo *et al.*, 2022).

تأثیر تنش‌های غیرزیستی بر فعالیت میکروارگانیزم‌های محرک رشد در ذرت

استفاده از باکتری‌های محرک رشد روی بذور ذرت نشان داد که تلقیح تأثیر معنی‌داری روی درصد جوانه‌زنی ندارد ولی می‌تواند موجب افزایش رشد ریشه، افزایش ۲۵ درصدی کارایی فتوسنتزی، افزایش ۲۰ درصدی میزان کلروفیل در مراحل گیاهچه‌ای شود. تنش شوری یکی از مهم‌ترین عوامل غیرزیستی محدودکننده عملکرد محصولات کشاورزی است که می‌تواند رشد و بهره‌وری ذرت را به شدت کاهش دهد. با این حال، استفاده از باکتری‌های ریزو سفری محرک رشد گیاه مانند گونه‌های استرپتومایسس می‌تواند اثرات منفی شوری را کاهش دهد و عملکرد گیاه را بهبود بخشد (Nozari *et al.*, 2022). در یک پژوهش، جدایه‌هایی از استرپتومایسس به‌عنوان باکتری‌های محرک رشد شناسایی شدند و نقش آن‌ها در افزایش رشد و تحمل به شوری در ذرت ارزیابی شد. ویژگی‌های مهم این جدایه‌ها شامل تولید ترکیبات ایندولیک (IC^۴)، سیدروفورها، آنزیم ACC دامیناز، فنیازین‌ها و توانایی ارتقای رشد گیاه بودند. تحمل به شوری از طریق کشت جدا به‌ها در غلظت‌های افزایشی NaCl (0-300 میلی‌مولار) سنجیده شد و چهار جدایه با ویژگی‌های PGPR و تحمل به شوری برای ارزیابی اثرات آن‌ها بر گیاه انتخاب شدند. تمام جدایه‌ها توانایی تولید IC و سیدروفور را داشتند، در حالی که CLV178 بهترین تولیدکننده این ترکیبات بود. آنزیم ACC دامیناز در شش جدایه شناسایی شد و فنیازین‌ها تنها در CLV186 و CLV194 یافت شدند و در جدایه CLV179، تولید سیدروفور و حل‌کنندگی فسفات تحت شوری القا شد. تمامی جدایه‌ها به جز CLV188 توانستند تا ۳۰۰ میلی‌مولار NaCl رشد کنند و بنابراین متحمل به شوری بودند. افزایش غلظت ترکیبات ایندولیک نیز در اکثر جدایه‌ها تحت شوری مشاهده شد. نتایج نشان داد جدا به‌های CLV97 و CLV179 به‌طور معنی‌داری

شدند و حضور ویژگی‌های محرک رشد گیاه و اثرات بالقوه آن‌ها پس از تلقیح روی گیاهان برنج به‌عنوان یک تحلیل بوم شناختی بررسی شد. دو ایزوله (A20 و ۵/۱) رشد سویه‌های بیماری‌زای *B. glumae* و همچنین طیف وسیعی از گونه‌های باکتریایی و قارچی را مهار کردند، درحالی‌که سویه سوم (۷/۱) تنها فعالیت ضدقارچی نشان داد. آزمایش‌های *in vitro* نشان داد که این سویه‌ها قادر به تولید سیدروفور، اسید ایندول استیک (IAA)، آنزیم‌های خارج سلولی و حل‌کننده فسفات هستند (Suárez-Moreno *et al.*, 2019). آزمایش‌های گلخانه‌ای با دو رقم برنج نشان داد که *Streptomyces A20* توانایی کلنی‌سازی ریشه و افزایش رشد گیاه را در هر دو رقم داراست. برای بررسی دقیق‌تر پرگنه سازی، موتانت نشان‌دار با *egfp* تولید شد و نتایج نشان داد که *Streptomyces A20-GFP* به‌طور قوی با تارهای ریشه مرتبط است، که این ارتباط می‌تواند با افزایش رشد گیاه در آزمایش‌های با کشت‌های استریل کنترل شده^{۴۴} مرتبط باشد (Thenappan *et al.*, 2024). برای شناسایی ترکیبات ضد میکروبی تولیدشده توسط سویه A20، آنالیز طیف سنجی جرمی انجام شد. نتایج نشان داد که A20 چندین ترکیب ضد میکروبی با اندازه کمتر از ۳ کیلوالتون تولید می‌کند و سه مورد از این مولکول‌ها به‌عنوان استرپتوتریسین‌های E، D و F شناسایی شدند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که *Streptomyces A20* پتانسیل بالایی به‌عنوان تلقیح‌کننده زیستی برای حفاظت از گیاهان برنج در برابر بیماری‌های باکتریایی دارد (Thenappan *et al.*, 2024).

