Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Biology

https://sbj.areeo.ac.ir/

Research Article

Enhancing maize growth and nutrient uptake through foliar application of phyllosphere-derived plant growth-promoting bacteria under field conditions

Vahid Allah Jahandideh Mahjenabadi[1*], Hadi Asadi Rahmani[2], Mahdieh Shamshiripour[3], and Kazem Khavazi[2]

1- Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. vahid.jahandideh67@gmail.com

2- Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. asadi_1999@yahoo.com, khavazik@yahoo.com

3- Researcher, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. mshamshiripour@yahoo.com

Article Info

Received: 2025-09-03

Accepted: 2026-02-02

Keywords:
Plant growth-promoting bacteria,
Phyllosphere,
Foliar application,
Zea mays,
Nutrient uptake

Corresponding author's email:
vahid.jahandideh67@gmail.com

DOI:
10.22092/SBJ.2026.370545.285

Extended Abstract

Background and Objectives: The phyllosphere microbiome represents an extraordinary ecological niche that harbors diverse microbial communities with immense potential for agricultural applications. As a unique aerial habitat, the phyllosphere supports bacterial populations that have evolved sophisticated mechanisms for plant growth promotion and stress mitigation. While rhizosphere bacteria have been extensively exploited in agricultural practices, the systematic utilization of phyllosphere-derived plant growth-promoting bacteria (PGPB) as foliar bioinoculants remains comparatively under-investigated, particularly under real-field conditions. This knowledge gap assumes critical importance given the increasing global demands for sustainable agricultural intensification and food security. The current investigation was designed to address this research vacuum through a comprehensive evaluation of three meticulously selected phyllosphere-originating bacterial strains *Enterobacter hormaechei* (AC. MN099393), *Stenotrophomonas maltophilia* (AC. MN099392), and *Microbacterium arborescens* (AC. MN099379) for their efficacy in enhancing maize (*Zea mays* L.) productivity, nutrient acquisition efficiency, and overall nutritional quality through foliar application. The study specifically aimed to elucidate the effects of these bacterial inoculants on shoot dry and fresh weight, nutrient uptake, while establishing correlations between observed phenotypic improvements and the documented plant growth-promoting attributes of the selected bacterial strains.

Materials and Methods: A rigorously designed field experiment was implemented during the 2020-2021 growing season at the Soil and Water Research Institute in Karaj, Iran, utilizing a randomized complete block design with three replications to ensure statistical robustness. The experimental matrix comprised four distinct treatments: (1) Absolute control (non-inoculated); (2) *E. hormaechei* inoculation; (3) *S. maltophilia* inoculation; and (4) *M. arborescens* inoculation. Soil characteristics were thoroughly analyzed before experiment establishment, revealing a loam texture with specific chemical properties. For the cultivation of maize, the seed variety 704 was used. The area of each plot was 30 m², **comprising** 4 ridges with a distance of 75 centimeters and a length of 10 m. Bacterial

suspensions were prepared to achieve optimal concentration (10^9 CFU mL^{-1}) and applied at the critical V3 phenological stage (4-6 leaf stage) during evening hours to maximize phyllosphere colonization efficiency and minimize UV-induced bacterial mortality. The application method involved careful dilution protocols and uniform spraying using sterilized equipment to ensure consistent coverage. Comprehensive assessments included detailed analysis of shoot dry and fresh weight and precise quantification of macronutrient (N, P, K) and micronutrient (Fe, Zn, Cu, Mn) concentrations through standard protocols. Statistical analyses of the data were performed using the SAS software. Mean comparisons were conducted using Fisher's Least Significant Difference (LSD) test at the 5% probability level.

Results: The foliar application of phyllosphere bacteria significantly influenced maize growth parameters. Shoot dry weight was markedly increased by both bacterial treatments (*S. maltophilia* and *E. hormaechei*) compared to the non-inoculated control (14289 kg ha^{-1}). Application of *S. maltophilia* resulted in a shoot dry weight of 15859 kg ha^{-1}, representing a significant increase of 11.0%. Similarly, *E. hormaechei* treatment yielded a dry weight of 15813 kg ha^{-1}, an increase of 10.7%. Nutritional analysis revealed significant biofortification effects, particularly for *E. hormaechei*. This treatment increased nitrogen concentration by 26.66% (1.33% versus control 1.05%), iron content by 37.3% (53.4 mg kg^{-1} versus 38.9 mg kg^{-1}), and manganese concentration by 39% (35.3 mg kg^{-1} versus 25.4 mg kg^{-1}). The *S. maltophilia* treatment also significantly enhanced nitrogen and iron concentrations by 19.02% and 33.16%, respectively. Phosphorus, potassium, zinc, and copper levels showed non-significant responses across treatments. *M. arborescens* application showed limited efficacy across most measured parameters, potentially attributable to suboptimal environmental adaptation mechanisms or reduced phyllosphere colonization capacity.

Conclusion: This research provides compelling evidence that targeted foliar application of specific phyllosphere-derived PGPB strains, particularly *E. hormaechei* and *S. maltophilia*, constitutes an innovative and highly effective strategy for enhancing maize productivity and nutritional quality under field conditions. The demonstrated improvements are mechanistically linked to the bacteria's multifunctional plant growth-promoting attributes, including enhanced nitrogen fixation capacity, sophisticated phytohormone modulation, and efficient siderophore-mediated iron sequestration. The significant enhancement of nutrient concentrations represents a major advancement toward sustainable nutrient management practices. These findings establish a robust scientific foundation for developing next-generation foliar bioinoculant technologies that can significantly reduce dependence on chemical fertilizers while simultaneously addressing global food security and nutritional challenges. The study opens new avenues for sustainable agricultural innovation through strategic manipulation of phyllosphere microbiomes and provides crucial insights for optimizing application protocols, strain selection criteria, and integration with existing agricultural practices. Future research should focus on elucidating molecular mechanisms underlying plant-bacteria interactions in the phyllosphere and developing commercial formulations for large-scale agricultural implementation.

Cite this article: Jahandideh Mahjenabadi, V.A, Asadi Rahmani, H., Shamshiripour, M., Khavazi, K., 2026. Enhancing maize growth and nutrient uptake through foliar application of phyllosphere-derived plant growth-promoting bacteria under field conditions. *Journal of Soil Biology*, 13 (2),213- 228.

DOI: 10.22092/SBJ.2026.370545.285
Publisher: Soil Science Society of Iran

دو فصلنامه

نشریه زیست‌شناسی خاک

https://sbj.areeo.ac.ir/

مقاله پژوهشی

بهبود رشد و جذب عناصر غذایی ذرت با محلول‌پاشی باکتری‌های محرک رشد فیلوسفر در شرایط مزرعه

وحید اله جهاندیده مهجن آبادی[۱*]، هادی اسدی رحمانی[۲]، مهدیه شمشیری پور[۳] و کاظم خاوازی[۲]

۱- استادیار موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. vahid.jahandideh67@gmail.com

۲- استاد موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. asadi_1999@yahoo.com، khavazik@yahoo.com

۲- پژوهشگر موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. mshamshiripour@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۴/۶/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳

