تاثیر قارچ حل‌کننده فسفات، هیومیک اسید و منابع فسفر بر رشد و جذب فسفر گیاه گوجه فرنگی

چکیده

تاثیر کاربرد قارچ *تریکودرما*، هیومیک اسید و منابع فسفر بر فراهمی فسفر خاک و تاثیر آن بر ویژگی‌های رشد و جذب فسفر گیاه گوجه فرنگی در یک آزمایش گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. فاکتورهای آزمایشی شامل ۱) قارچ (با و بدون *Trichoderma koningii*)، ۲) هیومیک اسید (۰، ۲ و ۴ گرم برکیلوگرم خاک) و ۳) منبع فسفر (بدون فسفر، کاربرد تری کلسیم فسفات و سوپر فسفات ساده) بودند. بیشترین مقادیر وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه و شاخص کلرفیل گیاه در تیمار کاربرد قارچ، ۴ گرم بر کیلوگرم هیومیک اسید و کاربرد سوپرفسفات ساده مشاهده شد. مایه‌زنی قارچ باعث افزایش مقدار جذب فسفر ریشه در خاک بدون فسفر، تیمار شده با تری کلسیم فسفات و سوپر فسفات ساده به‌ترتیب به میزان ۳۳/۷، ۸۵/۹ و ۶۸/۸ درصد شد. بیشترین مقدار فسفر فراهم خاک و جذب فسفر اندام هوایی گیاه در تیمار کاربرد قارچ، سوپر فسفات ساده و مقدار ۴ گرم بر کیلوگرم هیومیک اسید مشاهده شد که نسبت به تیمار بدون قارچ، فسفر و هیومیک اسید به میزان ۵۸ و ۱۵۳ درصد بیشتر بود. در مجموع، استفاده از هیومیک اسید و قارچ *تریکودرما* به‌همراه کود شیمیایی فسفره می‌تواند راهکاری مناسب جهت افزایش فسفر فراهم خاک باشد و جذب فسفر و رشد گیاه گوجه فرنگی را بهبود بخشد.

کلمات کلیدی: *هیومیک اسید، آزادسازی فسفر، تریکودرما، کشاورزی پایدار*

The effect of phosphate solubilizing fungi, humic acid and phosphorus sources on growth and phosphorus uptake of tomato plant

Abstract

The effect of *Trichoderma* fungus, humic acid and phosphorus sources on soil phosphorus availability and its effect on growth characteristics and phosphorus uptake of tomato plant was investigated in a greenhouse experiment. The experimental factors were 1) fungus (with and without *Trichoderma koningii*), 2) humic acid (0, 2 and 4 g kg^{-1} soil) and 3) phosphorus treatment (without phosphorus, use of three calcium phosphate and simple superphosphate. The highest values of fresh and dry weight of shoots and roots and chlorophyll index of the plant were observed in the treatment of fungus, 4 g kg^{-1} of humic acid and the application of simple superphosphate. Fungi inoculation led to increase the amount of root phosphorus uptake in soil treatment of without phosphorus, treated with three calcium phosphate and simple superphosphate by 33.7, 85.9 and 68.8%, respectively. The highest amount of soil available phosphorus and shoot phosphorus uptake was observed in soil treated with fungi, simple superphosphate and 4 g kg^{-1} of humic acid, which was 58 and 153% higher than the treatment without fungi, phosphorus and humic acid. In general, the combined use of humic acid, *Trichoderma* and chemical phosphorus fertilizer can be a suitable solution to increase the availability of soil phosphorus and improve the phosphorus uptake and growth of tomato plant.

Keywords: *Humic acid, Phosphorus release, Sustainable agriculture, Trichoderma*

ویراستاری نشده

مقدمه

فسفر یکی از مهم‌ترین مواد مغذی برای گیاهان و جانوران است. اگرچه بیشتر خاک‌های کشاورزی حاوی مقادیر زیادی فسفر آلی و معدنی هستند، اما به درستی در دسترس گیاهان قرار نمی‌گیرد. این مسئله به دلیل واکنش‌پذیری بالای فسفر با برخی فلزات مانند کلسیم، آهن و آلومینیوم و تشکیل کمپلکس‌های فلزی است که منجر به رسوب یا جذب ۷۵ تا ۹۰ درصد فسفر کل خاک می‌شود. در نتیجه، فقط غلظت بسیار کمی از فسفر در دسترس گیاهان است و بسیاری از خاک‌های کشاورزی در واقع دچار کمبود فسفر قابل دسترس هستند (Adesemoye and Kloepper, 2009) . به‌منظور رفع نیاز فسفر برای گیاهان در خاک‌های کشاورزی، مقادیر زیادی کودهای شیمیایی فسفره استفاده می‌شود (Ohno et al., 2005). با این حال، فسفر موجود در کودها نیز ممکن است با واکنش با یون‌های فلزی خاک، به فسفات‌های نامحلول تبدیل شده و از دسترس گیاهان مجددا خارج شود (Zidi et al., 2009). علاوه بر این، استفاده بیش از حد یا طولانی‌مدت از کودهای شیمیایی فسفره، باعث آلودگی محیطی و کاهش کیفیت خاک می‌شود (Rezakhani et al., 2019).

به خوبی شناخته شده است که استفاده از کودهای زیستی دارای ریزجانداران حل‌کننده فسفات می‌تواند کارایی استفاده از کودهای شیمیایی فسفره را افزایش دهد و در نتیجه جذب فسفر توسط گیاه را بهبود بخشد (Ghorchiani ; Rezakhani et al., 2019 et al., 2018). *تریکودرما* (*Trichoderma*) یکی از قارچ‌های مفید در کشاورزی و باغبانی است که به عنوان یک عامل کنترل بیولوژیک بیماری‌ها و همچنین بهبود کیفیت خاک شناخته شده است. گونه‌های این قارچ از طریق برقراری ارتباط با ریشه گیاهان و تحریک رشد ریشه، القای مقاومت سیستمیک، تولید هورمون‌های رشد و بهبود سلامت گیاهان منجر به افزایش رشد گیاهان می‌شود. این قارچ در بهبود جذب مواد مغذی از جمله فسفر نقش مهمی ایفا می‌کند (Yedidia *et al*., 2001). اغلب گونه‌های *تریکودرما*، محیط اطراف خود را با ترشح اسیدهای آلی، اسیدی کرده و بدین ترتیب منجر به انحلال ترکیبات نامحلول فسفات کلسیم می‌شوند. همچنین با کلاته کردن فلزات، می‌تواند قابلیت دسترسی فسفر را در خاک افزایش دهند (Rui-Xia et al., 2015). بنابراین، ریزجانداران حل‌کننده فسفات نه تنها می‌توانند به جذب بیشتر فسفر توسط گیاه کمک نمایند بلکه می‌توانند مصرف کودهای شیمیایی فسفره را تا حد زیادی کنترل کنند (Emami et al., 2018; Rezakhani et al., 2019). در این‌باره کشکا و همکاران (۱۳۹۷) تاثیر کاربرد باکتری انتروباکتر و قارچ *تریکودرما* در سطوح مختلف فسفر (۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) را بر بهبود عملکرد گندم بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد همزمان ریزجانداران و کود فسفره تاثیر بیشتری نسبت به کاربرد کود فسفره به تنهایی بر صفات رشد گندم داشته است. همچنین کاربرد این ریزجانداران در سطوح کم فسفر توانسته نتایج بهتری نسبت به خاک بدون باکتری و قارچ به همراه داشته باشد.

