

بررسی تأثیر میکروارگانسیم‌های حل‌کننده فسفات‌های نامحلول بر کارایی جذب و مصرف فسفر گیاه ذرت

میرحسین رسولی صدقیانی^{*}، راضیه ابراهیمی کریم‌آباد و رقیه واحدی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۷)

چکیده

به منظور بررسی کارایی جذب (PACE) و مصرف فسفر (PUTE) گیاه ذرت در حضور میکروارگانسیم‌های حل‌کننده فسفات، آزمایش گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل شامل منابع فسفات (تری‌کلسیم فسفات و خاک فسفات) و تلقیح میکروبی (شاهد، تغذیه با فسفر محلول، تلقیح با باکتری، تلقیح با قارچ و تلقیح تلفیقی قارچ و باکتری) اجرا شد. در پایان دوره رشد، وزن خشک، مقدار فسفر گیاه و فسفر خاک اندازه‌گیری و شاخص PACE، فسفر کارایی (PE) و PUTE محاسبه شد. نتایج نشان داد که اثر متقابل منابع فسفات و تلقیح میکروبی بر مقدار فسفر اندام هوایی گیاه، فسفر خاک، PUTE و PE معنی‌دار شد. به طوری که تیمار تلقیح قارچی با منبع تری‌کلسیم فسفات مقدار فسفر بخش هوایی را ۷ برابر در مقایسه با تیمار شاهد منبع خاک فسفات افزایش داد. PUTE در تیمار شاهد از منبع تری‌کلسیم فسفات ۲/۳۵ برابر بیشتر از فسفر محلول مشاهده شد تیمار تلقیح قارچی ۱/۶۱ برابر PACE در مقایسه با تیمار تلقیح توأم باکتری و قارچ افزایش داد. همچنین، بیشترین PE (۹۹ درصد) از تیمار تلقیح قارچی از منبع تری‌کلسیم فسفات حاصل شد. به طور کلی، در خاک‌های آهکی با فراهمی پایین فسفر، تلقیح میکروارگانسیم‌ها به همراه منابع کم محلول فسفر می‌تواند سبب رفع نیاز فسفات گیاه شود.

واژه‌های کلیدی: فسفر، میکروارگانسیم‌های حل‌کننده فسفات، ذرت

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.rsadaghiani@urmia.ac.ir

مقدمه

فسفر یکی از عناصر ضروری برای رشد و بهره‌وری گیاهان است که نقش مهمی در بسیاری از فعالیت‌های فیزیولوژیکی در گیاهان ایفا می‌کند (۲۲). با وجود توزیع گسترده آن در طبیعت به دو شکل آلی و معدنی، یک عنصر غذایی محدود کننده در بسیاری از خاک‌ها به‌خصوص در خاک‌های خشک و نیمه‌خشک است. زیرا بیش از ۷۰-۹۰ درصد کودهای فسفاته استفاده شده در خاک با کاتیون‌هایی نظیر Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Fe^{3+} و Al^{3+} تثبیت و یا به‌صورت اکسیدهای آهن و آلومینیوم، سیلیکات‌های آلومینیوم و کربنات‌های کلسیم جذب سطحی کلئیدهای خاک شده و جذب فسفر توسط گیاه را کاهش می‌دهد (۲) و گیاه تنها مقدار کمی از کودهای فسفاته به‌کار برده شده در خاک را می‌تواند مورد استفاده قرار دهد. بنابراین برای افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی، روش‌های مصرف کود باید به طریقی تغییر کند که مواد غذایی مورد نیاز گیاه در طول یک مدت طولانی و بدون هدررفت در اختیار گیاه قرار گیرد. همچنین با توجه به نیاز بالای عناصر غذایی در ذرت و عدم توانایی اکثر خاک‌های زراعی در تأمین این عناصر، میزان مصرف کودهای شیمیایی در این زراعت بسیار بالا است (۱۵). از سویی، منابع کودهای فسفاته در جهان محدود و تولید آنها هزینه‌بر است (۹) و بازده کودهای فسفوری در خاک‌های آهکی بسیار پایین است. لذا استفاده از میکروارگانیزم‌های حل‌کننده فسفر (قارچ‌ها و باکتری‌ها) به‌همراه مقادیر متعادل از منابع کم محلول فسفر (سنگ فسفات و تری‌کلسیم فسفات) از جمله روش‌های عملیات زراعی بهینه است که می‌تواند این مشکل را برطرف کند. میکروارگانیزم‌های حل‌کننده فسفات جزء مهم افزایش قابلیت جذب فسفر در خاک‌های قلیایی هستند که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در فرایندهای تجزیه، معدنی کردن و متحرک‌سازی عناصر غذایی به‌ویژه فراهمی فسفر برای گیاهان نقش کلیدی دارند (۲۰). این میکروارگانیزم‌ها که توانایی انحلال فسفات‌ها و تبدیل آن به فسفر محلول را دارند با رهاسازی تدریجی فسفر و تبدیل آن به شکل قابل جذب گیاه،

نیاز به کودهای فسفاته شیمیایی را کاسته و کارایی آنها را بالا می‌برند (۱۹) که از میان آنها، غالب‌ترین گونه‌ها متعلق به جنس‌های باسیلوس، سودوموناس، پنی‌سیلیوم و آسپرژیلوس است. این میکروارگانیزم‌ها به‌عنوان اجزای مکمل چرخه فسفر قادرند از طریق مکانیزم‌های مختلف مانند تولید پروتون، ایجاد کلات، ترشح آنزیم فسفاتاز، تولید اسیدهای آلی و معدنی فسفر را از منابع نامحلول آزاد کنند (۲۶). همچنین این میکروارگانیزم‌ها قادرند با سازوکارهایی شامل تثبیت نیتروژن، تولید هورمون‌های گیاهی باعث افزایش قابلیت فراهمی عناصر ریزمغذی و فسفر در گیاه شوند (۲۳). علاوه بر میکروارگانیزم‌ها، گیاهان فسفرکارا توانایی بالایی در جذب فسفر داشته و در نهایت می‌توانند در غلظت بسیار کم فسفر، رشد و عملکرد نسبی قابل قبولی تولید کنند. گیاهان فسفرکارا برای رشد بهتر دو مکانیزم اصلی به‌کار می‌برند که شامل: افزایش در جذب فسفر از خاک (مورفولوژی ریشه، ترشحات ریشه، طول و تراکم ریشه) و افزایش مصرف فسفر (مکانیزم‌های داخلی در سطح سلولی) است (۱۸).