چکیده

فیلوسفر گیاهان، زیستگاه مجموعه‌ای متنوع از ریزجانداران مفید از جمله باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPB) است که پتانسیل قابل‌توجهی برای بهبود رشد و عملکرد گیاهان دارند. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر محلول‌پاشی برگی باکتری‌های بومی جداسازی‌شده از فیلوسفر ذرت بر عملکرد و جذب عناصر غذایی این گیاه در شرایط مزرعه‌ای انجام شد. آزمایش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل محلول‌پاشی برگی با سه گونه باکتری *Enterobacter hormaechei* (AC. MN099393)، *Stenotrophomonas maltophilia* (AC. MN099392) و *Microbacterium arborescens* (AC. MN099379) و همچنین یک تیمار شاهد (بدون باکتری) بود. نتایج نشان داد که کاربرد باکتری‌های *E. hormaechei* و *S. maltophilia* به‌طور معنی‌داری وزن خشک اندام هوایی ذرت را به‌ترتیب ۱۰/۷ و ۱۱ درصد در مقایسه با شاهد افزایش دادند. بیشترین افزایش در غلظت نیتروژن (۲۶/۶۶درصد) مربوط به تیمار *E. hormaechei* بود. همچنین، این دو باکتری منجر به افزایش معنی‌دار غلظت آهن اندام هوایی (به ترتیب ۳۷/۳درصد و ۳۳/۲درصد) شدند. همچنین باکتری *E. hormaechei* منجر به افزایش معنی‌دار غلظت منگنز اندام هوایی (۳۹درصد) شد. با این حال، تأثیر تیمارها بر وزن تر اندام هوایی و غلظت فسفر، پتاسیم، روی و مس معنی‌دار نبود. یافته‌ها مؤید این است که محلول‌پاشی برگی با باکتری‌های محرک رشد فیلوسفر، به‌ویژه سویه‌های *E. hormaechei* و *S. maltophilia*، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار زیست‌محیطی و مؤثر در جهت بهبود عملکرد و ارتقای وضعیت تغذیه‌ای گیاه ذرت در سیستم‌های کشاورزی پایدار مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: باکتری‌های محرک رشد گیاه، فیلوسفر، کاربرد برگی، عملکرد ذرت، جذب عناصر غذایی.

استناد: جهاندیده مهجن آبادی، و.، اسدی رحمانی، ه.، شمشیری‌پور، م.، خاوازی، ک.، ۱۴۰۴. بهبود رشد و جذب عناصر غذایی ذرت با محلول‌پاشی باکتری‌های محرک رشد فیلوسفر در شرایط مزرعه. مقاله پژوهشی، *نشریه زیست‌شناسی خاک*، (۲)۱۳ ، ۲۲۸-۲۱۳.

مقدمه

ذرت با نام علمی *Zea mays* L. یکی از مهمترین محصولات غذایی جهان است که به همراه برنج و گندم، حداقل ۳۰ درصد از کالری مواد غذایی را برای بیش از ۴/۵ میلیارد نفر در ۹۴ کشور در حال توسعه تأمین می‌کند. این افراد شامل ۹۰۰ میلیون مصرف‌کننده فقیر هستند که ذرت جزء اصلی مواد غذایی آنها است. کمبود تولید ذرت و افزایش قیمت واردات آن وضعیت معیشت و امنیت غذایی میلیون‌ها فقیر را در کشورهای در حال توسعه تهدید می‌کند. به موازات افزایش قیمت سایر محصولات راهبردی به‌ویژه گندم، قیمت ذرت نیز از سال ۲۰۰۸ تاکنون به‌میزان چشمگیری افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود که به دلیل افزایش تقاضا و محدودیت-های گسترش کشت آن این روند افزایشی شدت بیشتری یابد. اما اقدامات جدی برای افزایش تولید ذرت در سطح جهانی می‌تواند موجب کاهش روند افزایش قیمت این محصول گردد (Shiferaw et al. 2011).

اگرچه گسترش سطح زیر کشت راهکاری سریع برای افزایش تولید است، این روش اغلب به تخریب اراضی و پیامدهای زیست‌محیطی منجر می‌شود. چالش اصلی امروز، دستیابی به رشد پایدار در تولید مواد غذایی بدون تهدید سلامت عمومی، کیفیت محیط‌زیست و پایداری سیستم‌های کشاورزی است. در این راستا، فیلوسفر (سطح برگ گیاهان) به‌عنوان زیستگاه طیف وسیعی از ریزجانداران مفید مانند باکتری‌ها، پتانسیل بالایی برای توسعه کودهای زیستی دارد. استفاده از این ریزجانداران در ترکیب با روش‌های سنتی تغذیه گیاهی، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، مزایای زیستم‌حیطی چشمگیری دارد. متأسفانه تحقیقات در زمینه نقش ریزجانداران فیلوسفر در بهبود عملکرد محصولات کشاورزی محدود بوده و بیشتر مطالعات بر شناسایی عوامل بیماریزا و مقاومت گیاهی متمرکز شده‌اند (Jackson et al., 2015). همکاری بین ریزجانداران فیلوسفر و گیاه میزبان، رویدادهای متابولیکی کلیدی را تنظیم می‌کند که رشد و توسعه گیاه را تسریع می‌نماید. به‌عنوان مثال، جوامع میکروبی فیلوسفر با تولید هورمون‌های گیاهی مانند سیتوکینین و اکسین، تقسیم سلولی و طویل‌شدگی سلول‌ها را تحریک می‌کنند یا پیش‌سازهای بیوسنتز این هورمون‌ها را فراهم می‌سازند (Dourado et al., 2015).

در سالیان اخیر از ریزجانداران مفید فیلوسفری به‌عنوان کودهای زیستی، برای افزایش عملکرد ارقام مختلف برنج استفاده شده است (Madhaiyan et al. 2004; Senthilkumar et al. 2009). به دلیل اثرات مفید اکثر گونه‌های *Methylobacterium* در فیلوسفر بر رشد و عملکرد گیاهان مختلف، توجه زیادی به این باکتری شده است. Tani و همکاران (۲۰۱۵)، با بررسی اثر *Methylobacterium* جداسازی شده از فیلوسفر گیاهان مختلف در افزایش رشد گیاهان برنج و جو در شرایط آزمایشگاه و مزرعه به این نتیجه رسیدند که تلقیح این باکتری‌ها منجر به افزایش عملکرد این گیاه شد. Esitken و همکاران (۲۰۱۰) اثر باکتری‌های فیلوسفری را به صورت‌های مایه تلقیح ریشه و برگ‌پاشی بر گیاه توت-فرنگی مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که تلقیح ریشه با باکتری *Bacillus* M3 و برگ‌پاشی باکتری‌های *Pseudomonas* BA-8 و یا *Bacillus* OSU-142 موجب افزایش رشد، عملکرد و مقدار عناصر فسفر، آهن، مس و روی در گیاه توت‌فرنگی شد. همچنین، اثر تیمارهای تلقیح باکتری‌های مورد مطالعه شامل M3 + BA-8، M3، BA-8 + OSU-142، M3 + OSU-142 و BA-8 موجب افزایش عملکرد به‌ترتیب به میزان ۳۳/۲درصد، ۱۸/۴درصد، ۱۸/۲درصد، ۱۵/۳درصد و ۱۰/۵درصد گردید. تعداد میوه در بوته به طور معنی‌داری با کاربرد M3 + BA-8 (۹۱/۷۳) و M3 (۸۱/۵۸) در مقایسه با شاهد (۶۸/۶۶) افزایش یافت. برگ‌پاشی گل و برگ گیاهان زردآلو، گیلاس شیرین و سیب با باکتری‌های *Bacillus* OSU-142 و *Bacillus* OSU-142 + BA-8 *Pseudomonas* موجب افزایش رشد و عملکرد در این گیاهان شد (Pirlak et al., 2007; Aslantaş et al.

2007). Giri و Pati (۲۰۰۴) با برگ‌پاشی باکتری‌های جنس *Corynebacterium* و *Flavobacterium* بر روی برگ‌های گیاه ذرت افزایش ۳۷-۳۰ درصد محصول را که معادل با به‌کارگیری کودهای شیمیایی نیتروژنی بود را گزارش کردند. کاربرد برگی *Azospirillum brasilense* منجر به بهبود رشد و عملکرد ذرت (Cardozo et al., 2021)و افزایش جذب نیتروژن در گیاه علفی *Megathyrsus maximus* شده است (Freitas et al., 2023). به طور مشخص، Devarajan و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که کاربرد برگی باکتری‌های جداسازی شده از فیلوسفر برنج، تحمل به تنش خشکی را در گیاه برنج از طریق سازوکارهای مختلف فیزیولوژیک القا می‌کند.