کاربرد کودهای آلی مانند هیومیک اسید یکی دیگر از راه‌کارهای مورد استفاده برای بهبود فراهمی زیستی عناصر غذایی در خاک است. هیومیک اسید (وزن مولکولی ۳-۳۰ کیلو دالتون) یکی از مهم‌ترین اسیدهای آلی است که به طور طبیعی از تجزیه و تخریب مواد گیاهی و جانوری در خاک بوجود می‌آید و دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است که تاثیر زیادی بر کیفیت خاک و رشد گیاهان دارد. هیومیک اسید می‌تواند با بهبود ساختمان خاک باعث افزایش تهویه و نفوذپذیری خاک شود. همچنین این ماده می‌تواند به حفظ رطوبت خاک کمک نماید و با کلاته کردن عناصر غذایی خاک و همچنین با تحریک رشد ریشه و فعالیت میکروبی منجر به جذب بهتر مواد مغذی توسط گیاهان شود (Karimi et al., Mackowiak et al., 2001; Mora et al., 2012; 2020). بنابراین استفاده از هیومیک اسید می‌تواند نیاز به مصرف کودهای شیمیایی را کاهش داده و از هزینه‌های تولید بکاهد (بهروان و همکاران، ۱۳۹۷؛ جهاندیده و همکاران، ۱۳۹۸). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که هیومیک اسید به همراه منابع فسفاتی می‌تواند تحرک و قابلیت دسترسی فسفر را در خاک افزایش دهد و موجب جذب بیشتر فسفر توسط گیاه شود (Yang et al., 1985; Wang et al., 1995). در حقیقت استفاده از مواد آلی یا اسیدهای آلی می‌توانند در افزایش فراهمی فسفر به وسیله جایگزینی آنیونی با یون‌های ارتوفسفات روی مکان‌های جذب، ایجاد پوشش بر روی سطوح جذب کننده اکسیدهای آهن، آلومینیم و کربنات‌ها، ایجاد کمپلکس با یون‌های آهن، آلومینیم و کلسیم موثر باشند. از طرفی، اسیدهای آلی با جذب روی سطوح جذب کننده باعث افزایش بار منفی ذرات شده و دفع آنیونی را افزایش می‌دهند (حلاج نیا و همکاران، ۱۳۸۵).

ویراستاری نشده

گوجه فرنگی یکی از گیاهان مهم در سبد محصولات مصرفی است و همانند سایر گیاهان، رشد بهینه و عملکرد مطلوب آن از نظر کمی و کیفی تحت تأثیر شرایط تغذیه‌ای قرار دارد. برای رسیدن به این مهم و ضرورت تولید ارگانیک گیاهان، توجه به راهکارهای زیستی مورد نیاز است. مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد همزمان هیومیک اسید با ریزجانداران محرک رشد گیاه باعث افزایش عملکرد گیاه شده است (Leme Filho et al., 2020; Cozzolino et al., 2021). Lerman و همکاران (۲۰۱۷) همچنین مشاهده کردند که تلقیح قارچ میکوریزا در حضور هیومیک اسید و فسفر منجر به افزایش رشد و جذب فسفر و نیتروژن گیاه به‌لیمو شد. با وجود این، در ارتباط با تاثیر همزمان کاربرد قارچ *تریکودرما*، سطوح مختلف هیومیک اسید در حضور منابع فسفات محلول و نامحلول بر عملکرد گوجه فرنگی و چگونگی تاثیر آن‌ها بر جذب فسفر توسط گیاه پژوهشی یافت نشد. بنابراین هدف این تحقیق این بود که کاربرد همزمان قارچ *تریکودرما* و هیومیک اسید بر کارایی جذب فسفر از منابع مختلف فسفر و صفات رشد گیاه گوجه‌فرنگی مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش ها

خاک مورد استفاده در این پژوهش از یک زمین زراعی واقع در کرمانشاه (طول جغرافیایی ′۰۹ °۴۷ شرقی و عرض جغرافیایی ′۲۱ °۳۴ شمالی) تهیه گردید که طی چند سال اخیر کود فسفره دریافت نکرده بود. نمونه خاک، هواخشک و از الک ۲ میلی‌متری گذرانده شد. ویژگی‌های عمومی خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتر، pH و هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع، کربن آلی به روش سوزاندن تر، نیتروژن کل به روش کجلدال، فسفر قابل دسترس به روش اولسن و پتاسیم قابل دسترس به روش عصاره‌گیری با استات آمونیم اندازه گیری شد (Burt, 2004). این ویژگی‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

بافت خاک	pH	هدایت الکتریکی	فسفر قابل دسترس	پتاسیم قابل دسترس	نیتروژن کل	کربن آلی
		$dS\ m^{-1}$		$mg\ kg^{-1}$	%	
لوم شنی	۷/۱	۱/۳۴	۱۲/۶	۷۶/۷	۰/۲۴	۰/۷۷

برای انجام این پژوهش، آزمایشی گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول، تیمار قارچ در دو سطح بدون قارچ (NF) و همراه با قارچ *تریکودرما* (WF)، فاکتور دوم، کاربرد هیومیک اسید در سه سطح صفر (H0)، ۲ (H2) و ۴ (H4) گرم برکیلوگرم خاک و فاکتور سوم، کاربرد فسفر شامل تیمار بدون فسفر (NP)، مقدار ۰/۲۵ گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از محل تری کلسیم فسفات (TCP) و سوپر فسفات ساده (SP) بود.

سویه قارچی مورد استفاده در این پژوهش سویه *Trichoderma koningii* بود که برای تکثیر و جوان‌سازی این قارچ از محیط کشت نشاسته دکستروز آگار استفاده شد. این سویه قارچی نشان داده بود که دارای توانایی انحلال فسفات نامحلول می‌باشد (ناهیدان و همکاران، ۱۳۹۸). برای تهیه مایه تلقیح قارچی، پس از رشد و اسپورزایی قارچ، ابتدا مقداری آب استریل بر روی کلونی‌های قارچ داخل پتری‌دیش ریخته و سپس سطح قارچ با استفاده از یک آنس استریل به آرامی خراشیده شد. سپس اسپورهای قارچ به یک ظرف استریل منتقل گردید. همچنین هیومیک اسید جامد از شرکت شیمی‌کرد خریداری شد.

