



Impact of Plant Growth Promoting Rhizobacteria Inoculation on Phosphorus Uptake and Quantitative and Qualitative Yield of Ratoon Sugarcane

Akbar Karimi^{1*} , Saeed Safirzadeh² , Nematallah Zakavi¹ ,
Shila Khajavi-Shojaei³ , Koroush Masoudian³, Pardis Khaji³ ,
Naeimeh Enayatizamir⁴ and Hossein Noroozi¹

1- Department of Agronomy, Khuzestan sugarcane research and training institute, Ahvaz, Iran

2- Hakim Farabi Agro-Industry CO., Ahvaz, Iran

3- Debal Khozaei Agro-Industry CO., Ahvaz, Iran

4- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

* Corresponding author, Email: a.karimi@iscrti.ir

(Received: 12 March 2025; Revised: 23 May 2025; Accepted: 24 May 2025)

Abstract

Background and Objective: Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) are effective in improving plant nutrition and yield through various strategies. The aim of this study was to investigate the effect of inoculation of PGPR on phosphorus uptake and quantitative as well as qualitative yield of two sugarcane varieties (CP73-21 and CP69-1062) during the second ratoon.

Methods: Two separate experiments were conducted in two sugarcane fields during second ratoon at De'bal Khoza'i Agro-Industry, Khuzestan. Each experiment was conducted in a randomized complete block design with three treatments of control (C), inoculation of *Enterobacter cloacae* R33 (B₃₃) and inoculation of bacterial consortium (three strains of *Enterobacter cloacae* R33, *Staphylococcus hominis* 9E and *Brevundimonas* sp.) (B_{mix}) and in three replications. The PGPR treatments were applied by spraying to soil. Three months after applying the treatments, soil microbial biomass carbon and available phosphorus, shoot phosphorus concentration, and shoot dry weight were measured. Plant quantitative and qualitative yields were also measured at the end of the plant growth period.

Results: In both studied fields, the application of PGPR treatments increased soil microbial biomass carbon, soil available phosphorus, and phosphorus uptake in the shoot of sugarcane. The results revealed that the B₃₃ treatment was more effective than the B_{mix} treatment in improving phosphorus availability in the soil, increasing phosphorus uptake in the shoot, and increasing the quantitative and qualitative yield of sugarcane. In the B₃₃ treatment, the yields of second ratoon sugarcane of the CP73-21 and CP69-1062 varieties were 9.3 and 10.5 percent, respectively, and the sugar yields were 12.3 and 12.6 percent, respectively, higher than the control treatment.

Conclusion: In general, the results of this study showed that inoculation of *Enterobacter cloacae* R33 bacteria can be considered as one of the effective strategies in improving phosphorus nutrition and sugarcane yield in ratoon fields.

Keywords: Phosphorus solubilizing bacteria, Phosphorus availability, Microbial activity, Sugar Yield, Sugarcane.

How to Cite: Karimi, A., Safirzadeh, S., Zakavi, N., Khajavi-Shojaei, S., Masoudian, K., Khaji, P., Enayatizamir, N., Noroozi, H., 2025. Impact of plant growth promoting rhizobacteria inoculation on phosphorus uptake and quantitative and qualitative yield of sugarcane. J. Soil Plant Interact. 16(1), 55–70 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.16.1.20201>





تأثیر مایه‌زنی باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه بر جذب فسفر و عملکرد کمی و کیفی نیشکر بازرویی

اکبر کریمی^{۱*}، سعید صفیرزاده^۲، نعمت‌الله زکوی^۱، شیلا خواجوی شجاعی^۳، کورش مسعودیان^۳، پردیس خاجی^۳،
نعیمه عنایتی‌ضمیر^۴ و حسین نوروزی^۱

- ۱- گروه تحقیقات به‌زراعی، مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان، اهواز، ایران
 - ۲- کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان، اهواز، ایران
 - ۳- کشت و صنعت دعبیل خزاعی خوزستان، اهواز، ایران
 - ۴- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- * مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.karimi@iscrti.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۳/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۳)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه (PGPR) با راهکارهای مختلف در بهبود تغذیه و عملکرد گیاهان مؤثرند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر مایه‌زنی PGPR بر جذب فسفر و عملکرد کمی و کیفی دو واریته نیشکر (CP69-1062 و CP73-21) در سن بازرویی دوم بود.

روش‌ها: این پژوهش به‌صورت دو آزمایش جداگانه در دو مزرعه بازرویی دوم نیشکر در کشت و صنعت دعبیل خزاعی خوزستان انجام شد. هر یک از آزمایش‌ها در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار شاهد (C)، مایه‌زنی باکتری *Enterobacter cloacae* R33 (B₃₃) و مایه‌زنی کنسرسیوم باکتریایی (سه سویه *Enterobacter cloacae* R33، *Staphylococcus hominis* 9E و *Brevundimonas* sp.) (B_{mix}) و در سه تکرار انجام شد. تیمارهای باکتری محرک رشد گیاه به‌روش اسپری کردن به خاک اعمال شدند. سه ماه پس از کاربرد تیمارها، کربن زیست‌توده میکروبی، فسفر فراهم خاک، غلظت فسفر شاخساره و وزن خشک شاخساره گیاه اندازه‌گیری شد. همچنین در پایان دوره رشد گیاه، عملکرد کمی و کیفی گیاه اندازه‌گیری شد.

نتایج: در هر دو مزرعه مورد بررسی، کاربرد تیمارهای PGPR سبب افزایش کربن زیست‌توده میکروبی خاک (۴۳/۵-۲۰/۳ درصد)، فسفر فراهم خاک (۵۲/۵-۲۴/۷ درصد) و مقدار (جذب) فسفر (۳۶/۳-۱۴/۱ درصد) در شاخساره نیشکر شد. نتایج نشان داد تیمار B₃₃ در بهبود فراهمی فسفر خاک، افزایش جذب فسفر در شاخساره و افزایش عملکرد کمی و کیفی نیشکر مؤثرتر از تیمار B_{mix} بود. در تیمار B₃₃ عملکرد نیشکر بازرویی دوم واریته‌های CP69-1062 و CP73-21 به‌ترتیب ۹/۳ و ۱۰/۵ درصد و عملکرد شکر به‌ترتیب ۱۲/۳ و ۱۲/۶ درصد، بیشتر از تیمار شاهد بود. نتایج همچنین نشان داد عملکرد کمی و کیفی نیشکر و مقدار فسفر در شاخساره در تیمارهای مختلف در واریته CP69-1062 بیشتر از واریته CP73-21 بود.

نتیجه‌گیری کلی: به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد مایه‌زنی باکتری *Enterobacter cloacae* R33 می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در بهبود تغذیه فسفر و عملکرد نیشکر در مزارع بازرویی مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: باکتری‌های حل‌کننده فسفر، فراهمی فسفر، فعالیت میکروبی، عملکرد شکر، نیشکر.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:



Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

فسفر یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی پرمصرف و ضروری در رشد و تغذیه نیشکر است. فسفر در ذخیره و انتقال انرژی، فتوسنتز و تنفس، رشد و گسترش ریشه و همچنین پنجه‌زنی و راتون‌پذیری نیشکر نقش مهمی دارد (Pan and Cai, 2023). همچنین قندسازی و تشکیل ساکارز از گلوکز و فروکتوز و انتقال آن‌ها، توسط ترکیبات فسفات تسهیل می‌شود (Zhu et al., 2018; (Zambrosi, 2021).

در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک، بخش زیادی از فسفر افزوده‌شده به خاک در سطح کانی‌های رسی و کربنات کلسیم جذب شده و به شکل‌های نامحلول فسفات کلسیم تبدیل می‌شود. از این‌رو فراهمی فسفر برای گیاهان در خاک‌های آهکی بسیار کم بوده و تثبیت فسفر یکی از دشواری‌های مهم در تغذیه گیاهان در این خاک‌ها است. بنابراین یافتن راهکاری برای بهبود تغذیه فسفر ضروری است (Safirzadeh et al., 2019, 2023).

