جهت تهیه فایل WORD این مقاله به سایت DaneshResan.com مراجعه نمایید و عنوان مقاله را جستجو کنید
بیش از ۲ میلیون مقاله فارسی در این سایت موجود میباشد

نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) / الف / جلد 29 / شماره 1 / 1394

اثر اسید اگزالیک در افزایش قابلیت استفاده فسفر خاک برای گیاه گندم

سیما دبستانی رضوی[1]، رضا خراسانی و امیر فتوت

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد علوم خاک دانشگاه فردوسی مشهد؛ Dabestani.s84@gmail.com

دانشیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد؛ Khorasani@ferdowsi.um.ac.ir

دانشیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد؛ afotovat@um.ac.ir

دریافت: 92/3/28 و پذیرش: 93/9/19

چکیده

بعضی از گیاهان کلسیم‌دوست در شرایط کمبود فسفر، به طور طبیعی قادرند تا حدی قابلیت استفاده فسفر را از طریق تراوش برخی ترکیبات نظیر اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم افزایش دهند. این تحقیق با الگوبرداری از این ویژگی خاص گیاهان و با هدف استفاده از یک اسید آلی در خاک آهکی با فسفر قابل استفاده نسبتاً کم، به منظور افزایش قابلیت جذب فسفر انجام شد. آزمایش در گلخانه با پنج تیمار ترکیبی از کود معدنی مونو کلسیم فسفات ($Ca(H_2PO_4).2H_2O$) و اسید اگزالیک (خالص با فرمول $C_2H_2O_4.2H_2O$) به صورت طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و در یک خاک آهکی با بافت لوم انجام گرفت. برای ساخت تیمارها مقادیر 68، 40/8، 27/2، 13/6 و صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از کود مونو کلسیم فسفات به ترتیب با صفر، 1/6، 2/4، 3/2 و 4 میلی‌مول بر کیلوگرم خاک از اسید اگزالیک ترکیب شد. دو ماه بعد از کشت گندم (*Triticum aestivum*) از رقم پارسی، گیاهان برداشت شد و ماده خشک اندام رویشی، غلظت و مقدار جذب فسفر توسط گندم و غلظت فسفر قابل جذب خاک اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد دامنه غلظت‌های مورد استفاده اسید اگزالیک (1/6 تا 4 میلی‌مول بر کیلوگرم خاک) برای افزایش قابلیت استفاده فسفر مناسب بود. کم کردن مصرف کود فسفر در خاک و اضافه کردن اسید اگزالیک برای جبران آن وزن ماده خشک گیاه را کاهش نداد و منجربه افزایش معنی‌دار جذب فسفر از خاک نیز شد. همچنین اضافه کردن اسید اگزالیک به خاک کارایی جذب فسفر گیاه را افزایش داد. نتایج تحقیق نشان داد، تیمار 27/2 میلی گرم بر کیلوگرم کود مونو کلسیم فسفات (به عنوان 40 درصد نیاز کود فسفر گیاه) و 2/4 میلی‌مول بر کیلوگرم اسید اگزالیک، بهترین ترکیب کود و اسید، برای افزایش قابلیت استفاده فسفر بود.

واژه‌های کلیدی: خاک آهکی، کارایی جذب فسفر، کود فسفر

---

[1] نویسنده مسئول، آدرس: دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه علوم خاک

جهت تهیه فایل WORD این مقاله به سایت DaneshResan.com مراجعه نمایید و عنوان مقاله را جستجو کنید
بیش از ۲ میلیون مقاله فارسی در این سایت موجود میباشد

مقدمه

فسفر عنصری ضروری برای هر سلول گیاهی است چرا که هیچ عنصر دیگری نمی‌تواند نقش حیاتی آن را در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه انجام دهد و جایگزین آن شود. غلظت این عنصر در خاک بسیار کم است و تحرک کمی در مقایسه با دیگر ترکیبات و عناصر غذایی مثل نیترات و پتاسیم دارد (باربر، 1995). تخمین زده شده است 5/7 میلیارد هکتار از خاک‌های سراسر جهان فسفر قابل استفاده بسیار کمی دارند (باتجز، 1997). خاک‌های آهکی کشور ما نیز از این قاعده مستثنی نیستند، کمبود فسفر در خاک‌های کشور ما کشاورزان را به استفاده هر چه بیشتر از کودهای فسفر ترغیب می‌کند. اما استفاده بیش از حد کودهای فسفر در خاک، خود عواقب و پیامدهای زیانبار زیادی را به دنبال خواهد داشت؛ بهره‌وری کم کودهای فسفر و تثبیت زیاد آن در خاک (هول فورد، 1997؛ منگل و کرکبی، 1982)، بر هم زدن تعادل عناصر غذایی در خاک (داس و همکاران، 2005)، آلودگی کودهای فسفر به عناصر سنگین از جمله کادمیوم و اورانیوم (آلووای و استینسن، 1999؛ گزمان و همکاران، 1995)، پدیده اوتروفیکاسیون[1] (تجمع عناصر غذایی از جمله فسفر در محیط‌های آبی) و از بین رفتن اکوسیستم‌های اطراف زمین‌های کشاورزی (کارپنتر و همکاران، 1998) و همچنین محدودیت منابع تأمین فسفر به عنوان منابع غیر قابل تجدید، همگی سبب شده‌اند توجه به کارآیی بیشتر کود یا استفاده از روش‌های ثانویه جهت افزایش قابلیت استفاده فسفر برای گیاهان در جهت کاهش مصرف کود احساس گردد.

