



محور مقاله: حاصلخیزی خاک، تغذیه گیاه و کشت گلخانه‌ای

تأثیر ریزجانداران حل‌کننده سیلیکات بر انحلال پتاسیم غیر تبادلی و قابلیت استفاده عناصر غذایی خاک

ساناز اشرفی سعیدلو^{۱*}، عباس صمدی^۲، میر حسن رسولی صدقیانی^۳، ابراهیم سپهر^۴، محسن برین^۴^۱ دانشجوی دکتری گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه^۲ استاد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه^۳ دانشیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه^۴ استادیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

چکیده

ریزجانداران نقش کلیدی در چرخه عناصر غذایی ایفا می‌نمایند. پژوهش حاضر با هدف بررسی توانایی ریزجانداران حل‌کننده سیلیکات در انحلال و آزادسازی پتاسیم از کانی‌های مختلف و تغییر اشکال پتاسیم بومی خاک اجرا گردید. آزمایش بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل تلقیح میکروبی (باکتری، قارچ، کنترل مثبت و کنترل منفی) و نوع گیاه (ذرت، کلزا، شاهد (بدون گیاه)) بود. نتایج نشان داد اثر تلقیح میکروبی و حضور گیاه بر تمام پارامترهای اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود ($p < 0.001$). باکتری بیشترین تأثیر را بر مقدار پتاسیم محلول و فسفر خاک داشت، به طوری که غلظت K محلول و فسفر در شرایط تلقیح باکتریایی به ترتیب ۱/۳۹ و ۱/۵۱ برابر نسبت به تیمار قارچی افزایش یافت. غلظت K تبادلی در شرایط کشت ذرت و کلزا، در حضور باکتری به ترتیب ۳۹/۴۹ و ۴۹/۰۳ درصد و در حضور قارچ ۲۸/۹۵ و ۳۷/۰۸ درصد نسبت به تیمار Cont⁻ افزایش یافت. به طور کلی می‌توان استنباط نمود که تلقیح سویه‌های میکروبی کارآمد منجر به افزایش قابلیت استفاده عناصر غذایی در خاک می‌شود. لذا شناسایی سویه‌های میکروبی با قابلیت انحلال عناصر غذایی و بهره‌گیری از توانایی آن‌ها، می‌تواند با عرضه مقادیر کافی عناصر غذایی، جلوگیری از آنبوهی عناصر و بهبود کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، از خطرات آلودگی زیست-محیطی که توسط مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی ایجاد می‌شوند، جلوگیری نمایند.

کلمات کلیدی: تلقیح میکروبی، عناصر پرمصرف، کانی‌های پتاسیم‌دار، ذرت

مقدمه

خاک بعنوان بستری برای تولید محصولات زراعی است که آب و عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاهان را تأمین می‌نماید. بمنظور تأمین غذای مورد نیاز جمعیت در حال رشد، بایستی میزان باروری و تولید محصولات کشاورزی بطور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یابد. کمبود نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل استفاده گیاه فاکتورهای اصلی محدودکننده در تولید مواد غذایی در بسیاری از خاک‌های کشاورزی هستند (Zord و همکاران ۲۰۱۴). با تشدید پیشرفت کشاورزی به دلیل تفکیک اراضی به زمین‌های کوچک و نیز معرفی واریته‌ها و هیبریدهای زراعی با عملکرد بالا در طول انقلاب سبز، سرعت تخلیه عناصر پرمصرف از جمله پتاسیم در خاک‌ها افزایش یافته است (Samadi و همکاران ۲۰۰۸). بعلاوه، سطوح پتاسیم قابل استفاده خاک در اثر آنبوهی، رواناب و فرسایش کاهش یافته است (Sheng and Huang, 2002). اخیراً کشت متراکم و کاربرد نامتعادل کودهای شیمیایی نیز منجر به کاهش سطح پتاسیم در خاک‌های مختلف شده است (Zord و همکاران ۲۰۱۴). در نتیجه، کمبود پتاسیم به یکی از محدودیت‌های اصلی در تولید محصول تبدیل شده، و بنابراین بسیاری از محصولات به کوددهی پتاسیم در خاک‌ها پاسخ می‌دهند.

