

Studying the Effect of Microbial Inoculation on Phosphorus Solubility and some Growth Indices of Maize (*Zea mays L.*) Plants

Masoumeh Hosseini^{1*}, Mohsen Barin², Mirhassan Rasouli-Sadaghiani³, Farrokh Asadzade⁴, Jafar Sufian⁵

(Received: April, 2025

Accepted: , July, 2025)

Abstract

Given the importance of corn as a crop and the potential of highly efficient indigenous microorganisms for producing inoculants and utilizing low-soluble and insoluble phosphate mineral resources, a study was conducted to investigate the effect of microbial inoculants on phosphorus solubility and selected growth and nutritional characteristics of corn. The study used a completely randomized design with six treatments: phosphorus chemical fertilizer of triple superphosphate type at the recommended rate (1.8 g per pot), biofertilizer at the recommended rate (1.8 g per pot, based on the optimal amount determined by MINITAB software), biofertilizer at twice the recommended rate, chemical fertilizer (50%) plus biofertilizer, chemical phosphorus fertilizer (25%) plus biofertilizer, and a control (no fertilizer), each with three replications. At the end of the growing season, growth indices, plant yield, and other desired traits were measured. The results showed that the highest shoot height (130.9 cm) occurred in the biofertilizer treatment at twice the recommended amount, the highest stem diameter index (7.63 cm) in the combined treatment of 50% chemical fertilizer and biofertilizer, and the highest plant dry weight (4.7 g per pot) in the biofertilizer treatment at the recommended rate. The effect of fertilizer treatments was significant for total nitrogen content ($p < 0.05$), phosphorus concentration ($p < 0.001$), and potassium concentration ($p < 0.01$). The highest absorption rates of zinc and manganese in the phosphorus chemical fertilizer and biofertilizer at the recommended rate were 2.75 and 2.2 times higher than the control, respectively. The effect of fertilizer sources was significant for basal respiration rate at the surface ($p < 0.001$) and microbial biomass carbon at the surface ($p < 0.05$). For most measured traits, there was no significant difference between the chemical phosphorus fertilizer treatments and the biological fertilizer. Therefore, microbial phosphorus fertilizers have the potential to increase plant growth indices.

Keywords: Biofertilizer, Macronutrients, Microbial inoculation, Microorganisms

Hosseini M., Barin M., Rasouli-Sadaghiani MH, Asadzade F., Soufian J. 2024. Investigation of the effect of microbial inoculation on phosphorus solubility and some growth indices of corn (*Zea mays L.*). *Applied Soil Research*. 13(4), 85-104

1. Master of Science in Soil Biology and Biotechnology, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Urmia, Urmia, Iran.

2, 3, 4. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University.

5. PhD student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Corresponding Author: roya70.hosseini@gmail.com

بررسی تأثیر تلقیح میکروبی بر حلالیت فسفر و برخی شاخص‌های رشدی گیاه ذرت (*Zea mays* L.)

معصومه حسینی^{۱*}، محسن برین^۲، میرحسن رسولی صدقیانی^۲، فرخ اسدزاده^۲ و جعفر صوفیان^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱)

(تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱)

چکیده

با توجه به اهمیت محصول ذرت و توان بالقوه میکروارگانسیم‌های بومی با کارایی بالا برای تولید مایه تلقیح و استفاده از منابع معدنی کم‌محلول و نامحلول فسفات، مطالعه‌ای با هدف بررسی تأثیر تلقیح میکروبی بر حلالیت فسفر و برخی ویژگی‌های رشدی و تغذیه‌ای ذرت انجام شد. این مطالعه در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۶ تیمار شامل (کود شیمیایی فسفره از نوع سوپر فسفات تریپل برابر توصیه (به میزان ۱/۸ گرم برای هر گلدان)، کود زیستی برابر توصیه (بر اساس مقدار توصیه شده که مقدار بهینه بدست آمده بر اساس نرم‌افزار MINITAB به میزان ۱/۸ گرم برای هر گلدان)، کود زیستی ۲ برابر توصیه، کود شیمیایی (۵۰٪) + کود زیستی، کود شیمیایی فسفره (۲۵٪) + کود زیستی و شاهد (بدون کود) در ۳ تکرار اجرا گردید. در پایان فصل رشد، شاخص‌های رشد، عملکرد گیاه و سایر صفات مورد نظر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد بیش‌ترین ارتفاع اندام هوایی (۱۳۰/۹ سانتی‌متر) در تیمار کود زیستی دو برابر توصیه، بیش‌ترین میزان شاخص قطر ساقه (۷/۶۳ سانتی‌متر) در تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی و کود زیستی و بیش‌ترین وزن خشک گیاه در تیمار کود زیستی برابر توصیه (۴/۷ گرم در گلدان) بود. همچنین اثر تیمارهای کودی بر میزان نیتروژن کل گیاه ($p < 0.05$)، غلظت فسفر ($p < 0.001$)، و نیز غلظت پتاسیم ($p < 0.01$) معنی‌دار بود. بیش‌ترین میزان جذب عنصر روی و منگنز در تیمار کود شیمیایی فسفره و کود زیستی برابر توصیه به ترتیب ۲/۷۵ و ۲/۲ برابر نسبت به تیمار شاهد بالاتر بود. اثر منابع کودی بر میزان تنفس پایه در سطح ($p < 0.001$) و بر کربن زیست توده میکروبی در سطح ($p < 0.05$) معنی‌دار بود. در بیشتر صفات مورد اندازه‌گیری اختلاف معنی‌داری مابین تیمارهای کودی شیمیایی فسفره و کود زیستی وجود نداشت. لذا می‌توان بیان داشت که کودهای میکروبی فسفره از قابلیت بالقوه‌ای در جهت افزایش شاخص‌های رشدی گیاهان برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: تلقیح میکروبی، عناصر پرمصرف، کود زیستی، میکروارگانسیم

حسینی م، برین م، صوفیان ج. ۱۴۰۴. بررسی تأثیر تلقیح میکروبی بر حلالیت فسفر و برخی شاخص‌های رشدی گیاه ذرت (*Zea mays* L.). تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۳، شماره ۴، ۸۵-۱۰۴

۱- کارشناسی ارشد بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳- دانشجوی دکتری، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

نویسنده مسئول: roya70.hosseini@gmail.com

مقدمه

فسفر از عناصر ضروری و پرمصرف بوده و به دو شکل آلی و معدنی در خاک یافت می‌شود و مقدار کل آن بین ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر است (Fang *et al.*, 2023). با توجه به فراوانی نسبی برخی از عناصر غذایی مانند فسفر در خاک‌های آهکی، مقدار قابل جذب این عناصر در بسیاری از موارد کمتر از مقدار لازم برای تأمین رشد مناسب گیاه است. در خاک‌های قلیایی، تثبیت فسفر توسط کلسیم، باعث کاهش کارایی کودهای فسفر محلول می‌شود (Betyar *et al.*, 2023). ریزجانداران حل‌کننده فسفات گروهی از ریزجانداران مفید هستند که قادرند ترکیبات نامحلول معدنی و آلی فسفر را به ترکیبات محلول تبدیل کنند و به رده، جنس و گونه خاصی اطلاق نمی‌گردند. این ریزجانداران عمدتاً به دو گروه باکتری و قارچ‌های حل‌کننده فسفات تقسیم می‌شوند و با آزاد کردن اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم و نیز اسیدهای معدنی منجر به انحلال ترکیبات معدنی نامحلول فسفات می‌شوند (Timofeeva *et al.*, 2022). مهم‌ترین قارچ‌های حل‌کننده فسفات از جنس (*Aspergillus*) و برخی گونه‌های (*Penicillium*) می‌باشند که نسبت به باکتری‌ها، نقش مؤثرتری در انحلال فسفات را ایفا می‌کنند (Rasouli Sadaghiani *et al.*, 2019). توانایی قارچ‌ها به دلیل داشتن ساختار هیف مانند و گسترش در عمق بیشتری از خاک بیش از باکتری‌ها است. قارچ‌ها به‌واسطه تولید اکسین، سیدروفور و سیانید هیدروژن نیز می‌توانند منجر به بهبود رشد گیاه شوند (Mushtaq *et al.*, 2025). قارچ آسپرژیلوس از جمله قارچ‌های ساپروفیت و فرصت‌طلب می‌باشد که اسپور آن در هوا پراکنده بوده و باعث آلودگی محیط‌کشت و مواد غذایی می‌شود. از مهم‌ترین گونه‌های آسپرژیلوس می‌توان به *آسپرژیلوس فلاووس*، *فومیگاتوس*، *نایجر*، *تریوس*، *نیدولانس* و *رسترکنپوس* اشاره نمود (Cho *et al.*, 2022). قارچ آسپرژیلوس با ترشح اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک، اسید گلوکونیک، اسید اگزالیک، اسید مالیک و اسید لاکتیک موجب کاهش pH خاک می‌شود. این اسیدها از طریق کاهش pH منطقه ریزوسفر و کلات نمودن یون‌های آلومینیم و کلسیم موجود در خاک‌های

اسیدی و قلیایی، منجر به افزایش فسفر قابل دسترس می‌شوند (Rasouli Sadaghiani *et al.*, 2019). قارچ آسپرژیلوس آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی تولید می‌کند که فسفر آلی را از مواد آلی آزاد می‌کنند. آنزیم فیتاز نیز فسفات را از ترکیبات فیتاته (که در بقایای گیاهی و مواد آلی یافت می‌شود) آزاد می‌کند. برخی از متابولیت‌های تولید شده توسط آسپرژیلوس می‌توانند به‌عنوان کلات‌کننده عمل کرده و یون‌های فلزی را که با فسفات ترکیب شده‌اند، جدا کنند و در نتیجه، فسفات را در محیط خاک آزاد سازند (Wang *et al.*, 2022). با افزایش فسفر قابل جذب، قارچ آسپرژیلوس به‌صورت غیرمستقیم موجب بهبود رشد ریشه، افزایش جذب مواد مغذی و تقویت سیستم ایمنی گیاه می‌شود (Kumar & Prasher, 2023). کود زیستی یکی از بهترین راه‌کارهای استفاده از توانایی بالقوه قارچ‌های حل‌کننده فسفات است. کودهای میکروبی به نوعی از کودهای زیستی اطلاق می‌گردد که در آن‌ها از میکروارگانیسم‌ها در بستری از مواد آلی-معدنی استفاده می‌شود. علیزاده و همکاران (Alizadeh *et al.*, 2020) مشاهده کردند در بزرک و باقلا کاربرد ترکیبی قارچ و کود زیستی باکتریایی نسبت به مقدار مصرف، بیشترین تأثیر را در افزایش جذب عناصر غذایی پرمصرف (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم و افزایش غلظت کلروفیل برگ) داشت. نتایج مطالعات اشکیود (Ashkyoud, 2023) نشان داد بین گیاهان و تیمارهای کودی از لحاظ عملکرد اندام هوایی (SDW)، غلظت فسفر (PC)، مقدار فسفر کل گیاه (TP²)، کارایی جذب فسفر (PACE) و مصرف فسفر (PUTE) اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در بین تیمارهای تلقیحی، تلقیح قارچ‌های حل‌کننده فسفات نسبت به سایر تیمارهای میکروبی تأثیر بیشتری بر عملکرد اندام هوایی در گیاهان، داشت. بطوری که عملکرد اندام هوایی در این تیمار در گیاه گندم و جو (با میانگین ۳/۸ گرم ماده خشک) نسبت به شاهد (با میانگین ۲/۵ گرم ماده خشک) بیشتر بود. در بین شاخص‌های کارایی فسفر، کارایی جذب این عنصر در تلقیح با قارچ‌های حل‌کننده فسفات در گندم (با مقدار ۰/۸۵) نسبت به جو (با مقدار ۰/۴۸) بالاتر بود. رسولی صدقیانی و همکاران (Rasouli Sadaghiani *et al.*, 2020) در پژوهشی توزیع شکل‌های