سالانه بیش از صد میلیون هکتار از اراضی زراعی دنیا به کشت ذرت اختصاص پیدا می‌کند و بعد از گندم بزرگ‌ترین سطح کشت را اشغال می‌کند. جمعیت رو به رشد جهان با کمبود عمده‌ای در تولیدات گیاهی مواجه است و در سطح جهان به تولید نباتات پرمحصولی مانند ذرت نیاز دارد. بنابراین برای تولید محصول مناسب بایستی به میزان کافی عنصرهای غذایی در اختیار این گیاه قرار گیرد. لذا این تحقیق با هدف بررسی کارایی جذب و مصرف فسفر در گیاه ذرت در حضور باکتری‌ها و قارچ‌های حل‌کننده منابع کم محلول فسفر صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار شامل منبع فسفاته (تری‌کلسیم فسفات و خاک فسفات) و تلقیح میکروبی (شاهد، تغذیه با فسفر محلول

جدول ۱. نتایج برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

بافت خاک	pH	EC	کربن آلی	کربنات کلسیم	نیترژن کل	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب
		dS m ⁻¹	درصد			mg kg ⁻¹	
لوم سیلت	۷/۸۰	۰/۸۰	۰/۷۶	۱۶/۰۰	۰/۲۸	۵/۰۰	۲۷۰

(KH₂PO₄)، تلقیح با باکتری، تلقیح با قارچ و تلقیح تلفیقی (قارچ و باکتری)) انجام شد. خاک مورد استفاده با فسفر قابل استفاده پایین برای آزمایش گلخانه ای از اراضی غیرزراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه و از عمق ۳۰-۰ سانتی متری انتخاب و بعد از هوا خشک کردن از غربال ۲ میلی متری عبور داده شد. سپس برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی به روش های استاندارد اندازه گیری شدند (۲۴) (جدول ۱). سپس در دستگاه اتوکلاو و با دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار ۱/۵ اتمسفر به مدت دو ساعت استریل شدند (۲۵). برای انجام آزمون های گلخانه ای، خاک های استریل شده به گلدان های پلاستیکی ۵ کیلوگرمی که با اتانول ۹۶ درصد ضد عفونی سطحی شده بودند منتقل شدند. برای تلقیح میکروبی از سویه های میکروبی جداسازی شده از ریزوسفر گندم با توان بالای انحلال فسفات های نامحلول استفاده شد که شامل سودوموناس های گروه فلورسنت (ترکیبی از گونه های *P. putida* و *P. fluorescens* *P. aeruginosa* اسپرژیلوس (*Aspergillus terreus* و *Aspergillus niger*) بود. برای تلقیح بذرها از روش اضافه کردن محلول باکتری ها (یک میلی لیتر از سوسپانسیون باکتری ها) به خاک اطراف بذرها همزمان با کاشت استفاده شد. مایه تلقیح قارچ ها نیز به قطر نیم سانتی متر و به فاصله کمی از سطح خاک به طور یکنواخت تلقیح و توزیع شد. به طوری که جمعیت میکروبی در هر سوسپانسیون تلقیح شده ۱۰^۸ cfu ml⁻¹ بود. پس از افزودن مایه های تلقیح، ۸ عدد بذر ذرت سینگل گراس ۷۰۴ (بعد از انجام ضد عفونی سطحی با هیپوکلریت سدیم ۰/۵ درصد) در هر کدام از گلدان ها قرار داده شد. همچنین میزان ۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم فسفر از منبع فسفات پتاسیم و میزان ۸۰ میلی گرم

بر کیلوگرم فسفر از منبع سنگ فسفات و تری کلسیم فسفات با در نظر گرفتن تیمارها و در فاصله ۵ سانتی متری زیر بذرها قرار داده شد. ۱۰ روز پس از سبز شدن بذرها، تعداد ۳ بوته سالم تر و قوی تر در هر گلدان نگهداری شدند. گلدان ها در شرایط گلخانه با دمای ۲۵±۵ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. در طول دوره رشد، از آب مقطر به منظور آبیاری و از محلول غذایی کامل فاقد فسفر برای تغذیه گیاهان استفاده شد. پس از ۷۰ روز دوره رشد، بخش هوایی از رویه خاک جدا شده و پس از شستشو با آب مقطر، به مدت ۷۲ ساعت در آن و در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد خشک و وزن خشک آنها اندازه گیری شدند. سپس فسفر قابل جذب (۲۴)، فسفر اندام هوایی گیاه به روش هضم خشک و رنگ آمیزی با آمونیم وانادات و آنتیمونی تارتارات اندازه گیری و شاخص های کارایی از روابط زیر محاسبه شد:

شاخص کارایی جذب فسفر (PACE):

$$PACE = (TP \text{ in } P_0) / (TP \text{ in } P_f)$$

TP in P₀ = مقدار فسفر کل شاخساره در حالت تلقیح میکروبی

TP in P_f = مقدار فسفر کل شاخساره در حالت فسفر محلول

شاخص کارایی مصرف فسفر (PUTE):

$$PUTE = SDW / TP$$

SDW = عملکرد خشک شاخساره

TP = مقدار فسفر کل شاخساره

شاخص فسفر کارایی (PE):

$$PE = (SDW \text{ in } P_0) / (SDW \text{ in } P_f) \times 100$$

SDW in P₀ = عملکرد خشک شاخساره در حالت تلقیح میکروبی

SDW in P_f = عملکرد خشک شاخساره در حالت فسفر محلول

جدول ۲. تجزیه واریانس تلقیح میکروبی و منبع فسفات بر فسفر قابل جذب خاک، عملکرد اندام هوایی، غلظت فسفر گیاه، مقدار فسفر و کارایی مصرف فسفر

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		وزن خشک اندام هوایی	فسفر قابل جذب خاک	مقدار فسفر گیاه
منابع فسفات	۱	۸۶/۹۷***	۶/۰۷۵***	۱۷۱۰/۵***
تلقیح میکروبی	۴	۷۷/۸۷***	۱/۲۱۶**	۳۵۴۸/۹***
منابع فسفات × تلقیح میکروبی	۴	۳/۷۹ ^{ns}	۱/۸۱۶***	۵۴/۶*
خطا	۲۰	۳/۹۳	۰/۱۷۸	۱۳/۵
ضریب تغییرات (%)	-	۱۶/۱	۷/۸۲	۶/۶
کارایی مصرف فسفر				۰/۰۰۳ ^{ns}
				۰/۰۴۲***
				۰/۰۰۸**
				۰/۰۰۱
				۱۳/۸۷

ns، ***، ** و * به ترتیب غیرمعنی دار، معنی دار در سطح ۰/۱ درصد، ۱ درصد و ۵ درصد

نتایج و بحث

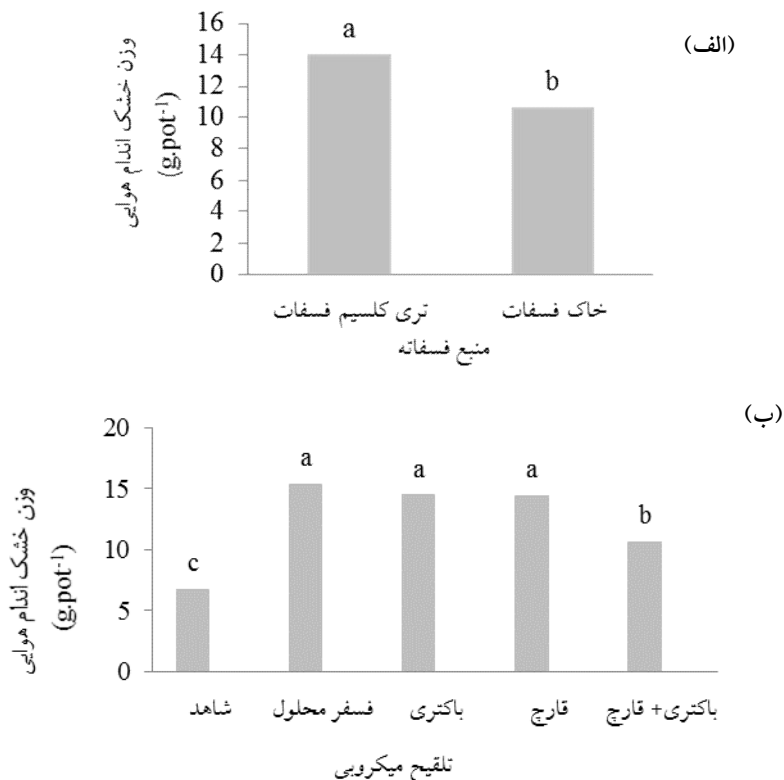
جدول ۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در بستر کشت را نشان می‌دهد.

جدول تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف منابع فسفات و تلقیح میکروبی بر فسفر قابل جذب در خاک ($P < 0/001$)، مقدار فسفر گیاه ($P < 0/005$) و کارایی مصرف فسفر ($P < 0/001$) را نشان می‌دهد (جدول ۲) که اثر متقابل این تیمارها بر پارامترهای گفته شده به استثنای وزن خشک اندام هوایی معنی دار بود. همچنین اثر اصلی منابع فسفات و تلقیح میکروبی نیز بر فسفر قابل جذب در خاک ($P < 0/001$ و $P < 0/001$) و وزن خشک اندام هوایی گیاه و مقدار فسفر گیاه ($P < 0/001$) معنی دار شد. اثر اصلی تلقیح میکروبی نیز بر کارایی مصرف فسفر ($P < 0/001$) معنی دار بود. اما با اثر اصلی منابع فسفات اختلاف معنی داری را نشان ندادند.

وزن خشک اندام هوایی گیاه

مقایسه میانگین اثر اصلی منابع فسفات نشان داد که بیشترین وزن خشک بخش هوایی گیاه (۱۴/۰۲ گرم در گلدان) در تیمار تری کلسیم فسفات حاصل شد که نسبت به تیمار خاک فسفات تری کلسیم ۳۲/۱۳ درصد افزایش نشان داد (شکل ۱- الف) که این نتایج در