برای مدیریت تغذیه فسفر در نیشکر، نیاز است مشخص شود که کاربرد کود فسفر پیش از کشت، تا چه حد می‌تواند نیاز تغذیه‌ای را در نیشکر بازروبی (راتون^۱) از راه بهبود عملکرد ساقه در واحد فسفر مصرف‌شده، کاهش دهد (Zambrosi, 2021). نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده است که اثر باقی‌مانده کوددهی فسفر پیش از کشت قلمه نیشکر، برای برآورد نیازهای نیشکر بازروبی کافی نبوده و این عامل سبب کاهش عملکرد نیشکر بازروبی می‌شود (de Oliveira et al., 2022). بنابراین بهبود فراهمی فسفر در خاک با راهکارهای مختلف، برای رفع نیاز تغذیه‌ای فسفر در نیشکر بازروبی ضروری است (Zambrosi, 2021; Karimi et al., 2024).

یکی از راهکارهای افزایش فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی و بهبود جذب آن در گیاه، مایه‌زنی باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه (PGPRs)^۲ با توانایی انحلال فسفر در خاک است (Safirzaeh et al., 2019). باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه، گروهی از باکتری‌های مفید هستند که از راه سازوکارهای

مستقیم و غیرمستقیم از جمله افزایش فراهمی عناصر غذایی به-ویژه فسفر، سبب بهبود وضعیت تغذیه‌ای و عملکرد گیاهان می‌شوند (Kumar and Verma, 2019; Nassef et al., 2025). این ریزجانداران نقش مهمی در پویایی فسفر خاک و افزایش فراهمی آن برای گیاهان دارند (Karimi et al., 2013; Liu et al., 2024; (Nassef et al., 2025).

آزادکردن اسیدهای آلی (مانند اسید اگزالیک، سیتریک و گلوکونیک) یا پروتون در محیط اطراف و کلات‌کردن، از جمله سازوکارهای باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه در افزایش جذب فسفر در گیاهان هستند. اسیدهای آلی تولیدشده توسط باکتری‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم فسفات‌های معدنی را حل کرده که نتیجه‌ای از تبادل آنیونی یا تشکیل کلات با یون‌های Fe^{+3} و Al^{+3} متصل به فسفر است. در نهایت فسفر غیرمحلول به‌صورت یون‌های محلول $H_2PO_4^-$ و HPO_4^{2-} تبدیل می‌شود. باکتری‌های محرک رشد گیاه همچنین با استفاده از هیدرولیز آنزیمی توسط آنزیم‌های ترشحی فسفاتاز، فسفر آلی خاک را معدنی می‌کنند (Islam et al., 2024; Nassef et al., 2025). افزون بر این، باکتری‌های محرک رشد گیاه توانایی تولید هورمون‌های رشد گیاهی را دارند که این هورمون‌ها توسعه ریشه را تحت تأثیر قرار داده، سبب افزایش طول ریشه و تشکیل ریشه‌های موین شده و از این راه نیز می‌توانند در افزایش جذب فسفر در گیاهان مؤثر باشند (Hasan et al., 2024). نتایج پژوهش (Estrada-Bonilla et al., 2021) در برزیل نیز نشان داد مایه‌زنی سویه‌های باکتری *Bacillus* sp. و *Rhizobium* sp. سبب افزایش فسفر فراهم خاک تحت کشت نیشکر (وارسته RB 86-7515) شد.

با توجه به کم‌بودن غلظت فسفر فراهم در خاک‌های مزارع نیشکر و همچنین به‌دلیل غلظت زیاده‌ای فسفر کل در خاک، استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه می‌تواند به‌عنوان راهکار مناسبی برای استفاده از منابع فسفر خاک و بهبود تغذیه و عملکرد نیشکر باشد (Safirzadeh et al., 2019). همچنین کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه در مزارع نیشکر به‌دلیل توانایی این باکتری‌ها

تیمار و در سه تکرار انجام شد. در هر آزمایش تیمارهای آزمایشی مشابه و شامل سه تیمار بدون کاربرد باکتری یا شاهد (C)، کاربرد باکتری *Enterobacter cloacae* R33 (B₃₃) و کاربرد ترکیبی از باکتری‌های محرک رشد گیاه (B_{mix}) شامل *Enterobacter cloacae* R33 و *Staphylococcus hominis* 9E و *Brevundimonas* sp. بودند.

در پژوهش‌های پیشین انجام شده اثر مجزا و تلفیقی این سویه‌های باکتری در آزمایش‌های انکوباسیون و گلدانی بررسی شده بود که بر اساس نتایج آن‌ها این دو تیمار به عنوان تیمارهای برتر مؤثر در انحلال فسفر در خاک های آهکی انتخاب شدند. از این رو در این پژوهش تنها تیمارهای برتر گزینش شده از نتایج پژوهش‌های پیشین، انتخاب شدند. همچنین در بررسی انجام شده در شرایط کشت توأم سه سویه باکتری *Enterobacter cloacae* R33، *Staphylococcus hominis* 9E و *Brevundimonas* sp. در پلیت، برهمکنش منفی میان این سویه‌های باکتریایی مشاهده نشد. مساحت هر کرت آزمایشی نیم هکتار (۲۲ فارو به طول ۲۵۰ متر) و مساحت کل محدوده مورد بررسی در هر مزرعه ۴/۵ هکتار بود. باکتری *Enterobacter cloacae* R33 مورد استفاده در این پژوهش از ریزوسفر نیشکر (مزارع کشت و صنعت دعبل خزاعی در استان خوزستان) جداسازی شده و توانایی تولید هورمون اکسین و انحلال فسفر (با توانایی انحلال فسفر نامحلول ۱۰/۱ میلی گرم بر لیتر در محیط کشت مایع PVK broth و نسبت قطر هاله به کلنی ۰/۸ در محیط کشت جامد PVK) را داشت (Lamizadeh et al., 2016) و باکتری‌های *Staphylococcus hominis* 9E و *Brevundimonas* sp. از باکتری‌های محرک رشد گیاه و حل کننده فسفر بودند که از کلکسیون میکروبی گروه علوم خاک دانشگاه شهید چمران اهواز تهیه شدند (Rezaeinasab et al., 2020).

برای تهیه زادمایه باکتری‌ها از سویه‌های مورد نظر، ابتدا باکتری‌ها در محیط کشت Nutrient Agar کشت شدند. پلیت‌ها در دمای ۲۸ درجه سلسیوس به مدت پنج روز انکوبه شدند. سپس برای تهیه زادمایه باکتری‌ها از سویه‌های مورد نظر با لوپ استریل

در بهبود وضعیت سایر عناصر غذایی در ریزوسفر و تولید متابولیت‌های محرک رشد، می‌تواند در بهبود عملکرد نیشکر مؤثر باشد (Estrada-Bonilla et al., 2021).

با توجه به چند ساله بودن گیاه نیشکر و عدم کاربرد کودهای جامد یا دانه‌ای فسفر در مزارع بازرویی نیشکر به دلیل دشواری‌های اجرایی آن، بررسی تأثیر کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه بر فراهمی فسفر در خاک و جذب آن توسط نیشکر در مزارع بازرویی ضروری به نظر می‌رسد. همچنین تاکنون پژوهش‌های چندانی در مورد تأثیر باکتری‌های محرک رشد گیاه در مزارع بازرویی نیشکر انجام نشده و یکی از دشواری‌های تغذیه‌ای مزارع بازرویی نیشکر کمبود فسفر است (Karimi et al., 2024). بنابراین این پژوهش به منظور بررسی تأثیر مایه زنی باکتری‌های محرک رشد گیاه بر فراهمی فسفر در خاک، جذب فسفر و عملکرد نیشکر (دو واریته تجاری نیشکر CP69- و CP73-21 و 1062) بازرویی دوم در شرایط مزرعه‌ای انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش ابتدا از دو مزرعه مکان اجرای پژوهش، نمونه مرکب خاک از لایه ۰-۳۰ سانتی متری تهیه شد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری شدند (Carter and Gregorich, 2008). خاک دو مزرعه مورد بررسی دارای بافت لوم رسی، ماده آلی کم، غیرشور و دارای فسفر کل زیاد و فسفر فراهم کم و درصد کربنات کلسیم زیاد بود (جدول ۱).