کودهای شیمیایی فسفات‌ها باشد، که هم از نظر اقتصادی برای کشاورزان و هم از نظر حفظ سلامت محیط زیست حائز اهمیت است.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی مایه تلقیح

قارچ *Aspergillus sp* مورد استفاده از بانک میکروبی گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه تهیه شد. قارچ *Aspergillus* جهت تکثیر در محیط کشت PDA³ به مدت حدود ۹۶ ساعت کشت و در دمای ۲۸ درجه سلسیوس انکوبه شد و بعد از حدود ۵ روز اسپورزایی، اسپورها با مقدار ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل با اسپاتول، طوری که محیط کشت آسیب نبیند، به آرامی از سطح محیط کشت جدا شدند. سپس این سوسپانسیون به پلیت دیگر انتقال داده شده و مشابه پلیت قبلی عمل شد و در نهایت سوسپانسیون به لوله فالکن استریل منتقل و تعداد اسپور با لام نئوبار شمارش گردید (Li et al., 2017). جمعیت اسپور قارچ با استفاده از لام نئوبار (hemocytometer) شمارش شد. به این صورت که پس از شمارش و تعیین غلظت اسپورها در صورت کم‌تر یا بیشتر بودن از جمعیت هدف ۱۰^۷ سوسپانسیون غلیظ یا رقیق‌تر شد (Greenfield, 2019). به منظور تهیه کود میکروبی فسفات‌ها جهت استفاده در کشت گلدانی از بستر بهینه شده استفاده شد. به این صورت که به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی اثرات سطوح مختلف ورمی کمپوست، سنگ فسفات و گوگرد موجود در کود زیستی، به‌عنوان متغیرهای مستقل، بر قابلیت انحلال فسفر، به‌عنوان متغیر وابسته، طرح مرکب مرکزی مورد استفاده قرار گرفت. در این روش دامنه‌های متفاوتی از این سه متغیر شامل ورمی‌کمپوست (۵۰-۵ درصد)، گوگرد (۳۰-۰ درصد) و سنگ فسفات (۸۰-۲۰ درصد) در نظر گرفته شده و به صورت کدبندی شده در محدوده +۱ تا -۱ براساس مقادیر واقعی و همچنین مقادیر کد شده (+۱، +α، ۰، -α، -۱) که در جدول (۱) ارائه شدند، به نرم افزار MINITAB معرفی شد. کدبندی مقادیر واقعی متغیرها با استفاده از رابطه (۱) انجام شد.

$$X_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x_i} \quad (\text{رابطه ۱})$$

فسفر در خاک آهکی تلقیح‌شده با قارچ‌های حل‌کننده فسفات را بررسی کردند؛ نتایج نشان داد تلقیح قارچی باعث تغییرات معنی‌داری در میزان فسفر قابل استفاده، فسفر آلی و فسفر معدنی شد. در پایان انکوباسیون، مقدار فسفر قابل دسترس، فسفر آلی، دی کلسیم فسفات (Ca₂-P) و آپاتیت (Ca₁₀-P) در تیمار تلقیح قارچی در مقایسه با تیمار شاهد افزایش نشان دادند. مشکلات جذب فسفر در خاک‌های آهکی به دلیل ویژگی‌های شیمیایی این نوع خاک‌ها ایجاد می‌شود. خاک‌های آهکی معمولاً دارای pH بالا و غنی از کربنات کلسیم (CaCO₃) هستند که این شرایط منجر به واکنش‌های شیمیایی می‌شود که قابلیت دسترسی فسفر برای گیاهان را به شدت کاهش می‌دهد. استفاده از ریزجانداران خاکی که توانایی انحلال فسفات‌ها و تبدیل آن به فسفر محلول را دارند، یکی از راه‌های مؤثر برای افزایش قابلیت جذب فسفر در خاک‌ها می‌باشد (Barin et al., 2019). تلقیح میکروبی بویژه تلقیح قارچی میزان جذب فسفر را از سنگ فسفات توسط گیاه افزایش داده و در نتیجه فسفرکارایی گیاهان را بطور معنی‌داری افزایش می‌دهد. لذا استفاده از سنگ فسفات به همراه تلقیح میکروبی بویژه تلقیح با قارچ‌های حل‌کننده فسفات در راستای تأمین نیاز فسفوری گیاهان می‌تواند پس از راستی آزمایی در آزمایشات مزرعه‌ای کاربردی باشد (Timofeeva et al., 2022). با توجه به اهمیت روزافزون ذرت به‌عنوان دومین محصول زراعی پرکشت در جهان و نیاز مبرم به افزایش تولید آن برای تأمین تقاضای رو به رشد، اتخاذ رویکردهای مدیریتی نوین و کارآمد در جهت بهبود کیفیت، شاخص‌های رشدی و وضعیت تغذیه‌ای این محصول استراتژیک از اهمیت بسزایی برخوردار است. مطالعه حاضر در این راستا و با هدف بررسی دقیق و جامع تأثیر تلقیح میکروبی بر مکانیسم حلالیت فسفر در خاک و پیامدهای آن بر طیف وسیعی از ویژگی‌های رشدی و تغذیه‌ای گیاه ذرت انجام شده است. این تحقیق به دنبال ارائه راهکارهای نوینی است که با بهره‌گیری از پتانسیل میکروارگانیزم‌های مفید خاک، ضمن افزایش کارایی جذب فسفر - عنصری کلیدی در رشد و توسعه گیاه - به بهبود کلی عملکرد و کیفیت محصول ذرت منجر شود. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند مبنایی برای توسعه استراتژی‌های کشاورزی پایدار و کاهش وابستگی به

در این رابطه X_i ، X_0 و x_0 به ترتیب نشان‌دهنده مقدار گذشته متغیر، مقدار واقعی هر متغیر و میانگین دامنه هر متغیر است. Δx نیز مقدار تغییر گام (Step Change) هر پارامتر می‌باشد.

جدول ۱- دامنه مقادیر آزمایشی متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی

Table 1. Range of experimental values of variables used in modeling

Independent variable	Factor		Domain & values			
	X_i	+1	+ α	0	α -	-1
Organic matter (g)	x_1	50	40.9	27.5	14.1	5
Sulfur (g)	x_2	30	23.9	15	6.1	0
Phosphate rock (g)	x_3	80	67.8	50	32.2	20

اندازه‌گیری شد و سپس در کشت گلدانی مورد استفاده قرار گرفتند.

آزمایش گلخانه‌ای

این مطالعه به صورت طرح کاملاً تصادفی در ۶ تیمار و ۳ تکرار در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه اجرا گردید. تیمارهای کودی مورد نظر که شامل کود شیمیایی فسفر برابر توصیه از نوع سوپر فسفات تریپل بر اساس مقدار توصیه شده مؤسسه تحقیقات خاک و آب ایران به مقدار ۱/۸ گرم برای هر گلدان (کنترل مثبت)، بدون کود (کنترل منفی)، کود میکروبی برابر با توصیه (۱/۸ گرم برای هر گلدان) (بهینه بدست آمده بر اساس نرم‌افزار MINITAB)، کود میکروبی دو برابر توصیه (۳/۶ گرم برای هر گلدان)، کود شیمیایی فسفره برابر ۵۰٪ توصیه (۰/۹ گرم) به اضافه کود میکروبی (۰/۹ گرم) مجموع ۱/۸ گرم برای هر گلدان، کود شیمیایی فسفره برابر ۲۵٪ توصیه (۰/۴۵ گرم) به اضافه کود میکروبی (۱/۳۵ گرم) مجموع ۱/۸ گرم برای هر گلدان بودند، بصورت یک لایه یک سانتی زیر بذر اعمال شدند. مقدار بهینه کود میکروبی در MINITAB بر اساس تحلیل آماری اثرات سطوح مختلف کود بر متغیرهای پاسخ، اندازه‌گیری شده و با هدف بهینه‌سازی این متغیرها تعیین شد. معیار اصلی، دستیابی به تأثیر مثبت و معنی‌دار بر عملکرد و کیفیت گیاه و/یا بهبود ویژگی‌های خاک در مقایسه با شرایط عدم استفاده از کود (شاهد) است. ضرورت استفاده از دو برابر مقدار بهینه کود زیستی در تیمارها، با هدف بررسی اثرات مقادیر بالاتر از حد مطلوب، از جنبه‌های مختلفی قابل توجیه است. یکی از دلایل اصلی، تعیین آستانه تحمل گیاه نسبت به مقادیر زیاد این کودها و ارزیابی احتمال بروز اثرات منفی بر رشد و

در این معادله، Y متغیر پاسخ (انحلال فسفر)، X_i و X_j متغیرهای مستقل کد شده، k تعداد متغیرهای مستقل، ε باقیمانده‌های مدل (اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای برآورده شده مدل) و نیز β_0 ، β_i ، β_{ij} و β_{ij} به ترتیب نشان‌دهنده اثر عرض از مبدأ، اثر توزیع خطی، درجه دو و برهمکنش بین متغیرها می‌باشد. بر اساس دامنه معرفی شده و همچنین تعداد متغیرهای مستقل، مجموع ۲۰ آزمایش و با ترکیب سطوح متفاوتی از مقادیر کدبندی شده این متغیرها را طراحی نمود در روش سطح پاسخ از یک تابع چندجمله‌ای درجه دوم (رابطه ۲) که شامل ترکیب خطی، درجه دوم و همچنین برهمکنش بین متغیرها بر اساس مقادیر کد شده است، برای پیش‌بینی متغیر وابسته استفاده می‌شود (Barin et al., 2022).