پتاسیم به عنوان یک منبع تجدیدنشدنی، عنصر غذایی ضروری، حیاتی و پرمصرف برای گیاه محسوب می‌شود که اهمیت آن در کشاورزی به خوبی شناخته شده است (دردی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). گیاهان پتاسیم مورد نیاز خود را از طریق کودهای شیمیایی افزوده شده و یا پتاسیم موجود در خاک تأمین می‌نمایند. پتاسیم در خاک به چهار شکل محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی یافت می‌شود که قابلیت استفاده این اشکال برای گیاه متفاوت بوده و انتقال پتاسیم بین آن‌ها به صورت برگشت‌پذیر صورت می‌گیرد (Syers, 2003). تعادل بین اشکال مختلف پتاسیم در خاک، منجر به تداوم تأمین پتاسیم با آنبوهی و یا مصرف آن توسط گیاه می‌گردد. اگر چه اشکال تبادلی و محلول پتاسیم ۱ الی ۲ درصد پتاسیم کل خاک را تشکیل می‌دهند و به عنوان دو شکل قابل دسترس برای گیاهان تلقی می‌شوند، ولی مطالعات نشان می‌دهند که پتاسیم غیرتبادلی و ساختمانی نیز می‌توانند در

* ایمیل نویسنده مسئول: sanazashrafi92@yahoo.com



تغذیه گیاه نقش داشته باشد چرا که واکنش‌های تعادلی و سینتیکی موجود بین اشکال مختلف این عنصر، سطح پتاسیم محلول و قابل دسترس گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Sparks and Huang, 1985).

با توجه به اینکه استفاده از مقادیر بالای کودهای پتاسیمی در کنار کودهای نیتروژنه و فسفوری در جهت افزایش عملکرد محصولات زراعی منجر به ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود (Akande و همکاران ۲۰۰۸) لذا جهت به حداقل رساندن خطرات ناشی از آلودگی‌های زیست‌محیطی و حفظ پایداری خاک، از ریزجانداران محرک رشد گیاهان (PGPR) شامل تثبیت‌کننده‌های نیتروژن، و حل‌کننده‌های فسفر و پتاسیم (KSB) بعنوان کود زیستی استفاده می‌شوند (Meena و همکاران ۲۰۱۴). مطالعات انجام شده حاکی از آن است که باکتری‌های مختلفی از جمله *B. circulans* و *Bacillus edaphicus*, *Bacillus mucilaginosus*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Burkholderia*, *Pseudomonas* دارای توانایی رهاسازی پتاسیم از کانی‌های پتاسیم‌دار هستند (Lian و همکاران ۲۰۰۲؛ Zhang و همکاران ۲۰۱۳). در بین قارچ‌ها نیز *Aspergillus* ساختار آن‌ها می‌باشند (Argelis و همکاران ۱۹۹۳). در کنار ریزجانداران حل‌کننده، شواهد حاکی از آن هستند که ترشحات ریشه‌ای نیز قابلیت انحلال عناصر غذایی معدنی نامحلول را افزایش می‌دهند که احتمالاً به دلیل تشکیل کمپلکس‌های فلزی محلول و پایدار بوده و نقش مهمی در فراهمی فلزات بازی می‌کنند (Collins و همکاران ۱۹۸۹). این ترشحات تثبیت فلزات را به وسیله مواد آلی خاک، اکسیدها و رس‌ها تعدیل کرده و رهاسازی آن‌ها را افزایش می‌دهند (Chen و همکاران ۲۰۰۳). گیاهان با افزایش ترشحات ریشه به کمبود عناصر از جمله K (Krafczyk و همکاران ۱۹۸۴) واکنش نشان می‌دهند، همینطور اسیدهای آلی بطور مؤثری تحرک و حلالیت کاتیون‌های فلزی زیادی از جمله Fe و Al (Jones and Darrah, 1994) را افزایش می‌دهند. در شرایط کمبود عناصر غذایی در ترکیب ترشحات ریشه‌ای گیاهان اسیدهای سیتریک، مالیک و اگزالیک افزایش می‌یابد. این اسیدها می‌توانند کمپلکس‌های بسیار پایداری با کاتیون‌های فلزی در محلول خاک تشکیل داده و نیز از طریق کاهش pH منجر به انحلال کانی‌ها و تغییر اشکال عناصر مختلف در خاک گردند (Chen و همکاران ۲۰۰۲). تبدیل پتاسیم از شکلی به شکل دیگر جزئی از دینامیک پتاسیم در خاک بوده و در طول زمان ممکن است پتاسیم‌های ساختمانی و تثبیت شده به شکل محلول یا تبادل‌ی و یا بالعکس و شکل‌های تبادل‌ی و محلول به شکل تثبیت شده تبدیل شوند. از آنجایی که این تبدیل‌ها بر قابلیت دسترسی پتاسیم برای گیاه تأثیرگذارند، مطالعه کارآیی ریزجانداران در حلالیت و آزادسازی عناصر غذایی به منظور کاهش هزینه‌های تولید و جلوگیری از آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف کودهای شیمیایی، ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی توانایی ریزجانداران حل‌کننده سیلیکات در انحلال و آزادسازی پتاسیم از کانی‌های مختلف و تغییر اشکال پتاسیم بومی خاک و نیز بررسی تأثیر ترشحات ریشه‌ای بر فراهمی عناصر غذایی نامحلول انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی مایه تلقیح سویه‌های برتر