این پژوهش در شرایط مزرعه‌ای، در دو مزرعه آزمایشی واقع در کشت و صنعت دعبل خزاعی در ۲۵ کیلومتری جنوب غربی شهر اهواز در استان خوزستان، در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ انجام شد. در این پژوهش تأثیر تیمارهای آزمایشی بر جذب فسفر و عملکرد دو واریته تجاری نیشکر شامل CP73-21 (واریته زودرس) و CP69-1062 (واریته میان‌رس) که بخش عمده سطح زیر کشت نیشکر در استان خوزستان را به خود اختصاص دادند، در سن بازرویی دوم در دو آزمایش جداگانه بررسی شد. این پژوهش در قالب طرح آزمایشی بلوک‌های کامل تصادفی، با سه

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های دو مزرعه مورد بررسی
Table 1. Physical and chemical properties of soils in the two studied fields

فسفر کل Total P	فسفر فراهم Available P	نیترژن کل Total N	رسانایی الکتریکی (Electrical conductivity, EC)	pH	کربنات کلسیم معادل (Calcium carbonate equivalent, CCE)	کربن آلی (Organic carbon, OC)	بافت خاک Soil texture	ویژگی Property
mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹	dS m ⁻¹	-	%	%	-	واحد Unit
892	7.46	0.52	3.42	7.82	46.5	0.42	لوم رسی	خاک مزرعه وارپته CP73-21 CP73-21 field soil
864	7.18	0.50	3.28	7.84	47.8	0.40	لوم رسی	خاک مزرعه وارپته CP69-1062 CP69-1062 field soil

شده (Motsara, 2015) و مقدار فسفر جذب شده در شاخساره گیاه محاسبه شد. به منظور اندازه گیری ارتفاع نهایی نیشکر، در انتهای دوره رشد گیاه (نه ماه پس از اعمال تیمارها)، از هر کرت آزمایشی ۲۰ ساقه از سطح خاک کف بر شده و ارتفاع آنها اندازه گیری شد. میانگین آنها به عنوان ارتفاع نهایی نیشکر در نظر گرفته شد. عملکرد نیشکر در تیمارهای مختلف، در زمان برداشت ماشینی مزرعه توسط دروگر، ثبت شد. سپس مقدار عملکرد نیشکر در هر تیمار بر حسب تن نیشکر در هکتار برآورد گردید. برای تعیین ویژگی های کیفی نیشکر، پس از عصاره گیری شربت نیشکر، درصد ساکارز شربت (پل^۳)، کل مواد جامد محلول در شربت نی (بریکس^۴)، اندازه گیری شدند و درصد شکر قابل استحصال^۵ (RS) محاسبه شد (de Oliveira et al., 2022). همچنین عملکرد شکر (تن در هکتار) در هر تیمار تعیین شد. تجزیه آماری داده های این پژوهش پس از آزمون نرمال بودن داده ها با استفاده از نرم افزار آماری SAS 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین داده ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نمودارها نیز در محیط نرم افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

کربن زیست توده میکروبی

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد اثر مایه زنی باکتری های محرک رشد گیاه بر کربن زیست توده میکروبی خاک تحت کشت هر دو واریته نیشکر (CP69-1062 و CP73-21) معنی دار بود (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین داده ها نشان داد در هر دو خاک تحت کشت واریته های CP69-1062 و CP73-21 نیشکر مایه زنی هر دو تیمار باکتری های محرک رشد گیاه (B_{33} و B_{mix})، سبب افزایش معنی دار کربن زیست توده میکروبی خاک در مقایسه با تیمار شاهد شد (جدول ۳). مقایسه کربن زیست توده میکروبی خاک در دو تیمار مایه زنی باکتری نشان داد که در هر دو مزرعه مورد بررسی، کربن زیست توده میکروبی خاک در تیمار B_{33}

مقداری از کلنی موجود در هر پلیت برداشته شد و در ارلن مایر یک لیتری دارای محیط کشت Nutrient Broth استریل، مایه زنی شد. سپس به منظور یکنواخت شدن محیط کشت مایع به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۸ درجه سلسیوس در شیکر انکوباتور قرار داده شدند.

در این پژوهش پس از رشد باکتری ها در محیط کشت مایع، مایه زنی باکتری ها به روش اسپری کردن خاک، در ابتدای رشد دوباره نیشکر در مزارع بازرویی انجام شد. مقدار زادمایه استفاده شده چهار لیتر در هر هکتار بود که با ۴۰۰ لیتر آب آبیاری رقیق شد و با استفاده از مخزن محلول پاشی توسط تراکتور، مایه زنی باکتری ها انجام شد. برای تیمار شاهد نیز ۴ لیتر محیط کشت استریل و بدون باکتری، با ۴۰۰ لیتر آب مخلوط شد و همانند سایر تیمارها اعمال شد. جمعیت باکتری های مورد استفاده در هر یک از تیمارها برای اعمال در مزرعه (پس از فرآیند رقیق سازی با ۴۰۰ لیتر آب) $10^7 \times 1/67$ CFU mL⁻¹ برآورد شد. در هر دو مزرعه آزمایشی، پس از اعمال تیمارها بلافاصله آبیاری مزارع انجام شد.

برای ارزیابی اثر تیمارهای اعمال شده بر ویژگی های خاک و گیاه، سه ماه پس از اعمال تیمارها، نمونه برداری خاک و گیاه به صورت مرکب، از کرت های آزمایشی مربوط به تیمارهای مختلف، انجام شد. در نمونه های خاک، غلظت فسفر فراهم خاک به روش اولسن (با استفاده از بی کربنات سدیم نیم مولار) عصاره گیری شده و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Apel UV-303 PD)، اندازه گیری شد (Carter and Gregorich, 2008). همچنین برای ارزیابی فعالیت میکروبی در تیمارهای مختلف، کربن زیست توده میکروبی به روش تدخین-عصاره گیری اندازه گیری شد (Jenkinson and Ladd, 1981). نمونه برداری شاخساره گیاه نیز از هر کرت آزمایشی انجام شد. پس از خشک کردن نمونه ها در آون، وزن خشک شاخساره اندازه گیری شد. غلظت فسفر شاخساره گیاه به روش خاکستریگری خشک شده، سپس هضم با اسید کلریدریک و رنگ سنجی اندازه گیری انجام

5. Recoverable sugar

3. Pol

4. Brix

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارها بر کربن زیست‌توده میکروبی و فسفر فراهم خاک

Table 2. Analysis of variance of the effect of treatments on soil microbial biomass carbon and available P concentration

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات (S.O.V)
Mean squares					
واریته CP69-1062		واریته CP73-21		df	
فسفر فراهم خاک	کربن زیست توده میکروبی	فسفر فراهم خاک	کربن زیست توده میکروبی		
Soil available P	Microbial biomass carbon	Soil available P	Microbial biomass carbon		
0.50 ^{ns}	58.7 ^{ns}	1.75 ^{ns}	194.1 ^{ns}	2	بلوک
					Block
10.1 ^{**}	5097 ^{**}	11.1 ^{**}	2677 ^{**}	2	تیمار
					Treatment
0.16	96.1	0.03	60.8	4	خطا
					Error
4.38	8.44	3.78	4.61		ضریب تغییرات
					CV (%)

^{ns} و ^{**} به ترتیب بیانگر آثار غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد هستند.
^{ns} and ^{**} stand for non-significant and significant effects at the 1% probability level, respectively

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر تیمارها بر کربن زیست‌توده میکروبی و فسفر فراهم خاک

Table 3. Means comparison of the effect of treatments on microbial biomass carbon and available P concentration in the soil

واریته CP69-1062		واریته CP73-21		تیمار
فسفر فراهم خاک Soil available P (mg kg ⁻¹)	کربن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass carbon (mg kg ⁻¹)	فسفر فراهم خاک Soil available P (mg kg ⁻¹)	کربن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass carbon (mg kg ⁻¹)	
7.12 ^c	186.9 ^b	7.33 ^c	197.7 ^b	C
10.76 ^a	263.8 ^a	11.18 ^a	248.3 ^a	B ₃₃
9.32 ^b	242.2 ^a	9.14 ^b	237.9 ^a	B _{mix}
0.91	23.6	0.73	15.1	LSD _{0.05}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند. C, B₃₃ و B_{mix} به ترتیب شاهد (بدون مایه‌زنی باکتری)، مایه‌زنی باکتری *Enterobacter cloacae* R33 و مایه‌زنی ترکیبی باکتری‌های *Enterobacter cloacae* R33، *Staphylococcus hominis* 9E و *Brevundimonas* sp. هستند.

Means with similar letter(s) are not significantly different according to the LSD test ($P < 0.05$). C, B₃₃ and B_{mix} are control (without bacterial inoculation), *Enterobacter cloacae* R33 inoculation and *Enterobacter cloacae* R33, *Staphylococcus hominis* E9 and *Brevundimonas* sp. inoculation treatments, respectively.