گیاهان برای استقرار و رشد بهینه در خاک‌های آهکی نیاز به تطابق با کمبود عناصر غذایی در این خاک‌ها دارند. یکی از روش‌های طبیعی گیاهان برای سازگاری با این شرایط تراوش ترکیبات آلی از ریشه است که سبب آزادسازی عناصر غذایی از منابع معدنی و آلی شده و باعث افزایش جذب آن‌ها از فاز محلول رایزوسفر (محدوده ای که اطراف ریشه گیاهان را فرا گرفته و تحت تأثیر تراوشات ریشه می‌باشد. اندازه این لایه حدود 1 تا 2 میلی‌متر و حداکثر 5 میلی‌متر در اطراف ریشه می باشد) توسط گیاه می‌شود (لیپتون و همکاران، 1987). جونز (1998) گزارش کرد که تراوشات ریشه نقش محوری را در افزایش قابلیت استفاده عناصر غذایی در خاک‌های آهکی ایفا می‌کنند. گیاهان کلسیم‌دوست به طور معمول میزان تراوش اسیدهای آلی به خصوص اسیدهای دی و تری کربوکسیلیک از جمله اسید سیتریک و اسید اگزالیک یا آنیون‌های این اسیدها را در مقایسه با گیاهان غیر کلسیم‌دوست افزایش می‌دهند (اشتورم و همکاران، 1994؛ تیلور و اشتورم، 1995). اولین بار گاردنر و همکاران (1982) حلالیت فسفر و به دنبال آن افزایش جذب فسفر را در نتیجه اسیدهای آلی تراوش شده از ریشه گزارش کردند. آنان دریافتند که سیترات تراوش شده از *Lupinus albus* فراهمی فسفر خاک را با افزایش حلالیت شکل‌های تثبیت شده فسفر بهبود می‌بخشد. بعضی محققان عقیده دارند که افزایش حلالیت فسفات‌های کلسیم به دلیل کاهش pH محیط در نتیجه آزادسازی یون H^+ از اسیدهای آلی تراوش شده از ریشه است (هینسینگر، 2001).

همچنین رقابت آنیون‌های آلی با آنیون فسفات در تصاحب مکان‌های جذب سطحی عامل دیگری در افزایش قابلیت استفاده فسفر در محلول خاک است (جونز و داراه، 1994). مرادی و همکاران (2012) نیز نشان دادند که اسیدهای آلی اضافه شده به خاک ممکن است باعث تغییرات در ویژگی‌های جذب فسفر در خاک‌های آهکی شوند. نتایج مطالعه آنان حاکی از آن بود که اسیدهای آلی، پتانسیل کاهش جذب سطحی فسفر را در خاک‌های آهکی دارند. اشتورم و همکاران (2005) گزارش کردند کارایی آزادسازی فسفر توسط اسیدهای آلی تنظیم‌شده در pH=7/5 در خاک آهکی از ترتیب زیر پیروی می‌کند: اگزالات > سیترات > مالات. کارایی بیشتر آنیون اگزالات نسبت به سیترات در استخراج فسفر از نمونه خاک آهکی در پژوهش‌های دیگر نیز به اثبات رسیده است (خادمی و همکاران، 2009؛ 2010).

همچنین یکی از مسائل مهم در ارتباط با استفاده از اسیدهای آلی در خاک تجزیه این ترکیبات توسط میکروارگانیسم‌های خاک است. به طور کل ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم به آسانی تجزیه می‌شوند و در نتیجه نیمه عمر کوتاه، بین 0/1 تا 26 ساعت دارند (ونهیس و همکاران، 2005؛ 2008). نتایج تحقیقات حاکی از آن است که در خاک آهکی اگزالات با سرعت کمتری تجزیه می‌شود (اشتورم و همکاران، 2001). به نظر می‌رسد جذب سریع اگزالات به خاک و حذف ناگهانی آن از محلول خاک و تشکیل و رسوب اگزالات کلسیم دلایل اصلی مقاومت این اسید به تجزیه در خاک آهکی است (ونهیس و همکاران، 2003). لذا می‌توان گفت اسید اگزالیک نسبت به سایر اسیدهای آلی پایداری بیشتری در خاک آهکی دارد.

با توجه به توانایی ویژه برخی از گیاهان کلسیم‌دوست در مقابله با کمبود فسفر با استفاده از

---

[1] Eutrophication

جهت تهیه فایل WORD این مقاله به سایت DaneshResan.com مراجعه نمایید و عنوان مقاله را جستجو کنید
بیش از ۲ میلیون مقاله فارسی در این سایت موجود میباشد

تراوشات گیاهی، این فرضیه در ذهن تداعی می‌شود که اضافه کردن اسیدهای آلی به طور مصنوعی به خاک باعث افزایش قابلیت استفاده فسفر در خاک‌های آهکی می‌شود. بنابراین هدف اصلی از این تحقیق پاسخ به این پرسش است که اثر مثبت اسید آلی بر فراهمی فسفر تا چه حد می‌تواند نیاز فسفر گیاه را تأمین کند و در نتیجه چه میزان از مصرف کود فسفر بکاهد و غلظت مورد نیاز برای این منظور چقدر است؟