تأثیر محرک‌های رشد استرپتومایسیس در پرایمینگ بذر ذرت به منظور افزایش تحمل به تنش‌های زیستی

یکی از مهم‌ترین تنش‌های زیستی تهدیدکننده دانه‌های ذرت، آلودگی به میکوتوکسین‌ها طی دوره انبارداری است. حضور قارچ‌های آفلاتوکسین‌زا نظیر *Aspergillus*

تأثیر محرک‌های رشد استرپتومایسیس در پرایمینگ بذر گندم به منظور افزایش تحمل به تنش‌های زیستی

استرپتومایسیس‌ها گزینه‌های امیدوارکننده‌ای برای کنترل زیستی بیماری‌ها به‌ویژه بیماری فوزاریوم سنبله‌اکثر گندم هستند. مطالعات انجام‌شده درباره استفاده از استرپتومایسیس به‌عنوان عوامل کنترل زیستی نشان داده است که تیمار بذر با مایع اسپورهای *Streptomyces sp. DEF39* پیش از کاشت موجب افزایش تحمل به بیماری قارچی *Fusarium graminearum* تا ۴۹ درصد می‌شود. مطالعات با ردیابی سویه *Streptomyces sp. DEF39* در اندام‌های گیاهی با استفاده از پرایمرهای ویژه نشان داد که استرپتومایسیس به‌عنوان اندوفیت عمل کرده و با کلونیزه کردن بافت‌های گیاه تا سنبله و همچنین ریشه‌ها قادر است به‌طور جزئی گیاه گندم را در برابر بیماری FHB محافظت کند (Tian *et al.*, 2024). فوزاریوم با تولید سم DON موجب توقف رشد و خسارت به گندم می‌شود ولی تلقیح با سویه یاد شده موجب ممانعت از تولید سم می‌شود هر چند رشد قارچ کاملاً متوقف نمی‌شود. این فرایند از طریق تولید متابولیت‌هایی در باکتری رخ می‌دهد که موجب می‌شود تا قدرت دفاعی گیاه در برابر قارچ بیشتر شود (Mattei *et al.*, 2022).

تأثیر محرک‌های رشد استرپتومایسیس در پرایمینگ بذر برنج به منظور افزایش تحمل به تنش‌های زیستی

بیماری باکتریایی سوختگی خوشه^{۴۳} که توسط *Burkholderia glumae* ایجاد می‌شود، یکی از مهم‌ترین بیماری‌های برنج است و در سال‌های اخیر تولید این محصول را در سراسر جهان به شدت تحت تأثیر قرار داده است. در مطالعه‌ای، سه جدایه از جنس استرپتومایسیس به‌عنوان عوامل کنترل زیستی علیه *B. glumae* ارزیابی