توافق با نتایج خسروی و همکاران (۱۰) بود، آنها نیز گزارش کردند که کاربرد خاک فسفات و تری کلسیم فسفات سبب افزایش وزن خشک اندام هوایی گیاه کاهو شد. همچنین در بین تلقیح سویه‌های میکروبی، کمترین وزن خشک بخش هوایی (۶/۷۶ گرم در گلدان) مربوط به تیمار شاهد و بیشترین آن (۱۵/۳۵ گرم در گلدان) مربوط به تیمار فسفر محلول بود که نسبت به تیمار شاهد ۲/۲۷ برابر افزایش نشان داد. اما با تلقیح باکتریایی و تلقیح قارچی تفاوت معنی داری نشان نداد. میزان کم وزن خشک اندام هوایی در تلقیح تلفیقی قارچ و باکتری ممکن است به علت وجود اثرات آنتاگونیستی بین این دو گروه میکروبی باشد. به طور کلی تلقیح میکروبی منجر به افزایش ۲/۵ برابری وزن خشک اندام هوایی نسبت به شاهد شد (شکل ۱- ب). در گزارشی مشابه با مقایسه وزن خشک در مقادیر مختلف فسفر محلول نشان داده شد که با مصرف فسفر محلول، وزن خشک رقم‌های مختلف گیاه افزایش معنی داری داشتند (۸ و ۱۸). در اغلب مطالعات اثر میکروارگانیزم‌ها در افزایش وزن خشک بخش هوایی گیاه را به توانایی این میکروارگانیزم‌ها در افزایش فراهمی و متعاقباً مصرف بهتر فسفر نسبت داده شده است. میکروارگانیزم‌های مورد استفاده در این تحقیق به‌ویژه باکتری‌ها دارای خواص محرک رشدی از جمله تولید



شکل ۱. مقایسه میانگین اثرات اصلی: الف) منابع فسفات و ب) تلقیح میکروبی بر وزن خشک اندام هوایی گیاه ذرت

کمترین مقدار (۴/۱ میلی گرم بر کیلوگرم) آن نیز مربوط به تیمار شاهد منبع خاک فسفات بود که با تیمارهای تلقیح باکتریایی و تلقیح توأم منبع خاک فسفات تفاوت معنی داری نشان نداد. همان‌طور که مشاهده شد میزان فسفر در خاک گلدان سویه‌های تلقیح شده و همچنین تیمار فسفر محلول به‌طور معنی داری کاهش یافت زیرا در این تیمارها به دلیل افزایش رشد ریشه، جذب فسفر از خاک توسط گیاه افزایش یافته است. مطالعات نشان داده‌اند که میکروارگانسیم‌های حل‌کننده فسفات، فسفر تثبیت شده در خاک را حل کرده و باعث افزایش عملکرد گیاه می‌شوند (۷). همچنین این میکروارگانسیم‌های حل‌کننده فسفات می‌توانند با ترشح اسیدهای آلی و معدنی، تولید کلات و تشکیل کمپلکس با کاتیون‌های فلزی سبب افزایش قابلیت دسترسی فسفر در خاک شوند (۳). ریشه گیاهان نیز موادی (قندها، اسیدهای آمینه و اسیدهای آلی) با وزن مولکولی کم به محیط اطراف خود تراوش می‌کند که رهاسازی مواد در اثر فتوسنتز توسط ریشه و تجزیه آنها توسط میکروارگانسیم‌های

سیدروفور، اکسین و توانا در انحلال فسفات‌های کم‌محلول هستند. علاوه بر این افزایش وزن خشک اندام هوایی نسبت به شاهد در اثر تلقیح با سویه‌های مورد آزمایش را همچنین می‌توان به تولید و ترشح اسیدهای آلی، معدنی، پلی‌ساکاریدها توسط این سویه‌ها نسبت داد که به دلیل خصوصیت کلات‌کنندگی در جذب آهن و سایر عناصر ریزمغذی و نیز آزادسازی فسفر از ترکیبات نامحلول سبب افزایش وزن خشک گیاه شده است (۴ و ۵).

فسفر قابل جذب خاک

مقایسه میانگین تیمارهای اعمال شده بر مقدار فسفر خاک در جدول ۲ قابل مشاهده است. بین تیمارهای مختلف بیشترین مقدار فسفر خاک (۶/۲ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار شاهد از منبع تری کلسیم فسفات مشاهده شد که با تیمارهای تیمار فسفر محلول و تیمار قارچی این منبع فسفات و نیز تیمار فسفر محلول از منبع خاک فسفات اختلاف معنی داری نداشت و

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل تلقیح میکروبی و منبع فسفات بر فسفر قابل جذب خاک، غلظت فسفر گیاه، مقدار فسفر و کارایی مصرف فسفر

منابع فسفات	تلقیح میکروبی	فسفر قابل جذب خاک	مقدار فسفر گیاه	کارایی مصرف فسفر (PUTE)
		(mg kg ⁻¹)	mg pot ⁻¹	(g DW mg ⁻¹ P)
	شاهد	۶/۲a	۲۵/۹۵g	۰/۴۷a
	فسفر محلول	۵/۶ab	۸۷/۵۳a	۰/۲۰d
تری کلسیم فسفات	باکتری	۵/۳b	۶۸/۷۳c	۰/۲۳d
	قارچ	۵/۸ab	۸۲/۴۸a	۰/۲۰d
	باکتری+قارچ	۵/۴b	۴۹/۹۶e	۰/۳۰bc
	شاهد	۴/۱c	۱۲/۷۷h	۰/۳۳b
	فسفر محلول	۵/۹ab	۷۵/۴۴b	۰/۲۰d
خاک فسفات	باکتری	۴/۵bc	۴۷/۰۷ef	۰/۲۷c
	قارچ	۵/۹ab	۶۱/۷۵d	۰/۲۰d
	باکتری+قارچ	۴/۳bc	۴۲/۶f	۰/۲۷c

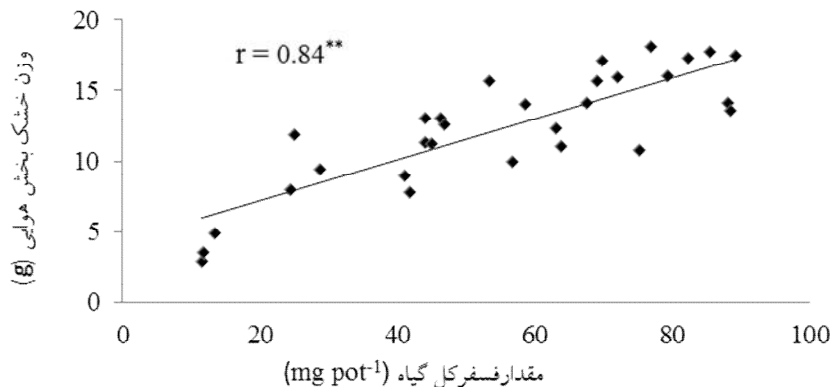
میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