می‌رسد، یکی از دلایل اصلی افزایش کربن زیست‌توده میکروبی خاک در تیمارهای کاربرد باکتری‌های محرک شده گیاه اثر غیرمستقیم آن‌ها باشد که سبب تحریک رشد گیاه و به‌احتمال زیاد افزایش ترشحات ریشه شده که در نهایت سبب افزایش جمعیت میکروبی و افزایش کربن زیست‌توده میکروبی شدند.

بیشتر از تیمار B_{mix} بود، اگرچه تفاوت آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار ($P < 0.05$) نبود (جدول ۳). کربن زیست‌توده میکروبی به‌عنوان کربن فعال، نشان‌دهنده تعداد ریزجانداران (به‌ویژه باکتری‌ها) در یک نمونه خاک و مقدار کربن تثبیت‌شده در سلول‌های میکروبی است (Rouydel et al., 2021). به‌نظر

فسفر نسبت به اسیدهای معدنی بیشتر است. این تفاوت به تأثیر کلات‌کنندگی اسید آلی ترشح‌شده توسط ریزجانداران نسبت داده می‌شود. اسیدهای آلی، دارای گروه‌های عاملی هیدروکسیلی و کربوکسیلی هستند که می‌توانند با مسدود کردن جایگاه‌های فعال جذب و ترسیب فسفر، حلالیت و فراهمی فسفر را در خاک افزایش دهند (Hasan et al., 2021).

از دیگر سازوکارهای انحلال ترکیبات نامحلول فسفر، تولید اسیدهای معدنی توسط باکتری‌های محرک رشد گیاه است. تولید اسیدهای معدنی، روشی غیرمستقیم در انحلال فسفر است که به دلیل تولید دی‌اکسید کربن توسط این باکتری‌ها، سبب تبدیل شکل‌های نامحلول فسفر به شکل فراهم برای گیاه می‌شود (Cheng et al., 2023). باکتری‌های محرک رشد گیاه همچنین با استفاده از هیدرولیز آنزیمی توسط آنزیم‌های ترشحی فسفاتاز، می‌توانند فسفر آلی خاک را معدنی می‌کنند (Li et al., 2023). به‌طور مشابه Sharma et al. (2023) با بررسی تأثیر مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد گیاه (دو سویه *Pseudomonas fluorescens* PSB28 و *Bacillus cereus* PSB29) بر فراهمی فسفر در یک خاک تحت کشت نیشکر (وارته 0238 Co) در هندوستان گزارش کردند که کاربرد هر دو سویه باکتری سبب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر فراهم خاک شد. (Aye et al., 2021). نیز با بررسی تأثیر مایه‌زنی باکتری محرک رشد گیاه (*Bacillus subtilis*) بر غلظت فسفر فراهم خاک، گزارش کردند مایه‌زنی باکتری سبب افزایش معنی‌دار جمعیت باکتریایی و غلظت فسفر فراهم خاک تحت کشت نیشکر شد.

غلظت و مقدار فسفر جذب‌شده در شاخساره

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر تیمار باکتری‌های محرک رشد گیاه بر غلظت فسفر شاخساره، وزن خشک و مقدار (جذب) فسفر در شاخساره در هر دو وارته نیشکر (CP69- و CP73-21) معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در هر دو وارته نیشکر تأثیر تیمارها بر مقدار فسفر در شاخساره نیشکر مشابه بود. بدین ترتیب که در هر دو خاک مورد

Rouydel et al. (2021) نیز گزارش کردند مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد گیاه، کربن زیست‌توده میکروبی خاک را در یک خاک آهکی به‌طور معنی‌داری افزایش داد. همچنین Santos et al. (2022) با انجام پژوهشی در برزیل گزارش کردند همزیستی باکتری *Bacillus velezensis* سبب افزایش کربن زیست‌توده میکروبی خاک تحت کشت نیشکر شد.

فسفر فراهم خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد گیاه بر غلظت فسفر فراهم خاک تحت کشت هر دو وارته نیشکر (CP73-21 و CP69-1062) معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در هر دو خاک تحت کشت وارته CP73-21 و CP69-1062، مایه‌زنی هر دو تیمار باکتری‌های محرک رشد گیاه (B_{33} و B_{mix})، غلظت فسفر فراهم خاک را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (جدول ۳). مقایسه دو تیمار B_{33} و B_{mix} نشان‌دهنده تأثیر بیشتر تیمار B_{33} در افزایش غلظت فسفر فراهم خاک در هر دو مزرعه مورد بررسی بود. به‌طور کلی بیشترین غلظت فسفر فراهم خاک در هر دو مزرعه آزمایشی مربوط به تیمار B_{33} بود به‌طوری‌که مقدار آن در این تیمار در دو خاک تحت کشت وارته CP73-21 و CP69-1062، به ترتیب ۵۲/۵ و ۵۱/۱ درصد بیشتر از شاهد بود (جدول ۳).

باکتری‌های مورد استفاده در این پژوهش از جمله باکتری *Enterobacter cloacae* R33 از باکتری‌های حل‌کننده فسفات بوده و توانایی انحلال فسفر را داشتند (لامی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از سازوکارهای باکتری‌های محرک رشد گیاه آزاد کردن اسیدهای آلی (مانند اگزالیک، سیتریک و گلوکونیک اسید) یا پروتون در محیط اطراف ریشه و به دنبال آن حل نمودن ترکیبات فسفر است. اسیدهای آلی تولیدشده توسط باکتری‌های محرک رشد گیاه می‌توانند به‌صورت مستقیم فسفات‌های معدنی را حل کرده و در نهایت فسفر غیرمحلول به یون‌های محلول $H_2PO_4^-$ و HPO_4^{2-} تبدیل می‌شود (Rawat et al., 2021; Jenkinson and Ladd, 1981). توانایی اسیدهای آلی در انحلال

جدول ۴. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارها بر غلظت فسفر، وزن خشک و جذب فسفر در شاخساره (سه ماه پس از اعمال تیمارها)

Table 4. Analysis of variance of the effect of treatments on shoot P concentration, dry weight and shoot P uptake

میانگین مربعات Mean squares						درجه آزادی df	منابع تغییرات (S.O.V)
واریته CP69-1062			واریته CP73-21				
جذب فسفر در شاخساره Shoot P uptake	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight	غلظت فسفر شاخساره Shoot P concentration	جذب فسفر در شاخساره Shoot P uptake	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight	غلظت فسفر شاخساره Shoot P concentration		
0.84 ^{ns}	0.009 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.011 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	2	بلوک Block
14.2 ^{**}	0.482 [*]	0.007 [*]	15.4 ^{**}	0.549 [*]	0.009 [*]	2	تیمار Treatment
0.40	0.062	0.0001	0.16	0.064	0.0001	4	خطا Error
4.42	4.63	6.22	3.77	4.89	6.36		ضریب تغییرات CV (%)

ns, * و ** به ترتیب بیان‌گر آثار غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد هستند.

^{ns}, * and ** stand for non-significant and significant effects at the 5 and 1% probability levels, respectively.

جدول ۵. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت فسفر، وزن خشک و جذب فسفر در شاخساره (سه ماه پس از اعمال تیمارها)

Table 5. Means comparison of the effect of treatments on shoot P concentration, dry weight and P uptake

واریته CP69-1062			واریته CP73-21			تیمار Treatment
جذب فسفر در شاخساره Shoot P uptake (mg plant ⁻¹)	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight (g plant ⁻¹)	غلظت فسفر شاخساره Shoot P concentration (%)	جذب فسفر در شاخساره Shoot P uptake (mg plant ⁻¹)	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight (g plant ⁻¹)	غلظت فسفر شاخساره Shoot P concentration (%)	
15.83 ^c	9.09 ^b	0.174 ^c	13.54 ^c	8.41 ^b	0.161 ^c	C
20.94 ^a	9.89 ^a	0.212 ^a	18.46 ^a	9.26 ^a	0.199 ^a	B ₃₃
18.06 ^b	9.41 ^{ab}	0.191 ^b	15.64 ^b	8.75 ^{ab}	0.179 ^b	B _{mix}
1.43	0.65	0.011	0.92	0.58	0.017	LSD _{0.05}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند. C, B₃₃ و B_{mix} به ترتیب شاهد (بدون مایه‌زنی باکتری)، مایه‌زنی باکتری *Enterobacter cloacae* R33 و مایه‌زنی ترکیبی باکتری‌های *Enterobacter cloacae* R33، *Staphylococcus hominis* 9E و *Brevundimonas* sp. هستند.