نمونه‌های خاک ریزوسفری از مزارع سیب‌زمینی استان آذربایجان غربی برداشت شده و جدایه‌های باکتریایی و قارچی خالص‌سازی شدند. برای غربالگری و جداسازی جدایه‌های برتر قارچ‌ها و باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم، محیط کشت الکساندروف جامد (بررسی کیفی) و مایع (بررسی کمی) استفاده گردید (Hue و همکاران ۲۰۰۶). سویه‌هایی که از هاله شفاف بزرگتر و شاخص حلالیت بالاتر و نیز میزان پتاسیم آزاد شده بیشتری برخوردار بودند به‌عنوان سویه برتر انتخاب شدند (Omkar, 2012). با توجه به اینکه باکتری *Pseudomonas fluorescens* و قارچ *Aspergillus niger* دارای بالاترین میزان شاخص حلالیت و میزان پتاسیم آزاد شده نسبت به سویه‌های دیگر بودند، لذا به‌عنوان سویه‌های مورد مطالعه انتخاب گردیدند.

باکتری *Pseudomonas fluorescens* و قارچ *Aspergillus niger* پس از جداسازی، به‌ترتیب در محیط‌های جامد نوترینت آگار (NA) و PDA بازکشت گردیدند. پس از گذشت ۴۸ ساعت از رشد باکتری‌ها و قارچ‌ها (با جمعیت حدود $2/49 \times 10^8$ سلول باکتری در هر میلی‌لیتر از محلول در جذب نور با طول موج ۶۰۰ نانومتر و جمعیت 4×10^7 اسپور در هر میلی‌لیتر از محلول)، یک لوپ از کشت تازه هر جدایه به درون ارلن حاوی ۲۵ میلی‌لیتر محیط نوترینت برات مایه زنی و سپس یک شب با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه (rpm) تکان داده شدند و برای تلقیح محیط اصلی مایه تلقیح، ۲ میلی‌لیتر از محیط یک شب مانده، به درون ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری که حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر از محیط نوترینت برات (NB) بود، مایه‌زنی و جهت یکنواخت شدن در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه (rpm) تکان داده شدند. بعد از تعیین جمعیت میکروبی مایه تلقیح، بذور به مدت دو ساعت با مایع تلقیح و صمغ عربی خیسانده شده و شیک گردیده و سپس صاف و هوا خشک شدند.