فیلوسفر به عنوان یک زیستگاه هوایی، محیطی ناهمگن و پویا است که باکتری‌های ساکن در آن در معرض چالش‌های شدید غیرزیستی از جمله نوسانات رطوبتی، تشعشعات فرابنفش، تغییرات دما و محدودیت دسترسی به عناصر غذایی قرار دارند. این باکتری‌ها برای بقا و استقرار موفق در چنین شرایط دینامیکی، سازوکارهای سازگاری متعددی را تکامل داده‌اند. تولید اگزوپلی‌ساکاریدهای محافظ و تشکیل زیست‌لایه[1] از جمله این راهبردها برای مقابله با خشکی و پرتوهای مضر است. همچنین، توانایی برخی گونه‌ها در تغییر شرایط موضعی (مانند کاهش pH) یا افزایش نشت مواد غذایی از برگ میزبان، به بهبود بقای آن‌ها کمک می‌کند. علاوه بر این، تولید ترکیبات ضد میکروبی و رقابت برای فضا و منابع، از دیگر راهبردهای کلیدی برای غلبه بر رقابت درون و بین‌گونه‌ای و نیز مقابله با عوامل بیماری‌زا در این محیط پیچیده به شمار می‌رود. درک این سازوکارهای بقا برای انتخاب و به‌کارگیری موفقیت‌آمیز باکتری‌های محرک رشد در فرمولاسیون‌های برگی دارای اهمیت بنیادی است (Lindow and Brandl, 2003; Vorholt, 2012).

مطالعه گذشته ما با کاربرد ۱۰ باکتری محرک رشد نشان داد که این باکتری‌ها منجر به افزایش رشد و وضعیت تغذیه‌ای ذرت در شرایط گلخانه می‌شوند (Jahandideh Mahjenabadi et al. 2020). اگرچه این مطالعه مقدماتی پتانسیل این جدایه‌های باکتریایی را در شرایط کنترل‌شده گلخانه نشان داد، شواهد میدانی از کاربرد موفق باکتری‌های خاص فیلوسفر همچنان محدود است. برای مثال، مطالعه مزرعه‌ای اخیر توسط Yen و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که محلول‌پاشی برگی با باکتری *Rhodopseudomonas palustris* به طور معنی‌داری رشد و عملکرد برنج را در شرایط مزرعه افزایش می‌دهد. این یافته به طور قوی از امکان سودمندی کاربرد برگی باکتری‌های تخصص‌یافته در محیط‌های کشاورزی واقعی حمایت می‌کند. اما بررسی کارایی سویه‌های بومی جداسازی‌شده از فیلوسفر ذرت در شرایط واقعی و پیچیده مزرعه، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، نوآوری پژوهش حاضر در بررسی کارایی این باکتری‌ها هنگام کاربرد به صورت محلول‌پاشی برگی در شرایط مزرعه است، که گامی ضروری و کاربردی برای توسعه نهاده‌های زیستی بر پایه ریزجانداران بومی به شمار می‌آید. این پژوهش با هدف پر کردن این خلأ دانشی و بررسی تأثیر برگ‌پاشی باکتری‌های فیلوسفر ذرت بر عملکرد و غلظت عناصر غذایی در شرایط مزرعه طراحی شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد باکتری‌های محرک رشد فیلوسفر گیاه ذرت از طریق محلولپاشی در مزرعه و تأثیر آن در افزایش عملکرد محصول ذرت آزمایشی با ۴ تیمار، در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۰ در موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج به‌صورت زیر انجام شد:

تیمار اول: شاهد بدون اسپری برگی باکتری (Control)

تیمار دوم: اسپری برگی باکتری *Enterobacter hormaechei*

[1] - Biofilm

تیمار سوم: اسپری برگی باکتری *Stenotrophomonas maltophilia*
تیمار چهارم: اسپری برگی باکتری *Microbacterium arborescens*
در مجموع با توجه به سه تکرار برای هر تیمار، آزمایش شامل ۱۲ کرت بود. در این آزمایش سعی شد تا زمان کاشت، کود زیستی حاوی باکتری‌ها مورد نظر در شرایط مناسب نگهداری شود (دمای ۴ تا ۱۵ درجه سانتی گراد).

سه جدایه باکتریایی (*Enterobacter hormaechei*, *Stenotrophomonas maltophilia* و *Microbacterium arborescens*) که در یک مطالعه مقدماتی (Jahandideh Mahjenabadi et al., 2020) از فیلوسفر ذرت جداسازی و به دلیل برخورداری از قوی‌ترین و متنوع‌ترین ویژگی‌های محرک رشد گیاه (جدول ۱) انتخاب شده بودند، در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱- ویژگی‌های محرک رشدی گیاه باکتری‌ها (Jahandideh Mahjenabadi et al., 2020).

Table 1. Plant growth promoting traits of bacteria (Jahandideh Mahjenabadi et al., 2020).

Siderophore	Exopolysaccharide ($g\ l^{-1}$)	Dissolution of organic phosphate ($g\ l^{-1}$)	Indole-3-acetic acid ($\mu g\ ml^{-1}$)	Nitrogenase ($nM\ ml^{-1}\ h^{-1}$)	Accession number	Bacterial species	Strains
-	0.495	37.27	18.70	7.44	MN099379	*M. arborescens*	KHO47
+	0.460	38.77	31.56	10.17	MN099392	*S. maltophilia*	QAZ26
-	0.120	75.05	30.00	70.31	MN099393	*E. hormaechei*	THE15

-: پاسخ منفی، +: پاسخ مثبت و ++: پاسخ مثبت قوی.

-: negative response, +: positive response and ++: strong positive response.

تهیه مایه تلقیح باکتری‌ها

باکتری‌ها در محیط کشت MC (۵ گرم شکر، ۱ گرم Peptone، ۰/۵ گرم Yeast extract، ۰/۲۵ گرم KH_2PO_4، ۰/۲۵ گرم Nacl و ۰/۱ گرم $MgSO_4.7H_2O$ در لیتر با pH ۷) اتوکلاو شده کشت داده شد و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۸ درجه سلسیوس در یک انکوباتور قرار داده شدند. جمعیت باکتری در مایه تلقیح‌ها برابر 10^9 $CFU\ ml^{-1}$ بودند (Shamshiripour et al., 2023).

عملیات کاشت، داشت و برداشت

قبل از شروع آزمایش از خاک مزرعه مورد آزمایش، شش کیلوگرم نمونه خاک مرکب تهیه شده و پس از هواخشک کردن و عبور از الک دو میلی‌متری به کیسه‌های پلاستیکی منتقل و برچسب مربوطه نصب گردید. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک از جمله مقادیر OC (Walkley and Black, 1934)، EC، TNV، P، K (Page et al., 1982)، pH (Thomas, 1996) و بافت خاک (Gee and Bauder, 1986) اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش.

Table 2. Results of physical and chemical analysis of soil at the experimental site.