مقایسه تأثیر باکتری‌های محرک رشد در غلات سه کربنه با غلات چهار کربنه

بر اساس داده‌های موجود، باکتری استرپتومایسس می‌تواند از طریق مکانیسم‌های مشابهی باعث بهبود رشد گیاهان شود و این مکانیسم‌ها وابسته به نوع فتوسنتز (C3 یا C4) نیستند. این باکتری‌ها با تولید فیتوهورمون‌هایی مانند اکسین، به رشد گیاه کمک می‌کنند. همچنین، با افزایش دسترس گیاه به مواد مغذی از طریق حل کردن فسفات و تولید سیدروفورها برای جذب آهن، سلامت گیاه را بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، استرپتومایسس با تولید آنتی‌بیوتیک‌ها و سایر ترکیبات ضد میکروبی، به کنترل عوامل بیماری‌زا کمک می‌کند و در نتیجه، مقاومت گیاه را افزایش می‌دهد. در نهایت، این باکتری‌ها با بهبود تحمل گیاه به تنش‌های محیطی مانند خشکی و شوری، به رشد بهتر آن در شرایط نامساعد یاری می‌رسانند. در واقع بر اساس داده‌های علمی موجود، نمی‌توان نتیجه‌گیری مستقیمی مبنی بر تفاوت در پاسخ گیاهان C3 (برنج و گندم) و C4 (ذرت و سورگوم) به باکتری استرپتومایسس به‌عنوان محرک رشد استنباط کرد. اگرچه در شرایط تغییر اقلیم مثل خشکی، جمعیت باکتری‌های استرپتومایسس در ریشه گیاهان C4 بیشتر از گیاهان C3 است و همین موجب می‌شود تا به تحمل این گیاهان نسبت به تنش خشکی کمک بیشتری کند. بر اساس داده‌های موجود فرضیه‌ای مطرح کرد که در گیاهان سه کربنه باکتری‌های محرک رشد می‌توانند نقش مؤثرتری در افزایش فتوسنتز، رشد ریشه، جذب عناصر، تحمل به تنش‌های شوری و خشکی از طریق القای سیستم دفاعی و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان داشته باشند در حالی که در گیاهان چهار کربنه اثرات بیشتر روی افزایش رشد ریشه، تثبیت عناصر و پایداری تنش دیده می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

باکتری‌های محرک رشد استرپتومایسس می‌توانند به صورت مستقیم یا غیر مستقیم با تلقیح روی بذور غلات استراتژیک گندم، برنج و ذرت موجب تحریک رشد در هر دو دوره رویشی و زایشی گیاه شده و با تولید ماده خشک

A. flavus و *parasiticus* می‌تواند سلامت و قدرت جوانه‌زنی بذور را به شدت کاهش دهد. در این راستا، استفاده از *Streptomyces philanthi RL-1-178* به‌صورت فیلتراسیون کشت خشک‌شده (DCF RL-1-178) به‌عنوان یک عامل پرایمینگ و پوشش‌دهنده بذر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که DCF RL-1-178 در شرایط *in vitro* قادر به مهار رشد *A. parasiticus* تا ۸۹ درصد و *A. flavus* تا ۹۵ درصد بود. فرمولاسیون پوشش‌بذر ذرت با ۱۰ تا ۱۵ درصد DCF RL-1-178 (v/v) همراه با پلیمر PVP-K90 در شرایط انبارداری به مدت ۵ ماه، رشد قارچ‌های تولیدکننده آفلاتوکسین را بیش از ۵۴ درصد کاهش داد و به‌طور کامل از تولید آفلاتوکسین B1 جلوگیری نمود (Boukaew *et al.*, 2023). نتایج بیانگر نقش پرایمینگ زیستی در ایجاد یک لایه محافظ در اطراف بذر است که می‌تواند آن را در برابر آلودگی‌های قارچی و تنش‌های محیطی مرتبط با نگهداری مقاوم سازد. علاوه بر این، بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان داد که پوشش‌بذر حاوی DCF RL-1-178 مانع نفوذ و رشد هیف‌های قارچی بر سطح دانه می‌شود. این ویژگی به‌عنوان یک مکانیسم ضد قارچی می‌تواند شرایط ایمن‌تری برای حفظ قوه نامیه و جلوگیری از خسارت‌های کیفی ایجاد کند. با این حال مطالعات سمیت سلولی نشان داد که غلظت‌های بالای ۱۵ درصد یا $1000 \mu\text{g/mL}$ از سویه DCF RL-1-178 اثرات سمیت سلولی قابل توجهی بر سلول‌های حیوانی کشت شده دارد. این یافته حاکی از آن است که اگرچه استفاده از استرپتومایسس به‌عنوان نیروی مقاومتی در بذر ذرت برای کاشت، نویدبخش است، اما کاربرد آن در نگهداری دانه‌های ذرت به‌عنوان خوراک دام نیازمند بررسی‌های ایمنی بیشتری است. پرایمینگ بذور ذرت با استرپتومایسس علاوه بر تقویت رشد و تعدیل مکانیسم‌های بیوشیمیایی، می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار مؤثر برای افزایش پایداری بذر در شرایط انبارداری و کاهش تنش‌های غیرزیستی ناشی از آلودگی قارچی مورد استفاده قرار گیرد (Kapadia *et al.*, 2022).