تهیه بذور، کشت و برداشت گیاه

آزمایش به صورت طرح کامل تصادفی با ۲ فاکتور تیمارهای تلقیح میکروبی (تلقیح باکتری، تلقیح قارچ، $Cont^+$ (بدون تلقیح با حضور پتاسیم برابر با توصیه کودی) و $Cont^-$ (بدون تلقیح و بدون استفاده از پتاسیم) (شاهد)) و نوع گیاه (ذرت، کلزا و شاهد (بدون گیاه)) در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه در سال ۱۳۹۷ اجرا گردید. جهت بررسی تأثیر تلقیح میکروبی بر رهاسازی پتاسیم نامحلول خاک و قابلیت استفاده سایر عناصر غذایی، در این آزمایش از گلدان‌های پلاستیکی با گنجایش چهار و نیم کیلوگرم استفاده شد. ابتدا در کف گلدان‌ها کاغذ صافی واتمن قرار داده شده سپس تا ارتفاع مشخص خاک (نمونه‌های خاک در دستگاه اتوکلاو و با دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار ۱/۵ اتمسفر به مدت ۲ ساعت استریل شدند) پر شد. تعداد کافی از بذور سالم ذرت سینگل (رقم Single Cross-704) و کلزا (رقم نیما) انتخاب و با محلول‌های هیپوکلریت سدیم ۵ درصد (۲ دقیقه)، اتانول ۹۶ درصد (۳۰ ثانیه) ضدعفونی شده و در ادامه ۷ الی ۸ مرتبه با آب مقطر استریل شستشو گردیدند. بعد از ضدعفونی سطحی بذرها، به منظور تأمین مقدار رطوبت مورد نیاز اولیه برای جوانه زنی، بذرها با آب استریل به مدت ۴۸ ساعت قبل از کاشت مرطوب شدند. ۸ عدد بذر در هر گلدان قرار داده و مقداری خاک روی آن‌ها ریخته شد. ۱۰ روز پس از سبز شدن بذور، تعداد ۳ بوته در هر گلدان نگه داشته شد. تا اتمام دوره رشد از آب مقطر برای آبیاری و از محلول غذایی کامل و عاری از پتاسیم و دارای پتاسیم ($MnSO_4 \cdot 4H_2O$, $FeEDTA$, $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $(NH_4)_6MO_{24} \cdot 4H_2O$, H_3BO_3 و $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) جهت جلوگیری از هر گونه تنش تغذیه‌ای استفاده شد (Darzi و همکاران ۲۰۰۸). پس از سپری شدن ۶۵ روز از زمان کاشت، گیاه داخل گلدان‌ها برداشت شده و برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل هدایت الکتریکی (EC_e) و pH در عصاره گل اشباع (Nelson and Sommers, 1982)، کربن آلی به روش Walkly and Black (۱۹۳۴)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Tandon, 1998)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen و همکاران ۱۹۵۴) و مقادیر پتاسیم محلول، تبادل و غیرتبادلی به وسیله روش‌های ارائه شده توسط Helmeke and Sparks (۱۹۹۶) اندازه‌گیری گردیدند. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵، با استفاده از نرم‌افزار MSTATC و ترسیم نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به برخی از ویژگی‌های خاک در جدول (۱) ارائه گردیده است. خاک مورد بررسی غیرشور، با بافت لوم شنی دارای آهک بالا با کربن آلی کم (کمتر از ۱ درصد) بود. وجود بافت درشت، باعث کاهش نگهداشت عناصر غذایی در خاک شده است. به‌منظور ارزیابی توانایی ریزجانداران در انحلال پتاسیم غیرتبادلی، حاکی با بافت لوم شنی انتخاب گردید تا مقدار پتاسیم محلول آن پایین باشد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

بافت خاک	رس	سیلت	شن	نیتروژن	کربن آلی	ماده آلی	کلسیم معادل	پتاسیم			واکنش خاک	قابلیت هدایت الکتریکی	
								محلول	تبادلی	غیرتبادلی			
				%			mg/kg			dSm^{-1}			
لوم شنی	۱۵/۵	۱۲/۵	۷۲	۰/۱۰۴	۰/۷	۱/۲۰۷	۱۴	۱۹/۶۹	۶۴/۳۷	۶۵۸/۰۸	۱۰/۱	۶/۸۶	۲/۸۲