بخش هوایی نیز شده بود که بیانگر همبستگی بالای بین این دو پارامتر است. چرا که افزایش جذب فسفر و انتقال آن به سلول‌های گیاه، سبب بهبود رشد و افزایش فتوسنتز و تولید مواد فتوسنتزی و در نهایت افزایش عملکرد گیاه ذرت شد. همچنین با توجه به جدول ۳ مقدار فسفر گیاه در تیمار تلقیح قارچ و باکتری به‌طور متوسط در هر دو منبع فسفات کمتر از تلقیح جداگانه گروه‌های میکروبی بود که دلیل آن را می‌توان به اثرات آنتاگونیستی این دو گروه میکروبی نسبت داد که با نتایج موسوی و سپهر (۱۶) مطابقت داشت. مدنی و همکاران (۱۴) تأثیر مصرف باکتری‌های حل‌کننده فسفات به‌صورت دو مرحله‌ای در پاییز و بهار به‌همراه ۱۲۵ کیلوگرم کود فسفر در افزایش مقدار فسفر بافت‌های گیاه کلزا را معنی‌دار گزارش کردند. در این بررسی همچنین همبستگی مثبت و معنی‌داری ($r = 0.84^{**}$) بین وزن خشک و مقدار فسفر کل اندام هوایی گیاه مشاهده شد (شکل ۲). لیاث و همکاران (۱۱) نیز بیان کردند که بین مقدار فسفر کل اندام هوایی گیاه و عملکرد خشک اندام

محیط ریشه، pH خاک را تحت تأثیر قرار داده و منجر به افزایش فراهمی فسفر در خاک و در اثر افزایش فسفر در ریزوسفر میزان این عنصر در گیاه افزایش می‌یابد.

مقدار فسفر گیاه

تلقیح سویه‌های میکروبی در هر دو شکل منبع فسفات نسبت به تیمارهای بدون تلقیح مقدار فسفر بخش هوایی گیاه را افزایش داده، اما بیشترین مقدار فسفر بخش هوایی (۸۷/۵ میلی‌گرم در گلدان) در تیمار تری‌کلسیم فسفات به‌همراه فسفر محلول مشاهده شد که با تلقیح قارچی از این منبع فسفات تفاوت معنی‌داری نداشت و کمترین مقدار آن نیز (۱۲/۳ میلی‌گرم در گلدان) مربوط به تیمار شاهد منبع خاک فسفات بود (جدول ۳). دلیل این امر می‌تواند به‌علت حلالیت بیشتر تری‌کلسیم فسفات نسبت به خاک فسفات باشد و نیز سهولت جذب و بالا بودن فسفر قابل جذب در کوتاه‌مدت از این منبع بیان کرد. چنانچه گزارش شد این تیمار منجر به افزایش وزن خشک



شکل ۲. رابطه بین مقدار فسفر جذب شده و وزن خشک اندام هوایی گیاه ذرت

توجیه این مطلب می‌توان چنین بیان کرد که مصرف فسفر در گیاه تحت کنترل متابولیسم سلولی و خصوصیات ژنتیکی است و کمتر تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرد. تلقیح میکروارگانسیم‌های حل‌کننده فسفات منجر به کاهش کارایی مصرف فسفر گیاه از هر دو منبع فسفات شده. این مطلب را می‌توان به توانایی این میکروارگانسیم‌ها در انحلال فسفات و افزایش فراهمی و جذب فسفر برای گیاهان و متعاقباً کاهش کارایی مصرف فسفر نسبت داد. نتایج این تحقیق در توافق با شهباز و همکاران (۲۱) است. آنها کاهش دو برابری در شاخص کارایی مصرف فسفر رقم‌های *Brassica* با فسفر محلول گزارش کردند و دلیل این کاهش را وابستگی کارایی مصرف فسفر به نوع ارقام گیاهی و سطوح فسفوری بیان کردند.

شاخص کارایی جذب فسفر گیاه (PACE)

تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴) نشان داد که اثرات اصلی منابع فسفات و تلقیح میکروبی تأثیر معنی‌داری بر کارایی جذب فسفر گیاه ($P < 0.001$) داشت. همان‌طور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود کارایی جذب فسفر در منبع فسفات تری‌کلسیم فسفات ۲۰/۷۵ درصد بیشتر از خاک فسفات بود. همچنین با توجه به شکل ۳-ب می‌توان بیان داشت که تلقیح سویه‌های میکروبی به‌طور معنی‌داری میزان کارایی جذب فسفر را افزایش داد. به طوری که تیمار تلقیح قارچی ۳/۷۸ برابر کارایی جذب فسفر در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. بنابراین می‌توان بیان

هوایی ارقام گیاهی گندم همبستگی مثبت وجود داشت. پژوهشگران زیادی نقش اتیلن در تغییرات مورفولوژیکی سیستم ریشه‌ای تحت تأثیر میکروارگانسیم‌های حل‌کننده فسفات را بیان کرده‌اند که خود می‌تواند بر جذب عناصر غذایی به ویژه فسفر توسط گیاه موثر باشد (۱ و ۱۲). استیکن و همکاران (۶) با بررسی تأثیر سه گونه باکتری محرک رشد *Bacillus M-3*, *Bacillus OSU-142*, *Pseudomonas BA-8* بر رشد و عملکرد محصول و سطح عناصر غذایی توت فرنگی، نشان دادند که عملکرد محصول و میزان فسفر در گیاهان تیمار شده در مقایسه با شاهد افزایش معنی‌داری داشتند.