برای انجام آزمایش، نمونه‌های ۱۵۰۰ گرمی از خاک (گذرانده شده از الک ۲ میلی‌متر) با مقادیر مختلف هیومیک اسید و فسفر مخلوط و به نیمی از خاک‌های تیمارشده، مایه تلقیح قارچی (معادل $۱۰^{۷}$ اسپور در هر گرم خاک) اضافه شد. خاک‌ها به گلدان‌های ضد عفونی شده انتقال یافتند. سپس برای کاشت بذور گوجه فرنگی (رقم فلات کارون)، ابتدا بذرها با قرار دادن در اتانول ۷۰ ٪ به مدت دو دقیقه، محلول هیپوکلریت سدیم ۲ ٪ به مدت سه دقیقه و ۵ بار شستشو با آب مقطر استریل ضدعفونی سطحی و برای جوانه زنی روی کاغذ صافی استریل درون پتری‌دیش قرار داده شدند. سپس، تعداد ۵ بذر جوانه زده به هر گلدان انتقال داده و رطوبت خاک به ۶۰ درصد ظرفیت زراعی رسانده شد. گلدان‌ها در محیط گلخانه با دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. پس

ویراستاری نشده

از استقرار کامل گیاهچه‌ها در خاک، عمل تنک کردن انجام و یک گیاهچه سالم برای ادامه آزمایش نگهداشته شد. پس از ۲ ماه، بوته ها برداشت و ارتفاع بوته و وزن تر ریشه و اندام هوایی اندازه‌گیری گردید. شاخص کلرفیل توسط دستگاه کلرفیل سنج شرکت مینولتای ژاپن مدل (SPAD-502) تعیین شد. سپس، نمونه‌ها در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند و بعد از آن وزن خشک آن‌ها تعیین گردید. برای اندازه‌گیری فسفر ریشه و ساقه گیاه، ابتدا نمونه‌های گیاهی خشک شده، پودر و در کوره الکتریکی خاکستر، توسط اسید کلریدریک ۲ نرمال هضم و سپس مقدار فسفر آن‌ها به روش رنگ سنجی قرائت شد (Ryan et al., 2007). مقدار فسفر قابل دسترس خاک نیز پس از عصاره‌گیری خاک با بی‌کربنات سدیم به روش رنگ سنجی اندازه‌گیری شد (Olsen and Sommers, 1982). مقدار جذب فسفر ریشه و اندام هوایی از حاصل‌ضرب غلظت فسفر در وزن خشک اندام گیاه محاسبه گردید.

آنالیز داده‌ها با نرم افزار SAS و ترسیم نمودارها با نرم افزار Excel انجام گرفته شد. مقایسات میانگین داده‌ها توسط آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج

صفات رشد گوجه فرنگی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بر صفات رشد گیاه گوجه فرنگی نشان داد که اثر اصلی همه تیمارهای مورد بررسی بر مقدار ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه و شاخص کلرفیل معنی‌دار بود (P< ۰/۰۵). همچنین اثر متقابل کاربرد قارچ و منبع فسفر بر وزن تر ریشه و اندام هوایی و اثر متقابل قارچ و هیومیک اسید بر ارتفاع گیاه و وزن تر ریشه معنی‌دار نبود (P> ۰/۰۵). اثر متقابل سه گانه تیمارها بر تمام صفات رشد گیاه معنی دار بود (P< ۰/۰۵) (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تاثیر تیمارهای مورد مطالعه بر ویژگی های رشدی گیاه گوجه فرنگی

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		ارتفاع گیاه	وزن تر اندام هوایی	وزن تر ریشه	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	شاخص کلروفیل
تکرار	۱	۲/۷ns	۶/۷۶ns	۱/۱۰۳ns	۰/۰۰۰۳*	۰/۰۰۰۴ns	۴/۰۳ns
قارچ (F)	۱	۸۷۲***	۲۵۳۱***	۳۸۹/۹***	۰/۵۰***	۰/۴۲۱***	۹۲۰***
منبع فسفر (P)	۲	۱۰۰***	۳۹۱***	۱۰۷/۸***	۰/۰۹***	۰/۰۷۰***	۱۱۲***
هیومیک اسید (H)	۲	۷۲/۹***	۱۷۸***	۲۳/۰۱***	۰/۰۰۴***	۰/۰۰۳***	۶۰/۰***
F*P	۲	۹/۷**	۳/۹۱ns	۲/۲۸ns	۰/۰۲***	۰/۰۱۵***	۸/۶۳*
F*H	۲	۰/۹۱ns	۳۷/۹***	۵/۳۱ns	۰/۰۰۰۸***	۰/۰۰۰۹*	۴/۴۲ns
P*H	۴	۵/۷۷**	۱۷/۰۴**	۱۲/۵۶***	۰/۰۰۲***	۰/۰۰۲**	۱۳/۲**
F*P*H	۴	۱۱/۳***	۷/۹۸*	۱۲/۳۶***	۰/۰۰۲***	۰/۰۰۳***	۸/۰۳*
خطا	۳۴	۱/۲۹	۳/۳۳	۱/۹۳	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۲	۲/۴۲
ضریب تغییرات	-	۳/۱۰	۳/۵۵	۵/۵۴	۱/۰۵	۲/۰۹	۳/۵۰

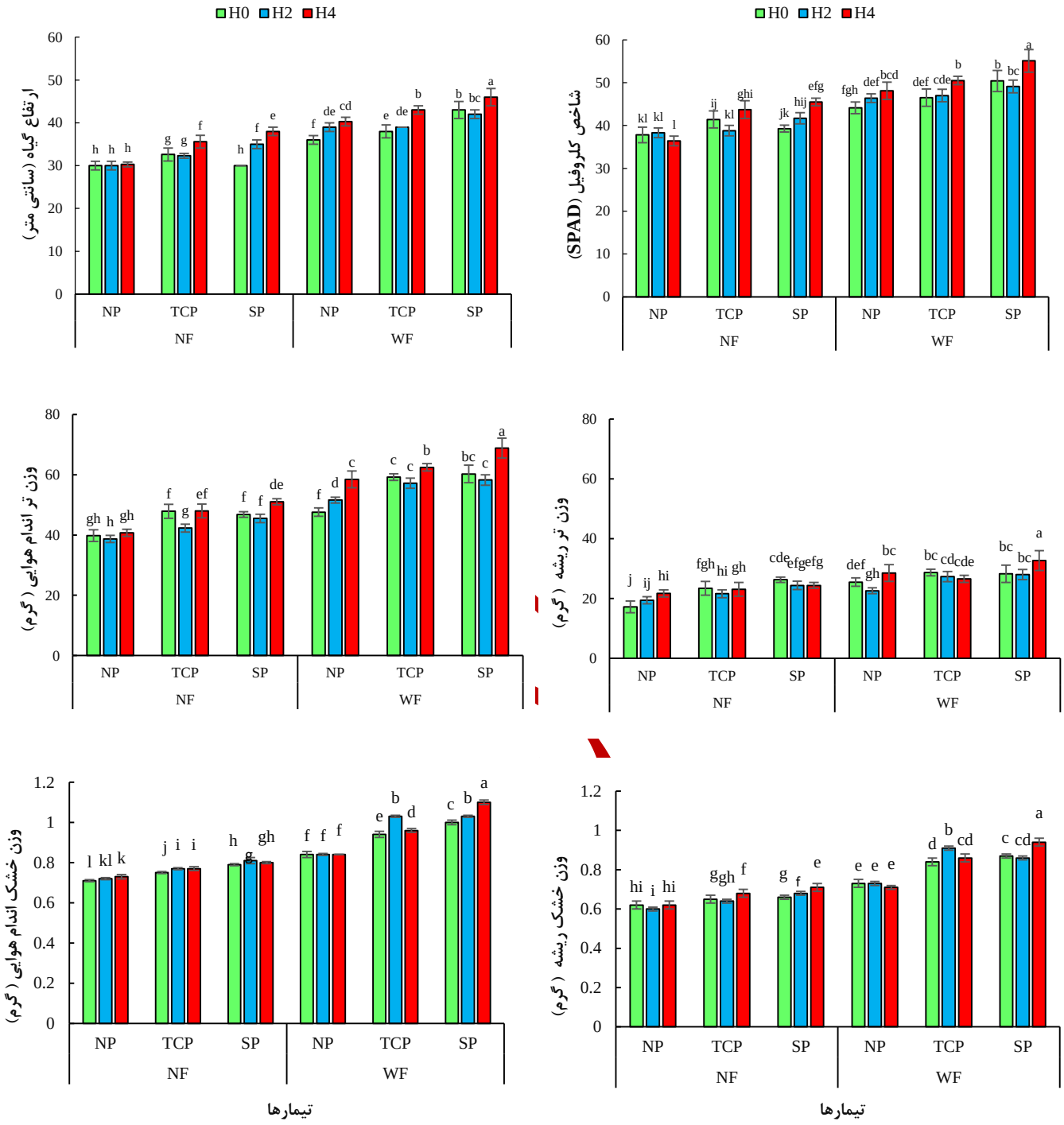
*، ** و *** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ و ۰/۱ درصد می باشند. ns نشانگر غیر معنی‌داری آماری می باشد.