Texture	Fe	Zn	Cu	Mn	K	P	N	OC	T.N.V	pH	EC
	mg kg^{-1}						درصد٪				dS m^{-1}
Loam	4.36	3.68	2.08	19.2	400	24.6	0.09	0.89	10.9	7.75	0.91

با توجه به نتایج آنالیز خاک و در نظر گرفتن حداکثر پتانسیل تولید ذرت علوفه‌ای در منطقه، میزان کودهای مورد نظر بر اساس کتاب «راهنمای مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه ذرت» تعیین شد (Gheibi et al., 2014). منابع کودی شامل اوره با توجه به آنالیز خاک بود. اوره در پنج نوبت، یک هشتم زمان سومین آب آبیاری، دو هشتم در مرحله ۶ برگی، دو هشتم در مرحله ۱۰ برگی، دو هشتم در مرحله قبل از ظهور گل‌های نر و یک هشتم در مرحله تشکیل دانه مصرف شد. غلظت مناسب فسفر قابل‌دسترس و پتاسیم محلول احتمالاً به دلیل سابقه کوددهی در خاک مزرعه تحقیقاتی بود. بنابراین کود حاوی فسفر و پتاسیم استفاده نشد.

برای کشت گیاه ذرت بذر مصرفی رقم ۷۰۴ در نظر گرفته شد. مساحت هر کرت ۳۰ مترمربع شامل ۴ پشته به فاصله ۷۵ سانتیمتر و طول ۱۰ متر بود. فاصله بوته‌ها از هم نیز ۱۲ سانتیمتر بود. فاصله بین دو کرت ۳ متر بود. بنابراین در هر کرت حدود ۳۳۰ بوته در نظر گرفته شد. در مرحله V3 (۴ تا ۶ برگی) اسپری برگی برای هر تیمار به‌صورت زیر انجام شد: اسپری برگی بعدازظهر و هنگام غروب آفتاب انجام شد. مقدار نیم لیتر از هرکدام از مایه تلقیح‌ها (با جمعیت 10^9 CFU mL^{-1}) در ۲۰ لیتر آب ریخته شده و به خوبی بهم زده شد (تقریباً ۴۰ برابر رقیق سازی). در ادامه به سه قسمت مساوی تقسیم شده (تقریباً معادل ۷ لیتر) و با استفاده از یک سم‌پاش ضدعفونی شده به خوبی در قسمت‌های مختلف گیاه ذرت (برگ‌ها و ساقه‌ها) اسپری شد (برای هر تکرار یک تیمار تقریباً حدود ۷ لیتر استفاده شد).

در زمان برداشت (ابتدای مرحله خمیری شدن دانه) با حذف یک متر از ابتدا و انتهای پشته‌های دوم و سوم، ۸ متر بعدی آن برداشت شد. نمونه کف بر گردیده و وزن تر اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد آون قرار داده شده و سپس وزن خشک اندام هوایی آنها تعیین شد. غلظت نیتروژن با روش کجلدال، فسفر با روش طیف‌سنجی نورمرئی- فرابنفش و پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (AOAC, 2005).

تجزیه‌وتحلیل‌های آماری

تجزیه‌وتحلیل‌های آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها بر مبنای آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج

نتایج نشان داد که کاربرد اسپری برگی باکتری‌ها تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی ذرت در سطح احتمال ۱ درصد داشت، اگرچه فاقد تأثیر معنی‌دار بر وزن تر اندام هوایی بود (جدول ۳)؛ بطوریکه هیچ کدام از تیمارهای باکتریایی منجر به افزایش وزن تر اندام هوایی نشده و به همراه شاهد در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۴). با این وجود باکتری‌های *E. hormaechei* و *S. maltophilia* منجر به افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی ذرت شدند (شکل ۱). بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی متعلق به تیمار باکتریایی *S. maltophilia* (۱۵۸۵۹ کیلوگرم در هکتار) بود که افزایش ۱۱ درصدی را نسبت به تیمار شاهد نشان داد.

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر کاربرد اسپری برگی باکتری‌ها بر وزن تر و خشک اندام هوایی و غلظت عناصر غذایی اندام هوایی ذرت.

Table 3. Analysis of variance of the effect of bacterial foliar application on shoot fresh and dry weight and nutrients concentration of maize shoot.

Mean Squares										
Manganese	Copper	Iron	Zinc	Potassium	Phosphorus	Nitrogen	Shoot dry weight	Shoot fresh weight	Degrees of Freedom	Source of Variation
74.5*	0.962^{ns}	146*	77.8^{ns}	0.005^{ns}	0.005^{ns}	0.042*	1640536*	746302^{ns}	3	Bacteria
11.2	0.818	20.2	18.4	0.022	0.002	0.005	208691	5510098	6	Error
11.7	11.8	9.6	15.7	34.4	18.1	6.26	2.99	3.63	Coefficient of Variation	

* و ** به ترتیب نشان دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ^{ns} نشان دهنده عدم معنی‌دار می‌باشند.

*, ** and ns indicate significance at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and non-significance, respectively.

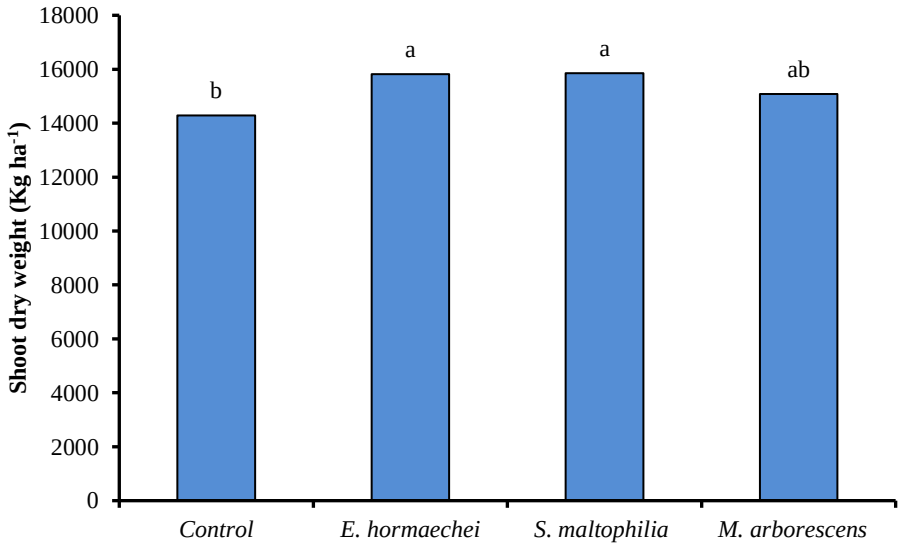
جدول ۴- مقایسه میانگین تأثیر کاربرد اسپری برگی باکتری‌ها بر وزن تر اندام هوایی و غلظت عناصر غذایی اندام هوایی ذرت.

Table 4. Comparison of means for the effect of bacterial foliar application on shoot fresh weight and nutrients concentration in maize shoot.

Zinc	Iron	Copper	Manganese	Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Shoot fresh weight	Treatments
mg kg^{-1}				درصد٪			Kg ha^{-1}	
25.4 b	7.53 a	38.9 c	31.3 a	0.339 a	0.323 a	1.05 c	65433 a	Control
35.3 a	8.50 a	53.4 a	31.9 a	0.322 a	0.344 a	1.33 a	64517 a	*E. hormaechei*
24.3 b	7.27 a	51.8 ab	23.4 ab	0.247 a	0.282 a	1.25 ab	64392 a	*S. maltophilia*
29.4 ab	7.37 a	42.9 bc	22.3 b	0.334 a	0.248 a	1.17 bc	64417 a	*M. arborescens*

میانگین‌هایی با حروف یکسان در یک ستون تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means within a column followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level.



شکل ۱- تأثیر کاربرد اسپری برگی باکتری‌های محرک رشد گیاه بر وزن خشک اندام هوایی.

Figure 1. Effect of foliar application of plant growth-promoting bacteria on shoot dry weight.