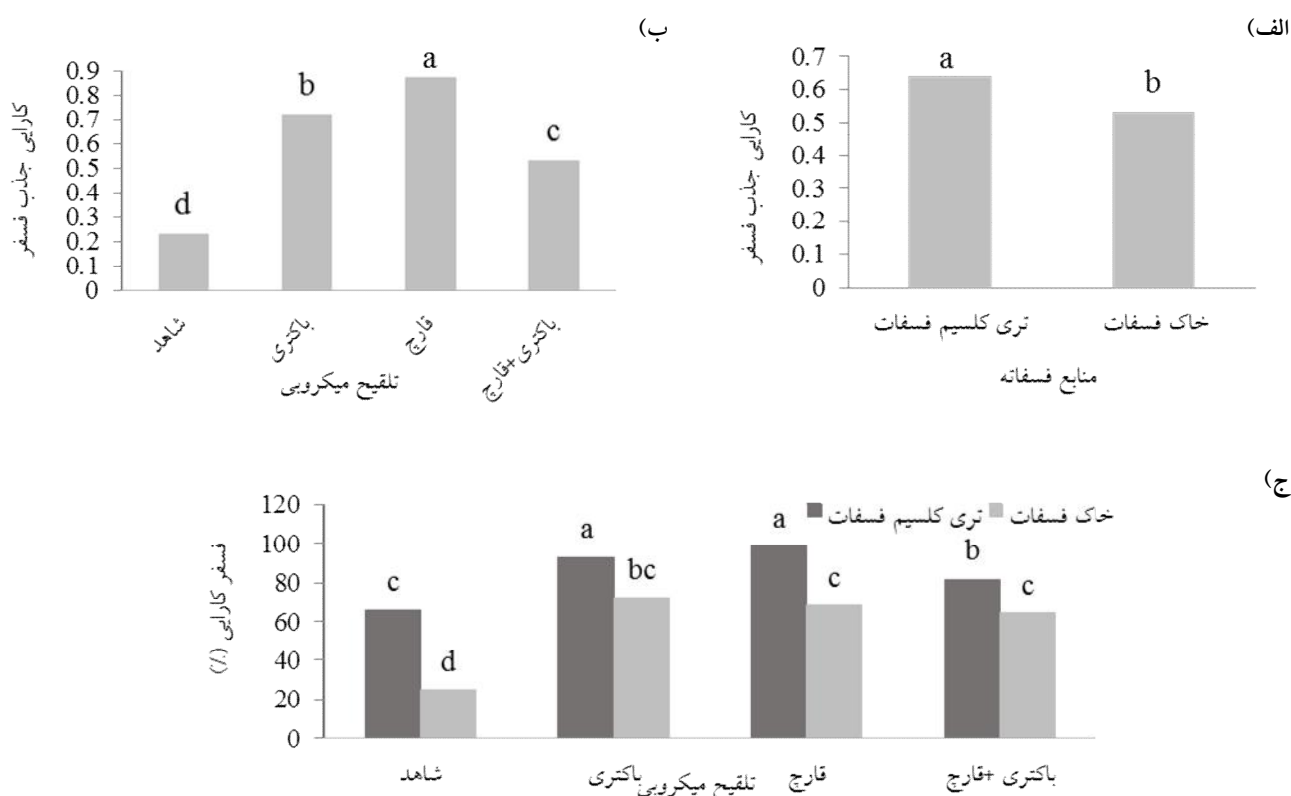
شاخص کارایی مصرف فسفر گیاه (PUTE)

این شاخص بیانگر این مطلب است که گیاهانی که در غلظت‌های پایین فسفر بتوانند فعالیت‌های متابولیکی را در بافت‌ها و اندام‌های خود طوری تنظیم کنند که وزن خشک بالایی را به‌ازای واحد فسفر جذب شده تولید کنند کارایی مصرف فسفر بالایی دارند. بیشترین مقدار شاخص کارایی مصرف فسفر در شرایط کمبود فسفر (تیمار شاهد) از منبع تری‌کلسیم فسفات ۰/۴۷ گرم ماده خشک بر میلی‌گرم و کمترین میزان کارایی مصرف فسفر در تیمار فسفر محلول و تلقیح قارچی (۰/۲ گرم ماده خشک بر میلی‌گرم) از هر دو منبع فسفات مشاهده شد که با تیمار تلقیح باکتریایی از منبع تری‌کلسیم فسفات اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۳). در

جدول ۴. تجزیه واریانس منابع فسفات و تلقیح میکروبی بر کارایی جذب فسفر و فسفرکارایی

میانگین مربعات		درجه آزادی	منابع تغییرات
فسفرکارایی (%)	کارایی جذب فسفر (PACE)		
۴۵۱۰***	۰/۰۷***	۱	منابع فسفات
۱۸۸۴/۸***	۰/۴۵***	۳	تلقیح میکروبی
۱۷۱/۲*	۰/۰۰۸ ^{ns}	۳	منابع فسفات × تلقیح میکروبی
۳۶/۳	۰/۰۰۳	۱۶	خطا
۸/۴	۹/۸	-	ضریب تغییرات (%)

ns * و *** به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح ۵ درصد و ۱ درصد



شکل ۳. مقایسه میانگین اثرات اصلی: (الف) منابع فسفات، (ب) تلقیح میکروبی و (ج) اثرات متقابل آنها بر کارایی جذب فسفر و فسفرکارایی

فراهمی فسفر برای جذب ریشه‌ها را افزایش داده و باعث جذب مقادیر بیشتری از این عنصر شده و کارایی جذب فسفر در گیاه ذرت را افزایش داده است (۱۳).