نتایج مقایسه میانگین اثرات سه گانه تیمارها نشان داد که قارچ *تریکودرما* در شرایط عدم استفاده از کود فسفره در خاک، باعث افزایش ارتفاع گیاه شد که با کاربرد هیومیک اسید، تاثیر قارچ بیشتر شد. هنگامی‌که قارچ و هیومیک اسید به همراه منابع فسفر از محل تری کلسیم فسفات و سوپرفسفات ساده استفاده شد، وزن تر و خشک ریشه افزایش بیشتری یافت. به طوری‌که بیشترین مقدار ارتفاع گیاه به میزان ۴۶ سانتی‌متر در تیمار کاربرد ۴ گرم بر کیلوگرم هیومیک اسید و کاربرد سوپرفسفات ساده به همراه

ویرایش نشده

قارچ *تریکودرما* به دست آمد که رشد ۵۳ درصدی را نسبت به خاک بدون فسفر و قارچ و هیومیک اسید به همراه داشت (شکل ۱). چنین روندی در وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه هم مشاهده شد، به طوری‌که بیشترین مقدار وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه گیاه گوجه فرنگی به ترتیب به میزان ۶۸/۸۲، ۳۲/۷۰، ۱/۱۰ و ۰/۹۴ گرم بود که در تیمار کاربرد ۴ گرم بر کیلوگرم هیومیک اسید و کاربرد سوپرفسفات ساده به همراه قارچ *تریکودرما* به دست آمد. در همین تیمار نیز مقدار شاخص کلرفیل گیاه دارای بیشترین مقدار خود (۵۵/۱ SPAD) بود که نسبت به تیمار شاهد بدون قارچ و منبع فسفر و هیومیک اسید به میزان ۴۶ درصد افزایش یافت (شکل ۱). این مسئله نشان‌دهنده تاثیر مثبت مایه زنی قارچ *تریکودرما* در افزایش کارایی کاربرد کود فسفره و هیومیک اسید بر رشد گیاه است. گزارش شده است که *تریکودرما* می‌تواند با تولید هورمون‌های رشد، نه تنها باعث افزایش ارتفاع، وزن بخش هوایی و ریشه گیاه شود بلکه با افزایش حجم ریشه‌های جانبی منجر به افزایش سطح فعال آن‌ها شده و جذب عناصر غذایی را بهبود بخشد. متابولیت‌های ثانویه *تریکودرما* مانند هارزیانولید[1] و ۶- پنتیل آلفا پیرون[2] هم در تنظیم رشد و هم فعال کردن پاسخ‌های دفاعی گیاه نقش دارند (خوش منظر و همکاران، ۱۳۹۸). هیومیک اسید با تاثیر مثبت بر طول، حجم و سطح فعال ریشه گیاه به دلیل دارا بودن ترکیبات شبه هورمونی و یا فعال کردن مسیرهای متابولیکی تولید اکسین در گیاه (Rathor et al. 2024)، بهبود جامعه میکروبی موثر بر چرخه عناصر غذایی و ساختمان‌سازی خاک می‌تواند شرایط بهینه‌ای را بر رشد گیاه فراهم نماید (Ai et al., 2023). همچنین، مشاهده شده است که هیومیک اسید می‌تواند طول و وزن گیاه را با بیان ژن‌های موثر در تولید هورمون سیتوکینین در ساقه افزایش دهد (Rathor et al. 2024). از طرفی، با بهبود رشد ریشه توسط هیومیک اسید، جذب آب و عناصر غذایی افزایش یافته و تولید رنگدانه‌های فتوسنتزی بواسطه جذب بیشتر عناصر غذایی نیز بیشتر می‌شود (جهاندیده و همکاران، ۱۳۹۸؛ Li et al., 2024). از آن‌جایی که فسفر از عناصر ضروری موثر بر رشد و فرآیندهای متابولیکی گیاهان همچون فتوسنتز است (Kayoumu et al., 2023)، با تامین فسفر از منابع فسفاته به ویژه فسفات محلول (سوپرفسفات ساده) و افزایش کارایی جذب آن توسط کاربرد هیومیک اسید و قارچ *تریکودرما*، افزایش بیشتری در شاخص کلرفیل و رشد گیاه گوجه فرنگی در پژوهش حاضر نیز مشاهده شده است (شکل ۱). پژوهش‌های پیشین نیز به نقش مثبت هیومیک اسید بر افزایش رشد گیاهان مانند گوجه فرنگی (Jindo et al., 2016)، گندم (Rathor et al. 2024)، خیار (De Hita et al., 2020) و ذرت (Canellas et al., 2002) اشاره کردند. جهاندیده و همکاران (۱۳۹۸) نیز تاثیر کاربرد فسفر و هیومیک اسید را بر شاخص‌های رشد گیاه کلزا بررسی کرده و مشاهده کردند که بیشترین وزن تر و خشک اندام هوایی و رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر و مقدار ۱ گرم بر کیلوگرم هیومیک اسید به صورت مصرف همراه با آب آبیاری بود. در برخی از مطالعات نیز به تاثیر مثبت کاربرد همزمان هیومیک اسید و ریزجانداران محرک رشد گیاه بر عملکرد گیاه اشاره داشته‌اند (Leme Filho et al., 2020; Cozzolino et al., 2021). در این باره، ویسی و همکاران (۱۳۹۵) بیان کردند که تاثیر کودهای شیمیایی بر اکثر ویژگی‌های عملکردی گیاه در غلظت‌های کمتر کود مناسب بود و مصرف زیاد آن‌ها باعث کاهش کارایی قارچ و هیومیک اسید شد. Lerman و همکاران (۲۰۱۷) همچنین مشاهده کردند که تلقیح قارچ میکوریزا در حضور هیومیک اسید و فسفر منجر به افزایش وزن خشک، جذب فسفر و نیتروژن به لیمو و زیست توده میکروبی در ریزوسفر گیاه شد که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. خلیلی و همکاران (۱۴۰۲) نیز مشاهده کردند که کاربرد هیومیک اسید و اکتینومیست‌های حل‌کننده فسفات به‌همراه کود فسفره باعث افزایش کارایی مصرف کود فسفره و فراهمی آن برای گیاه ذرت شد.