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و آنالیز خاک

نمونه خاک از محل پردیس دانشگاه فردوسی مشهد از لایه سطحی برداشت شد. به منظور آنالیز خاک نمونه بعد از هوا خشک شدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و سپس pH در گل اشباع، EC در عصاره گل اشباع تعیین شدند (مک‌لین، 1982). بافت خاک به روش هیدرومتر مشخص گردید (گی و بودر، 1986). کربنات کلسیم معادل از طریق خنثی‌سازی با اسید و تیتراسیون با سود اندازه‌گیری شد (ریچاردز، 1954). برای تعیین کربن آلی خاک از روش اکسیداسیون به وسیله‌ی دی‌کرومات پتاسیم استفاده شد (والکلی و بلاک، 1934). به منظور محاسبه نیاز کودی خاک، نیتروژن کل از روش کجلدال (برمنر، 1996) و پتاسیم به کمک استات آمونیوم (چاپمن و پرات، 1961) تعیین گردید. عصاره‌گیری فسفر قابل استفاده خاک به کمک بیکربنات سدیم 0/5 مولار در pH = 8/5 با نسبت یک به بیست خاک به عصاره انجام شد (اولسن و همکاران، 1954) و غلظت فسفر در عصاره‌ی به دست آمده به روش مولیبدات آمونیوم به کمک اسپکتروفتومتر در طول موج 660 نانومتر قرائت گردید (مورفی و ریلی، 1962).

کشت گیاهان

برای انجام آزمایش از گلدان‌هایی با ظرفیت 3 کیلوگرم خاک استفاده شد و کشت گیاهان در گلخانه با دمای روز و شب 33/2 و 20/3 درجه سلسیوس، در قالب طرح آزمایشی کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. کمبود عناصر غذایی نیتروژن، پتاسیم و روی با توجه به نتایج آنالیز خاک به کمک 120 میلی‌گرم بر کیلوگرم ازت، 80 میلی‌گرم بر کیلوگرم پتاسیم و 3 میلی‌گرم بر کیلوگرم روی به ترتیب توسط کودهای اوره، سولفات پتاسیم (K_2SO_4) و سولفات روی آبدار ($ZnSO_4.7H_2O$) جبران شد. تیمارهای آزمایش که عبارت بودند از سطوح مختلف فسفر و اسید اگزالیک، در دو مرحله اعمال شد؛ در مرحله‌ی اول کود فسفات مونوکلسیم ($Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$) به عنوان تیمار فسفر در مقادیر 68، 40/8، 27/2، 13/6 (به ترتیب به عنوان 100%، 60%، 40% و 20% نیاز گیاه و بر اساس توصیه کودی) و صفر میلی گرم بر کیلوگرم خاک به گلدان‌ها داده شد. سپس 12 عدد بذر گندم از رقم پارسی در گلدان کشت شد. گلدان‌ها هر روز با آب مقطر آبیاری شدند تا رطوبت خاک در حدود ظرفیت مزرعه (ظرفیت مزرعه 14 درصد بود) حفظ گردد. یک هفته بعد از کشت، گیاهان تنک شدند و تعداد آن در هر گلدان به نصف کاهش پیدا کرد. در مرحله‌ی دوم اسید اگزالیک به مقادیر مختلف 1/6، 2/4، 3/2 و 4 میلی‌مول بر کیلوگرم خاک برای جبران کمبود فسفر به ترتیب به تیمارهای فسفر 40/8، 27/2، 13/6 و صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفات مونوکلسیم به صورت محلول با آبیاری طی 12 روز به مرور افزوده شد. تیمار 68 میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفات مونوکلسیم که در آن تمام نیاز گیاه به فسفر از طریق کود تأمین شده بود، اسید اگزالیک دریافت نکرد و به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. بعد از گذشت دو ماه گیاهان برداشت شدند، فسفر قابل استفاده خاک اندازه‌گیری شد و پس از تعیین وزن تر و خشک گیاهان، نمونه‌ها خرد شد و از الک 0/5 میلی‌متری عبور داده شد. نمونه‌ها با روش اکسیداسیون خشک[1] هضم شدند (کمپل و پلانک، 1998) و فسفر آن توسط دستگاه اسپکتروفتومتر به روش آبی مولیبدات آمونیوم قرائت گردید. جذب فسفر نیز از حاصلضرب غلظت فسفر گیاه در وزن خشک آن به دست آمد.

آنالیز آماری

آنالیز داده‌ها به کمک نرم‌افزار MSTATC 1.42 انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح 5 درصد استفاده شد و نمودارها به کمک نرم‌افزار Sigmaplot 11 ترسیم گردید.

نتایج

ویژگی‌های خاک مورد استفاده در این تحقیق در جدول 1 آمده است.

[1] Dry Ashing

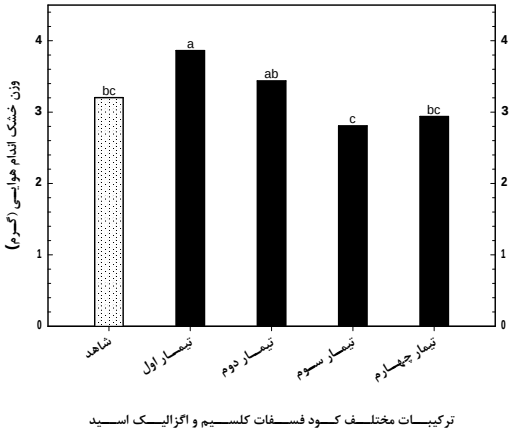
جدول 1- خصوصیات خاک مورد استفاده در آزمایش