راهبرد جامع می‌تواند سلامت غلات را ارتقا داده و تحمل آن در برابر تنش‌های غیرزیستی را افزایش دهد. کاربرد کودها و سموم زیستی استرپتومایسیس هم‌سو با اصول کشاورزی پایدار است؛ زیرا وابستگی به نهاده‌های شیمیایی را کاهش داده و رویکردی بوم‌شناختی‌تر برای حفاظت محصول فراهم می‌آورد. در آینده، توسعه این نهاده‌ها می‌تواند چشم‌انداز روشنی برای تولید محصولاتی مقاوم‌تر و پربازده‌تر در شرایط تغییرات اقلیمی فراهم کند. علاوه بر این، بررسی تعاملات مولکولی بین استرپتومایسیس در دو گروه غلات مورد مطالعه، همراه با مطالعات امیکسی، می‌تواند بینش‌های دقیق‌تری درباره مکانیسم‌های مولکولی اثرات سودمند آن‌ها ارائه دهد و بهینه‌سازی کاربرد آن‌ها را در جهت افزایش پایداری عملکرد محصولات تحت تنش امکان‌پذیر سازد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

References

- Akbari, A. R., Gharanjik, S., Koobaz, P., Karimi, E., & Sadeghi, A. (2016). Evaluation of Mutual Effect of Ectoine(s) producing *Streptomyces* and wheat at salt conditions. *Crop Biotechnology*, 5(3), 57-68.
- Akbari, A., Gharanjik, S., Koobaz, P., & Sadeghi, A. (2020). Plant growth promoting *Streptomyces* strains are selectively interacting with the wheat cultivars especially in saline conditions. *Heliyon*, 6(2), e03445. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.01952>
- Bhat, M.A., Kumar, V., Bhat, M.A., Wani, I.A., Dar, F.L., Farooq, I., Bhatti, F., Koser, R., Rahman, S., & Jan, A.T. (2020). Mechanistic insights of the interaction of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) with plant roots toward enhancing plant productivity by alleviating salinity stress. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01952>
- Boubekri, K., Soumare, A., Mardad, I., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Kouisni, L. (2021). The Screening of Potassium- and Phosphate-Solubilizing Actinobacteria and the Assessment of Their Ability to Promote Wheat Growth Parameters. *Microorganisms, Microbial Biotechnology* 9, 470.1-16. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030470>
- Boukaew, S., Mahasawat, P., Petlamul, W., Sattayasamitsathit, S., Surinkaew, S., Chuprom, J., Prasertsan, P. (2023). Application of antifungal metabolites from *Streptomyces philanthi* RL-1-178 for maize grain coating formulations and their efficacy as biofungicide during storage. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 39, 157 <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03604-5>.
- Cao, S., Yang, F., Zhang, H., Wang, Q., Xu, G., Zhu, B., & Wu, C. (2023). Physiological and Transcriptome Profiling Analyses Reveal Important Roles of *Streptomyces rochei* D74 in Improving Drought Tolerance of *Puccinellia distans* (Jacq.) Parl. *Environmental and Experimental Botany*, 207, 105204. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105204>
- Chen, J., Qiao, M., Yang, Y., Gao, Z., Yang, Z., & Lin, W. (2023). Exogenous *Streptomyces* spp. Benefit Naked Oat Growth under Dry Farming Conditions by Modifying Rhizosphere Bacterial Communities. *Applied soil ecology* 189, 104946. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104946>