[1] Harzianolide
[2] 6-pentyl-alpha-pyrone



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر متقابل قارچ، هیومیک اسید و منابع فسفر بر ویژگی‌های رشد گیاه گوجه فرنگی. NF: بدون قارچ، WF: با قارچ؛ NP: بدون کاربرد فسفر، TCP: کاربرد تری کلسیم فسفات، SP: کاربرد سوپرفسفات ساده، H0: بدون کاربرد هیومیک اسید، H2: کاربرد ۲ گرم بر کیلوگرم هیومیک اسید، H4: کاربرد ۴ گرم بر کیلوگرم هیومیک اسید. میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشند.

فسفر قابل دسترس خاک، جذب فسفر اندام هوایی و ریشه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر کاربرد قارچ، هیومیک اسید و منبع فسفر و اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه آن‌ها بر فسفر قابل دسترس خاک و جذب فسفر توسط اندام هوایی معنی‌دار بود (P< ۰/۰۵). تنها اثر اصلی قارچ و منبع فسفر و اثر متقابل این دو بر جذب فسفر ریشه از لحاظ آماری معنی دار شد (P< ۰/۰۵) (جدول ۳).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تاثیر مورد مطالعه بر مقدار فسفر در دسترس خاک و جذب فسفر اندام هوایی و ریشه گیاه گوجه فرنگی

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		فسفر قابل دسترس خاک	جذب فسفر اندام هوایی	جذب فسفر ریشه
تکرار	۱	۰/۷۹ns	۰/۰۸۹ns	۰/۵۱ns
قارچ (F)	۱	۴۵۶***	۱۴۵***	۲۵۳***
منبع فسفر (P)	۲	۱۲۸***	۳۳/۰۲***	۵۸/۳۵***
هیومیک اسید (H)	۲	۸۰/۸***	۲/۱۴۱***	۳/۸۵ns
F*P	۲	۲/۳۱***	۸/۶۵۴***	۱۸/۹۵***
F*H	۲	۱۶/۹***	۰/۶۱۹***	۲/۸۴ns
P*H	۴	۹/۳۵***	۱/۳۴۴***	۱/۹۳ns
F*P*H	۴	۳/۹۴***	۰/۹۴۸***	۰/۶۲۲ns
خطا	۳۵	۰/۰۹۹	۰/۰۲۵	۱/۹۷۱
ضریب تغییرات	-	۱/۴۸	۲/۲۴	۱۵/۷۶

*، ** و *** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ و ۰/۱ درصد می باشند. ns نشانگر غیر معنی‌داری آماری می باشد.

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که قارچ *تریکودرما* در خاک بدون فسفر منجر به افزایش مقدار فسفر قابل دسترس خاک شد و این تاثیر با کاربرد هیومیک اسید در غلظت ۴ گرم بر کیلوگرم به میزان ۵۸ درصد افزایش یافت. هنگامی‌که قارچ و هیومیک اسید به همراه تری کلسیم فسفات و سوپر فسفات ساده در خاک استفاده شد مقدار فسفر قابل دسترس افزایش یافت؛ به طوری‌که بیشترین مقدار فسفر قابل دسترس خاک (۲۹/۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک تیمار شده با قارچ *تریکودرما*، سوپرفسفات ساده و مقدار ۴ گرم بر کیلوگرم هیومیک اسید دیده شد (شکل ۲).

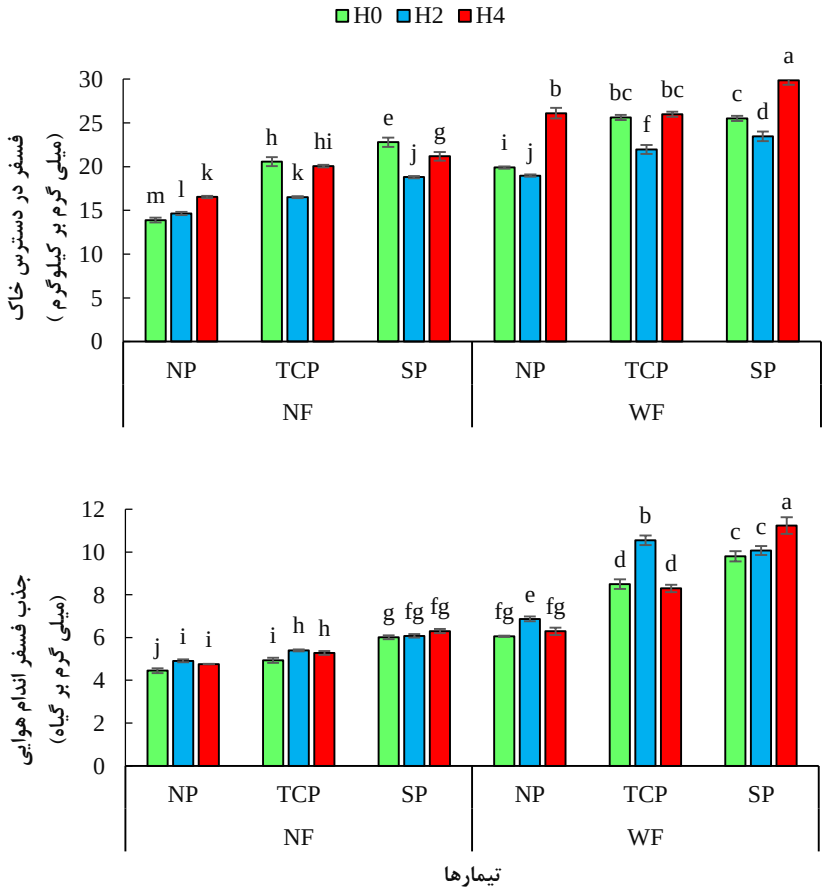
نتایج همچنین نشان داد که قارچ *تریکودرما* منجر به افزایش بیشتری در جذب فسفر اندام هوایی گوجه فرنگی در خاک‌های تیمارشده با هیومیک اسید شد؛ به طوری‌که بیشترین مقدار جذب فسفر اندام هوایی گیاه در تیمار کاربرد قارچ، سوپر فسفات ساده و مقدار ۴ گرم بر کیلوگرم هیومیک اسید مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد بدون قارچ، فسفر و هیومیک اسید افزایش ۱۵۳ درصدی را نشان داد (شکل ۲).

در ارتباط با مقدار جذب فسفر در ریشه نیز مقایسه میانگین اثر متقابل قارچ و منابع فسفر حاکی از آن بود که کاربرد فسفر از دو منبع سوپرفسفات ساده و تری‌کلسیم فسفات باعث افزایش مقدار جذب فسفر ریشه شد؛ اگرچه تفاوت معنی‌داری در جذب فسفر ریشه بین دو منبع فسفر مشاهده نشد. با کاربرد قارچ *تریکودرما* مقدار جذب فسفر ریشه در خاک بدون فسفر، تیمار شده با تری‌کلسیم فسفات و سوپر فسفات ساده به میزان ۳۳/۷، ۸۵/۹ و ۶۸/۸ درصد افزایش یافت (شکل ۳).