بافت	EC_e(ds m^{-1}	pH_s	$N_{(t)}$[2]%	Zn	Fe	$P_{(av)}$	$K_{(av)}$[1]	OM%	$CaCo_3$%
				(mg kg^{-1})					
لوم	1/86	7/64	0/390	0/646	1/87	10	150/72	0/775	16/25

1 : av = available
2 : t = total

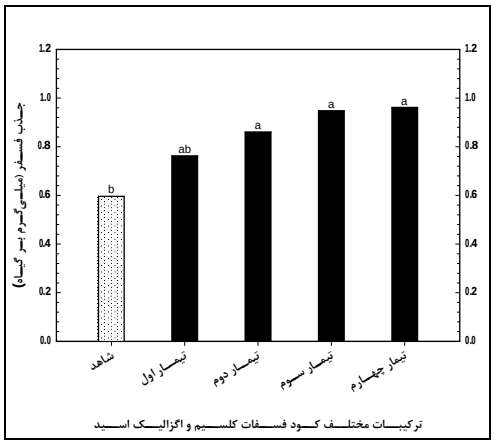
خاک به کار گرفته شده در آزمایش با داشتن 16/25 درصد کربنات کلسیم، یک خاک آهکی با بافت لوم بود و فسفر قابل استفاده نسبتاً کمی (سیلسپور و ممیزی، 1384؛ فتاحی‌نژاد و همکاران، 2012) داشت.

اثر ترکیبات مختلف کود مونو کلسیم فسفات و اسید اگزالیک بر وزن خشک، جذب فسفر گیاه گندم، غلظت فسفر و فسفر قابل استفاده خاک بعد از برداشت در شکل‌های 1 تا 4 آورده شده است. محور x نشانگر تیمارهای مختلف به کار رفته در آزمایش می‌باشد که به ترتیب شامل تیمار شاهد (68 میلی‌گرم بر کیلوگرم مونو کلسیم فسفات و صفر میلی‌مول بر کیلوگرم اسید اگزالیک)، تیمار اول (40/8 و 1/6)، تیمار دوم (27/2 و 2/4)، تیمار سوم (13/6 و 3/2) و تیمار چهارم (صفر و 4) است.



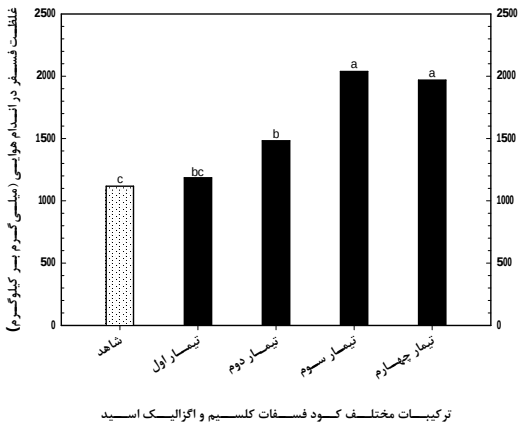
شکل 1- اثر ترکیبات مختلف کود مونو کلسیم فسفات و اسید اگزالیک بر وزن خشک گندم

حروف مشترک بین تیمارها نشان از عدم معنی‌داری آن‌ها در سطح 0/05 است.



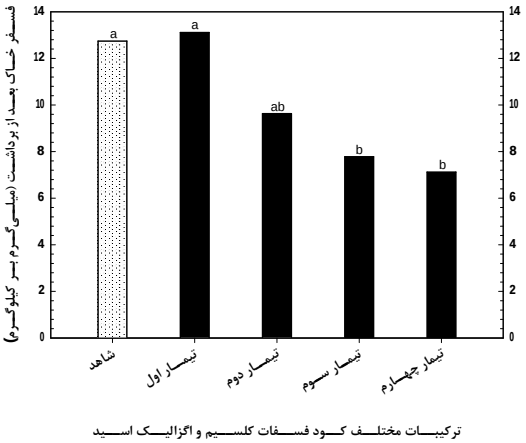
شکل 2- اثر ترکیبات مختلف کود مونو کلسیم فسفات و اسید اگزالیک برمحتوای فسفر گیاه گندم

حروف مشترک بین تیمارها نشان از عدم معنی‌داری آن‌ها در سطح 0/05 است.



شکل 3- اثر ترکیبات مختلف کود مونو کلسیم فسفات و اسید اگزالیک بر غلظت فسفر گیاه گندم

حروف مشترک بین تیمارها نشان از عدم معنی‌داری آن‌ها در سطح 0/05 است.



شکل 4- اثر ترکیبات مختلف کود مونو کلسیم فسفات و اسید اگزالیک بر فسفر خاک بعد از برداشت گیاه گندم

حروف مشترک بین تیمارها نشان از عدم معنی‌داری آن‌ها در سطح 0/05 است.