(رابطه ۲)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad i \neq j$$

(رابطه ۳)

$$P_i = \left[\frac{\beta_i^2}{\sum \beta_i^2} \right] \times 100 \quad i \neq 0$$

در این رابطه P_i درصد اثر هر یک از متغیرهای طرح مرکب مرکزی و β_i نیز ضرایب معادله چندجمله‌ای (رابطه ۳) است. قبل از تلقیح میکروبی مقدار آب مورد نیاز تعیین شده (برای هر نمونه، همراه با ۱ میلی‌لیتر مایه تلقیح (با جمعیت حدود 10^7 در هر میلی‌لیتر) داخل هر بسته ریخته و دهانه بسته‌ها پرس شد و پس از تلقیح قارچ‌ها، بسترهای کود میکروبی آماده شده به مدت ۲ ماه در دمای 28 ± 2 درجه سانتی‌گراد در انکوباتور قرار داده شدند و در پایان زمان آزمایش، مقدار فسفر محلول با روش مولیبدات-وانادات و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV3100) در طول موج ۴۷۰ نانومتر

با آب معمولی و سپس با آب مقطر شسته شده و در آن با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک شده و وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری گردید. به منظور تجزیه شیمیایی، اندام هوایی آسیاب شده و در ظرف‌های پلاستیکی قرار گرفتند. سپس بخش هوایی به مدت ۶ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد در کوره الکتریکی قرار داده شدند. هضم اندام هوایی برای اندازه‌گیری میزان فسفر، پتاسیم، روی و منگنز به روش خشک سوزانی انجام شد (Gupta, 2000). در عصاره‌های به دست آمده غلظت فسفر به روش رنگ‌سنجی در طول موج ۴۷۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر (Shimadzu UV3100) (Cotteni, 1980)، غلظت پتاسیم به روش نشر اتمی و با استفاده از دستگاه فیلم فتومتر و غلظت روی و منگنز با دستگاه جذب اتمی تعیین گردید. غلظت نیتروژن نیز در اندام هوایی ذرت با استفاده از روش کج‌لدال طی ۳ مرحله شامل مرحله هضم تر: ۰/۳ گرم از نمونه‌های گیاهی آسیاب شده و سپس ۲/۳ میلی‌لیتر مخلوط اسیدها اضافه (اسید سولفوریک و اسید سالسیلیک) شد. پس از سپری شدن ۲۴ ساعت نمونه‌ها روی هیتر قرار داده شدند. جهت تکمیل و تسریع عمل هضم از آب اکسیژنه استفاده گردید. در مرحله تقطیر، ۲۰ میلی‌لیتر از عصاره‌های هضم و ۱۵ میلی‌لیتر هیدروکسید سدیم ۵۰ درصد در بالن تقطیر ریخته شد. در ارلنی که در مسیر خروج بخار قرار داشت، ۱۰ میلی‌لیتر اسید بوریک ۲ درصد و چند قطره معرف ازت اضافه گردید. در مرحله تیتراسیون نیز محلول داخل ارلن با HCl ۰/۱ نرمال تیترا شد (Bremner & Mulvaney, 1982).

اندازه‌گیری شاخص‌های بیولوژیک خاک

تنفس پایه و تنفس برانگیخته

به منظور اندازه‌گیری شاخص‌های میکروبی خاک، مقداری خاک از منطقه ریزوسفر از قبل جداسازی شده و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگه‌داری گردید. اندازه‌گیری تنفس پایه (BR⁵) (Anderson, 1982) و تنفس برانگیخته (SIR⁶) به روش تیتراسیون با HCL، ۰/۵ نرمال انجام شد (Anderson & Domsch, 1990).

عملکرد گیاه در صورت مصرف بیش از حد است. برخی کودهای زیستی، به‌ویژه در سطوح بالا، ممکن است به دلیل تحریک بیش از اندازه فعالیت‌های میکروبی یا تولید متابولیت‌های خاص، منجر به بروز اثرات بازدارنده یا حتی سمی در گیاه شوند. از این رو، بررسی چنین سطوحی می‌تواند به درک بهتر دامنه ایمن و مؤثر مصرف این نهاده‌ها کمک کند. خاک مورد استفاده برای آزمایش گلخانه‌ای، از زمین‌های غیرزراعی دانشگاه ارومیه از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر تهیه شده و پس از هوا خشک کردن و گذراندن از الک پنج مش به آزمایشگاه منتقل شدند. در هر گلدان (گلدان‌های پلاستیکی با قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۸/۵ سانتی‌متر) حدود ۵ کیلوگرم خاک (با نسبت ۳ به ۱ خاک به ماسه) ریخته شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee, 1986)، pH خاک در عصاره گل اشباع به روش پتانسیومتری (McLean, 1982)، هدایت الکتریکی خاک (EC) در عصاره اشباع (Nelson & Sommer, 1982)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون (Nelson & Sommer, 1982) و پتاسیم قابل جذب به روش عصاره‌گیری با استات آمونیم و قرائت با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر (Champan & Pratt, 1978)، مقادیر آهن، روی، مس و منگنز با دستگاه جذب اتمی اسپکترومتری (Shimadzu 6300 AA)، نیتروژن کل به روش کج‌لدال، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen *et al.*, 1954) و کربن آلی به روش والکی بلک (Nelson & Sommer, 1982) اندازه‌گیری شد. تعداد کافی از بذور سالم ذرت سینگل (رقم Single Cross-704) برای عملیات کاشت انتخاب و با محلول‌های هیپوکلریت سدیم ۵ درصد (۲ دقیقه) و اتانول ۹۶ درصد (۳۰ ثانیه) ضدعفونی شده و در ادامه ۷ الی ۸ مرتبه با آب مقطر استریل شستشو یافتند. پس از جوانه زدن بذرها، سه بوته در هر گلدان نگه‌داشته شد. در طول دوره رشد (۶۰ روز) شرایط نگهداری برای تمام گلدان‌ها یکسان بود. پس از اتمام دوره رشد رویشی و قبل از برداشت گیاه، ارتفاع گیاه از سطح خاک با استفاده از متر نواری و قطر ساقه با استفاده از کولیس در تمامی بوته‌ها اندازه‌گیری گردید. بعد از عملیات برداشت بوته‌ها، نمونه‌های گیاهی

6. Substrat Induced Respiration (SIR)

4. Calcium Carbonate to Equivalent

5. Basal Respiration (BR)

کربن زیست توده میکروبی

برای اندازه‌گیری کربن زیست توده میکروبی (MBC^7) از روش تدخین - استخراج استفاده شد و از اختلاف مقادیر محاسبه شده برای نمونه‌های تدخین شده و تدخین نشده مقدار کربن زیست توده میکروبی محاسبه گردید (Ladd *et al*, 1983).

نتایج و بحث

نتایج مربوط به غلظت ترکیبات اصلی موجود در نمونه سنگ فسفات و تجزیه ترکیبات ورمی کمپوست در جدول

(۲ و ۳) نشان داد که نمونه سنگ فسفات دارای مقدار نسبتاً پایین فسفر P_2O_5 معادل (۰.۷/۳٪) و درصد بالای از دیگر ترکیبات مانند Fe_2O_3 (۰.۲۱/۶٪) و SiO_2 (۰.۱۶/۱٪) است. در مقابل، ورمی کمپوست دارای ترکیب متعادلی از مواد مغذی (فسفر ۰.۵۶/۵٪، پتاسیم ۰.۰۴/۰٪، نیتروژن ۰.۲۱/۰۳٪) و کربن آلی بالا (۰.۲۵٪) با نسبت C/N مناسب (۱۲/۷) است که آن را به ماده‌ای مناسب برای اصلاح خاک و بهبود قابلیت جذب عناصر غذایی تبدیل می‌کند.

جدول ۲- غلظت ترکیبات اصلی موجود در نمونه سنگ فسفات (نتایج ایکس آر اف)

Composition	Cl	SO ₃	SiO ₂	MgO	F	Fe ₂ O ₃	AL ₂ O ₃	CCE	P ₂ O ₅
	%								
Phosphate rock	<0.1	0.25	16.1	0.83	0.62	21.6	4.25	48	7.3

جدول ۳- نتایج تجزیه ورمی کمپوست

Table 3. Vermicompost decomposition results

Sample	pH	EC	Organic Carbon	Nitrogen	Ratio C/N	Phosphorus	Potassium
	(1:5)	(1:5)dS m ⁻¹	%	%			%
Vermicompost	7.9	1.63	25	2.03	12.7	0.56	0.4

تجزیه واریانس مربوط به مدل طرح مرکب مرکزی در جدول (۵) ارائه شده است. نتایج بیانگر این مطلب است که در بخش خطی مدل، اثر متغیرهای مواد آلی (ورمی کمپوست) و سنگ فسفات بر غلظت فسفر معنی‌دار شد ($p < 0.01$). در بخش درجه دوم نیز تنها گوگرد تأثیر معنی‌داری بر انحلال فسفر توسط قارچ داشت ($p < 0.05$). در ارتباط با اثرات متقابل متغیرهای مستقل با توجه به مقادیر آماره p ، برهمکنش مواد آلی (ورمی کمپوست) با گوگرد ($p < 0.05$) و گوگرد با سنگ فسفات معنی‌دار شد (جدول ۵).

ترکیب آزمایش‌های موردنیاز بر مبنای طرح مرکب مرکزی با سه متغیر ورمی کمپوست، خاک فسفات و گوگرد در جدول (۴) ارائه شده است در این جدول نیز مقادیر فسفر محلول اندازه‌گیری شده برای هر آزمایش ارائه گردید. بر اساس نتایج بیشترین انحلال فسفر (۶۶۷/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به سطح +۱ مواد آلی (۵۰ درصد)، سطوح میانه گوگرد (۱۵ درصد) و خاک فسفات (۵۰ درصد) بود. کمترین مقدار انحلال (۲۳۳/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به سطح -۱ مواد آلی (۵ درصد)، سطوح میانه گوگرد (۱۵ درصد) و خاک فسفات (۵۰ درصد) بود.

جدول ۴- ماتریس مقادیر متغیرهای کد شده در مدل‌سازی روش طرح مرکب مرکزی

Table 4. Matrix of Coded Values of Variables Used in Central Composite Design (CCD) Modeling

Experiment Number	Encoded values of the variables			Available phosphate (mg kg ⁻¹)
	Sulfur	Phosphate-Rich Soil	Organic matter	
1	1.00	0.00	0.00	338.1
2	0.00	0.00	1.00	666.3
3	-0.59	-0.59	0.59	596.7
4	0.59	-0.59	-0.59	664.9
5	-0.59	-0.59	-0.59	601.5
6	0.59	0.59	-0.59	338.5
7	0.00	0.00	0.00	506.2
8	0.00	0.00	0.00	506.2
9	0.00	-1.00	0.00	518.4
10	-1.00	0.00	0.00	332.6
11	0.59	0.59	0.59	507.6
12	0.00	0.00	0.00	500.1
13	0.00	0.00	0.00	510.0
14	-0.59	0.59	-0.59	310.3
15	-0.59	0.59	-0.59	372.8
16	0.59	-0.59	-0.59	308.5
17	0.00	0.00	-1.00	233.6
18	0.00	0.00	0.00	506.2
19	0.00	1.00	0.00	391.9
20	0.00	0.00	0.00	508.4

The actual values corresponding to the coded levels (-1, -0.59, 0, +0.59, +1) were as follows: for organic matter (5, 14.1, 27.5, 40.5, 50 grams), for sulfur (0, 6.1, 15, 23.9, 30 grams), and for phosphate soil (20, 32.2, 50, 67.8, 80 grams), respectively.