نتایج نشان داد که تأثیر اسپری برگی باکتری‌ها بر غلظت نیتروژن در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین میزان غلظت نیتروژن در اندام هوایی در تیمار اسپری برگی باکتری *E. hormaechei* مشاهده

شد (۲۶/۶۶ درصد افزایش نسبت به شاهد). همچنین اسپری برگی باکتری *S. maltophilia* نیز منجر به افزایش معنی‌دار غلظت نیتروژن در اندام هوایی شد، اما وزن خشک شاخساره در گیاهان تیماره شده با باکتری *M. arborescens* اختلاف معنی‌داری را نسبت به شاهد نشان نداد (جدول ۴).

همچنین اسپری برگی باکتری‌ها تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن و منگنز اندام هوایی ذرت در سطح احتمال ۵ درصد داشت (جدول ۳). گیاهان اسپری برگی شده با باکتری‌های *E. hormaechei* و *S. maltophilia* غلظت آهن اندام هوایی ذرت را به ترتیب به میزان ۳۷/۳ و ۳۳/۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. با این وجود اختلاف غلظت آهن در گیاهان اسپری شده با باکتری *M. arborescens* و تیمار شاهد معنی‌دار نبود (جدول ۴). تیمار باکتری *E. hormaechei* از بیشترین مقدار غلظت منگنز در اندام هوایی برخوردار بود و نسبت به تیمار شاهد افزایش ۳۹ درصدی را نشان داد. این در حالی است که باکتری‌های *S. maltophilia* و *M. arborescens* تأثیر معنی‌داری بر غلظت این عنصر نداشتند و با تیمار شاهد در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۴).

نتایج حاکی از آن است که تأثیر اسپری برگی باکتری‌ها بر غلظت فسفر، پتاسیم، مس و روی اندام هوایی ذرت معنی‌دار نبود (جدول ۳). با این وجود گیاهان اسپری شده با باکتری *E. hormaechei* از بیشترین مقدار غلظت عناصر غذایی فسفر، مس و روی در اندام هوایی برخوردار بودند (جدول ۴).

بحث

در این مطالعه دو باکتری *E. hormaechei* و *S. maltophilia* بیشترین تأثیر را در افزایش وزن خشک اندام هوایی ذرت داشتند. سایر محققان نیز نشان دادند که محلول‌پاشی گل و برگ گیاهان زردآلو، گیلاس شیرین و سیب با باکتری‌های *Bacillus* OSU-142 و *Bacillus Pseudomonas* BA-8 + OSU-142 موجب افزایش رشد و عملکرد این گیاهان شد (Pirlak et al., 2007; Aslantaş et al., 2007).

یافته‌های حاضر مبنی بر افزایش معنی‌دار وزن خشک و جذب عناصر توسط *S. maltophilia* با نتایج سایر پژوهش‌ها که به توانایی‌های چندگانه این باکتری اشاره دارند، همسو است. به‌عنوان مثال، یک مطالعه جامع بر روی سویه *S. maltophilia* جداسازی شده از ریزوسفر گندم، وجود مجموعه‌ای از ژن‌های درگیر در ارتقای رشد گیاه، جذب مواد مغذی و فعالیت ضد میکروبی را در ژنوم این باکتری تأیید کرده است. این ویژگی‌های ژنتیکی، همراه با شواهد فیزیولوژیکی، *S. maltophilia* را به‌عنوان یک کاندیدای امیدوارکننده برای کاربرد در کشاورزی پایدار برجسته می‌کند (Sharma et al., 2024).

یک یافته قابل تأمل، افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی بدون تغییر متناظر در وزن تر، می‌تواند نشان‌دهنده یک تغییر فیزیولوژیک مطلوب ناشی از کاربرد باکتری‌ها باشد (Vorholt, 2012). این الگو را می‌توان به بهبود کارایی مصرف آب در گیاهان تلقیح‌شده نسبت داد، به طوری که باکتری‌های فیلوسفر احتمالاً با تعدیل تعرق و بسته‌شدن روزنه‌ها، امکان تولید زیست‌توده خشک بیشتر با مصرف آب مشابه را فراهم کرده‌اند. این فرضیه با مطالعه Devarajan و همکاران (۲۰۲۱) همسو است که به طور مستقیم نشان دادند محلول‌پاشی برگی با *Bacillus megaterium* می‌تواند محتوای نسبی آب برگ را در گیاه برنج تحت تنش خشکی به طور معنی‌داری افزایش دهد.

باکتری‌های فیلوسفری از طریق تثبیت نیتروژن، تولید هورمون‌های گیاهی از قبیل ایندول-۳-استیک اسید (IAA[2])، توان حل کنندگی فسفات و تولید سیانید هیدروژن سبب افزایش رشد گیاه می‌شوند (Batool et al., 2016). نتایج باکتری‌های *S. maltophilia* و *E. hormaechei* مورد استفاده در این پژوهش از توانایی

[2] - Indole-3-acetic acid

بالایی در تولید IAA برخوردار هستند (جدول ۱) و سبب افزایش بیشتر وزن خشک اندام هوایی ذرت شده‌اند. تأثیر مثبت باکتری‌های تولید کننده IAA بر بهبود رشد گیاه به‌وسیله سایر محققان نیز گزارش شده است (Madhaiyan et al., 2005; Ryu et al., 2006; Vorholt, 2012, Fallah Nosratabad et al., 2024; Javadzadeh, et al., 2024; Khoshru et al., 2025).

اثر باکتری‌های فیلوسفری بر جذب عناصر غذایی ممکن است به‌صورت غیرمستقیم رخ دهد. بدین صورت که این باکتری‌ها می‌توانند بر متابولیسم گیاه، شامل راهبردهای جذب عناصر غذایی تأثیر بگذارند. IAA منجر به ریشه‌زایی، تقسیم سلول و توسعه سلول می‌شود و با افزایش سطح ویژه ریشه توسط افزایش تشکیل ریشه‌های جانبی و نابه‌جا (Kudoyarova et al., 2017; Gao et al., 2019) سبب افزایش جذب عناصر غذایی به‌وسیله گیاه می‌شود (Carrillo et al., 2002). این امر احتمالاً در مورد باکتری‌های *S. maltophilia* و *E. hormaechei* صادق است. فرض بر آن است که IAA شیب غلظت عناصر غذایی از ریشه به برگ‌ها را به وسیله سست کردن دیواره سلولی و متعاقباً افزایش تراوش عناصر غذایی از سلول‌های برگ افزایش می‌دهد (Lindow and Brandl, 2003;Vorholt, 2012). همچنین، این فرضیه یکی دیگر از دلایلی است که اثر IAA تولید شده به‌وسیله *E. hormaechei* و *S. maltophilia* بر جذب عناصر غذایی گیاه ذرت را صرف‌نظر از اثر آن بر ریشه تأیید می‌کند. اثر مثبت اسپری برگی باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه بر جذب عناصر غذایی فقط به‌وسیله تأثیر IAA بر افزایش رشد ریشه و ایجاد شیب غلظت عناصر غذایی قابل توجیه نیست.