کرد که قارچ‌های حل‌کننده فسفات با فعالیت خود مانند گسترش سیستم ریشه‌ای و تولید آنزیم فسفاتاز سبب تجزیه فسفات‌های آلی و پیروفسفات‌های غیرآلی شده و از این طریق

شاخص فسفرکارایی (PE)

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها اثر منابع فسفات و تلقیح میکروبی بر درصد فسفرکارایی ($P < 0.001$) در سطح 0.1 درصد معنی‌دار شد (جدول 4)، همچنین اثر متقابل منبع فسفات و تلقیح میکروبی نیز تأثیر معنی‌داری بر میزان فسفرکارایی ($P < 0.05$) داشت. تلقیح با میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات شاخص فسفرکارایی را به طور معنی‌دار افزایش داد که قارچ‌های حل‌کننده فسفات در افزایش فسفرکارایی فعال‌تر از تلقیح توأم و جداگانه باکتری‌های حل‌کننده فسفات عمل کردند به طوری که بیشترین درصد فسفرکارایی (99٪) در تیمار تلقیح قارچی از منبع تری‌کلسیم فسفات مشاهده شد که با تیمار تلقیح باکتریایی (93٪) از همین منبع اختلاف معنی‌داری نداشت و کمترین میزان فسفرکارایی نیز مربوط به تیمار شاهد منبع خاک فسفات (25٪) بود (شکل 3-ج). این افزایش فسفرکارایی توسط میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات در افزایش جذب و مصرف فسفر بومی خاک یا فسفر اضافه شده به خاک است. فسفرکارایی پدیده‌ای پیچیده است که تحت تأثیر مکانیسم‌های گیاهی دخیل در جذب فسفر از خاک و مصرف فسفر در سطح متابولیسم سلولی است. اسبورن و رینگل (17) با ارزیابی فسفرکارایی بیست رقم گندم در استفاده از منابع آلی و معدنی فسفر، گزارش دادند که ارقام گندم در استفاده از منبع فسفات آهن کاراتر از منبع فیتات هستند. به عبارتی نوع منبع فسفر، فسفرکارایی ارقام را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لیائو و همکاران (11) گزارش کردند که مکانیسم‌های فسفرکارایی به فاکتورهای زیادی از قبیل محیط رشد و شکل‌های شیمیایی فسفر خاک وابسته است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که تلقیح میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات بر صفات اندازه‌گیری شده و شاخص‌های کارایی تأثیر معنی‌داری داشته و باعث افزایش وزن خشک گیاه شده است. در بیشتر پارامترهای اندازه‌گیری شده تأثیر منبع تری‌کلسیم فسفات نسبت به منبع خاک فسفات بالاتر بود که می‌تواند به علت حلالیت بیشتر آن نسبت به خاک فسفات باشد. در این بررسی همچنین همبستگی مثبت و معنی‌داری بین وزن خشک و مقدار فسفر اندام هوایی گیاه مشاهده شد. افزایش جذب فسفر و انتقال آن به سلول‌های گیاه، سبب بهبود رشد و افزایش فتوسنتز و تولید مواد فتوسنتزی و در نهایت افزایش عملکرد ذرت شد. در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تلقیح میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات با منابع کم محلول فسفر میزان جذب فسفر توسط گیاه را از این منابع کم محلول را افزایش داده و در نتیجه منجر به افزایش کارایی فسفر گیاه می‌شود. از این رو با توجه به هزینه بالای کودهای شیمیایی و خطرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف زیادی این کودها، استفاده از میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات به‌تنهایی یا در تلفیق با مقدار متعادل و بهینه تری‌کلسیم فسفات و خاک فسفات، گزینه مناسبی به‌منظور دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار است. چنین استنباط می‌شود که در شاخص کارایی مصرف فسفر (PUTE) تأثیر تیمار تلفیقی قارچ+باکتری و در شاخص کارایی جذب فسفر (PACE) تأثیر تیمار تلقیح قارچی بالاتر بود.

منابع مورد استفاده

1. Afzal, A., M. Ashraf, S. A. Asad and M. Farooq. 2005. Effect of phosphate solubilizing microorganisms on phosphorus uptake, yield and yield traits of Wheat (*Triticum aestivum L.*) in rainfed area. *Internet Journal Agriculture Biological* 7(2): 207-209.
2. Ali Khani, A., G. Jilani, M. Saleem Akhtar, S. M. Saqlan Naqavi and M. Rasheed. 2009. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. *Journal of Agriculture Biological Science* 1(1): 48-58.
3. Antoun, H. 2002. Field and green house trials performed with phosphate solubilizing bacteria and fungi.