جدول ۵- ضرایب تابع چندجمله‌ای طرح مرکب مرکزی برای پیش‌بینی غلظت فسفات محلول

Table 5. Polynomial Function Coefficients from Central Composite Design (CCD) for the Prediction of Soluble Phosphate Concentration

Model Component	Model parameters	Adjusted Mean Squares	F-statistic	P-statistic
Model intercept	intercept	29163	8.47	0.001
Linear	OM	126128	36.65	0.0000
	S	202	0.06	0.813
	RP	53558	15.56	0.003
Quadratic	OM×OM	965	0.28	0.608
	S×S	34418	10	0.01
	RP×RP	613	0.18	0.682
Interaction	OM×S	27370	7.94	0.018
	OM×RP	1800	0.52	0.486
	S×RP	18802	5.46	0.042

OM, S, and RP denote organic matter, sulfur, and phosphate soil, respectively

$$\text{Dissolved P (mg.kg}^{-1}\text{)} = 504.4 + 161.6X_1 - 105.3X_2 - 6.5X_3 - 23.1X_{12} - 18.4X_{22} - 138.2X_{32} - 42.4 X_1 X_2 + 165.4 X_1 X_3 + 137.1 X_2 X_3$$

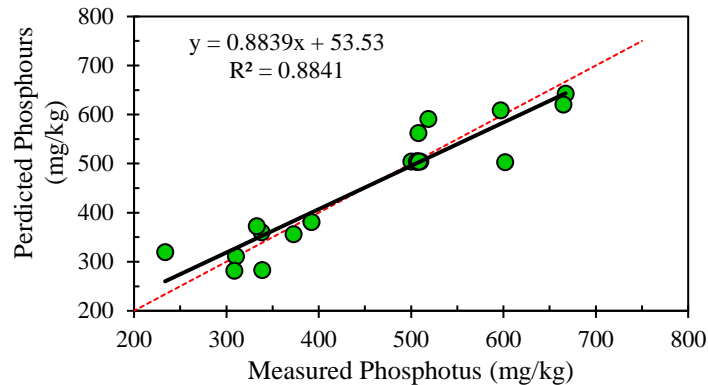
$$R^2 = 0.8841$$

که بر مبنای نتایج تحلیل آماری ضرایب مدل طرح مرکب مرکزی خلاصه شده‌است، حاکی از اثر مثبت و فزاینده ورمی‌کمپوست بر افزایش انحلال فسفر است. به‌منظور ارزیابی کارایی مدل حاصل از طرح مرکب مرکزی (رابطه

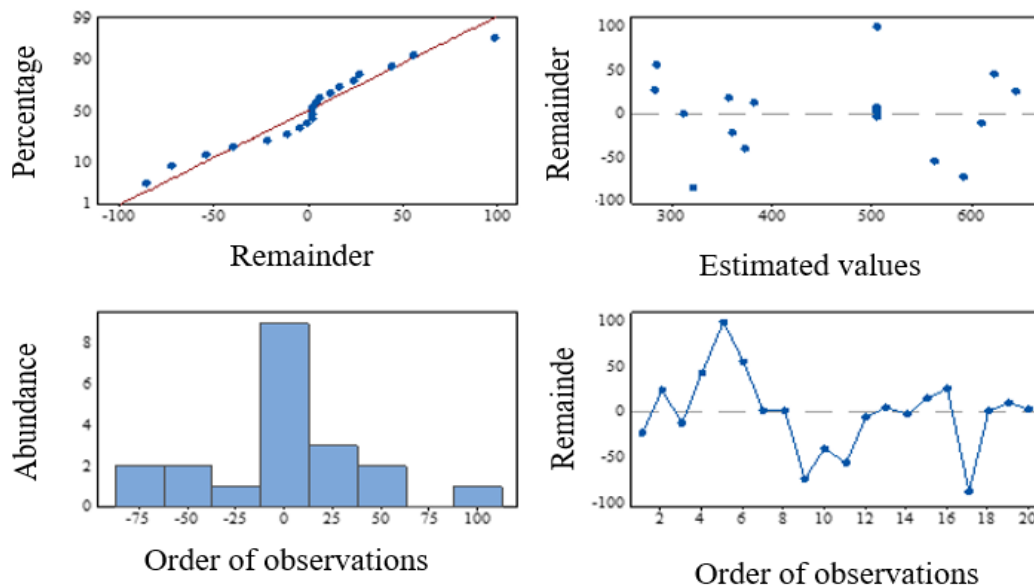
براساس نتایج ارائه شده در جدول (۵) برای معنی‌داری هر یک از ضرایب تابع چند جمله‌ای طرح مرکب مرکزی و با در نظر گرفتن ضرایب دارای اثر معنی‌دار تابع پیش‌بینی‌کننده، مقدار فسفر محلول به صورت رابطه (۴) قابل ارائه خواهد بود. در این معادله X_1 ، X_2 و X_3 به ترتیب مربوط به مقادیر کد شده‌ی مواد آلی، گوگرد و خاک-فسفات می‌باشند. (رابطه ۴)

مقادیر باقی مانده مدل طرح مرکب مرکزی نیز نرمال بوده و بر اساس علامت (مثبت و منفی بودن) مقادیر باقی مانده مدل می توان نتیجه گرفت که مدل مذکور فاقد بیش برآورد و یا کم برآوردی سیستماتیک بوده و جهت خطای آن تابعی از مقدار فسفر محلول نبوده و حالت تصادفی دارد.

۴)، مقدار فسفر اندازه گیری شده در آزمایش های طرح مرکب مرکزی در مقابل میزان فسفر پیش بینی شده با مدل طرح مرکب مرکزی ترسیم شد (شکل ۱). این شکل نشانگر این است که مدل طرح مرکب مرکزی به طور مطلوبی مقدار فسفر را برآورد کرده و می توان گفت که ۸۸/۴۱ درصد از تغییرات مقدار انحلال فسفر توسط این مدل قابل تبیین است. همچنین بر اساس شکل (۲) توزیع



شکل ۱- مقایسه غلظت فسفات محلول مشاهده ای و پیش بینی شده با استفاده از مدل طرح مرکب مرکزی
Figure 1. Comparison between observed & predicted concentrations of soluble phosphate using the Central Composite Design (CCD) mode



شکل ۲- توزیع باقی مانده های مدل طراحی ترکیبی مرکزی
Figure 2. Distribution of residuals from the Central Composite Design (CCD) model

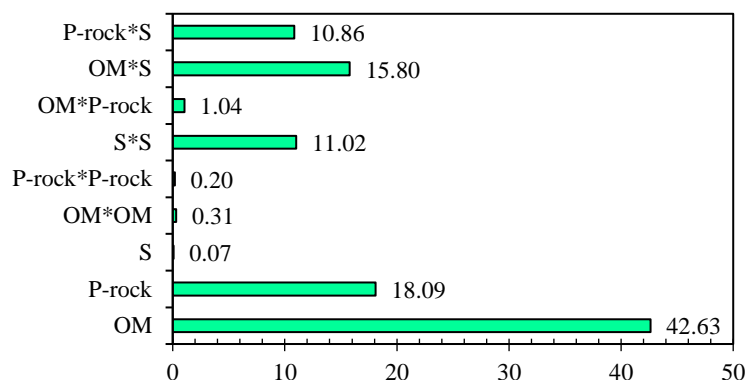
گوگرد، سنگ فسفات و گوگرد و توان دوم گوگرد بیشترین تأثیر را بر میزان انحلال فسفر مشاهده ای داشتند. به طوری که درصد اثر این ۵ متغیر به ترتیب برابر با ۴۲/۶۳، ۱۸/۰۹، ۱۵/۸۰، ۱۱/۰۲ و ۱۰/۸۶ بوده و مجموع درصد اثرات این ۵ متغیر نیز برابر با ۹۸/۴ درصد بود.

جهت رتبه بندی اثر پارامترهای مدل طرح مرکب مرکزی (رابطه ۲)، درصد اثر هر یک از پارامترهای مدل طرح مرکب مرکزی در شکل (۳) نشان داده شده است. از بین متغیرهای مستقل بررسی شده به ترتیب مواد آلی (ورمی- کمپوست)، سنگ فسفات، برهمکنش بین مواد آلی و

نتایج مربوط به آنالیز خاک مورد استفاده در بستر گلخانه نشان داد که بافت خاک لوم رسی با درصد ذرات (رس ۳۵٪، سیلت ۲۵٪، شن ۴۰٪) بوده، pH قلیایی داشته و شور نمی‌باشد (جدول ۶).

شکل ۳- نتایج تحلیل پارتو برای مقایسه اثر پارامترهای ورودی مدل طرح مرکب مرکزی بر انحلال فسفر

Figure 3. Pareto analysis results comparing the effects of input parameters in the Central Composite Design (CCD) model on phosphorus solubilization.



جدول ۶- نتایج تجزیه خاک مورد استفاده در بستر گلخانه‌ای

Table 6. Results of soil analysis used in greenhouse substrate

Feature	Unit	Amount
Soil texture		Clay loam
Clay particles	%	35
Silt particles	%	25
Sand particles	%	40
pH		7.69
EC	dS m ⁻¹	0.5
Calcium Carbonate	%	19.5
Organic Carbon	%	0.5
Phosphorus	mg kg ⁻¹	7.4
Potassium	mg kg ⁻¹	230
Iron	mg kg ⁻¹	9.1
Copper	mg kg ⁻¹	1.2
Zinc	mg kg ⁻¹	0.6
Manganese	mg kg ⁻¹	10.1

موجب بهبود ارتفاع ساقه شده است (Gou *et al.*, 2020). از طرف دیگر، برخی تحقیقات نشان داده‌اند که فسفر باعث افزایش کارایی مصرف نیتروژن می‌شود که به تبع آن رشد و نمو بخش رویشی گیاه نیز افزایش می‌یابد (Sharma *et al.*, 2024). نتایج این تحقیق مشابه با نتایج دیوی و همکاران (Devi *et al.*, 2023) بود؛ زیرا آن‌ها نیز گزارش کردند که کاربرد کودهای زیستی و کودهای شیمیایی به تنهایی و در تلفیق با یکدیگر در تیمارهای مختلف موجب افزایش ارتفاع گیاه نسبت به تیمار شاهد شد. الشبلی و همکاران (Al-Shibli *et al.*, 2019) گزارش کردند که سویه‌های *Aspergillus terreus* منجر به

نتایج جدول ۷ نشان داد که اثر تیمارهای کودی بر میزان ارتفاع ساقه (در سطح احتمال ۵ درصد) معنی‌دار بود. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین ارتفاع گیاه مربوط به تیمار کود زیستی دو برابر توصیه (۱۳۰/۹ سانتی‌متر) بود که با تیمار شاهد (۹۰/۴۹ سانتی‌متر) تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۸). افزایش ارتفاع گیاه در نتیجه افزایش فسفر قابل دسترس در اثر بکار بردن کود زیستی ۲ برابر را می‌توان این چنین توجیه نمود که عنصر فسفر با اثرات مثبتی که بر افزایش توسعه سیستم ریشه‌ای دارد، میزان جذب آب و عناصر غذایی ضروری به ویژه نیتروژن را افزایش داده است که این امر