نتایج تحقیقات متعدد نشان‌دهنده نقش مؤثر جامعه باکتریایی فیلوسفر در تثبیت نیتروژن است. یکی از مهم‌ترین دلایل فراوانی و توانایی باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن موجود در میکروبیوم فیلوسفر آن است که فیلوسفر به‌طور مستقیم در معرض اتمسفر قرار دارد (Knief et al., 2012; Mwajita et al., 2013; Batool et al., 2016). در بین باکتری‌های مورد مطالعه در این تحقیق *E. hormaechei* منجر به افزایش قابل‌توجه غلظت نیتروژن اندام هوایی ذرت شد. باکتری *E. hormaechei* استفاده‌شده در این پژوهش دارای توان تثبیت نیتروژن بالا توسط آنزیم نیتروژناز است (جدول ۱). این نتایج به تأثیر برگ‌پاشی باکتری‌های فیلوسفری تثبیت کننده نیتروژن در بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه اشاره دارد. سازوکار احتمالی دیگر، نقش این باکتری‌ها در تسهیل جذب نیتروژن از طریق خاک به واسطه تحریک رشد ریشه است. باکتری محرک رشد *E. hormaechei* با تولید هورمون‌هایی مانند ایندول استیک اسید (IAA)، توسعه سیستم ریشه را افزایش داده و در نتیجه سطح جذب عناصر را گسترش می‌دهند (Ranawat et al., 2021). همسو با یافته‌های حاضر، Freitas و همکاران (۲۰۲۳) مشاهده کردند که محلول‌پاشی *A. brasilense* و *P. fluorescens* بر روی علف *Megathyrsus maximus*، جذب نیتروژن را به ترتیب تا ۴۲درصد و ۲۵درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد. افزایش غلظت نیتروژن کل در گیاهان تیمار شده با *E. hormaechei* همچنین ممکن است با تحریک سنتز پروتئین در گیاه میزبان نیز مرتبط باشد. به‌عنوان مثال، Devarajan و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که اسپری برگی باکتری *B. megaterium* منجر به افزایش محتوای پروتئین در برگ‌های برنج شد.

در بین باکتری‌های مورد مطالعه، *S. maltophilia* و *E. hormaechei* منجر به افزایش قابل توجه غلظت عنصر آهن اندام هوایی ذرت شدند. باکتری *S. maltophilia* دارای توانایی تولید سیدروفور است (جدول ۱). توانایی تولید سیدروفور نیز یک راهبردهای مهم در بعضی از باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه در شرایط کمبود آهن است (Ferreira et al., 2019). نتایج حاصل از یک پژوهش بر روی گیاهان سویا و گندم نشان داد که برگ‌پاشی همزمان آهن و سیدروفور تولید شده به‌وسیله باکتری‌ها منجر به افزایش عملکرد و غلظت آهن دانه این

گیاهان شد (Sharma et al., 2019). نکته جالب توجه، افزایش چشمگیر غلظت آهن توسط *E. hormaechei* بود، با وجود اینکه این باکتری فاقد توانایی تولید سیدروفور بود. اگرچه فرضیه تأثیر غیرمستقیم IAA بر تحریک سیستم ریشه و در نتیجه جذب آهن از خاک قابل طرح است، اما این فرضیه در مطالعه حاضر به طور مستقیم آزمون نشده و توجیه کامل این مشاهده دشوار است. برای توجیه این مشاهده در شرایط کاربرد برگی، فرضیه‌های دیگری را باید در نظر گرفت: این باکتری ممکن است با ترشح ترکیبات کاهش‌دهنده pH، حلالیت آهن موجود در سطح برگ را افزایش دهد، یا با القای یک پاسخ سیستمیک در گیاه، باعث افزایش بیان ناقلین آهن در ریشه و در نتیجه جذب بیشتر این عنصر از خاک شود. همچنین تولید ترکیبات کلاته کننده دیگر به جز سیدروفور می‌تواند منجر به افزایش جذب آهن توسط گیاه شده باشد (Vorholt, 2012).

Esitken و همکاران (۲۰۱۰) اثر باکتری‌های فیلوسفری را به صورت‌های مایه تلقیح ریشه و برگ‌پاشی بر گیاه توت‌فرنگی مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که تلقیح ریشه با باکتری *Bacillus* M3 و برگ‌پاشی باکتری‌های *Pseudomonas* BA-8 و یا *Bacillus* OSU-142 موجب افزایش رشد، عملکرد و مقدار عناصر فسفر، آهن، مس و روی در گیاه توت‌فرنگی شد. همچنین، اثر تیمارهای تلقیح باکتری‌های مورد مطالعه شامل M3 + BA-8، BA-8 + OSU-142، M3، M3 + OSU-142 و BA-8 موجب افزایش عملکرد به‌ترتیب به میزان ۳۳/۲درصد، ۱۸/۴درصد، ۱۸/۲درصد، ۱۵/۳درصد و ۱۰/۵درصد گردید. تعداد میوه در بوته به طور معنی‌داری با کاربرد M3 + BA-8 (۹۱/۷۳) و M3 (۸۱/۵۸) در مقایسه با شاهد (۶۸/۶۶) افزایش یافت.

همانگونه که مشاهده شد باکتری *M. arborescens* تأثیری بر وزن تر و خشک اندام هوایی و غلظت عناصر غذایی نداشت. احتمال بر آن است که به دلیل شرایط نامساعد اقلیمی بقای باکتری‌ها بر سطح برگ کاهش یافته باشد. همگن نبودن محیط یک چالش عمده جهت تکامل باکتری‌های فیلوسفری است، از اینرو این باکتری‌ها با استفاده از سازوکارهای مختلف، خود را با تغییرات محیطی سازگار می‌نمایند (Parasuraman et al., 2019). شرایط محیطی تأثیرگذار بر تکامل باکتری‌های فیلوسفری عبارتند از: رطوبت، اشعه فرابنفش، درجه حرارت، قابلیت دسترسی به عناصر غذایی، رقابت درون و بین گونه‌ها، آفت‌کش‌ها، عوامل کنترل زیستی و حضور جمعیت‌های بیماری‌زا (Hirano and Upper, 2000; Lindow and Brandl, 2003). تغییرات ژنتیکی صورت‌گرفته در طی تکامل میکروب‌ها، اغلب منجر به سازگاری بیشتر آنها با عوامل زیستی و غیر زیستی می‌شود (Knief et al., 2012; Bokulich et al., 2014; Finkel et al., 2017; Chaudhary et al., 2017). علاوه بر آن، نوع گونه باکتری نیز نقش مهمی در توانایی آن جهت سازگاری با شرایط محیطی دارد. بدین صورت که برخی از باکتری‌های فیلوسفری قادر به تغییر موضعی محیط خود، افزایش نشت عناصر غذایی از برگ گیاه میزبان، تولید اسپور و اگزوپلی‌ساکاریدهای خارج سلولی برای مقابله با شرایط نامناسب محیطی هستند (Lindow and Brandl, 2003). تولید زیست‌لایه و ترکیبات ضد میکروبی، از دیگر سازوکارهای دفاعی باکتری‌ها در برابر تنش‌های محیطی می‌باشند. نتایج ما نشان داد که باکتری *M. arborescens* نسبت به دو باکتری دیگر علاوه بر اینکه در ویژگی‌های محرک رشد گیاه ضعیف‌تر بود از توانایی کمتری نیز در تولید اگزوپلی ساکارید برخوردار بود که از ویژگی‌های مهم برای حفظ بقای باکتری بر سطح برگ است. یکی از محدودیت‌های این مطالعه، عدم پایش جمعیت و ارزیابی کلونیزاسیون باکتری‌ها بر روی سطح برگ (فیلوسفر) پس از محلول‌پاشی است. این داده‌ها می‌توانست توجیهی قوی برای تفاوت آشکار در عملکرد بین سویه‌ها ارائه دهد. بنابراین، ارزیابی مستقیم دینامیک جمعیت باکتری‌ها بر روی فیلوسفر، یک گام ضروری برای درک سازوکار عمل و بهینه‌سازی

فرمولاسیون‌های باکتریایی در مطالعات آتی به شمار می رود.