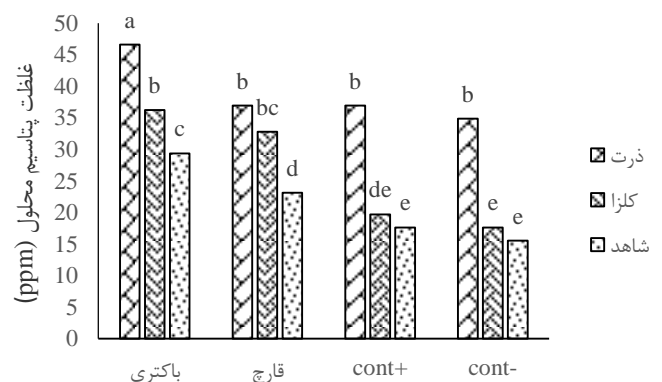
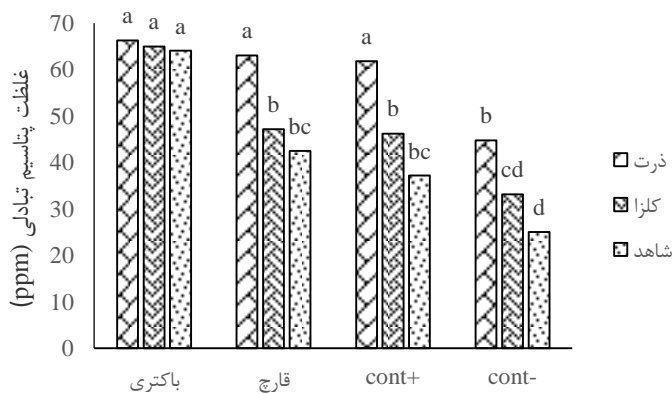
بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تأثیر تلقیح میکروبی بر تمام پارامترهای اندازه‌گیری شده، به جز مقدار نیتروژن و pH خاک، معنی‌دار بود ($P < 0.001$) (جدول ۲). نتایج نشان داد که تلقیح میکروبی و حضور گیاه منجر به افزایش مقدار نیتروژن خاک در مقایسه با نمونه‌های شاهد شد، به‌طوری‌که غلظت نیتروژن در تیمارهای باکتریایی و قارچی تحت کشت ذرت در مقایسه با تیمارهای $Cont^+$ و $Cont^-$ به ترتیب ۱/۲۳، ۱/۴۷، ۱/۰۸ و ۱/۳۱ برابر افزایش یافت. نتایج مقایسات میانگین حاکی از آن بود که در بین تیمارهای تلقیح میکروبی، باکتری بیشترین تأثیر را بر مقدار پتاسیم محلول و فسفر خاک داشت، به‌طوری‌که غلظت K محلول و فسفر در شرایط تلقیح باکتریایی به ترتیب ۲۸/۲۶ و ۳۴/۰۲ درصد نسبت به تیمار قارچی افزایش داشت. Badr و همکاران (۲۰۰۶) در بررسی انحلال کانی‌های حاوی پتاسیم و فسفر توسط باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات‌های معدنی مشاهده نمودند که رهاسازی پتاسیم و فسفر در تیمارهای مایه‌زنی شده با سویه‌های باکتری در مقایسه با تیمار بدون مایه‌زنی افزایش یافت.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس خصوصیات اندازه‌گیری شده در خاک

میانگین مربعات										درجه آزادی	منابع تغییرات
کربنات کلسیم معادل	قابلیت هدایت الکتریکی	واکنش خاک	ماده آلی	کربن آلی	پتاسیم غیرتبادلی	پتاسیم تبادلی	پتاسیم محلول	فسفر	نیتروژن		
۸/۱۸***	۰/۰۳۳***	۰/۰۰۹ ^{NS}	۰/۴۰***	۰/۰۱۴***	۵۲۱۸۳***	۱۹۶/۸***	۲۲۷/۹***	۵۹/۰۷***	۰/۰۰۱ ^{NS}	۳	تلقیح میکروبی
۱/۸۹ ^{NS}	۱/۳۹***	۰/۰۱۵ ^{NS}	۰/۰۱۶ ^{NS}	۰/۰۰۵ ^{NS}	۲۷۸۲۹***	۲۸۲/۶***	۹۰۷/۷***	۸۳/۴۳***	۰/۰۰۱ ^{NS}	۲	نوع گیاه تلقیح
۱/۹۱ ^{NS}	۰/۲۷۱***	۰/۰۶۹***	۰/۰۲۷***	۰/۰۰۹***	۳۳۵۱**	۸۹۴/۵***	۱۳۱/۷***	۱۹/۰۹***	۰/۰۰۱*	۶	میکروبی × نوع گیاه
۰/۹۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۹۵۲/۷	۳۴/۴۳	۷/۱۳	۰/۳۳۱	۰/۰۰۱	۲۴	اشتباه آزمایشی
۷/۱۳	۱/۰۵	۰/۵۵	۹/۶۱	۹/۶۱	۶/۱۸	۱۱/۸۱	۹/۲۲	۶/۶۲	۱۱/۵۶	-	ضریب تغییرات %

***، **، * به ترتیب نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱، ۰/۰۱ و ۵٪ و NS نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار هستند.