Means with similar letter(s) are not significantly different according to the LSD test ($P < 0.05$). C, B₃₃ and B_{mix} are control (without bacterial inoculation), *Enterobacter cloacae* R33 inoculation and *Enterobacter cloacae* R33, *Staphylococcus hominis* E9 and *Brevundimonas* sp. inoculation treatments, respectively.

بررسی، غلظت فسفر شاخساره، وزن خشک شاخساره و مقدار فسفر در شاخساره نیشکر، در تیمار B₃₃ به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد بود (جدول ۵). هر چند در هر دو مزرعه مورد بررسی، از نظر وزن خشک شاخساره تفاوت معنی‌داری میان دو

نیشکر در تیمارهای باکتری‌های محرک رشد گیاه، در مقایسه با تیمار شاهد را افزایش معنی‌دار داد.

عملکرد کمی و کیفی نیشکر

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر تیمار باکتری‌های محرک رشد گیاه بر ارتفاع ساقه و عملکرد نیشکر، در هر دو مزرعه مورد بررسی معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها همچنین نشان داد اثر تیمار باکتری‌های محرک رشد گیاه بر شکر قابل استحصال، در هر دو مزرعه مورد بررسی، از نظر آماری معنی‌دار نبود، در حالی‌که اثر این تیمار بر عملکرد شکر در هر دو مزرعه مورد بررسی از نظر آماری معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد کاربرد تیمار B₃₃ سبب افزایش معنی‌دار ارتفاع و عملکرد هر دو واریته نیشکر (CP73-21 و CP69-1062)، در مقایسه با تیمار شاهد شد. ارتفاع و عملکرد هر دو واریته نیشکر در تیمار B_{mix} نیز بیشتر از تیمار شاهد بود، اما تفاوت آن‌ها معنی‌دار نبود (شکل ۱).

عملکرد کمی و کیفی نیشکر در تیمار B₃₃ نسبت به B_{mix}، به احتمال زیاد به دلیل اثر رقابتی و بازدارندگی میان باکتری‌ها در تیمار B_{mix} و کاهش زیست‌توده میکروبی (جدول ۳) و به دنبال آن کاهش اثر مثبت آن بر عملکرد نیشکر در مقایسه با تیمار B₃₃ باشد. البته با توجه به نتایج به دست آمده، نیاز است برهم‌کنش این باکتری‌ها در پژوهش‌های آینده به طور دقیق بررسی شود. مقایسه دو واریته نیشکر نشان داد تیمارهای باکتری محرک رشد آثار مثبت مشابهی بر عملکرد کمی و کیفی نیشکر در دو واریته مورد بررسی داشتند. مقایسه دو واریته نیشکر نشان داد در حالی‌که ارتفاع نیشکر در تیمارهای مختلف در واریته CP73-21 بیشتر از CP69-1062 بود، با این حال عملکرد نیشکر در تیمارهای مختلف در واریته CP69-1062 بیشتر از واریته CP73-21 بود. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر سایر اجزای عملکرد از جمله وزن تک‌ساقه و تعداد ساقه در هکتار در عملکرد بیشتر واریته CP69-1062 نسبت به واریته CP73-21 است.

باکتری‌های محرک رشد گیاه مورد استفاده در این پژوهش،

تیمار B_{mix} و شاهد مشاهده نشد، با این حال، غلظت فسفر و مقدار فسفر در شاخساره نیشکر در تیمار B_{mix} به طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد بود. مقدار فسفر در شاخساره واریته‌های CP73-21 و CP69-1062 در تیمار B₃₃ به ترتیب ۳۶/۳ و ۳۲/۳ درصد و در تیمار B_{mix} به ترتیب ۱۵/۵ و ۱۴/۱ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود (جدول ۵). این نتایج نشان‌دهنده تأثیر بیشتر تیمار B₃₃ نسبت به تیمار B_{mix} در افزایش جذب فسفر در شاخساره نیشکر است. همچنین نتایج نشان داد مقدار فسفر در شاخساره در تیمارهای مختلف در واریته CP69-1062 بیشتر از واریته CP73-21 بود.

به طور کلی نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کارایی زیاد باکتری *Enterobacter cloacae* R33 در بهبود جذب فسفر در نیشکر بازروبی بود. مقایسه دو واریته مورد بررسی نشان داد که غلظت فسفر در شاخساره، وزن خشک و جذب فسفر در شاخساره در واریته CP73-21 بیشتر از واریته CP69-1062 بود. نتایج این پژوهش نشان داد مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد گیاه به‌ویژه تیمار B₃₃ در هر دو مزرعه مورد بررسی، سبب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر فراهم خاک شد (جدول ۳). بنابراین افزایش جذب فسفر در دو تیمار باکتری محرک رشد گیاه (به‌ویژه در تیمار B₃₃) را می‌توان، به افزایش معنی‌دار غلظت فسفر فراهم خاک در اثر کاربرد این دو تیمار نسبت داد. (Safirzadeh et al., 2019). پژوهشی در شرایط گلخانه‌ای تأثیر مایه‌زنی دو سویه باکتری محرک رشد گیاه (*Enterobacter cloacae*) بر رشد نیشکر (واریته CP57-614) را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد مایه‌زنی باکتری‌ها سبب افزایش جذب فسفر توسط گیاه شد. آن‌ها دریافتند مایه‌زنی *Enterobacter cloacae* R33 رفتار شیمیایی فسفر در ریزوسفر نیشکر (به‌ویژه در شرایط فراهمی کم فسفر در خاک) را تحت تأثیر قرار داده و احتمالاً با سازوکار کلاته کردن فسفر سبب افزایش جذب فسفر توسط نیشکر می‌شود (Safirzadeh et al., 2021). آن‌ها با بررسی اثر دو سویه باکتری *Enterobacter cloacae* بر جذب فسفر در نیشکر گزارش کردند استفاده از این باکتری به عنوان حل‌کننده فسفات در شرایط کمبود فسفر در خاک، مقدار جریان فسفر به درون ریشه و جذب فسفر

جدول ۶. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارها بر عملکرد کمی و کیفی دو واریته نیشکر

Table 6. Means comparison of the effect of treatments on qualitative and quantitative yield of two sugarcane varieties

میانگین مربعات Mean squares								درجه آزادی df	منابع تغییرات
واريته CP69-1062				واريته CP73-21					
عملکرد شکر Sugar yield	شکر قابل استحصال Recoverable sugar	عملکرد نیشکر Sugarcane yield	ارتفاع Height	عملکرد شکر Sugar yield	شکر قابل استحصال Recoverable sugar	عملکرد نیشکر Sugarcane yield	ارتفاع Height		
0.047 ^{ns}	0.031 ^{ns}	2.43 ^{ns}	14.3 ^{ns}	0.011 ^{ns}	0.014 ^{ns}	2.10 ^{ns}	4.31 ^{ns}	2	بلوک Block
1.725*	0.048 ^{ns}	41.9*	240.3*	0.533*	0.058 ^{ns}	28.5*	289.3*	2	تیمار Treatment
0.039	0.011	2.51	31.6	0.045	0.014	3.58	48.7	4	خطا Error
5.38	4.38	4.22	4.60	5.01	4.16	5.76	5.94		ضریب تغییرات CV (%)

ns, * and ** stand for non-significant and significant effects at the 5 and 1% probability levels, respectively.