- Proceedings of the 15th International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization. Salamanca University, Salamanca, Spain.
4. Archana, D. S. 2007. Studies on potassium solubilizing bacteria. M.Sc. Thesis, University of Agricultural Sciences, Dharwad.
 5. Chakraborty, U., B. Chakraborty and M. Basnet. 2006. Plant growth promotion and induction of resistance in *Camellia sinensis* by *Bacillus megaterium*. *Journal of Basic Microbial* 46: 186-195.
 6. Esitken, A., H. E. Yildiz, S. Ercisli, M. Figen Donmez, M. Turan and A. Gunes. 2009. Effects of plant growth promoting bacteria (PGPB) on yield, growth and nutrient contents of organically grown strawberry. *Ecological Engineering* 33: 150-156.
 7. Gull, M., F. Y. Hafeez, M. Saleem and A. Malik. 2004. Phosphate uptake and growth promotion of chickpea by co-inoculation of mineral phosphate solubilizing bacteria and a mixed rhizobial culture. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 44: 623-628.
 8. Gunes A., A. Inal, M. Alpaslan and I. Cakmak. 2006. Genotypic variation in phosphorus efficiency between Wheat cultivars grown under greenhouse and field conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 52: 470-478.
 9. Gyaneshwar, P., L. J. Kumar and P. S. Parekh. 2002. Role of microorganisms in induced by ACC deaminase containing PGPR. *The American Phytological Society* 17(8): 865-871.
 10. Khosravi, A., M. Zarei and A. Ronaghi. 2017. Effect of phosphate solubilizing bacterium, vermicompost and phosphate sources on growth of lettuce in a calcareous soil. *Soil Biology* 5(1): 81-93. (In Farsi).
 11. Liao, M., P. J. Hocking, B. Dong, E. Delhaize, A. E. Richardson and P. R. Ryan. 2008. Variation in early phosphorus-uptake efficiency among wheat genotypes grown on two contrasting Australian soil. *Australian Journal Agriculture Research* 59: 157-166.
 12. Li, J., D. H. Ovakim, T. C. Charles and B. R. Glick. 2000. An ACC deaminase minus mutant of *Enterobacter cloacae* UW4 no longer promotes root elongation. *American Phytopathological Society* 41: 101-105.
 13. Liu, Y., G. Mi, F. Chen, J. Zhang and F. Zhang. 2004. Rhizosphere effect and growth of two maize (*Zea mays* L.) genotypes with contrasting P efficiency at low P availability. *Plant Science* 167: 217-223.
 14. Madani, H., G. R. Naderi Brojerdi, H. Aghajani and A. R. Pazoki. 2011. Evaluating of chemical phosphate fertilizers and Phosphor solublizing bacteria on seed yield, biological yield and tissues relative phosphorus content in winter rapeseed (*Brassica napus* L.). *Agronomy and Plant Breeding* 6(4): 93-104. (In Farsi).
 15. Mirhadi, M. J. 2001. Maize. Agricultural Research, Education and Extension Organization Press.
 16. Musavi, R. and E. Sepehr. 2013. Phosphorus efficiency of some barley genotypes in the presence of phosphate-solubilizing microorganisms. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture Soilless Culture Research* 4(16): 40-27. (In Farsi).
 17. Osborne, L. D. and Z. Rengel. 2002. Screening cereals for genotypic variation in efficiency of phosphorus uptake and utilization. *Australian Journal Agriculture Research* 53: 295-303.
 18. Ozturk, L., S. Eker, B. Torun and I. Cakmak. 2005. Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. *Plant and Soil* 269: 69-80.
 19. Pradhan, N. and L. B. Sukla. 2006. Solubilization of inorganic phosphates by fungi isolated from agriculture soil. *African Journal of Biotechnology* 5(10): 850-854.
 20. Richardson, A. E. 2001. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. *Australian Journal Plant Physiology* 28: 897-906.
 21. Shahbaz, A. M., Y. Oki and T. Adachi. 2005. Phosphorus nutrition of Brassica cultivars under deficient and adequate levels in solution culture. PP: 236-237. In: Li, (Eds.), Plant Nutrition for Food Security, Human Health and Environmental Protection, Tsinghua University Press. Beijing, Chin.
 22. Sharma, S., V. Kumar and R. B. Tripathi. 2011. Isolation of Phosphate Solubilizing Microorganism (PSMs) from Soil. *Microbial Biotechnology Research* 1(2): 90-95.
 23. Siddiqui, Z. A. and J. Pichtel. 2008. Mycorrhizae: an overview. P. 1-35. In: Siddiqui, Z. A., M. S. Akhtar and K. Futai (Eds.), Mycorrhizae: Sustainable agriculture and forestry. Springer Science, Business Media B.V.
 24. Sparks, D. L., A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N., Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston and M. E. Sumner. 1996. Methods of soil analysis Part 3- Chemical methods. P. 1390. Soil Science Society of America Book Ser. 5, Madison, Wisconsin, USA.
 25. Vahedi, R., M. H. Rasouli-sadaghiani and M. Barin. 2019. The effect of fruit trees pruning waste biochar on some soil biological properties under rhizobox conditions. *Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 23(1): 321-336. (In Farsi).
 26. Whitelaw, M. A. 2000. Growth promotion of plants inoculated with phosphate solubilization fungi. *Advances in Agronomy* 69(8): 99-151.

Investigating the Effect of Phosphate Solubilizing Microorganisms of Insoluble Phosphorus on Phosphorus Acquisition and Utilization Efficiency in Corn (*Zea mays* L.)

M. H. Rasouli-Sadaghiani*, R. Ebrahimi Karimabad and R. Vahedi¹

(Received: May 5-2019; Accepted: January 7-2020)

Abstract

In order to investigate P acquisition efficiency (PACE) and P utilization efficiency (PUTE) of the corn in the presence of phosphate-solubilizing microorganisms (PSMs), a factorial experiment was carried out in a completely randomized design in the greenhouse. The factors were including P sources (tricalcium phosphate (TCP) and rock phosphate (RP)) and microbial inoculation (control, soluble P as KH_2PO_4 (Ps), inoculation with bacteria (PSB), inoculation with fungi (PSF), co-inoculation of PSB + PSF). At the end of growth period, plant dry weight and P content in plant and soil available-P were measured and then PACE, PUTE and phosphorus efficiency (PE) indices were calculated. The results showed that, the interaction of phosphate source and microbial inoculation was significant with respect to shoot P content, soil P, PUTE and PE. PSF-TCP treatment increased 7 times shoot phosphorus content compared to cont-RP treatment. PUTE in Cont-TCP treatment was 2.35 times higher than the TCP-P_s. The inoculation of PSF increased the PACE 1.61 times compared to co-inoculation of PSB + PSF treatment. Also, the highest PE index (99%) was obtained from SF-TCP treatment. In general, in calcareous soils with low P availability, inoculation of PSM with insoluble phosphorus sources can meet the phosphate needs of the plant.

Keywords: Phosphorous, Phosphate-Solubilizing Microorganisms, Corn

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

*: Corresponding author, Email: m.rsadaghiani@urmia.ac.ir