به طور کلی، بهبود رشد و جذب عناصر غذایی مشاهده شده در این پژوهش را می‌توان به مجموعه‌ای از سازوکارهای مستقیم و غیرمستقیم نسبت داد. این سازوکارها شامل تولید محرک‌های رشد گیاهی (مانند IAA)، افزایش در دسترس بودن عناصر (از طریق تثبیت نیتروژن، تولید سیدروفور یا کاهش pH موضعی)، و به طور متقابل، القای یک وضعیت فیزیولوژیک "تقویت شده" در گیاه میزبان است. این حالت فیزیولوژیک بهبودیافته که اغلب به عنوان "القای تحمل به تنش" شناخته می‌شود، می‌تواند شامل تجمع متابولیت‌های محافظ، تنظیم هورمونی و افزایش بیان ژن‌های مرتبط با استرس باشد، همان‌طور که به وضوح برای باکتری *B. megaterium* در مطالعه Devarajan و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده شد. بنابراین، بسیار محتمل است که سویه‌های موفق ما نیز چنین پاسخ سیستمیک جامعی را در گیاه ذرت القا کرده باشند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش شواهد امیدوارکننده‌ای در مورد اثربخشی کاربرد برگی باکتری‌های محرک رشد فیلوسفر، به‌ویژه سویه‌های *E. hormaechei* و *S. maltophilia*، در بهبود عملکرد و جذب عناصر غذایی ذرت تحت شرایط مزرعه‌ای ارائه می‌نماید. یافته‌ها به وضوح تأثیر معنی‌دار باکتری‌های *E. hormaechei* و *S. maltophilia* را در افزایش معیارهای رشد و غلظت عناصر غذایی کلیدی تأیید می‌کند. بهبود مشاهده‌شده در وزن خشک اندام هوایی (تا ۲/۱۳ درصد) همراه با افزایش چشمگیر در غلظت نیتروژن (۷/۲۶ درصد)، آهن (۳/۳۷ درصد) و منگنز (۹/۳۸ درصد) نشان‌دهنده پتانسیل بالای این باکتری‌ها در ارتقای کارایی مصرف عناصر غذایی است. این اثرات مثبت را می‌توان به ویژگی‌های چندگانه محرک رشد این باکتری‌ها نسبت داد. از جنبه کاربردی، این یافته‌ها راهکارهای نویدبخشی برای توسعه نهاده‌های زیستی جدید و پایدار در جهت کاهش مصرف کودهای شیمیایی و بهبود امنیت غذایی ارائه می‌کنند. با این وجود، برای بهینه‌سازی فرمولاسیون و تعیین دقیق‌ترین زمان کاربرد، تحقیقات بیشتری مورد نیاز است. همچنین بررسی سازوکارهای مولکولی دخیل در تعامل بین میزبان و باکتری در فیلوسفر می‌تواند به درک بهتری از این سیستم پیچیده بینجامد. برای بهینه‌سازی نتایج، بررسی دفعات و زمان‌بندی‌های مختلف محلول‌پاشی (مانند کاربرد در مراحل مختلف رشدی) در مطالعات آتی نیز پیشنهاد می‌شود. در مجموع، این تحقیق گامی مهم در جهت توسعه راهکارهای پایدار کشاورزی بر اساس بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌های بومی است.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با پشتیبانی «بخش بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور» به انجام رسید. بدین‌وسیله نویسنده/نگارنده صمیمانه از کلیه همکاران و کارشناسان این بخش که در اجرای این تحقیق همکاری نمودند، قدردانی می‌نماید.

References

1. Ahmed, E., & Holmström, S. J. (2014). Siderophores in environmental research: roles and applications. *Microbial Biotechnology*, 7(3), 196-208. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12117
2. AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (2005). *Official methods of analysis*, 18th edn. AOAC-Int, Arlington.
3. Aslantaş, R., Cakmakçi, R., & Şahin, F., (2007). Effect of plant growth promoting rhizobacteria on young apple tree growth and fruit yield under orchard conditions. *Scientia Horticulturae*, 111(4), 371-377. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.016
4. Batool, F., Rehman, Y., & Hasnain. S., (2016). Phylloplane associated plant bacteria of commercially superior wheat varieties exhibit superior plant growth promoting abilities. *Frontiers in Life Science*, 9(4), 313-322. https://doi.org/10.1080/21553769.2016.1256842
5. Bokulich, N. A., Thorngate, J. H., Richardson, P. M., & Mills, D. A. (2014). Microbial biogeography of wine grapes is conditioned by cultivar, vintage, and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(1), E139-E148. https://doi.org/10.1073/pnas.1317377110
6. Cardozo, P., Di Palma, A., Martin, S., Cerliani, C., Esposito, G., Reinoso, H., & Travaglia, C. (2022). Improvement of maize yield by foliar application of *Azospirillum brasilense* Az39. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(3), 1032-1040. https://doi.org/10.1007/s00344-021-10356-9
7. Carrillo, A. E., Li, C. Y., & Bashan, Y. (2002). Increased acidification in the rhizosphere of cactus seedlings induced by *Azospirillum brasilense*. *Naturwissenschaften*, 89(9), 428-432. https://doi.org/10.1007/s00114-002-0347-6
8. Chaudhary, D., Kumar, R., Sihag, K., & Kumari, A. (2017). Phyllospheric microflora and its impact on plant growth: A review. *Agricultural Reviews*, 38 (1). https://doi.org/10.18805/ag.v0iOF.7308
9. Devarajan, A. K., Muthukrishanan, G., Truu, J., Truu, M., Ostonen, I., Kizhaeral S, S., ... & Kuttalingam Gopalasubramanian, S. (2021). The foliar application of rice phyllosphere bacteria induces drought-stress tolerance in *Oryza sativa* (L.). *Plants*, 10(2), 387. https://doi.org/10.3390/plants10020387
10. Dourado, M. N., Aparecida Camargo Neves, A., Santos, D. S., & Araújo, W. L. (2015). Biotechnological and Agronomic Potential of Endophytic Pink-Pigmented Methylotrophic *Methylobacterium* spp. *BioMed Research International*, 2015(1), 909016. https://doi.org/10.1155/2015/909016
11. Esitken, A., Yildiz, H. E., Ercisli, S., Donmez, M. F., Turan, M., & Gunes, A. (2010). Effects of plant growth promoting bacteria (PGPB) on yield, growth and nutrient contents of organically grown strawberry. *Scientia Horticulturae*, 124(1), 62-66. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.12.012
12. Fallah Nosratabad, A., & Khoshru, B. (2024). Potentials and challenges of biofertilizers in sustainable agriculture. *Soil Science Society of Iran*, 12(1), 19-63. https://doi.org/10.22092/SBJ.2024.366090.265
13. Ferreira, C. M., Vilas-Boas, Â., Sousa, C. A., Soares, H. M., & Soares, E. V. (2019). Comparison of five bacterial strains producing siderophores with ability to chelate iron under alkaline conditions. *AMB Express*, 9(1), 78. https://doi.org/10.1186/s13568-019-0796-3
14. Finkel, O. M., Castrillo, G., Paredes, S. H., González, I. S., & Dangl, J. L. (2017). Understanding and exploiting plant beneficial microbes. *Current Opinion in Plant Biology*, 38, 155-163. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.04.018
15. Freitas, G. D. S., Moreira, A., Prudencio, M. F., Heinrichs, R., Nogueira, M. A., Hungria, M., & Soares Filho, C. V. (2023). Foliar spray inoculation with plant growth promoting bacteria

associated with nitrogen doses in *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri. *Agronomy*, 13(4), 1040. https://doi.org/10.3390/agronomy13041040