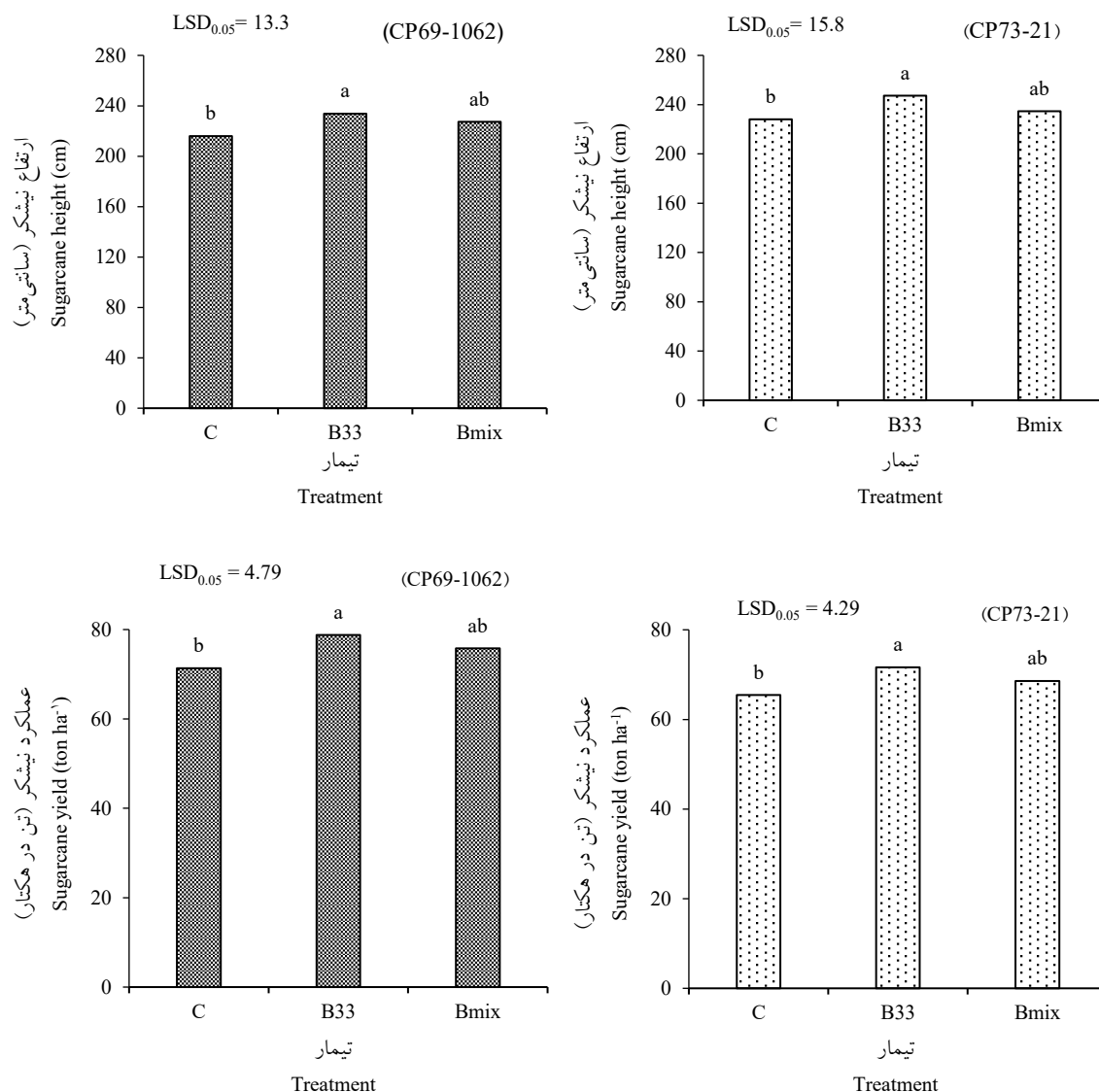
ns, * and ** stand for non-significant and significant effects at the 5 and 1% probability levels, respectively.

محرک رشد گیاه سبب بهبود تغذیه فسفر در نیشکر و افزایش تولید زیست‌توده و عملکرد آن می‌شود. (Sharma et al. 2023) با بررسی تأثیر مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد گیاه (دو سویه *Bacillus cereus* و *Pseudomonas fluorescens* PSB28 (PSB29) بر جذب فسفر در نیشکر در هندوستان گزارش کردند کاربرد هر دو سویه باکتری سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک برگ و ساقه شاخساره نیشکر شد.

کاربرد تیمارهای باکتری‌های محرک رشد گیاه اثر معنی‌داری بر درصد شکر قابل استحصال هر دو واریته نیشکر (CP73-21 و CP69-1062) نیشکر نداشتند (جدول ۶). درحالی‌که عملکرد شکر در هر دو تیمار مایه‌زنی باکتری محرک رشد گیاه، در هر دو واریته نیشکر بیشتر از تیمار شاهد بود. عملکرد شکر بازروی دوم واریته‌های CP73-21 و CP69-1062 در تیمار B₃₃ به‌ترتیب ۱۲/۳ و ۱۲/۶ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود (شکل ۲). مقایسه دو واریته نیشکر نشان داد که عملکرد شکر در تیمارهای مختلف در واریته CP69-1062 بیشتر از واریته CP73-21 بود.

فسفر یکی از عناصر غذایی پرمصرف و ضروری برای رشد

توانایی تولید هورمون اکسین را داشتند (لامی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶) که این هورمون‌ها توسعه ریشه را تحت تأثیر قرار داده و سبب افزایش طول ریشه و تشکیل ریشه‌های موئین می‌شوند؛ در نتیجه این می‌تواند سبب افزایش سطح جذب و در نهایت افزایش جذب فسفر از خاک توسط گیاه گردد (Hasan et al., 2024). به‌احتمال زیاد افزایش توسعه ریشه یکی از دلایل افزایش جذب فسفر در تیمارهای مایه‌زنی‌شده با باکتری‌های محرک رشد گیاه (به‌ویژه *Enterobacter cloacae* R33) در این پژوهش باشد. حرکت فسفر در خاک به‌دلیل پخشیدگی بسیار کند بوده و تنها در نزدیکی ریشه امکان جذب فسفر وجود دارد. با وجود این افزون بر سازوکار افزایش توسعه ریشه، تولید اسیدهای آلی و ترکیبات آلی توسط باکتری‌های محرک رشد گیاه، می‌تواند تحرک فسفر را افزایش داده و سبب شود تا در فواصل دورتر از ریشه نیز قابلیت جذب فسفر وجود داشته باشد. نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیشین (de Oliveira et al., 2022; Zambrosi, 2021) مشابه بود که گزارش کردند در مزارع بازروی نیشکر در خاک‌هایی با فراهمی کم فسفر، کاربرد باکتری‌های

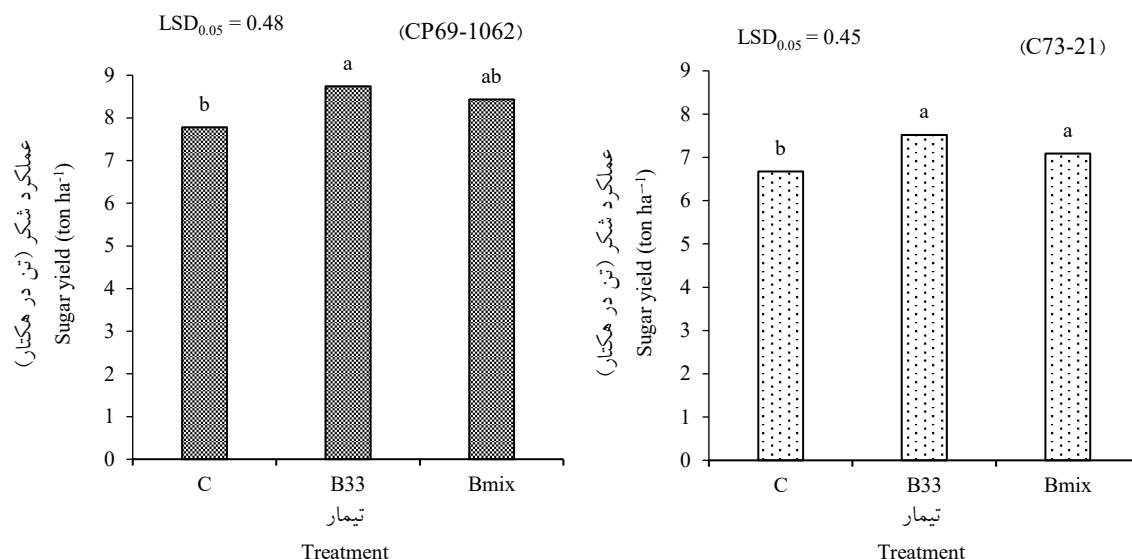


شکل ۱. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر ارتفاع و عملکرد دو واریته نیشکر مورد بررسی. میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند. C، B₃₃ و B_{mix} به ترتیب شاهد (بدون مایه‌زنی باکتری)، مایه‌زنی باکتری *Enterobacter cloacae* R33 و مایه‌زنی ترکیبی باکتری‌های *Enterobacter cloacae* R33، *Staphylococcus hominis* 9E و *Brevundimonas* sp. هستند.