میکروبی فسفات‌تهیه شده از هفت باکتری (*Pantoea agglomerans* P5، *Pseudomonas putida* Tabriz، *fluorescen* Tabriz، *Enterobacter* sp.S16-3، *Pseudomonas* sp.C16-20، *Bacillus megaterium* JK6 و *B. firmus*) در بستر پایه خاک فسفات (۴۵ گرم)، گوگرد (۱۵ گرم) و باگاس (۳۰ گرم) را مورد ارزیابی قرار دادند. در این آزمایش، باکتری *P. agglomerans* P5 به‌عنوان باکتری حل‌کننده فسفات مورد استفاده در کود بارور ۲ به‌عنوان کنترل مثبت استفاده شد و نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان داد که کاربرد کودهای میکروبی فسفات‌تهیه در گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴، بر وزن تر و خشک کل ریشه و بخش هوایی، جذب فسفر، پتاسیم، آهن و روی بخش ریشه و بخش هوایی، تأثیر کاملاً معنی‌داری داشت. کاربرد کودهای زیستی می‌تواند در نتیجه تولید هورمون‌های محرک رشد، گسترش ریشه و افزایش قابلیت دسترسی به عناصر غذایی موجب افزایش جذب عناصر غذایی و افزایش وزن خشک ذرت شده باشد اما این افزایش در حضور کودهای شیمیایی به علت گسترش ریشه و تامین بخش بیشتری از عناصر مورد نیاز گیاه ذرت تشدید می‌شود. باکتری‌های ریزوسفری توسط ترشح هورمون‌های رشد، افزایش حلالیت ترکیبات نامحلول فسفر و پتاسیم از طریق تولید اسیدهای آلی و معدنی، تولید سیدروفور و افزایش حلالیت آهن و روی، تولید آنزیم ACC دامیناز موثر به رشد بهتر گیاه کمک می‌کند (Gilik et al., 2004). دلیل افزایش وزن خشک گیاه بر اثر مصرف کودهای زیستی می‌تواند بدلیل افزایش سطح ریشه در پاسخ به ترشح هورمون‌های مختلف گیاهی توسط این کودها باشد که موجب افزایش سطح تماس ریشه با خاک و در کل جذب بیشتر عناصر غذایی می‌شود. همچنین تولید اسیدهای مختلف توسط این میکروارگانیسم‌ها می‌تواند موجب انحلال فسفر معدنی و آلی خاک شود (Eidizadeh et al., 2010). بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر تیمارهای کودی بر مقدار نیتروژن کل گیاه معنی‌دار (در سطح ۵ درصد) بود (جدول ۹). بر اساس نتایج مقایسات میانگین، بیشترین مقدار جذب نیتروژن گیاه در تیمار کود شیمیایی ۵۰ درصد و کود زیستی، ۲/۶۲ برابر نسبت به تیمار شاهد بیشتر بود (جدول ۱۰).

افزایش ارتفاع گیاه، قطر ساقه، وزن خشک و سایر خصوصیات رشدی گیاه بامیه *Abelmoscus Esculentus* شد. نتایج جدول ۷ نشان داد که اثر تیمارهای کودی بر قطر ساقه گیاه ذرت در (سطح ۵ درصد معنی‌دار) بود. اندازه قطر ساقه ذرت در تیمار تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی و کود زیستی، کود شیمیایی فسفره (۲۵٪) + کود زیستی، کود زیستی برابر توصیه، کود زیستی ۲ برابر توصیه و کود شیمیایی فسفره برابر توصیه به ترتیب ۱/۴۸، ۱/۴۷، ۱/۴۲، ۱/۳۸ و ۱/۱۹ برابر نسبت به تیمار شاهد افزایش داشت (جدول ۸). آزمایش‌های متعددی در زمینه کاربرد کودهای زیستی انجام شده است و نتایج حاکی از نقش مثبت این میکروارگانیسم‌ها در فنولوژی گیاه بوده است. رستمی و همکاران (Rostami et al., 2023) نشان دادند که استفاده از کود بیولوژیک، سبب افزایش توسعه ریشه و جذب بهتر آب و مواد غذایی می‌شود که به دنبال آن رشد گیاه افزایش می‌یابد و می‌توان انتظار داشت که افزایش رشد و نمو بخش‌های مختلف گیاه همچون ساقه حاصل شود. در مقادیر بالای کودهای شیمیایی، افزایش شاخص سطح برگ و در نتیجه استفاده بهتر از نور خورشید و سایر منابع طی فصل رشد و افزایش فتوسنتز گیاه، سبب افزایش رشد اندام‌های رویشی می‌شود و در نتیجه قطر ساقه نیز افزایش می‌یابد. طبق گزارشات دیگر نیز، کاربرد کودهای شیمیایی فسفر، باعث افزایش قطر ساقه آفتابگردان گردیده است (Manzoor et al., 2024). بنابراین کودهای زیستی همراه با کاربرد کودهای شیمیایی سبب افزایش شاخص‌های رشدی گیاه مانند قطر ساقه می‌شوند، چرا که کاربرد توأم این کودها از طریق افزایش فعالیت میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها و افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی می‌تواند شاخص‌های رشدی گیاه را افزایش دهند (Rostami et al., 2023). نتایج تجزیه واریانس اثر منابع کودی بر وزن خشک گیاه در جدول (۷) نشان داد که اثر منابع کودی بر وزن خشک (در سطح ۰/۱ درصد) معنی‌دار بود. بر اساس مقایسه میانگین داده‌ها نیز می‌توان اظهار نمود که منابع کودی در مقایسه با تیمار شاهد تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک گیاه ذرت داشتند. میزان وزن خشک در تیمار کود زیستی، حدود ۱/۹۵ برابر بیشتر از تیمار شاهد به‌دست آمد (جدول ۸). در مطالعه‌ای خوشرو و همکاران (Khoshru et al., 2019)، اثربخشی کودهای

جدول ۹- تجزیه واریانس اثر منابع کودی بر میزان جذب عناصر پرمصرف در گیاه ذرت

Table 9. Analysis of variance of fertilizer sources impact on the macronutrient's uptake in corn plant

	Sources of changes	Mean squares Degree of freedom		
		Nitrogen	Phosphorus	Potassium
Fertilizer sources	5	3301.949*	139.289***	4143.765**
Error	12	865.910	5.574*	368.089
CV%	-	21.30	11.01	16.26

significant at $p \leq 0.001$, $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$ probability level ***, ** and *

جدول ۱۰- نتایج مقایسه میانگین اثر منابع کودی بر جذب عناصر پرمصرف

Table 10. Mean comparison results of fertilizer sources impact on the macronutrients uptake

Fertilizer sources	Nitrogen	Potassium Phosphorus	
Phosphorus fertilizer as recommended	3.07 ^{ab}	0.53 ^a	2.86 ^a
Biofertilizer as recommended	2.9 ^{ab}	0.55 ^a	2.90 ^a
Biofertilizer 2 times the recommendation	3.73 ^a	0.54 ^a	3.08 ^a
Phosphorus chemical fertilizer (50%) + biofertilizer	3.7 ^a	0.51 ^{ab}	2.66 ^a
Phosphorus chemical fertilizer (25%) + biofertilizer	3.21 ^{ab}	0.50 ^{ab}	2.70 ^a
Control (without fertilizer)	2.61 ^b	0.34 ^b	1.87 ^b
LSD _{0.05}	1.02	0.05	0.43

Means with the same superscript letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at $P < 0.05$

را افزایش دهد (Liu *et al.*, 2024). تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن بود که اثرات تیمارهای کودی تأثیر معنی‌داری (در سطح ۰/۰۱ درصد) بر غلظت فسفر گیاه داشت (جدول ۹). تمامی تیمارهای کودی جذب فسفر را نسبت به تیمار شاهد بطور معنی‌داری افزایش دادند (جدول ۱۰). در تیمارهای کود شیمیایی فسفره (۵۰٪) + کود زیستی و کود شیمیایی فسفره (۲۵٪) + کود زیستی مقدار فسفر نسبت به بقیه تیمارهای کودی؛ به غیر از شاهد؛ کاهش یافت. دلیل این کاهش می‌تواند به این خاطر باشد که بین کودهای شیمیایی و میکروارگانیسم‌های موجود در کودهای زیستی ممکن است اثرات متقابل منفی وجود داشته باشد. غلظت بالای برخی از عناصر شیمیایی در کودهای شیمیایی می‌تواند فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید کود زیستی را مهار کند. این میکروارگانیسم‌ها نقش مهمی در حل‌کنندگی و جذب فسفر دارند. در نتیجه، با کاهش فعالیت آن‌ها، جذب فسفر نیز کاهش می‌یابد. در برخی موارد، مصرف همزمان کود شیمیایی فسفاته با کود زیستی می‌تواند منجر به کاهش کارایی میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات شود، زیرا گیاه دیگر به تحریک این میکروارگانیسم‌ها برای آزادسازی فسفر نیازی ندارد (Timofeeva *et al.*, 2022). نتایج مطالعات لاملوم و همکاران (Lamlom *et al.*, 2023) نشان

بطور کلی نتایج نشان داد که تیمارهای کودی به تنهایی و نیز در تلفیق با هم، تأثیر مثبتی بر غلظت نیتروژن گیاه داشتند. بررسی‌های رامانجانویلو و همکاران (Ramanjaneyulu *et al.*, 2007) نشان داد که کاربرد کودهای فسفاته ۲۵ و ۵۰ درصد همراه با کود زیستی در مقایسه با کود کامل شیمیایی و نیز سایر کودهای زیستی، تفاوت معنی‌داری در غلظت نیتروژن در سورگوم ایجاد نکرد؛ با این حال نسبت به تیمار شاهد افزایش مقدار این عنصر معنی‌دار بود. این نتایج با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. احمد و همکاران (Ahmad *et al.*, 2011) در مطالعه‌ای نشان دادند که استفاده از کودهای شیمیایی و کودهای زیستی هم بصورت تکی و نیز در تلفیق باهم سبب افزایش غلظت نیتروژن نسبت به تیمار شاهد در گیاه گندم شد. برخی از گونه‌های *Aspergillus* می‌توانند با تولید آنزیم‌ها و اسیدهای آلی، به تجزیه مواد آلی خاک کمک کرده و نیتروژن آلی موجود را به فرم‌های قابل جذب برای گیاه (مانند نیترات و آمونیوم) تبدیل کنند (Zhu, 2016). فسفر نقش مهمی در توسعه ریشه گیاه دارد؛ با توسعه سیستم ریشه‌ای قوی‌تر، گیاه می‌تواند در حجم بیشتری از خاک نفوذ کرده و نیتروژن بیشتری جذب کند. همچنین، فسفر در متابولیسم نیتروژن در گیاه نقش دارد و می‌تواند کارایی جذب و استفاده از نیتروژن

(Vahedi & Rasouli Sadaghiani, 2018). نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱۱) نشان داد که اثرات منابع کودی (در سطح ۰/۱ درصد) تاثیر معنی داری بر غلظت پتاسیم گیاه داشتند. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که هیچ اختلاف آماری معنی داری در بین تاثیر سطوح مختلف تیمارهای کود شیمیایی و زیستی بر غلظت پتاسیم وجود نداشت. اما همه تیمارها با شاهد اختلاف معنی داری را نشان دادند؛ به این صورت که غلظت تیمار کود زیستی ۲ برابر توصیه، کود زیستی برابر توصیه، کود شیمیایی فسفره برابر توصیه، کود شیمیایی فسفره (۲۵٪) + کود زیستی و کود شیمیایی فسفره (۵۰٪) + کود زیستی به ترتیب ۱/۶۴، ۱/۵۵، ۱/۵۲، ۱/۴۴ و ۱/۴۲ برابر نسبت به تیمار شاهد بیشتر بودند (جدول ۱۲). کود شیمیایی ۲۵ و ۵۰ درصدی فسفره در ترکیب با کود زیستی، از نظر غلظت پتاسیم در گیاه اختلاف معنی داری با تیمار کود شیمیایی برابر توصیه نداشتند. بنابراین مصرف کودی زیستی توأم با مقدار ۲۵ و ۵۰ درصد کود شیمیایی در راستای افزایش پتاسیم گیاه می‌تواند از مصرف ۷۵ و ۵۰ درصدی کود شیمیایی NPK جلوگیری نماید. دلیل افزایش پتاسیم توسط کودهای زیستی می‌تواند تولید هورمون‌های گیاهی توسط میکروارگانیسم‌های موجود در کودهای زیستی باشد که سبب توسعه ریشه شده و از این طریق سبب افزایش سطح جذب می‌شود. تولید سیدروفور و پروتون توسط میکروارگانیسم‌ها که در رهاسازی یون پتاسیم از کانی موثر می‌باشند؛ نیز دلیل دیگر افزایش غلظت پتاسیم می‌باشد (Sadeghi *et al.*, 2024).