- Deng, Z., Yang, W., Lin, T., Wang, Y., Hua, X., Jiang, X., Chen, J., Pan, J., *et al.* (2025). Multidimensional insights into the biodiversity of *Streptomyces* in soils of China: A pilot study. *Microbiology Spectrum*, 13(2), e01692-24. <https://doi.org/10.1128/spectrum.01692-24>
- Dos Santos, R.M., Diaz, P.A.E., Lobo, L.L.B., & Rigobelo, E.C. (2020) Use of plant growth-promoting rhizobacteria in maize and sugarcane: Characteristics and applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 136. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00136>.
- Figueiredo, M. V. B., Seldin, L., de Araujo, F. F., & Mariano, R. L. R. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: Fundamentals and applications. In D. K. Maheshwari (Ed.), *Plant growth and health promoting bacteria (Microbiology Monographs)*, 18, 21-43. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-13612-2_2.
- Guo, D.-J., Li, D.-P., Singh, R.K., Singh, P., Verma, K.K., Sharma, A., Qin, Y., Khan, Q., Song, X.-P., Malviya, M.K., (2022). Comparative transcriptome analysis of two sugarcane varieties in response to diazotrophic plant growth promoting endophyte *Enterobacter rogenkampii* ED5. *Journal of Plant Interaction*, 17, 75-84.
- Goswami, M., & Deka, S. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria—Alleviators of abiotic stresses in soil: A review. *Pedosphere*, 30, 40-61. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(19\)60839-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(19)60839-8).
- Gopalakrishnan, S., Srinivas, V., Sree Vidya, & Rathore, M. (2013). Plant growth-promoting activities of *Streptomyces spp.* in sorghum and rice. *Springerplus*. 29 (2), 574. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-574>.
- Hada, A., Kumari, C., Phani, V., Singh, D., Chinnusamy, V., & Rao, U. (2020). Host-induced silencing of FMRFamide-like peptide genes, flp-1 and flp-12, in rice impairs reproductive fitness of the root-knot nematode *Meloidogyne graminicola*. *Frontiers Plant Science*, 11, 894. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00894>
- Harikrishnan, H., Shanmugaiah, V., & Balasubramanian, N. (2014). Optimization for production of indole acetic acid (IAA) by plant growth-promoting *Streptomyces sp.* VSMGT1014 isolated from rice rhizosphere. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3, 158-171.
- Harikrishnan, H., Shanmugaiah, V., Balasubramanian, N., Sharma, M.P., & Kotchoni, S.O. (2014). Antagonistic potential of native strain *Streptomyces aurantiogriseus* VSMGT1014 against Sheath Blight of rice disease. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30, 3149-3161. <https://doi.org/10.1007/s11274-014-1742-9>
- Harir, M., Bendif, H., Bellahcene, M., Fortas, Z., & Pogni, R. (2018). *Streptomyces* secondary metabolites. In A. Méndez-Vilas. *Basic biology and applications of actinobacteria*. Springer. London. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79890>
- Jog, R., Nareshkumar, G., & Rajkumar, S. (2016). Enhancing soil health and plant growth promotion by actinomycetes. In S. Gopalakrishnan, A. Sathya, & R. Vijayabharathi, *Plant growth promoting actinobacteria* (pp. 33–45). Springer. London. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0707-1_3.
- Kapadia, C., Patel, N., Rana, A., Valdya, H., Alfarraj, S., Ansari M.J., Gafur, A., Poczai, P. & Sayyed, R.Z. (2022). Evaluation of plant growth-promoting and salinity ameliorating potential of halophilic bacteria isolated from saline soil. *Frontiers in plant science*, 13, 946217.
- Khadayat, K., Sherpa, D.D., Malla, K.P., Shrestha, S., Rana, N., & Marasini, B.P. (2020). Molecular identification and antimicrobial potential of *Streptomyces* species from Nepalese soil. *International Journal of Microbiology*, 2020,8817467. <https://doi.org/10.1155/2020/8817467>.
- Khan, N., Bano, A., Ali, S., & Babar, M.A. (2020) Crosstalk amongst phytohormones from planta and PGPR under biotic and abiotic stresses. *Plant Growth Regulation*, 90: 189–203. <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00571-x>.
- Khan, N., Ali, S., Tariq, H., Latif, S., Yasmin, H., Mehmood, A., & Shahid, M.A. (2020). Water conservation and plant survival strategies of rhizobacteria under drought stress. *Agronomy*, 10, 1683. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111683>
- Khoso, M.A., Wagan, S., Alam, I., Hussain, A., Ali, Q., Saha, S., Poudel, T.R., Manghwar, H., & Liu, F. (2024). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: current perspective. *Plant Stress*. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100341>
- Kumari, P., Meena, M., Gupta, P., Dubey, M.K., Nath, G., Upadhyay, R.S. (2018). Plant growth promoting rhizobacteria and their biopriming for growth promotion in mung bean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek). *Biocatalysis. Agricultural. Biotechnology*, 16, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.07.030>
- Kumari, P., Meena, M., Upadhyay, R.S. (2018). Characterization of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) isolated from the