Fig. 1. Means comparison of the effect of treatments on height and yield of two studied sugarcane varieties. Means with similar letter(s) are not significantly different according to the LSD test ($P < 0.05$). C, B₃₃ and B_{mix} are control (without bacterial inoculation), *Enterobacter cloacae* R33 inoculation and *Enterobacter cloacae* R33, *Staphylococcus hominis* E9 and *Brevundimonas* sp. inoculation treatments, respectively.

بازرویی نیشکر با کاهش فراهمی فسفر برای گیاه و کاهش جذب آن در نیشکر، به دلیل عدم تأمین فسفر مورد نیاز گیاه، کاهش می‌یابد (Zambrosi, 2021; da Costa et al. 2023). بنابراین یکی از دلایل افزایش عملکرد نیشکر در تیمار باکتری‌های محرک رشد گیاه به‌ویژه تیمار B₃₃ می‌تواند افزایش معنی‌دار غلظت فسفر

و عملکرد نیشکر است. فسفر به‌عنوان یک عنصر غذایی کلیدی نقش مهمی در فرآیندهای بیوشیمیایی نیشکر، توسعه ریشه و افزایش عملکرد ساقه نیشکر دارد (Borges, 2020; da da Costa et al., 2023; Rosa et al., 2022; Tarumoto et al., 2022). نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که رشد و عملکرد مزارع



شکل ۲. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر عملکرد شکر در دو واریته نیشکر مورد بررسی. میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند. C، B₃₃ و B_{mix} به ترتیب تیمارهای شاهد (بدون مایه‌زنی باکتری)، مایه‌زنی باکتری *Enterobacter cloacae* R33 و مایه‌زنی ترکیبی باکتری‌های *Enterobacter cloacae* R33، *Staphylococcus hominis* 9E و *Brevundimonas* sp. هستند.

Fig. 2. Means comparison of the effect of treatments on sugar yield in two studied sugarcane varieties. Means with similar letter(s) are not significantly different according to the LSD test ($P < 0.05$). C, B₃₃ and B_{mix} are control (without bacterial inoculation), *Enterobacter cloacae* R33 inoculation and *Enterobacter cloacae* R33, *Staphylococcus hominis* E9 and *Brevundimonas* sp. inoculation treatments respectively.

واریته RB92579)، گزارش کردند مایه‌زنی باکتری‌ها سبب افزایش معنی‌دار عملکرد نیشکر شد، بدین ترتیب که مایه‌زنی سویه‌های *Azospirillum brasilense*، *Bacillus subtilis* و *Pseudomonas fluorescens* عملکرد نیشکر را به ترتیب ۵/۷، ۵/۷ و ۱۰/۱ درصد افزایش داد، در حالی که کاربرد ترکیبی سه سویه باکتری، اثر معنی‌داری بر عملکرد نیشکر نداشت. به طور مشابه (Aguado-Santacruz et al., 2024) نیز افزایش ارتفاع و عملکرد دو واریته نیشکر (NCO 310 و Mex 57-473) (کشت جدید تا بازرویی سوم) را در اثر مایه‌زنی باکتری محرک رشد گیاه مکزیکی گزارش کردند. (Lopes et al., 2021) نیز با بررسی تأثیر باکتری *Bacillus* sp. بر عملکرد کمی و کیفی نیشکر گزارش کردند که تأثیر این باکتری بر درصد شکر قابل استحصال (RS) از نظر آماری معنی‌دار نبود. (Aye et al., 2022) نیز با بررسی تأثیر مایه‌زنی باکتری محرک رشد گیاه سویه *Bacillus subtilis* بر شاخص‌های کیفی عملکرد نیشکر در تایلند گزارش کردند

فراهم خاک، جذب فسفر در گیاه و بهبود تغذیه فسفر در نیشکر باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت کاربرد باکتری محرک رشد گیاه سویه *Enterobacter cloacae* R33 می‌تواند در رفع نیاز تغذیه‌ای فسفر در نیشکر بازرویی دوم و بهبود عملکرد آن مؤثر باشد. همچنین تولید هورمون‌های محرک رشد گیاه، بهبود توسعه ریشه گیاه و به دنبال آن بهبود جذب آب و عناصر غذایی، افزایش فراهمی سایر عناصر غذایی و جذب آن‌ها توسط گیاه از راه ترشح متابولیت‌های مختلف، از دیگر سازوکارهای باکتری‌های محرک رشد گیاه در افزایش عملکرد نیشکر است (Aguado-Santacruz et al., 2024; de Andrade et al., 2023;) (Sharma et al., 2023). به طور مشابه (Rosa et al., 2022) با بررسی تأثیر مایه‌زنی سویه‌های مختلف باکتری‌های محرک رشد گیاه شامل *Azospirillum brasilense*، *Bacillus subtilis*، *Pseudomonas fluorescens* و کاربرد ترکیبی آن‌ها به روش اسپری کردن خاک بر عملکرد کمی و کیفی نیشکر (کشت جدید

خوزستان، در مزارع با سن بازرویی دوم و بیشتر، استفاده از توانایی میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفر برای بهبود تغذیه فسفر در نیشکر و تأمین فسفر مورد نیاز آن و به‌دنبال آن بهبود عملکرد نیشکر، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. البته پیش از کاربرد این باکتری‌ها در مزرعه در سطح وسیع، نیاز است که از غیربیماری‌زا بودن سویه‌های باکتری (برای گیاه، جانوران و انسان) اطمینان حاصل شود و گواهی و تأییدیه مربوطه دریافت شود.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان و کشت و صنعت دعبل خزاعی خوزستان برای حمایت مالی و مساعدت در مراحل مختلف اجرای این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

مایه‌زنی باکتری سبب اثر معنی‌داری بر درصد شکر قابل استحصال (RS) نداشت. با توجه به این‌که در این پژوهش تفاوت معنی‌داری بین مقادیر شکر قابل استحصال در تیمارهای مختلف وجود نداشت، می‌توان گفت که اثر تیمارهای باکتری محرک رشد گیاه بر عملکرد شکر، به‌طور معمول به‌دلیل اثر آن‌ها بر عملکرد کمی نیشکر بود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان‌دهنده تأثیر مثبت و معنی‌دار مایه‌زنی باکتری *Enterobacter cloacae* R33 در مزارع بازرویی دوم نیشکر، بر غلظت فسفر فراهم خاک، فعالیت میکروبی خاک، جذب فسفر در نیشکر و همچنین عملکرد کمی و کیفی نیشکر بود. به‌طور کلی با توجه به اهمیت تغذیه فسفر و پیامدهای منفی ناشی از کمبود فسفر در مزارع بازرویی و براساس نتایج این پژوهش می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاربرد *Enterobacter cloacae* R33 می‌تواند در بهبود عملکرد نیشکر (وارته‌های CP73-21 و CP69-1062) در سن بازرویی دوم مؤثر باشد. بنابراین با توجه به غلظت زیاد فسفر کل در اغلب مزارع نیشکر

References

منابع مورد استفاده

1. Aguado-Santacruz, G.A., Arreola-Tostado, J.M., Aguirre-Mancilla, C., García-Moya, E., 2024. Use of systemic biofertilizers in sugarcane results in highly reproducible increments in yield and quality of harvests. *Heliyon* 10(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28750>.
2. de Andrade, L.A., Santos, C.H.B., Frezarin, E.T., Sales, L.R., Rigobelo, E.C., 2023. Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms* 11(4), 1088. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>.
3. Aye, P.P., Pinjai, P., Tawornpruek, S., 2021. Effect of phosphorus solubilizing bacteria on soil available phosphorus and growth and yield of sugarcane. *Walailak J. Sci. Technol. (WJST)*. 18(12), 10754-9. <https://doi.org/10.48048/wjst.2021.10754>.
4. Bahadori, A., Gharineh, M.H., Bakhshandeh, A., Enayatizamir, N., Shafeinia, A., 2021. The effect of plant growth promoting rhizobacteria in reducing nitrogen and phosphorus fertilizers application in sugarcane. *Plant Arch.* 21(1), 1130-1137. <https://doi.org/10.51470/Plantarchives.2021.v21.no1.149>.
5. Borges, B.M., Strauss, M., Camelo, P.A., Sohi, S.P., Franco, H.C., 2020. Re-use of sugarcane residue as a novel biochar fertiliser - Increased phosphorus use efficiency and plant yield. *J. Clean. Prod.* 262, 121406. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121406>.
6. Carter M.R. and Gregorich, E.G., 2008. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, 1204 pp. <https://doi.org/10.1201/9781420005271>.
7. Cheng, Y., Narayanan, M., Shi, X., Chen, X., Li, Z., Ma, Y., 2023. Phosphate-solubilizing bacteria: Their agroecological function and optimistic application for enhancing agro-productivity. *Sci. Total Environ.* 901, 166468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166468>.
8. Batista da Costa, D., Freire, F.J., de Andrade, J.J., da Silva, S.R.V., dos Santos, R.L., Santos, H.C., de Oliveira, A.C.,