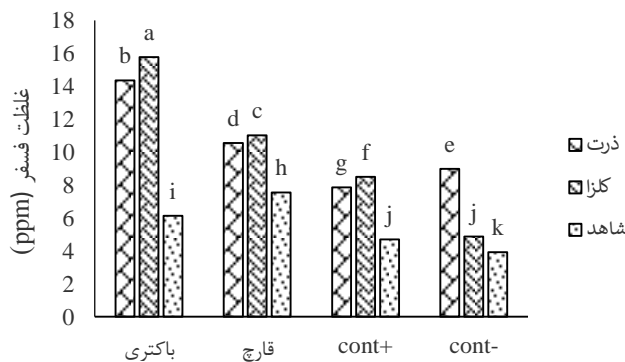
شکل‌های (۱ و ۲) اثرات متقابل تیمارهای تلقیح میکروبی و نوع گیاه را بر مقادیر پتاسیم محلول و تبادلی نشان می‌دهند. نتایج این بررسی نشان داد که تلقیح میکروبی منجر به افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم محلول شد. بیشترین غلظت k محلول مربوط به تیمار یاکتریایی در شرایط کشت ذرت (۴۶/۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کمترین مقدار مربوط به تیمار Cont⁻ شاهد (۱۵/۵۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. در ارتباط با K تبادلی نیز تلقیح میکروارگانیسم‌ها و ترشحات ریشه‌ای گیاهان، افزایش غلظت پتاسیم را در پی داشتند. غلظت K تبادلی در شرایط کشت ذرت و کلزا، در حضور باکتری به ترتیب ۳۹/۴۹ و ۴۹/۰۳ درصد و در حضور قارچ ۲۸/۹۵ و ۳۷/۰۸ درصد نسبت به تیمار Cont⁻ افزایش یافت.



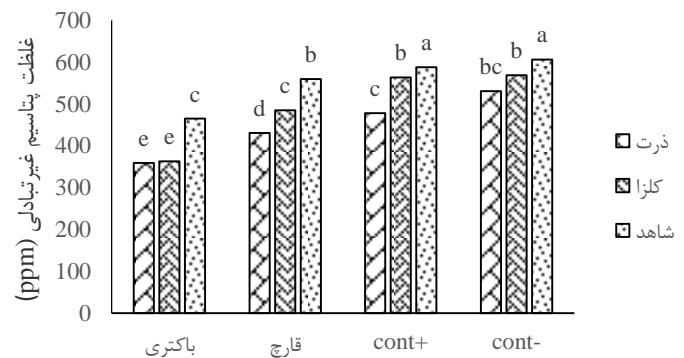
شکل ۲- اثر تلقیح میکروبی و نوع گیاه بر غلظت پتاسیم تبادل‌ی خاک $Cont^+$ و $Cont^-$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می‌باشند.

شکل ۱- اثر تلقیح میکروبی و نوع گیاه بر غلظت پتاسیم محلول خاک $Cont^+$ و $Cont^-$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می‌باشند.

مقایسات میانگین نشان داد مقدار پتاسیم غیرتبادل‌ی در تیمارهای تلقیح یافته در مقایسه با تیمارهای بدون تلقیح کاهش معنی‌دار داشت (شکل ۳). به عبارت دیگر تلقیح باکتری و قارچ منجر به کاهش شکل غیرتبادل‌ی پتاسیم و افزایش شکل‌های محلول و تبادل‌ی شده است. بالاترین سطح K غیرتبادل‌ی مربوط به نمونه‌های شاهد تیمارهای $Cont^+$ و $Cont^-$ است و این امر نشان می‌دهد در کنار تلقیح میکروبی، حضور گیاه نیز به واسطه‌ی ترشحات ریشه-ای در تبدیل شکل غیرقابل استفاده پتاسیم به شکل‌های قابل دسترس نقش دارد. اثر متقابل تلقیح میکروبی و نوع گیاه در ارتباط با فسفر خاک نیز معنی‌دار بود ($P < 0.001$) (شکل ۴). بالاترین غلظت فسفر در شرایط کشت کلزا و در حضور باکتری مشاهده شد. به گونه‌ای که مقدار فسفر در این تیمار در مقایسه با تیمارهای قارچ، $Cont^+$ و $Cont^-$ به ترتیب ۱/۴۳، ۱/۸۵ و ۳/۲۴ برابر بیشتر بود. افزایش ۲۳/۳۲ و ۳۶/۲۱ درصدی مقدار فسفر خاک در نمونه‌های شاهد تیمار باکتریایی و نیز افزایش ۳۷/۷۴ و ۴۸/۲۱ درصدی فسفر خاک در نمونه‌های شاهد تیمار قارچ نسبت به نمونه‌های مشابه تیمارهای $Cont^+$ و $Cont^-$ حاکی از تأثیر میکروارگانیزم‌های تلقیح شده در انحلال اشکال نامحلول فسفر خاک و افزایش غلظت فسفر محلول است. حال آنکه بالا بودن غلظت فسفر در شرایط کشت ذرت و کلزا در تیمارهای $Cont^+$ و $Cont^-$ در مقایسه با نمونه‌های شاهد این دو تیمار، نشان‌دهنده‌ی تأثیر گیاهان و متعاقباً ترشحات ریشه‌ای آن‌ها در انحلال فسفر نامحلول است.