داد که کاربرد کودهای زیستی فسفوباکتین و نیتروبین موجب افزایش غلظت فسفر کاه گندم در مقایسه با کودهای شیمیایی شد. مطالعات بونونی و همکاران (Bononi *et al.*, 2020) نیز نشان داد که اسیدهای آلی تولید شده بوسیله قارچ‌های حل‌کننده فسفات می‌تواند بر خاک فسفات اثر گذاشته و جذب فسفر توسط گیاه را افزایش دهد. لذا نتایج نشان می‌دهد استفاده از پتانسیل میکروارگانیسم‌ها از طریق افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی و افزایش گسترش ریشه موجب افزایش جذب عناصر غذایی به ویژه فسفر توسط گیاه می‌گردد. افزایش غلظت فسفر در گیاه در اثر کاربرد کودها به ویژه کودهای زیستی به دلیل نقش بسیار مهم میکروارگانیسم‌های حل‌کننده موجود در ساختار کودهای زیستی برای فراهمی و جذب بیشتر این عنصر می‌باشد. دلیل احتمالی دیگر برای جذب در تیمارهای کاربرد کود زیستی و کود شیمیایی به علت افزایش سطح جذب، با گسترش ریشه بدلیل وجود میزان مطلوب عناصر غذایی قابل جذب می‌باشد. گسترش ریشه گیاه موجب جذب بیشتر فسفر از خاک و کودهای فسفره می‌گردد (Salardini, 2005). همچنین اسیدهای آلی تولید شده بوسیله قارچ‌های حل‌کننده فسفات می‌تواند بر خاک فسفات اثر گذاشته و جذب فسفر توسط گیاه را افزایش دهد. لذا نتایج نشان می‌دهد استفاده از پتانسیل میکروارگانیسم‌ها از طریق افزایش قابلیت دسترسی به عناصر غذایی و افزایش گسترش ریشه موجب افزایش جذب عناصر غذایی به ویژه فسفر توسط گیاه می‌گردد

جدول ۱۱- تجزیه واریانس منابع کودی بر غلظت عناصر پرمصرف در گیاه ذرت

Table 11. Analysis of variance of fertilizer sources impact on the macronutrients concentration in corn plant

	Sources of changes	Mean squares		
		Degree of freedom		
		Nitrogen	Phosphorus %	Potassium
Fertilizer sources	5	0.739*	0.017***	0.538**
Error	12	0.334	0.001	0.060
CV%	-	17.74	6.44	9.13

***, ** and * significant at $p \leq 0.001$, $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$ probability level

جدول ۱۲- نتایج مقایسه میانگین اثر منابع کودی بر غلظت عناصر پرمصرف

Table 12. Mean comparison results of fertilizer sources impact on the macronutrients concentration in corn plant

	Fertilizer sources	Nitrogen	Potassium Phosphorus
		%	
Phosphorus fertilizer as recommended	144.8 ^a	24.43 ^a	133.7 ^a
Biofertilizer as recommended	141.0 ^{ab}	25.8 ^a	150.0 ^a
Biofertilizer 2 times the recommendation	161.7 ^a	24.36 ^a	132.9 ^a
Phosphorus chemical fertilizer (50%) + biofertilizer	165.6 ^a	23.21 ^a	123.2 ^a
Phosphorus chemical fertilizer (25%) + biofertilizer	144.8 ^a	21.6 ^b	123.2 ^a
Control (without fertilizer)	63.1 ^b	8.39 ^c	44.79 ^b
LSD _{0.05}	52.35	4.20	34.13

Means with the same superscript letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at P < 0.05

هوایی را به ترتیب ۴۰/۹۸ و ۸۵/۶۵ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش دادند. نتایج تجزیه واریانس، (جدول ۱۳) نشان داد که اثر تیمارهای کودی (در سطح ۰/۰۵ درصد) بر جذب منگنز توسط گیاه معنی‌داری بود. بر اساس نتایج مقایسه میانگین جذب منگنز در تیمارهای کود شیمیایی فسفره برابر توصیه، کود زیستی برابر توصیه، کود زیستی ۲ برابر توصیه، کود شیمیایی فسفره (۵۰٪) + کود زیستی و کود شیمیایی فسفره (۲۵٪) + کود زیستی به ترتیب ۲/۲، ۲/۱، ۲ و ۱/۹ برابر نسبت به تیمار شاهد بیشتر بود (جدول ۱۴). همچنین با توجه به نتایج مقایسه میانگین غلظت منگنز، بیشترین میزان غلظت منگنز مربوط به تیمار کود شیمیایی فسفره برابر توصیه و تیمار کود شیمیایی فسفره (۵۰٪) + کود زیستی بود (جدول ۱۵). هرچند بین تیمارها اختلاف آماری معنی‌داری مشاهده نشد. یافته‌های مطالعه حاضر با نتایج پژوهش‌های رحیم‌زاده و همکاران (Rahimzadeh *et al.*, 2013) هم‌سو بود. آن‌ها نیز گزارش کردند تیمار کود شیمیایی باعث افزایش میزان جذب منگنز و تجمع آن در گیاه شد که با تیمارهای عدم کاربرد کود (شاهد)، کود فسفات‌ها بارور ۲ و ترکیب کودی نیتروکسین + فسفات‌ها بارور ۲ + بیوسولفور تفاوت معنی‌داری نداشت. محمدی مقدم و همکاران (Mohammadi Moghadam *et al.*, 2010) نیز گزارش کردند که قارچ *آسپرژیلوس فلاووس* سبب افزایش فراهمی عناصر کم‌مصرف به‌ویژه منگنز در ارقام مختلف پسته شد.

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس اثر منابع کودی بر غلظت روی در گیاه معنی‌دار (در سطح ۵ درصد) گردید (جدول ۱۳). بیشترین جذب روی در تیمار کود زیستی برابر توصیه (۲۲/۰۰ میلی‌گرم بر گلدان) و کمترین جذب نیز در تیمار شاهد (۰/۰۸ میلی‌گرم بر گلدان) بود (جدول ۱۴). بیشترین غلظت روی در تیمارهای کود زیستی برابر توصیه (۴۷/۵۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کود شیمیایی فسفره برابر توصیه (۴۷/۴۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود (جدول ۱۵). یکی از دلایل کاهش توانایی گیاه در استفاده از عناصر میکرو خاک، غلظت بالای عناصر غذایی از جمله فسفر می‌باشد؛ که در تیمار کود شیمیایی فسفات‌ها و سایر تیمارهایی که در افزایش حلالیت فسفر نقش داشته‌اند، نمود یافته است. میکروارگانیزم‌ها رشد گیاه را به سه روش تحت تأثیر قرار می‌دهند: ۱- سنتز و تولید ترکیبات ویژه برای گیاهان، ۲- تسهیل جذب عناصر غذایی ویژه از محیط و ۳- حفاظت گیاهان از بیماری‌های خاص و از این طریق سبب افزایش جذب عناصر غذایی در گیاه می‌شوند (Khan *et al.*, 2000). تلقیح گیاهان با قارچ‌های *آسپرژیلوس* می‌تواند با افزایش طول ریشه‌ها و همچنین با افزایش سطح جذب، جذب عناصر غذایی مانند روی را در گیاه افزایش دهد (Kothari *et al.*, 1991). نعمتی و گلچین (Nemati & Golchin, 2015) در پژوهشی بیان کردند که تلقیح خاک با کودهای زیستی عملکرد، اجزای عملکرد و غلظت عناصر کم‌مصرف گیاه را بطور معنی‌داری افزایش داد. برین و همکاران (Barin *et al.*, 2019) نیز در مطالعه‌ای اظهار نمودند که تیمارهای تلقیح قارچی و میکوریزی، مقدار روی اندام

جدول ۱۳- تجزیه واریانس اثرات منابع کودی بر جذب عناصر کم مصرف در گیاه ذرت

Table 13. Analysis of variance of fertilizer sources impact on the micronutrients uptake in corn plant significant at $p \leq 0.05$ probability level

	Fertilizer sources	Manganese Zinc (mg. pot ⁻¹)
Phosphorus fertilizer as recommended	0.22 ^a	0.22 ^a
Biofertilizer as recommended	0.22 ^a	0.22 ^a
Biofertilizer 2 times the recommendation	0.17 ^{ab}	0.20 ^{ab}
Phosphorus chemical fertilizer (50%) + biofertilizer	0.17 ^{ab}	0.21 ^{ab}
Phosphorus chemical fertilizer (25%) + biofertilizer	0.14 ^b	0.19 ^{ab}
Control (without fertilizer)	0.08 ^c	0.1 ^b

Means with the same superscript letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at $P < 0.05$.

جدول ۱۴- نتایج مقایسه میانگین اثر منابع کودی بر جذب عناصر کم مصرف در گیاه ذرت

Table 14. Mean comparison results of fertilizer sources impact on micronutrients uptake in corn plant

	Fertilizer sources	Manganese/Zinc (mg. Kg ⁻¹)
Phosphorus fertilizer as recommended	47.42 ^a	48.96 ^a
Biofertilizer as recommended	47.53 ^a	44.33 ^{ab}
Biofertilizer 2 times the recommendation	38.27 ^{ab}	47.62 ^{ab}
Phosphorus chemical fertilizer (50%) + biofertilizer	38.02 ^{ab}	48.59 ^a
Phosphorus chemical fertilizer (25%) + biofertilizer	32.01 ^b	45.09 ^{ab}
Control (without fertilizer)	32.67 ^b	39.86 ^b
LSD _{0.05}	10.08	5.56

Means with the same superscript letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at $P < 0.05$.