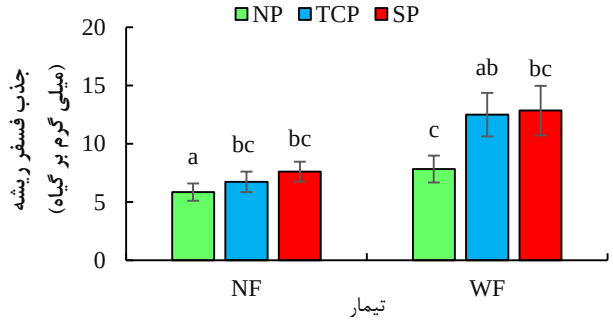
نتایج به‌طور کلی نشان‌دهنده افزایش کارایی فراهمی فسفر در اثر کاربرد *تریکودرما* و هیومیک اسید می‌باشد. اگرچه کاربرد کودهای شیمیایی فسفره، از روش‌های متداول تامین فسفر برای گیاه است ولی در خاک معمولا دستخوش واکنش‌های شیمیایی و تثبیت شده و بخش زیادی از آن‌ها به صورت غیرقابل جذب درآمده و از کارایی آن‌ها کاسته می‌شود (Vance et al., 2003). ریزجانداران حل‌کننده فسفات، دارای سازوکارهای مختلفی جهت افزایش فراهمی فسفر در خاک هستند. یکی از سازوکارها، اسیدی کردن محیط اطراف ریشه در اثر آزاد کردن اسیدهای آلی (مانند اگزالیک، سیتریک و گلوکونیک اسید) یا معدنی و به‌دنبال آن حل کردن ترکیبات فسفره می‌باشد. توانایی اسیدهای آلی در انحلال فسفر نسبت به اسیدهای معدنی بیش‌تر است و این تفاوت به تأثیر کلات کنندگی اسید آلی نسبت داده شده است. اسیدهای

ویراستاری نشده

آلی، با داشتن گروه‌های عاملی هیدروکسیلی و کربوکسیلی می‌توانند با مسدود کردن جایگاه‌های فعال جذب و ترسیب فسفر، حلالیت و فراهمی فسفر را در خاک افزایش دهند (Hasan et al., 2024). ریزجانداران حل‌کننده فسفات همچنین با استفاده از تولید آنزیم‌های فسفاتازی، می‌توانند فسفر آلی خاک را معدنی کنند و در اختیار گیاه قرار دهند (Li et al., 2023). در تعدادی از مطالعات گذشته مشاهده شده است که تاثیر ریزجاندارن حل‌کننده فسفات بر افزایش فراهمی فسفر و جذب آن توسط گیاه با کاربرد هیومیک اسید افزایش می‌یابد (Leme Filho et al., 2020; Cozzolino et al., 2021). خلیلی و همکاران (۱۴۰۲) مشاهده کردند که مایه‌زنی اکتینومیست حل‌کننده فسفات به همراه کود فسفره و هیومیک اسید، جذب فسفر گیاه ذرت را افزایش داد. در واقع، هیومیک اسید به عنوان یک ماده آلی می‌تواند فراهمی فسفر را در خاک از طریق کاهش جذب فسفر توسط ذرات خاک و جلوگیری از تشکیل فسفات‌های نامحلول، افزایش دهد (Sagar et al., 2023). از طرفی، هیومیک اسید از طریق تاثیر بر متابولیسم سلولی، افزایش رشد و نمو گیاه، ریشه‌زایی و نفوذ پذیری ریشه، افزایش بیان ژن‌های موثر بر جذب عناصر غذایی و انتقال آن‌ها به داخل گیاه می‌تواند باعث جذب بیشتر آب و عناصر غذایی از جمله فسفر توسط گیاه شود (Karimi et al., 2020)؛ در نتیجه ظرفیت جذب فسفر از خاک و کود افزایش می‌یابد. Cozzolino و همکاران (۲۰۲۱) نیز بیان کردند که هیومیک اسید می‌تواند روابط هم‌زیستی و همیاری ریزجانداران با گیاه را با تحریک فعالیت میکروبی، ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی و آناتومی در ریشه و افزایش زندمانی و کلونیزاسیون بیشتر، بهبود بخشد و بدین ترتیب جذب عناصر غذایی توسط گیاه را افزایش دهد.



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل قارچ، هیومیک اسید و منابع فسفر بر فسفر قابل دسترس خاک و جذب فسفر اندام هوایی گیاه گوجه فرنگی. NF: بدون قارچ، WF: با قارچ؛ NP: بدون کاربرد فسفر، TCP: کاربرد تری کلسیم فسفات، SP: کاربرد سوپرفسفات ساده، H0: بدون کاربرد هیومیک اسید، H2: کاربرد ۲ گرم بر کیلوگرم هیومیک اسید، H4: کاربرد ۴ گرم بر کیلوگرم هیومیک اسید. میانگین های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می باشند.



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل قارچ و منابع فسفر بر جذب فسفر ریشه گیاه گوجه فرنگی. NF: بدون قارچ، WF: با قارچ؛ NP: بدون کاربرد فسفر، TCP: کاربرد تری کلسیم فسفات، SP: کاربرد سوپرفسفات ساده. میانگین های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می باشند.

نتیجه گیری کلی

نتایج نشان داد که کاربرد همزمان *تریکودرما*، هیومیک اسید در غلظت ۴ گرم بر کیلوگرم و سوپر فسفات ساده باعث افزایش بیشتری در زیست توده اندام هوایی و ریشه، ارتفاع گیاه و محتوای کلرفیل و فسفر گیاه نسبت به تیمار شاهد شد. این موضوع نشان‌دهنده تاثیر هم‌افزایی تیمارهای یاد شده بر پارامترهای رشد و فیزیولوژی گیاه است که می‌تواند به دلیل فراهمی بیشتر فسفر قابل دسترس در اثر کاربرد *تریکودرما* با ویژگی آزادسازی فسفر و همچنین هیومیک اسید باشد. بنابراین، به منظور افزایش کارایی کودهای شیمیایی فسفره و افزایش تولید محصولات کشاورزی، کاربرد همزمان *تریکودرما* و هیومیک اسید به همراه کودهای شیمیایی فسفره توصیه می‌گردد.

منابع

بهروان، حمید رضا؛ خراسانی، رضا؛ فتوت، امیر؛ معزی، عبدالامیر؛ تقوی، مهدی (۱۳۹۸). تاثیر اسید هومیک و کود فسفر بر آنزیم‌های فسفاتاز، کربن فعال و فسفر قابل استفاده در ریزوسفر گیاه نیشکر. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰ (۱۰)، ۲۵۷۱-۲۵۸۱.

جهاندیده، آمنه؛ بارانی مطلق، مجتبی؛ دردی پور، اسماعیل؛ قربانی نصرآبادی، رضا (۱۳۹۸). اثر اسید هیومیک بر فراهمی کود فسفر و برخی صفات فیزیولوژیکی گیاه کلزا. *آب و خاک*، ۳۳ (۶)، ۸۷۳-۸۸۴.

اکرم حلاج‌نیا، اکرم؛ حق‌نیا، غلامحسین؛ فتوت، امیر؛ خراسانی، رضا. (۱۳۸۵). تأثیر ماده آلی بر فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی. *آب و خاک*، ۱۰ (۴)، ۱۲۱-۱۳۳.