شکل 1 اثر ترکیبات مختلف کود مونو کلسیم فسفات با اسید اگزالیک را بر ماده خشک اندام هوایی گندم نشان می‌دهد. وقتی مصرف کود فسفر برای گیاه گندم از 68 به 40/8 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک کاهش یافت و برای جبران آن اسید اگزالیک به میزان 1/6 میلی‌مول بر کیلوگرم به خاک اضافه شد، وزن خشک اندام هوایی گندم نه تنها کاهش نداشت بلکه افزایش معنی‌داری نیز نسبت به شاهد نشان داد، به طوری‌که بیشترین ماده خشک اندام هوایی در این تیمار به دست آمد. کاهش بیشتر کود فسفر مورد نیاز گیاه و در عوض اضافه کردن مقادیر بیشتر اسید اگزالیک در تیمارهای دوم و سوم نیز منجر به کاهش معنی‌دار وزن خشک نسبت به شاهد نشد. نتیجه برای تیمار چهارم نیز بسیار جالب توجه بود؛ به این تیمار هیچ کود فسفری اضافه نشد و تمام نیاز گیاه به فسفر، به کمک 4 میلی‌مول بر کیلوگرم اسید اگزالیک با بهره‌مندی بهینه از موجودی فسفر خاک، تأمین شد که طی آن ماده خشکی تقریباً معادل شاهد به دست آمد. کمترین ماده خشک اندام هوایی نیز در تیمار سوم مشاهده شد که البته اختلاف آن با تیمار شاهد معنی‌دار نبود.

شکل 2 نشانگر میزان جذب فسفر گیاه گندم تحت تأثیر ترکیبات مختلف کود مونو کلسیم فسفات و اسید اگزالیک نسبت به شاهد است. برخلاف انتظار با کاهش مصرف کود فسفر در خاک از 68 تا صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم، میزان جذب فسفر گیاه افزایش یافت به طوری که در تیمارهای دوم، سوم و چهارم افزایش جذب فسفر نسبت به شاهد معنی‌دار بود که قطعاً دلیل آن تأثیر مثبت اضافه شدن اسید اگزالیک است. فقط تیمار اول از این لحاظ اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشت. تیمارهای

سوم و چهارم نتیجه تقریباً مشابهی داشتند و بیشترین مقادیر جذب فسفر در این تیمارها به دست آمد.

شکل 3 غلظت فسفر در اندام هوایی گیاه گندم را در تیمارهای مختلف ترکیبات کود مونو کلسیم فسفات و اسید اگزالیک مورد بررسی قرار می‌دهد. تیمار اول از این لحاظ اختلافی با شاهد نداشت که البته دلیل آن احتمالاً اثر رقت است چرا که ماده خشک اندام رویشی این تیمار نسبت به شاهد بیشتر بود. اما در تیمارهای بعدی افزایش معنی‌دار غلظت فسفر نسبت به شاهد وجود داشت که مخصوصاً برای تیمارهای سوم و چهارم بسیار مشهود بود به طوری که در این تیمارها افزایش تقریباً دو برابری غلظت فسفر در گیاه نسبت به شاهد دیده شد. تیمار سوم با غلظت 2000 میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر، بیشترین غلظت را در بین سایر تیمارها نشان داد. ضمناً اختلاف غلظت فسفر بین تیمارهای دوم و سوم نیز معنی‌دار بود که البته با توجه به اختلاف معنی‌دار وزن خشک اندام رویشی بین این دو تیمار، می‌توان دلیل آن را نیز اثر رقت دانست، به طوری که اختلاف جذب فسفر بین این دو تیمار معنی‌دار نبود.

در شکل 4 غلظت فسفر خاک بعد از برداشت گندم در تیمارهای مختلف نشان داده شده است. سطح فسفر خاک بعد از برداشت گیاه در تیمار اول مشابه شاهد بود ولی در تیمارهای بعدی مقدار آن کاهش یافت به طوری که در تیمارهای سوم و چهارم کاهش نسبت به شاهد معنی‌دار بود که حاکی از جذب بیشتر فسفر توسط گیاه در این تیمارها داشت (شکل 2). مقدار فسفر خاک بعد از برداشت گیاه برای تیمارهای سوم و چهارم تقریباً یکسان بود.

بحث

یکی از عوامل مؤثر بر کارایی استخراج فسفر توسط اسیدهای آلی غلظت آن است. نتایج نشان داد افزایش غلظت اسید آلی تا 2/4 میلی‌مول بر کیلوگرم خاک (0/6 میلی‌مولار) تغییری در غلظت فسفر گیاه و جذب فسفر ایجاد نکرد (شکل‌های 3 و 2). درور و استیلینگ (1997) و جونز (1998) نیز بیان کردند غلظت‌های کمتر از 0/5 میلی‌مولار اسیدهای آلی در حلالیت عناصر غذایی از جمله فسفر در خاک بی اثر است. بنابراین به نظر می‌رسد غلظت‌های انتخابی برای تأمین هدف آزمایش مناسب بوده است، مخصوصاً اینکه غلظت‌های بالاتر از 4 میلی‌مول بر کیلوگرم اسید اگزالیک در خاک تأثیر بیشتری بر غلظت فسفر گیاه و جذب فسفر نداشتند (نتایج آورده نشده است).

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد تیمار اول از لحاظ جذب فسفر و غلظت فسفر در گیاه اختلافی با شاهد ندارد (شکل‌های 2 و 3)، اما ماده خشک اندام رویشی آن نسبت به شاهد بیشتر است (شکل 1). بنابراین به نظر می‌رسد افزودن اسید اگزالیک به خاک باعث افزایش ماده خشک اندام هوایی می‌شود، ولی بررسی میزان جذب فسفر (شکل 2) نشان می‌دهد که این مسئله به دلیل افزایش قابلیت استفاده فسفر نبوده است و شاید عامل دیگری باعث این افزایش شده است؛ مثلاً محققان معتقدند تجزیه زیاد و چرخه سریع اسیدهای آلی می‌تواند نقش مهمی را در تنفس خاک ایفا کند که باعث رشد و نمو بیشتر گیاه می‌شود (ون‌هیس و همکاران، 2002؛ فوجی و همکاران،2010). پس اثر مثبت اسید اگزالیک بر خاک را نمی‌توان فقط محدود به تأثیر بر قابلیت استفاده فسفر خاک دانست و اثرات دیگر آن نیز می‌تواند باعث بهبود رشد گیاه شود.