میکروارگانیزمها می‌توانند تنفس میکروبی خاک را افزایش دهند (Wu *et al.*, 2023). آنیتا و همکاران (Anita *et al.*, 2011) بیان داشتند کاربرد کودهای زیستی و کودهای شیمیایی موجب افزایش فعالیت‌های میکروبی خاک از جمله افزایش تعداد باکتری‌ها، قارچ‌ها و فعالیت آنزیم‌های خاک نسبت به شاهد می‌شود. تنفس میکروبی نه تنها مشخص‌کننده وضعیت و فعالیت میکروب‌های خاک است، بلکه تعیین‌کننده روند، تعادل و چگونگی تجزیه ماده آلی، فعالیت آنزیمی و چرخه برخی عناصر غذایی خاک نیز خواهد بود (Vahedi *et al.*, 2019). با توجه به نتایج تجزیه واریانس تیمارهای مختلف کودی بر مقدار تنفس برانگیخته دارای تأثیر معنی‌داری نبود (جدول ۱۶). معنی‌دار شدن تنفس پایه و عدم معناداری تنفس برانگیخته می‌تواند نشان دهد که تیمارهای کودی بر فعالیت روتین و سطح پایه متابولیسم میکروبی نسبت به ظرفیت پاسخ سریع و پتانسیل رشد آن‌ها در مواجهه با یک منبع کربن غنی و ناگهانی بیشتر تأثیرگذار بوده‌اند که علت این امر ممکن است به نوع کود، نحوه تأثیر آن بر دسترسی به منابع و ترکیب جامعه

جدول تجزیه واریانس، نشان داد که اثر متقابل منابع کودی (در سطح ۰/۰۱ درصد) بر تنفس پایه معنی‌دار بود (جدول ۱۶). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نیز نشان داد، کاربرد کود شیمیایی و کود زیستی در خاک موجب افزایش معنی‌دار تنفس پایه در تمام سطوح این کودها در مقایسه با تیمار شاهد شده است (جدول ۱۷). بطوری که استفاده‌ی ۲ برابری توصیه کود زیستی، بالاترین (۸۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) میزان تنفس پایه را به خود اختصاص داد. هرچند که با تیمار مصرف تلفیقی کود زیستی و کود شیمیایی فسفره ۵۰ درصد تفاوت آماری نشان نداد. کم‌ترین میزان تنفس پایه نیز در تیمار شاهد (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) مشاهده شد. کاربرد کودهای زیستی در تلفیق با کودهای شیمیایی افزایش معنی‌داری را در میزان تنفس خاک در مقایسه با کاربرد تکی کودهای شیمیایی و کودهای زیستی ایجاد می‌کند. کودهای زیستی تنفس میکروبی را افزایش داده و همراه با کاربرد کودهای شیمیایی این اثر تشدید می‌شود، زیرا کاربرد کودهای زیستی و شیمیایی با افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی از طریق افزایش فعالیت و جمعیت

فعالیت میکروارگانیسیم‌های خاک در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافته و در نتیجه سبب افزایش شاخص‌های میکروبی می‌گردد. لذا زمانی که این کود دو برابر میزان بهینه مصرف می‌شود، منجر به افزایش و بهبود شاخص‌های میکروبی در خاک می‌گردد. افزایش کربن زیست توده میکروبی در نتیجه کاربرد کودها ناشی از تأمین بستر مناسب برای میکروارگانیسیم‌های خاک است که فعالیت آن‌ها را تحریک کرده و باعث افزایش فعالیت بیولوژیکی خاک می‌شود (Chen *et al.*, 2017). بالا بودن جمعیت قارچ‌ها در اثر کاربرد ۲ برابری کود زیستی در مقایسه با شاهد دلیل دیگر افزایش کربن زیست توده میکروبی در این تیمار است. این قارچ‌ها بعد از پایان چرخه زندگی از بین رفته و به کل زیست توده میکروبی اضافه می‌شوند. بنابراین اجساد سلولی اضافه شده به خاک می‌تواند دلیل افزایش این شاخص باشد (Aghababaei *et al.*, 2013).

میکروبی خاک بستگی داشته باشد (Pu *et al.*, 2023). نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر مقدار کربن زیست توده میکروبی در جدول (۱۶) نشان داد که اثر منابع کودی بر میزان این شاخص (در سطح ۵ درصد) معنی‌دار بود. بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نیز میزان کربن زیست توده میکروبی در تیمارهای مختلف کودی نسبت به تیمار شاهد دارای میانگین بالاتری بود (جدول ۱۷). ارتباط مثبتی بین تنفس پایه و زیست توده میکروبی وجود داشت. بطوری که بالاترین میزان تنفس پایه و کربن زیست توده در کود زیستی ۲ برابر توصیه بود. به عبارتی دیگر با افزایش تنفس پایه، زیست توده میکروبی نیز افزایش یافته است که با نتایج بدست آمده توسط واحدی و همکاران (Vahedi *et al.*, 2019) مطابقت دارد. آن‌ها ارتباط قوی و معنی‌داری بین این دو شاخص میکروبی در اثر استفاده از تلقیح میکروبی در خاک مشاهده کردند. بطور کلی چنین نتیجه‌گیری می‌شود که زمانی که کود زیستی به خاک اضافه می‌شود، جمعیت و

جدول ۱۶- تجزیه واریانس اثر منابع کودی بر شاخص‌های میکروبی خاک

Table 16. Analysis of variance of fertilizer sources impact on soil microbial indices

	Sources of changes	Degree of freedom	Mean Squares	
			Basic breathing	Substrate-stimulated respiration
Fertilizer sources	5	2404.056***	158.222 ^{ns}	87573.656*
Error	12	46.389	205.611	22157.000
CV%	-	11.18	14.26	16.20

***, * and ^{ns}: significant at $p \leq 0.01$, $p \leq 5$ probability level and insignificant

جدول ۱۷- نتایج مقایسه میانگین اثر منابع کودی بر شاخص‌های میکروبی خاک

Table 17. Mean comparison results of fertilizer sources impact on soil microbial indices

Fertilizer sources	Basic respiration	Microbial biomass carbon
	($\text{mgCO}_2\text{-C/kg.day}$)	(mg.kg^{-1})
Phosphorus fertilizer as recommended	66.00 ^c	968.0 ^a
Biofertilizer as recommended	72.00 ^{bc}	934.00 ^a
Biofertilizer 2 times the recommendation	88.00 ^a	1012.0 ^a
Phosphorus chemical fertilizer (50%) + biofertilizer	80.67 ^{ab}	1123.0 ^a
Phosphorus chemical fertilizer (25%) + biofertilizer	49.00 ^d	866.7 ^{ab}
Control (without fertilizer)	10.00 ^e	618.00 ^b
LSD _{0.05}	12.12	264.00

Means with the same superscript letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at $P < 0.05$.

نتیجه‌گیری کلی

مورد مطالعه، شرایط آزمایش و اثرات متقابل ارتباط داد. به‌طور کلی، کودهای میکروبی اغلب به‌عنوان یک راهکار مکمل و پایدار در کنار یا به جای بخشی از کودهای شیمیایی مطرح می‌شوند و انتظار نمی‌رود در تمامی شرایط و برای تمامی ویژگی‌ها، عملکردی مشابه یا برتر از کودهای شیمیایی داشته باشند. اثربخشی کودهای میکروبی به شدت به شرایط محیطی، نوع میکروارگانیسم، گیاه و مدیریت زراعی بستگی دارد. در واقع کاربرد کودهای میکروبی به‌عنوان یک استراتژی بیولوژیک نه تنها می‌تواند وابستگی به کودهای شیمیایی فسفره را کاهش داده و هزینه‌های تولید را بهینه‌سازی کند، بلکه با کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی، گامی مهم در راستای دستیابی به کشاورزی پایدار و تولید محصولات غذایی سالم‌تر برای جامعه برمی‌دارد. بنابراین نیاز است که پس از انجام آزمایش‌های تکمیلی در شرایط مزرعه‌ای و بر روی طیف وسیع‌تری از محصولات کشاورزی، استفاده از این کودهای میکروبی به‌عنوان یک مکمل موثر برای کودهای شیمیایی در برنامه‌های مدیریت تغذیه گیاهی مورد توجه قرار گیرد.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از کودهای زیستی، به ویژه کودهای فسفاته و تلقیح‌شده با قارچ اسپرژیلوس، نه تنها به‌طور چشمگیری پارامترهای کمی و کیفی گیاه ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) را بهبود می‌بخشد، بلکه با ارتقاء فعالیت‌های میکروبی مفید در خاک ریزوسفر، به پایداری اکوسیستم کشاورزی نیز کمک می‌کند. این کودها با افزایش دسترسی گیاه به عناصر غذایی ضروری مانند فسفر، نیتروژن، منگنز و روی، منجر به افزایش وزن خشک و عملکرد بخش‌های مختلف گیاه می‌شوند. علاوه بر این، بهبود شاخص‌های میکروبی خاک، از جمله افزایش تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده، نشان‌دهنده افزایش سلامت و حاصلخیزی خاک است. در بیشتر ویژگی‌های مورد اندازه‌گیری، کودهای میکروبی مورد مطالعه اختلاف معنی‌دار با کود شیمیایی نداشت. علت این امر را می‌توان به یک سری عوامل همچون محدودیت‌های ذاتی عملکرد کودهای میکروبی در مقایسه با کودهای شیمیایی، عوامل مرتبط با کودهای میکروبی

Refrence

- Aghababaei F., Raiesi F., and Hosseinpour A. 2013. The Influence of earthworm and arbuscular mycorrhizal fungi on microbial biomass carbon and enzyme activity in a soil contaminated with cadmium in sunflower (*Helianthus annuus L.*) cultivation. *Water and Soil*, 27(5): 949-962.
- Ahmed M. A., Ahmed A. G., Mohamed M. H., and Tawfik M. M. 2011. Integrated effect of organic and biofertilizers on wheat productivity in new reclaimed sandy soil. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 7(1): 105-114.
- Alismaeel Z. T., Abbar A. H., and Saeed O. F. 2022. Application of central composite design approach for optimisation of zinc removal from aqueous solution using a Flow-by fixed bed bioelectrochemical reactor. *Separation and Purification Technology*, 287, 120510.
- Alizadeh K., Rezaei-chiyaneh E., Amirnia R., and Barin M. 2020. Combined Application of PGPR and Mycorrhizal Fungi on Seed yield, Macronutrients Uptake and Soil Biological Index in Intercropping Linseed (*Linum usitatissimum L.*) with Faba bean (*Vicia faba L.*). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(1): 19-40. (In Persian)
- Al-Shibli H., Dobretsov S., Al-Nabhani A., Maharachchikumbura S. S., Rethinasamy V., and Al-Sadi A. M. 2019. *Aspergillus terreus* obtained from mangrove exhibits antagonistic activities against *Pythium aphanidermatum*-induced damping-off of cucumber. *PeerJ*, 7, e7884.
- Anderson J. P. 1982. Soil respiration. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9: 831-871.
- Anderson T. H., and Domsch K. H. 1990. Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(2): 251-255.
- Anita J., Szabó A., Kovács Z., and Kátai J. 2011. The effect of alternative methods of nutrient supply on some microbiological characteristics of a chernozem soil. *Fascicula Protectia Mediului*, 17:85-90.