خوش منظر، الهه؛ علی اصغرزاد، ناصر؛ ارزنلو، مهدی؛ نیشابوری، محمدرضا؛ خوشرو، بهمن (۱۳۹۸). تاثیر گونه‌های *تریکودرما* بر رشد و جذب عناصر غذایی در گوجه فرنگی تحت تنش کم آبی. *نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۲۹ (۲)، ۱۰۷-۱۲۰.

خلیلی، نیلوفر؛ قربانی نصرآبادی، رضا؛ بارانی مطلق، مجتبی؛ خدادادی، رضا (۱۴۰۲). اثر اسید هیومیک و مایه زنی جدایه‌های اکتینومایست برحلالیت فسفر در شرایط آزمایشگاهی و محتوای فسفر گیاه ذرت (*Zea mays*). *مجله مدیریت خاک و تولید پایدار*. ۱۳ (۲)، ۷۵-۹۴.

محمدی کشکا، فائزه؛ پیردشتی، همت اله؛ یعقوبیان، یاسر؛ بخشنده، اسماعیل (۱۳۹۷). نقش تلقیح قارچ تریکودرما و باکتری اینتروباکتر بر بهبود عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) در سطوح مختلف کود فسفر. *بوم شناسی کشاورزی*. ۱۰ (۲)، ۴۳۰-۴۴۴.

ناهیدان، صفورا؛ هاشمی، شمسی؛ ظفری، دوستمراد (۱۳۹۸). ارزیابی توان تعدادی از گونه‌های *تریکودرما* در انحلال فسفات و آزادسازی پتاسیم در شرایط درون‌شیشه‌ای. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۰ (۵)، ۱۲۳۱-۱۲۴۲.

ویسی، حمیده؛ حیدری، غلامرضا؛ سهرابی، یوسف (۱۳۹۵). اثر دو گونه قارچ میکوریزا و سطوح مختلف اسید هیومیک و کودهای شیمیایی بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.). *بوم شناسی کشاورزی*، ۸ (۴)، ۵۶۷-۵۸۲.

References

Adesemoye, A.O., & Kloepper, J.W. (2009). Plant–microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. *Applied Microbiology Biotechnology*, *85*, 1–12.

Ai, S., Meng, X., Zhang, Z., Li, R., Teng, W., Cheng, K., & Yang, F. (2023). Artificial humic acid regulates the impact of fungal community on soil macroaggregates formation. *Chemosphere*, *332*, 138822.

Behravan, H., Khorassani, R., Fotovat, A., Moezzi, A., & Taghavi, M. (2020). The Effect of humic acid and phosphorus fertilizer on phosphatase enzymes, active carbon and available phosphorus in sugarcane rhizosphere. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *50*(10), 2571-2581. (In Persion)

Burt, R. (2004). Soil survey laboratory methods manual: Soil survey investigations. Version 4.0. Natural Resources Conservation Service, Nebraska, United States.

Canellas, L.P., Olivares, F.L., Okorokova-Façanha, A.L., & Façanha, A.R. (2002). Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H^+-ATPase activity in maize roots. *Plant physiology*, *130*(4), 1951-1957.

Cozzolino, V., Monda, H., Savy, D., Di Meo, V., Vinci, G., & Smalla, K. (2021). Cooperation among phosphate-solubilizing bacteria, humic acids and arbuscular mycorrhizal fungi induces soil microbiome shifts and enhances plant nutrient uptake. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *8*(1), 1-18.

De Hita, D., Fuentes, M., Fernández, V., Zamarreño, A. M., Olaetxea, M., & García-Mina, J.M. (2020). Discriminating the short-term action of root and foliar application of humic acids on plant growth: emerging role of jasmonic acid. *Frontiers in plant science*, *11*, 493.

Emami, S., Alikhani, H.A., Pourbabaei, A.A., Etesami, H., Motashare Zadeh, B., & Sarmadian, F. (2018). Improved growth and nutrient acquisition of wheat genotypes in phosphorus deficient soils by plant growth-promoting rhizospheric and endophytic bacteria. *Soil Science and Plant Nutrition*, *65*, 1–9.

Ghorchiani, M., Etesami, H., & Alikhani, H.A. (2018). Improvement of growth and yield of maize under water stress by co-inoculating an arbuscular mycorrhizal fungus and a plant growth promoting rhizobacterium together with phosphate fertilizers. *Agriculture Ecosystem Environment*, *258*, 59–70.

Halajnia, A., Haghnia, G.H., Fotovat, A.M. I.R., & Khorasani, R. (2007). Effect of organic matter on phosphorus availability in calcareous soils. *JWSS-Isfahan University of Technology*, *10*(4), 121-133.(In Persion)

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.

Jahandideh, A., Barani, M., Dordipour, E., & Ghorbani Nasrabadi, R. (2020). The effect of humic acid on the availability of phosphorus fertilizer and some physiological traits of rapeseed (canola). *Water and Soil*, *33*(6), 873-884. (In Persion)

Jindo, K., Soares, T.S., Peres, L.EP., Azevedo, I.G., Aguiar, N.O., Mazzei, P., Spaccini, R., Piccolo, A., Olivares, F.L., & Canellas, L.P. (2016). Phosphorus speciation and high-affnity transporters are infuenced by humic substances. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *179*, 206– 214.

Kashka, F.M., Pirdashti, H., Yaghoubian, Y., & Bakhshandeh, E. (2018). The role of Trichoderma and Enterobacter inoculation on improving wheat yield in different levels of phosphorus fertilizer. *Journal of Agroecology*, *10* (2), 430-443. (In Persion).

Karimi, E., Shirmardi, M., Dehestani Ardakani, M., Gholamnezhad, J., & Zarebanadkouki, M. (2020). The effect of humic acid and biochar on growth and nutrients uptake of calendula (Calendula officinalis L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *51*(12), 1658-1669.

Kayoumu, M., Iqbal, A., Muhammad, N., Li, X., Li, L., Wang, X., Gui, H., Qi, Q., Ruan, S., Guo, R., Zhang, X., Song, M., & Dong, Q. (2023). Phosphorus availability affects the photosynthesis and antioxidant system of contrasting low-P-tolerant cotton genotypes. *Antioxidants*, *12*(2), 466.

Khalili, N., Ghorbani Nasrabadi, R., Baranimotlagh, M., & Khodadadi, R. (2023). The effect of humic acid and inoculation of actinomycetes isolates on phosphorus solubilization in laboratory condition and phosphorus content in maize (Zea mays). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, *13*(2), 75-94. (In Persion)

Khosh Manzar, E., Aliasgharzad, N., Arzanlou, M., Neyshabouri, M. R., & Khoshrou, B. (2019). The effect of Trichoderma isolates on tomato growth and nutrients uptake under water deficit stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *29*(2), 107-120 (In Persion).

Leme Filho, JF., Thomason, WE., Evanylo, GK., Zhang, X, Strickland, MS., Chim, BK., & Diatta, AA. (2020). The synergistic efects of humic substances and biofertilizers on plant development. *International Journal of Plant & Soil Science*, *32*(7), 56-75.

Lermen, C., da Cruz, R.M.S., de Souza, J.S., de Almeida Marchi, B., & Alberton, O. (2017). Growth of Lippia alba (Mill.) NE Brown inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi with different levels of humic substances and phosphorus in the soil. *Journal of applied research on medicinal and aromatic plants*, *7*, 48-53.

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. *Microbiological Research*, 127375.