در بین ترکیب‌های مورد استفاده در آزمایش، تیمار دوم با استفاده از غلظت کمتر اسید اگزالیک توانست با ماده خشک تولیدی برابر با شاهد، جذب فسفر بیشتری نسبت به آن داشته باشد (شکل‌های 1 و 2). در حالی که در تیمارهای سوم و چهارم با مصرف بیشتر اسید اگزالیک، جذب فسفر تقریباً مشابه تیمار دوم بود (شکل 2). پس می‌توان تیمار دوم را به عنوان مقرون به صرفه‌ترین تیمار از لحاظ مصرف اسید اگزالیک دانست.

نکته بعد مقایسه تیمارهای سوم و چهارم است که تقریباً وضعیت مشابهی از لحاظ ماده خشک تولیدی اندام رویشی، میزان جذب فسفر و مقدار فسفر خاک بعد از برداشت گیاه داشتند (شکل‌های 1 و 2 و 4) و اختلاف آن‌ها فقط در مقدار کود فسفر و اسید اگزالیک بود؛ تیمار چهارم 13/6 میلی‌گرم بر کیلوگرم مونو کلسیم فسفات کمتر و 0/8 میلی‌مول بر کیلوگرم اسید اگزالیک بیشتر نسبت به تیمار 3 دریافت کرده بود. می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که اسید اگزالیک اضافی می‌تواند کاهش کود مونو کلسیم فسفات را جبران کند.

وقتی در تیمار دوم کود مونو کلسیم فسفات به میزان 40/8 میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت و در عوض از 2/4 میلی‌مول بر کیلوگرم اسید اگزالیک استفاده شد، ماده خشک اندام هوایی گیاه نه تنها کاهش نداشت (شکل 1)، بلکه افزایش جذب فسفر نیز دیده شد (شکل 2). نکته‌ای که لازم است به آن اشاره گردد این است که در این تیمار حتی اگر افزایش جذب فسفر مشاهده نمی‌شد و میزان جذب فسفر مشابه شاهد بود نیز نتیجه مورد نظر به دست آمده بود، چرا که بدون کم شدن ماده خشک تولید

شده، مصرف کود فسفر کاهش یافته بود. از این‌رو احتمالاً می‌توان در غلظت‌های کمتر اسید اگزالیک (نسبت به آن‌چه در این تیمار استفاده شده است)، نیز به جذب فسفر حداقل معادل با شاهد دست پیدا کرد. نتایج تحقیق خادمی و همکاران (2010) در شرایط شبیه سازی شده رایزوسفر نشان داد اسید اگزالیک حتی در غلظت 0/01 میلی‌مولار نیز می‌تواند ایزوتوپ فسفر 33 بیشتری نسبت به آب (که به عنوان شاهد مورد استفاده قرار گرفته بود) از خاک استخراج کند. نتیجه مطالعه آن‌ها می‌تواند تأییدی بر صحت مطالب بالا باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود به تیمار چهارم، کود فسفر اضافه نشد. این در حالی است که نه تنها علائم کمبود فسفر در این تیمار مشاهده نشد بلکه نسبت به شاهد، جذب فسفر بیشتری نیز داشت (شکل 2). نتایج این تیمار به خوبی اثر مثبت اسید اگزالیک بر افزایش قابلیت استفاده فسفر را نشان می‌دهد که در شرایط آزمایشگاهی نیز به اثبات رسیده است (اشتورم و همکاران، 2002؛ خادمی و همکاران،2010). حال سؤال اینجاست که فسفر مورد نیاز این تیمار از کجا تأمین شده است؟ در این تیمار تغییرات فسفر خاک، 9 میلی‌گرم در هر گلدان بود (از 30 میلی‌گرم (جدول 1) به 21 میلی‌گرم (شکل 4) رسیده است) و جذب فسفر اندام هوایی گندم تقریباً 6 میلی‌گرم بر گلدان بود (شکل 2). با توجه به اینکه محتوای فسفر ریشه‌های گندم را نیز نباید نادیده گرفت (که در این آزمایش تعیین نشده است)، می‌توان گفت، احتمالاً اضافه کردن اسید اگزالیک به خاک در این تیمار سبب شده بخشی از فسفر غیر قابل استفاده خاک نیز به فرم قابل استفاده تبدیل شود. گانگ و همکاران (2012) با بررسی اجزای مختلف فسفر بعد از اضافه کردن اسیدهای آلی به خاک دریافتند که فسفر موجود در اجزای $NaCHO_3$-P_o (فسفر جذب سطحی شده)، $NaCHO_3$-P_i (فسفر آلی که به آسانی معدنی می‌شود) و $NaOH$-P_i (فسفر غیر آلی تقریباً غیر قابل دسترس که در سطح خارجی فسفات‌های آهن و آلومینیوم آمورف قرار دارد) به فرم فسفر محلول تبدیل شده است. همچنین توانایی اسیدهای آلی در محلول کردن منابع پایدار فسفر در تحقیق دیگر نیز به اثبات رسیده است (گاهونیا و همکاران، 2000).