- Simões Neto, D.E., 2023. Phosphorus agronomic efficiency index under different fertilizer application methods in two cycles of sugarcane cultivated in tropical soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 54(17), 2376–2393. <https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2223570>.
9. de Oliveira, C.L.B., Cassimiro, J.B., Lira, M.V.D.S., Boni, A.D.S., Donato, N.D.L., Reis Jr, R.D.A., Heinrichs, R., 2022. Sugarcane ratoon yield and soil phosphorus availability in response to enhanced efficiency phosphate fertilizer. *Agronomy* 12(11), 2817. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112817>.
10. Estrada-Bonilla, G.A., Durrer, A., Cardoso, E.J., 2021. Use of compost and phosphate-solubilizing bacteria affect sugarcane mineral nutrition, phosphorus availability, and the soil bacterial community. *Appl. Soil Ecol.* 157, 103760. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103760>.
11. Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., Khan, N., 2024. Role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as a plant growth enhancer for sustainable agriculture: A review. *Bacteria.* 3(2), 59–75. <https://doi.org/10.3390/bacteria3020005>.
12. Islam, M., Siddique, K.H., Padhye, L.P., Pang, J., Solaiman, Z.M., Hou, D., Srinivasarao, C., Zhang, T., Chandana, P., Venu, N., Prasad, J.V.N.S., 2024. A critical review of soil phosphorus dynamics and biogeochemical processes for unlocking soil phosphorus reserves. *Adv. Agron.* 185, 153–249. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.02.004>.
13. Jenkinson, D. S., Ladd, J. N. 1981. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. *Soil Biochem.* 5(1), 415–471.
14. Karimi, A., Zakavi, N., Safirzadeh, S., Noroozi, H., Ariz, A., 2024. Evaluation of sugarcane nutritional status by deviation from optimum percentage (DOP) method in Khuzestan province. *Iranian J. Soil Water Res.* 55(3), 449–466. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.371718.669657>. (In Persian with English abstract)
15. Kumar, A., and Verma, J.P., 2019. The role of microbes to improve crop productivity and soil health. In: Achal, V., Mukherjee, A. (Eds.), *Ecological Wisdom Inspired Restoration Engineering*. Springer, Singapore, pp. 249–265. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0149-0_14.
16. Lamizadeh, E., Enayatizamir, N., Motamedi, H., 2016. Isolation and identification of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) from the rhizosphere of sugarcane in saline and non-saline soil. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 5(10), 1072–83. <https://doi.org/10.20546/ijemas.2016.510.113>.
17. Li, H.P., Han, Q.Q., Liu, Q.M., Gan, Y.N., Rensing, C., Rivera, W.L., Zhao, Q., Zhang, J.L., 2023. Roles of phosphate-solubilizing bacteria in mediating soil legacy phosphorus availability. *Microbiol. Res.* 272, 127375. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127375>.
18. Liu, F., Qian, J., Zhu, Y., Wang, P., Hu, J., Lu, B., He, Y., Tang, S., Shen, J., Liu, Y., Li, F., 2024. Phosphate solubilizing microorganisms increase soil phosphorus availability: A review. *Geomicrobiol. J.* 41(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2272620>.
19. Lopes, C.M., Silva, A.M.M., Estrada-Bonilla, G.A., Ferraz-Almeida, R., Vieira, J.L.V., Otto, R., Vitti, G.C., Cardoso, E.J.B.N., 2021. Improving the fertilizer value of sugarcane wastes through phosphate rock amendment and phosphate-solubilizing bacteria inoculation. *J. Clean. Prod.* 298, 126821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126821>.
20. Nassef, K., Sahli, A., Bouhdid, S., Mezzoug, N., Abrini, J., Khay, E.O., 2025. Phosphate solubilizing microorganisms and their use in sustainable agriculture: A review. *Geomicrobiol. J.* 42(3), 224–243. <https://doi.org/10.1080/01490451.2025.2457660>.
21. Motsara, M.R. 2015. *Guide to Laboratory Establishment for Plant Nutrient Analysis*. Scientific Publishers.
22. Pan, L., Cai, B., 2023. Phosphate-solubilizing bacteria: advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects. *Microorganisms* 11(12), 2904. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122904>.
23. Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D., Shankhdhar, S.C., 2021. Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 21(1), 49–68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>.
24. Rezaeinasab F., Enayatizamir N., Zalaghi R., Moradi, N., 2020. Impact of phosphate solubilizing microorganisms on mineral and organic forms of phosphorus and its availability in soil under maize (*Zea mays* L.) cultivation. *Appl. Soil Res.* 9(1), 102–116. (In Persian with English abstract)
25. Rosa, P.A.L., Galindo, F.S., Oliveira, C.E.D.S., Jalal, A., Mortinho, E.S., Fernandes, G.C., Marega, E.M.R., Buzetti, S., Teixeira Filho, M.C.M., 2022. Inoculation with plant growth-promoting bacteria to reduce phosphate fertilization requirement and enhance technological quality and yield of sugarcane. *Microorganisms* 10(1), 192. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010192>.
26. Rouydel, Z., Barin, M., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Khezri, M., Vetukuri, R.R., Kushwaha, S., 2021. Harnessing the potential of symbiotic endophytic fungi and plant growth-promoting rhizobacteria to enhance soil quality in saline soils. *Processes* 9(10), 1810. <https://doi.org/10.3390/pr9101810>.
27. Safirzadeh, S., Chorom, M., Enayatizamir, N., 2019. Effect of phosphate solubilising bacteria (*Enterobacter cloacae*) on phosphorus uptake efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Soil Res.* 57(4), 333–341. <https://doi.org/10.1071/SR18128>.

28. Safirzadeh, S., Chorom, M., Enayatizamir, N., 2021. Speciation and fractionation of phosphorus affected by enterobacter cloacae in the rhizosphere of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). J. Soil Sci. Plant Nutr. 21, 187–199. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00352-5>.
29. Safirzadeh, S., Karimi, A., Ariz, A., 2023. Comparison of phosphorus uptake efficiency and effective mechanisms in commercial varieties of sugarcane. Iran. J. Soil Water Res. 54(8): 1179–1196. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.359325.669502>. (In Persian with English abstract)
30. Santos H.L., Silva G.F.D., Carnietto M.R.A., Oliveira L.C., Nogueira C.H.D.C., Silva M.D.A., 2022. *Bacillus velezensis* associated with organomineral fertilizer and reduced phosphate doses improves soil microbial—chemical properties and biomass of sugarcane. Agronomy 12(11), 2701. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112701>.
31. Sharma, L., Shukla, S.K., Jaiswal, V.P., Gaur, A., 2023. Novel Strains of *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus cereus* and their integrated use with inorganic fertilizers enhancing P availability, crop growth parameters, and sugarcane yield in subtropical India. Sugar Tech. 25(6), 1467–1485. <https://doi.org/10.1007/s12355-023-01299-4>.
32. Tarumoto, M.B., de Campos, M., Momesso, L., do Nascimento, C.A.C., Garcia, A., Coscolin, R.B.D.S., Martello, J.M., Crusciol, C.A.C., 2022. Carbohydrate partitioning and antioxidant substances synthesis clarify the differences between sugarcane varieties on facing low phosphorus availability. Front. Plant Sci. 13, 888432. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.888432>.
33. Zambrosi, F.C.B., 2021. Phosphorus fertilizer reapplication on sugarcane ratoon: opportunities and challenges for improvements in nutrient efficiency. Sugar Tech. 1–5. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00925-9>.
34. Zhu, J., Li, M., Whelan, M., 2018. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. Sci. Total Environ. 612, 522–537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.095>.