16. Gao, J., Luo, Y., Wei, Y., Huang, Y., Zhang, H., He, W., Sheng, H., & An, L. (2019). Screening of plant growth promoting bacteria (PGPB) from rhizosphere and bulk soil of Caragana microphylla in different habitats and their effects on the growth of Arabidopsis seedlings. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 33(1), 921-930. https://doi.org/10.1080/13102818.2019.1629841
17. Gee, G.W., & Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. P 383-411, In: A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis, Part I.* 2d Madison, WI. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15
18. Gheibi, M.N., Tehrani, M.M., & Asadi, F. (2014). A Guide to the Integrated Management of Soil Fertility and Corn Nutrition. *Soil and Water Research Institute Publications*. 53 pp. (In Perisan)
19. Giri, S., & Pati, B., (2004). A comparative study on phyllosphere nitrogen fixation by newly isolated *Corynebacterium* sp. & *Flavobacterium* sp. and their potentialities as biofertilizer. *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica*, 51(1-2), 47-56. https://doi.org/10.1556/AMicr.51.2004.1-2.3
20. Hirano, S. S., & Upper, C. D. (2000). Bacteria in the leaf ecosystem with emphasis on *Pseudomonas syringae*—a pathogen, ice nucleus, and epiphyte. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 64 (3):624-653. https://doi.org/10.1128/MMBR.64.3.624-653.2000
21. Jackson, C., Stone, B., & Tyler, H. (2015). Emerging perspectives on the natural microbiome of fresh produce vegetables. *Agriculture*, 5(2), 170-187. https://doi.org/10.3390/agriculture5020170
22. Jahandideh Mahjen Abadi, V. A., Sepehri, M., Rahmani, H. A., Zarei, M., Ronaghi, A., Taghavi, S. M., & Shamshiripour, M. (2020). Role of dominant phyllosphere bacteria with plant growth–promoting characteristics on growth and nutrition of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 2348-2363. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00302-1
23. Javadzadeh, M., Khavazi, K., Ghanavati, N., Jafarnejadi, A. R., Jahandideh Mahjenabadi, V. A. (2024). Effect of plant growth-promoting bacteria and sulfur on growth and micronutrient concentration in wheat grain in saline-sodic soils. *Soil Science Society of Iran*, 11(2), 167-182. https://doi.org/10.22092/sbj.2024.356053.225
24. Khoshru, B., Fallah Nosratabad, A., Khosravi, H., Asgharzadeh, A., Faridian, L. (2025). nhancing agricultural productivity using PGPR and nanoparticles: mechanisms, challenges, and future directions. *Soil Science Society of Iran*, 12(2), 279-313. https://doi.org/ 10.22092/SBJ.2025.368425. 277
25. Knief, C., Delmotte, N., Chaffron, S., Stark, M., Innerebner, G., Wassmann, R., Von Mering, C., & Vorholt, J. A. (2012). Metaproteogenomic analysis of microbial communities in the phyllosphere and rhizosphere of rice. *The Isme Journal*, 6(7), 1378. https://doi.org/10.1038/ismej.2011.192
26. Kudoyarova, G. R., Vysotskaya, L. B., Arkhipova, T. N., Kuzmina, L. Y., Galimsyanova, N. F., Sidorova, L. V., Gabbasova, I. M., Melentiev, A. I., & Veselov, S. Y. (2017). Effect of auxin producing and phosphate solubilizing bacteria on mobility of soil phosphorus, growth rate, and P acquisition by wheat plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39(11), 253. https://doi.org/10.1007/s11738-017-2556-9
27. Lindow, S. E., & Brandl, M. T. (2003). Microbiology of the phyllosphere. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(4),

1875-
1883. https://doi.org/10.1128/AEM.69.4.
1875-1883.2003

28. Madhaiyan, M., Poonguzhali, S., Senthilkumar, M., Seshadri, S., Chung, H., Jinchul, Y., Sundaram, S., & Tongmin, S., (2004). Growth promotion and induction of systemic resistance in rice cultivar Co-47 (*Oryza sativa* L.) by *Methylobacterium spp. Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 45.
29. Mwajita, M. R., Murage, H., Tani, A., & Kahangi, E. M. (2013). Evaluation of rhizosphere, rhizoplane and phyllosphere bacteria and fungi isolated from rice in Kenya for plant growth promoters. *SpringerPlus*, 2(1), 606. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-606
30. Page, A. L., Miller, R. H., & Keeny, D. R. (1982). Methods of soil analysis. Part 2, *Chemical and Microbiological Properties*, Madison Wisconsin U.S.A.
31. Parasuraman, P., Pattnaik, S., & Busi, S. (2019). Phyllosphere Microbiome: Functional Importance in Sustainable Agriculture. *In New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier, 135-148. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64191-5.00010-9
32. Pirlak, L., Turan, M., Sahin, F., & Esitken, A., (2007). Floral and foliar application of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) to apples increases yield, growth, and nutrient element contents of leaves. *Journal of Sustainable Agriculture*, 30(4), 145-155. https://doi.org/10.1300/J064v30n04_11
33. Ranawat, B., Bachani, P., Singh, A., & Mishra, S. (2021). *Enterobacter hormaechei* as plant growth-promoting bacteria for improvement in *Lycopersicum esculentum*. *Current microbiology*, 78(4), 1208-1217. https://doi.org/10.1007/s00284-021-02368-1
34. Ryu, J., Madhaiyan, M., Poonguzhali, S., Yim, W., Indiragandhi, P., Kim, K., Anandham, R., Yun, J., Kim, K.H., & Sa, T. (2006). Plant growth substances produced by Methylobacterium spp. and their effect on tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) and red pepper (*Capsicum annuum* L.) growth. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 16(10), 1622.
35. Senthilkumar, M., Madhaiyan, M., Sundaram, S., & Kannaiyan, S. (2009). Intercellular colonization and growth promoting effects of *Methylobacterium* sp. with plant-growth regulators on rice (*Oryza sativa* L. Cv CO-43). *Microbiological Research*, 164(1), 92-104. https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.10.007
36. Shamshiripour, M., Jahandideh Mahjen Abadi, V.A., Hemmati, V., Otadi, A., & Esmaeilizad, A. (2023). Determining the appropriate formulation for growth promotong bacterial inoculum of Corn phyllosphere. *Soil and Water Research Institute Publications*. 49 pp. (In Perisan)
37. Sharma, P., Pandey, R., & Chauhan, N. S. (2024). Biofertilizer and biocontrol properties of *Stenotrophomonas maltophilia* BCM emphasize its potential application for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1364807. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.680981
38. Sharma, S., Chandra, S., Kumar, A., Bindraban, P., Saxena, A. K., Pande, V., & Pandey, R. (2019). Foliar application of iron fortified bacteriosiderophore improves growth and grain Fe concentration in wheat and soybean. *Indian Journal of Microbiology*, 59(3), 344-350. https://doi.org/10.1007/s12088-019-00810-4
39. Shiferaw, B., Prasanna, B. M., Hellin, J., & Bänziger, M. (2011). Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*, 3(3), 307. https://doi.org/10.1007/s12571-011-0140-5
40. Tani, A., Sahin, N., Fujitani, Y., Kato, A., Sato, K., & Kimbara, K., (2015). Methylobacterium species promoting rice and barley growth and interaction specificity revealed with whole-cell matrix-assisted laser desorption/ionization-time-of-flight mass spectrometry (MALDI-TOF/MS) analysis. *PloS one*, 10(6), e0129509.

https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129509

41. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and Soil Acidity. P 475-490, In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of soil analysis, Part 3, No. 5, *ASA and SSSA*, Madison, WI. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16
42. Vorholt, J. A. (2012). Microbial life in the phyllosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 10(12), 828. https://doi.org/10.1038/nrmicro2910
43. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29-38. https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003
44. Yen, K. S., Sundar, L. S., & Chao, Y. Y. (2022). Foliar application of *Rhodopseudomonas palustris* enhances the rice crop growth and yield under field conditions. *Plants*, 11(19), 2452. https://doi.org/10.3390/plants11192452