در انتها ذکر این مطلب ضروریست که اسید اگزالیک مورد استفاده در این تحقیق، اسید خالص (آزمایشگاهی) بوده است. واضح است که از لحاظ اقتصادی نمی‌توان این اسید اگزالیک را در سطح وسیع به کار برد. استفاده از اسید صنعتی (تجاری) با خلوص بالا می‌تواند تا حدی هزینه‌ها را کاهش دهد. حتی برای کاهش بیشتر هزینه‌ها و مقرون به صرفه بودن، می‌توان استفاده از مواد آلی حاوی اسید اگزالیک را در دستور کار خود قرار داد؛ آبمیوه‌های صنعتی، ریواس، اسفناج، چغندر و همچنین برگ‌های چای حاوی مقادیر بسیار فراوان اگزالات هستند (نونان و ساواگ، 1999). هر چند محاسبه میزان کود و مقرون به صرفه بودن آن هدف اصلی این تحقیق نبود و برای آن منظور باید مطالعات اقتصادی دیگری انجام شود.

یکی از مشکلات اصلی در آغاز آزمایش، تعیین غلظت‌های مناسب اسید اگزالیک برای اضافه کردن به خاک بود. با توجه به اینکه تعداد تحقیقات مشابه در این زمینه بسیار محدود بود و تحقیقات مذکور اکثراً در شرایط شبیه سازی شده رایزوسفر، در مقیاس کوچک و بعضاً بدون حضور گیاه انجام شده بود، این امکان وجود نداشت که غلظت‌های مورد استفاده آن‌ها، عیناً در این آزمایش به کار گرفته شود. در نهایت با بررسی مجموع منابع موجود، غلظت‌های 1 تا 40 میلی‌مول اسید اگزالیک مورد استفاده قرار گرفت که نتایج نشان داد، غلظت‌های 1 تا 4 میلی‌مول در هر کیلوگرم خاک می‌تواند اهداف طرح را تأمین کند. بنابراین یکی از دستاوردهای مهم این تحقیق، یافتن دامنه مناسب غلظت اسید اگزالیک در خاک آهکی برای افزایش قابلیت استفاده فسفر بود. پس به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت، استفاده از غلظت‌های 1 تا 4 میلی‌مول بر کیلوگرم اسید اگزالیک در خاک، توانست قابلیت استفاده و در نتیجه جذب فسفر گیاه گندم را افزایش دهد و کارایی جذب فسفر توسط گیاه را بهبود بخشد. کاهش مصرف کود فسفر و در عوض، اضافه کردن اسید اگزالیک به خاک، تغییری در رشد و نمو گیاه ایجاد نکرد که شاید این موضوع بتواند از دیدگاه کاهش آلودگی زیست محیطی توسط کودهای شیمیایی مورد توجه واقع شود. نتایج نشان داد کاهش مصرف کود فسفر تا 40 درصد نیاز گیاه و همراه کردن آن با غلظت 2/4 میلی‌مول بر کیلوگرم اسید اگزالیک، می‌تواند ترکیب مناسبی برای این منظور باشد.

فهرست منابع:

1. سیلسپور، م و ممیزی، م. 1384. تعیین حد بحرانی فسفر و پتاسیم در خاک های تحت کشت گندم در دشت ورامین. فصلنامه کشاورزی پویا، جلد 2، شماره 3و4.
2. Alloway, B.J., and Steinnes, E. 1999. Anthropegenic additions of cadmium to soils. In: Cadmium in Soils and Plants, Mc Laughlin, M.J., and Sigh, B.R.(eds), Kluwer Academic, Dordreckt, The Netherlands.
3. Barber, S.A. 1995. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. Wiley, New York.
4. Batjes, N.H. 1997. A world data set of derived soil properties by FAO_UNESCO soil unit for global modeling. Soil Use and Management. 13: 9-16.
5. Bremner, J.M. 1996. Nitrogen_Total, in: Methods of Soil Analysis, part 3, Sparks, D.L.(eds), Madison, Wasconsin, USA.
6. Campbell, C. R., and Plank. C. O. 1998. Preparation of plant tissue for laboratory analysis. In Handbook of reference methods for plant analysis , ed. Y. P. Kalra, 37–49. Boca Raton, Fl.: CRC Press.
7. Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N., and Smith, V.H. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. Ecological Applications. 8: 559-568.
8. Chapman, H.D., and Pratt, P.F. 1961. Methods of Analysis for Soils, Plants and Waters. USDA. Washington D C.
9. Das, K., Dang, R., Shivananda, T.N., and Sur, P. 2005. Interaction effect between phosphorus and zinc on their availability in soil in relation to their contents in stevia (*Stevia rebaudiana*). The Scientific World Journal. 5: 490-495.
10. Drever, J.I., and Stillings, L.L. 1997. The role of organic acids in mineral weathering. Colloids and Surfaces A_Physicochemical and Engineering Aspects. 120: 167-181.
11. Fatahi Nejad, E., Siadat, A., Esfandiari, M., Moghadasi. R., and Moezi, A. 2012. Determination of the critical level of phosphorus in rapeseed dry land agriculture in the southeastern of Khuzestan. African Journal of Agricultural Research. 7: 3277-3283.
12. Fujii, K., Hayakawa, C., Van Hees, P.A.W., Funakawa, S., and Kosaki, T. 2010. Biodegradation of low molecular weight organic compounds and their contribution to heterotrophic soil respiration in three Japanese forest soils. Plant and Soil. 334: 475-489.
13. Gahoonia, T.S., Asmar, F., Giese, H., Nielsen, G.G., and Nielsen, N.E. 2000. Root-released organic acids and phosphorus uptake of two barley cultivars in laboratory and field experiments. European Journal of Agronomy. 12: 281-289.
14. Gang, X., Hongbo, S., Rongfu, X., Nie, Y., Pei, Y., Sun, Z., and Blackwell, M.S.A. The role of root-released organic acids and anions in phosphorus transformations in a sandy loam soil from Yantai, China. African Journal of Microbiology Research. 6: 674 -679.
15. Gardner, W.K., Parbery, D.G., and Barber, D.A. 1982. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. II: The effect of varying phosphorus supply and soil type on some characteristics of the soil/root interface. Plant and Soil. 68: 33-41.
16. Gee, G.H., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis, in: Methods of Soil Analysis: Physical Properties, Klute, A.(ed). Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
17. Guzman, E.T.R., Rios, M.S., Garcia, J.L.I., and Regil, E.O. 1995. Uranium in phosphate rock and derivaties. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 189: 301-306.
18. Hinsinger, P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. Plant and Soil. 237: 173-195.
19. Holford, L.C.R. 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. Australian Journal of Soil Research. 35: 227-239.