- rhizosphere of *Vigna radiata* (mung bean). *Biocatalysis. Agricultural. Biotechnology*, 16, 155-162.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.07.029>.
- Lee, N., Hwang, S., Kim, J., Cho, S., Palsson, B., & Cho, B.-K. (2020). Genome mining approaches for the identification of secondary metabolite biosynthetic gene clusters in *Streptomyces*. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 18, 1548-1556.
<https://doi.org/10.1016/j.csbj.2020.06.024>.
- Lian, T., Huang, Y., Xie, X., Huo, X., Shahid, M.Q., Tianm L., Lan, T., & Jin, J. (2020). Rice SST Variation Shapes the Rhizosphere Bacterial Community, Conferring Tolerance to Salt Stress through Regulating Soil Metabolites. *mSystems*.
<https://doi.org/10.1128/msystems.00721-20>
- Liu, H., Li, J., & Singh, B.K. (2024) Harnessing Co-Evolutionary Interactions Between Plants and *Streptomyces* to Combat Drought Stress. *nature plants*, 10, 1159-1171.
<https://doi.org/10.1038/s41477-024-01749-1>
- Lu, L., Liu, N., Fan, Z., Liu, M., Zhang, X., Tian, J., Yu, Y., Lin, H., Huang, Y., & Kong, Z. (2024). A Novel PGPR Strain, *Streptomyces lasalocidi* JCM 3373(T), Alleviates Salt Stress and Shapes Root Architecture in Soybean by Secreting Indole-3-Carboxaldehyde. *plant cell & environment*, 47, 1941-1956.
<https://doi.org/10.1111/pce.14847>
- Martínez-Viveros, O., Jorquera, M. A., Crowley, D. E., Gajardo, G., & Mora, M. L. (2010). Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 293-319.
- Meena, M., Dubey, M. K., Swapnil, P., Zehra, A., Singh, S., Kumari, P., & Upadhyay, R. S. (2017). The rhizosphere microbial community and methods of its analysis. In H. B. Singh, B. K. Sarma, & C. Keswani (Eds.), *Advances in PGPR research* (pp. 275–295). *CABI*.
<https://doi.org/10.1079/9781786390325.0275>
- Mendes, R., Garbeva, P., & Raaijmakers, J.M. (2013). The rhizosphere microbiome: Significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiology, Reviews*, 37, 634-663.
<http://dx.doi.org/10.1111/1574-6976.12028>.
- Nazir, N., Kamili, A. N., & Shah, D. (2018). Mechanism of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in enhancing plant growth—A review. *International Journal of Management, Technology and Engineering*, 8, 709-721.
- Neto, W.P., Guterres, J.B., & da Luz, L.A. (2025). Co-inoculation with *Streptomyces* isolates promotes plant growth and modulates root exudation in maize. *Theoretical and Experimental Plant*, 37, 24.
<https://doi.org/10.1007/s40626-025-00366-3>
- Nivedita, S., Behera, S. S., Behera, P. K., Parwez, Z., Giri, S., Behera, H. T., & Ray, L. (2024). Salt-resistant *Streptomyces* consortia promote growth of rice (*Oryza sativa* var. Swarna) alleviating salinity and drought stress tolerance by enhancing photosynthesis, antioxidant function, and proline content. *Microbiological Research*, 274, 100124.
<https://doi.org/10.1016/j.micr.2024.100124>
- Nozari, R. M., Ramos, L. M., da Luz, L. A., Almeida, R. N., Lucas, A. M., Cassel, E., de Oliveira, S. D., Astarita, L. V., & Santarém, E. R. (2022). Halotolerant *Streptomyces* spp. Induce salt tolerance In maize through systemic induction of the antioxidant system and accumulation of proline. *Rhizosphere*, 24, 100623. [10.1016/j.rhisph.2022.100623](https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100623).
- Nozari, R., Ortolan, F., Astarita, L. V., & Santarém, E. R. (2021). *Streptomyces* spp. enhance vegetative growth of maize plants under saline stress. *Brazilian Journal of Microbiology*, 52(3), 1-13.
<https://doi.org/10.1007/s42770-021-00480-9>.
- Ojuederie, O., Olanrewaju, O., & Babalola, O. (2019). Plant Growth Promoting Rhizobacterial Mitigation of Drought Stress in Crop Plants: Implications for Sustainable Agriculture. *Agronomy*, 9, 712.
<https://doi.org/10.3390/agronomy9110712>.
- Raaijmakers, J.M., Paulitz, T.C., Steinberg, C., Alabouvette, C., & Moëgne-Loccoz, Y. (2009) The rhizosphere: A playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. *Plant Soil*, 321, 341-361.
- Saikia, K., & Bora, L.C. (2021). Exploring actinomycetes and endophytes of rice ecosystem for induction of disease resistance against bacterial blight of rice. *European journal of plant pathology*.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10658-020-02141-3>
- Shan, H., Wen, H., Zhang, J., Wang, Y., Lu, L., Liu, Y., Yang, B., & Ji, W. (2025). Synergistic role of *Streptomyces* composite inoculants in mitigating wheat drought stress under field conditions. *Plants*, 14(3), 366-375.
<https://doi.org/10.3390/plants14030366>
- Subrahmanyam, G., Kumar, A., Sandilya, S. P., Chutia, M., & Yadav, A. N. (2020). Diversity, plant growth promoting attributes, and agricultural applications of rhizospheric microbes. In A. Varma, R. Prasad, & N. Tuteja