- Ashkyoud Z. 2023. Application of phosphate-solubilizing bacteria and fungi on phosphorus absorption and utilization efficiency in wheat and barley, 7th Annual International Congress on Agricultural Development, Natural Resources, Environment and Tourism of Iran, Tabriz, <https://civilica.com/doc/1967233> (In Persian)
- Barin M., Asadzadeh F., Hosseini M., Hammer E. C., Vetukuri R. R., and Vahedi R. 2022. Optimization of biofertilizer formulation for phosphorus solubilizing by *Pseudomonas fluorescens* Ur21 via response surface methodology. *Processes*, 10(4): 650.
- Barin M., Rasouli Sadaghiani M. H., Ashrafi Saeidlou S., and Shakouri F. 2019. Effects of salinity and microbial inoculation on the yield and phosphorous efficiency indicators of corn. *Applied Soil Research*, 7(1), 148-165. (In Persian)
- Betyar Kh., Moradi N., Moezzi A.A., and Khajoo Shojaei S. 2023. Combined effect of biochar and sugarcane bagasse compost on phosphorus adsorption and desorption characteristics in calcareous soil. *Agricultural Engineering*, 46(1):100-83.(In Persia)
- Bononi L., Chiamonte J. B., Pansa C. C., Moitinho M. A., and Melo I. S. 2020. Phosphorus-solubilizing *Trichoderma* spp. from Amazon soils improve soybean plant growth. *Scientific Reports*, 10(1): 2858.
- Bremner J. M., and Mulvaney C. S. 1982. Nitrogen total. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9: 595-624.
- Chapman H. D., and Pratt, P. F. 1962. Methods of analysis for soils, plants and waters. *Soil Science*, 93(1): 68.
- Chen S., Ding X. Q., Zhu Z. K., Wang J., Peng P. Q., Ge T. D., and Wu J. S. 2017. Effect of straw application on the dynamics of exogenous nitrogen and microbial activity in paddy soil. *Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue*, 38(4):1613-1621. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201609219>
- Cho H. J., Son S. H., Chen W., Son Y. E., Lee I., Yu J. H., and Park H. S. 2022. Regulation of Conidiogenesis in *Aspergillus flavus*. *Cells*, 11(18): 2796.
- Cotteni A.1980. Methods of plant analysis: 64-100. *Soil and Plant Testing. FAO Soil Bulletin*, 784p.
- Devi S. P., Ranjithkumar R., Djearmane S., Tey L. H., Wong L. S., Kayarohanam S., Arumugam N., Almansour A.I., and Perumal, K. 2023. Organic Remobilization of zinc and phosphorus availability to plants by application of mineral solubilizing bacteria *Pseudomonas aeruginosa*. *Heliyon*, 9(11).
- Eidizadeh Kh., Mahdavi Damghani A.M., Sabahi H., and Soufizadeh S. 2010. Effects of application of biological fertilizers in combination with chemical fertilizers on corn (*Zea mays* L.) growth in Shushtar. *Agricultural Ecology*, 2(2): 292-301.(In Persian)
- Fang B., Chen L., Wang Y., Zhu Y. F., Wang R., Song G. F., Liu J., Yang B., and Zhang S. W. 2023. Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors. *Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue*, 44(1): 452-462.
- Gee G. W. 1986. Particle size analysis. *Methods of soil analysis/ASA and SSSA*.
- Glick B. R. 2004. Bacterial ACC deaminase and the alleviation of plant stress. *Advances in applied microbiology*, 56: 291-312.
- Gou J. Y., Suo S. Z., Shao K. Z., Zhao Q., Yao D., Li H. P., Zhang J.L., and Rensing, C. 2020. Biofertilizers with beneficial rhizobacteria improved plant growth and yield in chili (*Capsicum annuum* L.). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36:1-12.
- Greenfield E. A. 2019. Myeloma and hybridoma cell counts and viability checks. *Cold Spring Harbor Protocols*, 2019(10), pdb-prot103259.
- Gupta R.K. 2000. Soil, plant, water and fertilizer analysis. *Agrobios*, New Delhi, India, pp. 438.
- Khan M. S., Zaidi A., and Wani P. A. 2009. Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture-a review. *Sustainable agriculture*, 551-570.
- Khoshru B., Sarikhani M. R., and Aliasgharzag N. 2019. The effect of inoculation of some phosphate microbial fertilizers on nutritional indices of corn (*Zea mays* L.). *Soil and water knowledge*, 29(2): 15-27(In Persian)
- Kothari S. K., Marschner H., and Römheld V. 1991. Contribution of the VA mycorrhizal hyphae in acquisition of phosphorus and zinc by maize grown in a calcareous soil. *Plant and soil*, 131: 177-185.

- Kumar V., and Prasher I. B. 2023. Phosphate solubilization and indole-3-acetic acid (IAA) produced by *Colletotrichum gloeosporioides* and *Aspergillus fumigatus* strains isolated from the rhizosphere of *Dillenia indica* L. *Folia Microbiologica*, 68(2): 219-229.
- Ladd J. N., Jackson R. B., Amato M., and Butler J. H. A. 1983. Decomposition of plant material in Australian soils. I. The effect of quantity added on decomposition and on residual microbial biomass. *Soil Research*, 21(4): 563-570.
- Lamlom S. F., Irshad A., and Mosa W. F. 2023. The biological and biochemical composition of wheat (*Triticum aestivum*) as affected by the bio and organic fertilizers. *BMC plant biology*, 23(1): 111.
- Li Y. F., Wu X. B., Niaz S. I., Zhang L. H., Huang Z. J., Lin Y. C., Li J., and Liu L. 2017. Effect of culture conditions on metabolites produced by the crinoid-derived fungus *Aspergillus ruber* 1017. *Natural Product Research*, 31(11): 1299-1304.
- Liu M., Zhao M., Yang G., Sun M., Yang A., Sun C., Zhao H., and Ao X. 2024. Root morphology, nitrogen metabolism and amino acid metabolism in soybean under low phosphorus stress. *Scientific Reports*, 14(1):28583.
- Manzoor D., Ansari M. A., Kaleri A. A., Laghari R., Rajput A. A., Naseem M. A., Khaki S.A., Shakoor A., Abideen M.Z.U., Jarwar S., and Laghari K. 2024. Impact of Different Rates of Phosphatic Fertilizer on the Growth and Yield of Sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Jammu Kashmir Journal of Agriculture*, 4(1): 15-20.
- McLean J. W. 1982. Instabilities of finite-amplitude water waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 114:315-330.
- McLean, J. W. 1982. Instabilities of finite-amplitude water waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 114:315-330.
- Mohammadi Moghadam M., Sobhanipour A., and Hokamabadi H. 2010. Study of the relationship between the growth rate of aflatoxin-producing *Aspergillus flavus* and the production of aflatoxin B1 with the percentage of nutrients and protein in the kernels of different pistachio cultivars. *Journal of Horticultural Sciences (Agricultural Sciences and Industries)*, 24 (2): 216-222. (In Persian)
- Mushtaq N., Iqba A., Batool S., Janiad S., Ahmed M., Al-Asmari F., Rahim M.A., Ramadan M.F., and Zongo E. 2025. Alginate Beads Encapsulated Auxinauxin-Producing producing *PGPR* as a Biofertilizer biofertilizer Promotes promotes *Triticum aestivum* Growthgrowth. *ACS Omega*.
- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. p. 539–579.
- Nelson, D.W. and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. p. 539–579.
- Nemati A., and Golchin A. 2016. The effect of biofertilizers on yield and concentration of micronutrients in tomato plant organs under cadmium stress. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5(3): 46-64. (In Persian)
- Olsen S. R., Watanabe F. S., Cosper H. R., Larson W. E., and Nelson L. B. 1954. Residual phosphorus availability in long-time rotations on calcareous soils. *Soil science*, 78(2): 141-152.
- Olsen, S. R., Watanabe, F. S., Cosper, H. R., Larson, W. E., and Nelson, L. B. 1954. Residual phosphorus availability in long-time rotations on calcareous soils. *Soil science*, 78(2): 141-152.
- Pu J., Li Z., Tang H., Zhou G., Wei C., Dong W., Jin Z and He, T. 2023. Response of soil microbial communities and rice yield to nitrogen reduction with green manure application in karst paddy areas. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1070876.
- Rahimzadeh S., Sohrabi Y., Heydari Gh., Ayouzi A., and Hosseini S. M. 2013. The effect of using biological and chemical fertilizers on the absorption of macronutrients, micronutrients and essential oil percentage in the medicinal plant *Medindia moldavica Dracocephalum*. (*Dracocephalum moldavica* L. *moldavica Dracocephalum*). *Journal of Iranian Agricultural Research*. 11(1): 179-190. SID.
- Ramanjaneyulu A. V., Shivay Y. S., and Giri G. 2007. Partitioning of photosynthates, N and P in mustard as influenced by nutrient management in fodder sorghum (*Sorghum Bicolor* L.)-mustard (brassica juneca L.) cropping sequence. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 53(5):553-565.

- Rasouli Sadaghiani, M.H., Barin, M., Shakouri, F. and Ashrafi Saeidlou, S., 2019. Effects of phosphate-solubilizing microorganisms and mycorrhizal fungi on the growth parameters of corn (*Zea mays* L.) under salinity condition. *Applied Soil Research*, 7(3), pp.25-39. (In Persian)
- Rasouli-Sadaghiani M.H., Vahedi R., Mashayekhi M., and Barin M. 2020. Distribution of phosphorus forms in calcareous soil inoculated with phosphate-solubilizing fungi. *Applied Soil Research*, 8(2): 70-81. (In Persian)
- Rostami H., Abbasi N., and Hajinia S. 2023. Evaluation of yield and yield components and quality of camelina grain oil under fertilizer application. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(4): 245-260. (In Persian)
- Sadeghi M., Movahedi Dehnavi M., Yadavi A., and Ebrahimi F. 2024. Evaluation of macronutrient uptake and phosphorus efficiency indices in rapeseed (*Brassica napus*) under the influence of phosphorus fertilizer management. *Iranian Crop Plant Sciences*, 55(2):123-139. (In Persian)
- Salardini A.A. 2005. Soil Fertility, 7th edition, Tehran University Press. Pages 47-76. (In Persian)
- Sharma K., Sharma J. C., Sharma S., Sharma N., Sharma R., Hashem A., Almutairi K.F., and Abd Allah, E. F. 2024. Optimizing leaf nutrient status, growth, and yield parameters in high-density apple orchards (*cv. Super chief*) via integrated drip irrigation and fertigation techniques. *Heliyon*, 10(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36136>
- Timofeeva A., Galyamova M., and Sedykh S. 2022. Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture. *Plants*, 11(16): 2119. <https://doi.org/10.3390/plants11162119>
- Vahedi R, Rasouli Sadaghiani M.H., and Barin, M. 2019. Evaluation of qualitative characteristics of calcareous soil treated with biochar and compost in the presence of growth promoting plants. *Iranian Soil and Water Research*, 50(2):259-272. (In Persian) doi: 10.22059/ijswr.2018.257511.667908
- Vahedi R., Rasouli Sadaghiani M.H. 2018. The effect of using biochar and compost of pruning waste along with growth-promoting rhizospheric bacteria on the availability of macronutrients in the rhizosphere of wheat. *Applied Soil Research*. 6 (4). (In Persian)
- Wang L., Guan H., Hu J., Feng Y., Li X., Yusef K. K., Gao H., and Tian D. 2022. *Aspergillus Niger* enhances organic and inorganic phosphorus release from wheat straw by secretion of degrading enzymes and oxalic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(35): 10738-10746.
- Wu L. X., Wang Y., Lyu H., and Chen X. D. 2023. Effects of a compound *Trichoderma* agent on *Coptis chinensis* growth, nutrients, enzyme activity, and microbial community of rhizosphere soil. *PeerJ*, 11, e15652.
- Zhou S., Zeng X., Xu Z., Bai Z., Xu S., Jiang C., Zhuang G., and Xu S. 2020. *Paenibacilluspolymyxa* biofertilizer application in a tea plantation reduces soil N₂O by changing denitrifier communities. *Canadian journal of microbiology*, 66(3): 214-227.
- Zhu W. 2016. New natural products from the marine-derived *Aspergillus fungi*-A review. *Acta Microbiologica Sinica*, 56(3): 331-362.