20. Jones, D.L. 1998. Organic acids in the rhizosphere – acritical review. Plant and Soil. 205: 25-44.
21. Jones, D.L., and Darrah, P.R. 1994. Role of root derived organic acids in nutrient mobilization from the rhizosphere. Plant and Soil. 166: 247-257.
22. Khademi, Z., Jones, D.L., Malakouti, M.J., and Asadi, F. 2010. Organic acids differ in enhancing phosphorus uptake by *Triticum aestivum* L. effects of rhizosphere concentration and counterion. Plant and Soil. 334: 151-159.
23. Khademi, Z., Jones, D.L., Malakouti, M.J., and Asadi, F., and Ardebili, M. 2009. Organic acid mediated nutrient extraction efficiency in three calcareous soils. Soil Research. 47: 213-220.
24. Lipton, D.S., Blanchar, R.W., and Blevins, D.G. 1987. Citrate, malate, and succinate concentration in exudates from P- sufficient and P-strssed *Medicago satriva* L. seedlings. Plant Physiology. 85: 315-317.
25. Mangel. K., and Kirkby, E.A. 1982. Principle of plant nutrition. 5th ed. Springer.
26. Mclean, E.D. 1982. Soil pH and lime measurement. Methods of soil analysis part 2: chemical and microbial properties. 2nd ed. Agronomy 9(1). ASA. SSSA. Madison publisher.Wisconsin.USA.
27. Moradi, N., Sadaghiani, M.H.R., Sepehr, E., and Mandoulakani, B. 2012. Effects of low-molecular-wheight organic acids on phosphorus sorption characteristics in some calcareous soils. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 36: 459-468.
28. Murphy, J., and Riley, J.P. 1962. A Modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta. 27: 31-36.
29. Noonan, S.C., and Savage, G.P. 1999. Oxalate content of foods and its effect on humans. Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition. 8: 64-74.
30. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. USDA Circular 939. Us Government Printing. Washington D C.
31. Richards, L.A. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA. Washington D C.
32. Strom, L., Olssen, T., and Tyler, G. 1994. Differences between calcifuges and acidifuge plants in root exudation of low molecular organic acids. Plant and Soil. 167: 239-245.
33. Strom, L., Owen, A.G., Godbold, D.L., and Jones, D.L. 2005. Organic acid in a calcareous soil implications for rhizosphere nutrient cycling. Soil Biology and Biochemistry. 37: 2046-2054.
34. Strom, L., Owen, A.G., Godbold, D.L., and Jones, D.L. 2002. Organic mediated P mobilization in the rhizosphere and uptake by maize roots. Soil Biology and Biochemistry. 35: 703-710.
35. Strom, L., Owen, A.G., Godbold, D.L., and Jones, D.L. 2001. Organic acid behavior in a calcareous soil: sorption reactions and biodegradation rates. Soil Biology and Biochemistry. 33: 2215-2133.
36. Tyler, G., and Strom, L. 1995. Differing organic acid exudation pattern explains calcifuge and acidifuge behavior of plants. Annals of Botany. 75: 75-78.
37. Van Hees, P.A.W., Johansson, E., and Jones, D.L. 2008. Dynamics of simple carbon compounds in two forest soils as revealed by soil solution concentrations and biodegradation kinetics. Plant and Soil. 310: 11-23.
38. Van Hees, P.A.W., Jones, D.L., and Godbold, D.L. 2003. Biodegradation of low molecular weight organic acids in a limed forest soil. Water, Air and Soil Pollution. 3: 121-144.
39. Van Hess, P.A.W., Jones, D.L., and Godbold, D.L. 2002. Biodegradation of low molecular weight organic acids in coniferous forest podzolic soils. Soils Biology and Biochemistry. 34: 1261-1272.

40. Van Hees, P.A.W., Jones, D.L., Nyberg, L., Holmstrom, S.J.M., Godbold, D.L., and Lundstrom, U.S. 2005. Modeling low molecular weight organic acid dynamics in forest soils. Soil Biology and Biochemistry. 37: 517-531.
41. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determination soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration method. Soil Science. 37: 29-38.