- (Eds.), *Plant microbiomes for sustainable agriculture* (pp. 1–52). Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-38453-1_1
- Shepherdson, E.M.F., Baglio, C.R., & Elliot, M.A. (2023). Streptomyces Behavior and Competition in the Natural Environment. *Current Opinion in Microbiology*, 71, 102257. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2022.102257>
- Suárez-Moreno, Z. R., Vinchira-Villarraga, D. M., Vergara-Morales, D. I., Castellanos, L., Ramos, F. A., Guarnaccia, C., Degrassi, G., Venturi, V., & Moreno-Sarmiento, N. (2019). Plant-Growth Promotion and Biocontrol Properties of Three Streptomyces spp. Isolates to Control Bacterial Rice Pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 10, 290. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00290>
- Thenappan, D. P., Pandey, R., Hada, A., Kumar Jaiswal, D., Chinnusamy, V., Bhattacharya R. & Annapurna K. (2024). Physiological basis of plant growth promotion in rice by rhizosphere and endosphere associated Streptomyces isolates from India. *Rice*, 17, 60. <https://doi.org/10.1186/s12284-024-00732-w>
- Tian, X., Hu, L., Jia, R., Cao, S., Sun, Y., Dong, X., & Wang, Y. (2024). Streptomyces pratensis S10 Promotes Wheat Plant Growth and Induces Resistance in Wheat Seedlings against *Fusarium graminearum*. *Journal of Fungi*, 10(8), 578-584. <http://doi.org/10.3390/jof10080578>
- Yadav, M., Vashisht, B. B., Jalota, S. K., Kumar, A., & Kumar, D. (2022). Sustainable Water Management Practices for Intensified Agriculture, in Soil-Water, Agriculture, and Climate Change (Springer International Publishing), 131-161. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12059-6_8
- Upadhyay, P., Agrawal, N., Kumar Yadav, P., & Patel, R. (2020). The Evolutionary Path from C3 to C4 Photosynthesis: A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(1), 748-762. <https://doi.org/https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.901.082>