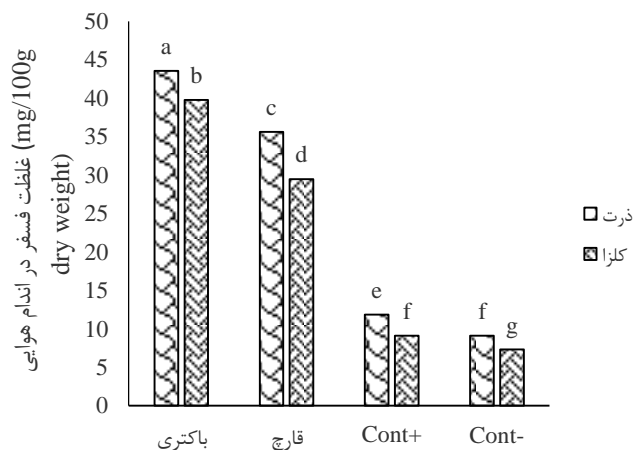
شکل ۴- اثر تلقیح میکروبی و نوع گیاه بر غلظت فسفر خاک $Cont^+$ و $Cont^-$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می‌باشند.



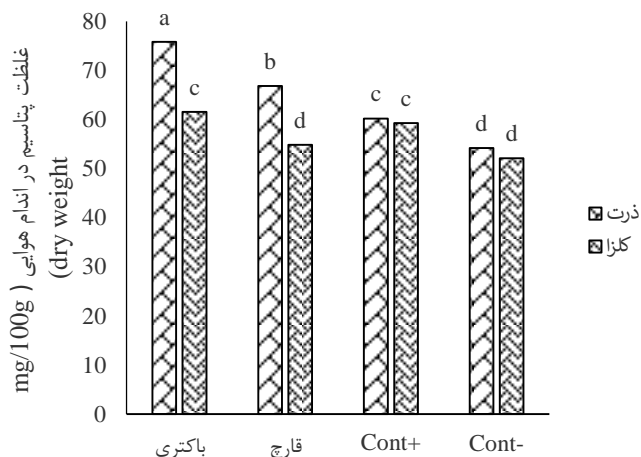
شکل ۳- اثر تلقیح میکروبی و نوع گیاه بر غلظت پتاسیم غیرتبادل‌ی خاک $Cont^+$ و $Cont^-$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می‌باشند.

بالاترین غلظت پتاسیم (۷۵/۸۷ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم وزن خشک) و فسفر (۴۳/۵۵ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم وزن خشک) اندام هوایی در حضور باکتری و شرایط کشت ذرت مشاهده گردید. غلظت پتاسیم اندام هوایی کلزا در شرایط تلقیح باکتریایی و قارچی به ترتیب ۱۵/۳۸ و ۵/۰۳ درصد بیشتر

از تیمار Cont⁻ بود (شکل ۵). تأثیر تلقیح باکتری و قارچ بر غلظت فسفر اندام هوایی در ذرت نیز بیشتر از کلزا بود. به طوری که مقدار فسفر در این تیمارها به ترتیب ۱/۰۹ و ۱/۲۰ برابر بیش از کلزا بود (شکل ۶).



شکل ۶- اثر تلقیح میکروبی بر غلظت فسفر اندام هوایی Cont⁺ و Cont⁻ به ترتیب نشان دهنده شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می باشند.



شکل ۵- اثر تلقیح میکروبی بر غلظت پتاسیم اندام هوایی Cont⁺ و Cont⁻ به ترتیب نشان دهنده شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می باشند.