Li, X., Zhi, Y., Jia, M., Wang, X., Tao, M., Wang, Z., & Xing, B. (2024). Properties and photosynthetic promotion mechanisms of artificial humic acid are feedstock-dependent. *Carbon Research*, *3*(1), 4.

Mackowiak, C.L., Grossl, P.R., & Bugbee, B.G. (2001). Beneficial effects of humic acid on micronutrient availability to wheat. *Soil Science*, *65*, 1744-1750.

Mora,V., Baigorri, R., Bacaicoa, E., & Zamarreno, A. (2012) The humic acid-induced changes in the root concentration of nitric oxide, IAA and ethylene do not explain the changes in root architecture causedby humicacid in cucumber. *Environmental and Experimental Botany*, *76*, 24-32.

Nahidan, S., Hashemi, S., & Zafari, D. (2019). Evaluation of phosphate solubilizing and potassium releasing ability of some Trichoderma species under in-vitro conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *50*(5), 1231-1242. (In Persion).

Ohno, T., Griffin, T.S., Liebman, M., & Porter, G.A. (2005). Chemical characterization of soil phosphorus and organic matter in different cropping systems in Maine, USA. *Agriculture Ecosystem Environment*, *105*, 625–634.

Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In Methods of soil analysis. Part 2, editd by. Page, A.L., Sparks, D.L., Helmke, P.A., & Loeppert, R.H. Madison WI: American Society of Agronomy. 403–30.

Rathor, P., Upadhyay, P., Ullah, A., Gorim, L.Y., & Thilakarathna, M.S. (2024). Humic acid improves wheat growth by modulating auxin and cytokinin biosynthesis pathways. *AoB Plants*, *16*(2), plae018.

Rezakhani, L., Motesharezadeh, B., Tehrani, M. M., Etesami, H., & Hosseini, H. M. (2019). Phosphate–solubilizing bacteria and silicon synergistically augment phosphorus (P) uptake by wheat (Triticum aestivum L.) plant fertilized with soluble or insoluble P source. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *173*, 504-513.

Ryan, J., Estefan, G., & Rashid, A. (2007). Soil and Plant Analysis Laboratory Manual. Center for Agricultural Research in the Dryland Areas (ICARDA), Aleppo, Syria.

Rui-Xia, L., Feng C., Guan P., Qi-Rong, S., Rong, L., Wei., C. (2015). Solubilization of phosphate and micronutrients by *Trichoderma harzianum* and its relationship with the promotion of tomato plant growth. *Plose One*, *25*, 1-16.

Sagar, R., Thippeshappa, G.N., Kadalli, G.G., & Dhananjaya, B.C. (2023). Phosphorus transformation in acid soil as influenced by humic substance. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, *198*(12), 1029-1039.

Vance, C.P., Uhde-Stone, C., & Allan, D.L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *Journal of New phytologist*, *157* (3), 423-447.

Veysi, H., Heidari, G., & Sohrabi, Y. (2016). The effect of mycorrhizal fungi and humic acid on yield and yield components of sunflower. *Journal of Agroecology*, *8*(4), 567-582. (In Persion).

Wang, X.J., Wang, Z.Q., & Li, S.G. (1995). The effect of humic acids on the availability of phosphorus fertilizers in alkaline soils. *Soil Use and Management*, *11*(2), 99-102.

Yang, X., Zhang, M., Li, J. & Yang, Z. (1985). Study on the effect of ammonium nitro-humus from several materials on fertilizer super phosphate. *Application of Atomic Energy in Agriculture*, *1*, 45-50.

Yedidia, I., Srivastva, A.K., Kapulnik, Y., & Chet, I. (2001). Effect of *Trichoderma harzianum* on microelement concentrations and increased growth of cucumber plants. *Plant and Soil*, *235*, 235-242.

Zaidi, A., Khan, M.S., Ahemad, M., Oves, M., & Wani, P.A. (2009). Recent advances in plant growth promotion by phosphate-solubilizing microbes. Microbial Strategies for Crop Improvement. Springer, 23–50.

The effect of phosphate solubilizing fungi, humic acid and phosphorus sources on growth and phosphorus uptake of tomato plant

Extended Abstract

ویرایش شده

Introduction

Phosphorus (P) deficiency is one of the major problems in agricultural soils around the world. The use of phosphate solubilizing fungi (PSF) such as *Trichoderma* is known as one of the most effective ways for increasing P availability and improving P use efficiency. The application of humic acid also improves the bioavailability of nutrients such as P in the soil, stimulates plant growth and development, protects against biotic and abiotic stresses and increases agricultural productivity. Moreover, several authors have reported that the combination of microbial inoculants with humic acid gives more reproducible results for plant growth and production. However, their effect may be related to P availability in soil. Therefore, this study was conducted to investigate the effect of *Trichoderma* and humic acid on soil phosphorus availability, growth characteristics and phosphorus uptake of tomato plant in soil fertilized with soluble and insoluble phosphorus sources.

Materials and methods

A factorial experiment was conducted in a completely randomized block design with three replications in greenhouse conditions. The experimental factors were 1) fungus (with and without *Trichoderma koningii*), 2) humic acid (0, 2 and 4 g kg^{-1} soil) and 3) phosphorus treatment (without phosphorus, use of 0.25 mg P kg^{-1} from three calcium phosphate and simple superphosphate). Humic acid and phosphorous treatments were mixed in the soil matrix, then *Trichoderma* (10^7 spore g^{-1} soil) was added to half of pots. Then 5 sterile tomato seeds were planted in each pot at 2-cm depth which were declined to 1 plant in each pot after the emerging and greening phase. At the end of cultivation period, height, fresh and dry weight of root and shoot, chlorophyll index and also P uptake in root and shoot of tomato were determined after dry digestion. Also the amount of available P in the soil was measured after extraction with $NaHCO_3$.

Results

The results showed that fungi inoculation and application of humic acid increased the fresh and dry weight of shoot and root and chlorophyll index of the tomato plant in soil unfertilized and fertilized with different P sources. The highest values of the aforementioned parameters of tomato were observed in the treatment of fungus, 4 g kg^{-1} of humic acid and application of simple superphosphate. Fungi inoculation led to increase the amount of root P uptake in soil without P, treated with three calcium phosphate and simple superphosphate by 33.7, 85.9 and 68.8%, respectively. The highest amount of soil available P and shoot P uptake was also observed in soil treated with fungi, simple superphosphate and 4 g kg^{-1} of humic acid, which was 58 and 153% higher than the soil treatment without fungus, P and humic acid.

Conclusion

Application of humic acid and *Trichoderma* to plants grown in soluble or insoluble P medium markedly enhanced P use efficiency. The combined application of 4 g kg^{-1} humic acid, *Trichoderma* and simple superphosphate fertilizer can be a suitable solution to increase the availability of soil P and improve P uptake and growth of tomato plant. The information on the availability of P following PSF and humic acid addition to plant growth medium may help in better management of P fertilization.

Author Contribution

Conceptualization, S.N.; methodology, S.N. and S.M.; software, S.N. and S.M.; validation, S.N.; formal analysis, S.N and S.M.; investigation, S.N.; resources, S.N and S.M.; data curation, S.M.; writing-original draft preparation, S.N.; writing-review and editing, S.N.; visualization, S.N.; supervision, S.N.; project administration, S.N.
All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the corresponding author.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

پذیرفته شده