تجزیه کانی‌های موجود در خاک در اثر کاهش pH محیط کشت (به دلیل تولید اسیدهای آلی نظیر اسید سیتریک، تارتاریک، استیک، گلیکولیک، سوکسینیک که از طریق تشکیل کمپلکس و تولید H⁺ تأثیر خود در آزادسازی عناصر غذایی را اعمال می‌نمایند. نوع اسید آلی، خواص شیمیایی، پیوند بین اتم‌های موجود در کانی و ساختمان بلوری از جمله عواملی هستند که در آزادسازی عناصر از کانی‌ها تحت تأثیر اسیدهای آلی مؤثرند) (Ullman و همکاران ۱۹۹۶)، تشکیل کمپلکس با کاتیون‌های سطحی کانی (به واسطه اسیدهای آلی و سیدروفور تولید شده)، تولید اگزو پلی‌ساکاریدها (Exo-polysaccharide) که به طور غیرمستقیم در آزادسازی عناصر نقش دارند، تولید CO₂ در حین فعالیت حیاتی میکروارگانیسم‌ها و نیز تولید آنزیم‌ها از سازوکارهای اصلی باکتری‌ها در رهاسازی عناصر محسوب می‌شوند (Baker و همکاران ۱۹۹۸). پلی‌ساکاریدها، اسیدهای آلی و سیدروفورها را به شدت جذب کرده و منجر به تشکیل غلظت بالایی از اسیدهای آلی و سیدروفورها در نزدیکی سطح کانی شده و با اکسید سیلیسیم موجود در سطح کانی کمپلکس ایجاد می‌نمایند، به این ترتیب عناصر از سطح کانی آزاد شده و وارد محیط محلول می‌شوند، از طرفی پلی‌ساکاریدهای موجود در محیط با جذب سیلیسیم باعث به هم خوردن تعادل سیلیسیم بین کانی و فاز محلول می‌شوند و از این طریق منجر به آزاد شدن عناصری نظیر پتاسیم و فسفر می‌گردند (Lian و همکاران ۲۰۰۷). همچنین پلی‌ساکاریدهای تولید شده توسط باکتری‌ها می‌توانند با کانی ترکیب شده و کمپلکس باکتریایی- کانی را تشکیل دهند و از این طریق منجر به تخریب کانی‌ها و آزادسازی عناصر گردند (Welch and Ullman, 1993). قارچ‌ها نیز از سه طریق می‌توانند انحلال کانی‌ها و رهاسازی عناصر را افزایش دهند: (۱) تولید اسید، اسیدهای آلی که در طول متابولیسم سلولی و یا در اثر تجزیه ضایعات متابولیکی ترشح می‌شوند pH محیط کشت را کاهش می‌دهند. اسیدیته بالا پیوندهای شیمیایی کانی را تضعیف کرده و منجر به رهاسازی عناصری نظیر پتاسیم می‌شود (Harley and Gilkes, 2000). (۲) تجزیه، ممکن است لیگاند‌های آلی مستقیماً در سطوح کانی‌ها قرار بگیرند و یا با قارچ کمپلکس تشکیل داده و باعث تخریب کانی شوند. این دو واکنش می‌تواند در ارتباط با تعدادی از ترکیبات آلی مانند اسیدهای استیک، فوماریک، گلیوکسیلیک و ایتاکونیک که بنا به گزارش‌ها با سوخت و ساز بدن قارچ‌ها در ارتباطند ادامه یابد (Lian و همکاران ۲۰۰۷). (۳) خرد نمودن مکانیکی ذرات (Jongmans و همکاران ۱۹۹۷). در این مکانیسم میسلیموم‌ها برای تأمین عناصر غذایی موردنیاز از طریق توسعه هیف وارد ساختار درونی کانی‌ها



می شوند. به این ترتیب نیروهای فیزیکی وارد شده کانی ها را خرد نموده و ضمن کاهش اندازه ذرات سطوحی تازه و با واکنش پذیری بالایی را ایجاد می نمایند.

مطالعات Chen و همکاران (۲۰۰۲) نشان داد که ترشحات ریشه های اسیده های آلی با وزن مولکولی کم هستند، که می توانند عناصر را فعال کنند و درجه فعالیت عناصر غذایی به شدت به مقدار و نوع اسید آلی اضافه شده و خصوصیات بیوشیمیایی و فیزیکوشیمیایی خاک بستگی دارد. گیاهان با افزایش ترشحات ریشه به کمبود عناصر از جمله K (Krafczyk و همکاران ۱۹۸۴)، Zn (Jones and Darrah, 1994) و Cu (Nielsen, 1976)، Fe (Jones and Darrah, 1994) و واکنش نشان می دهند، همینطور اسیده های آلی بطور مؤثری تحرک و حلالیت کاتیون های فلزی زیادی از جمله Al، Fe (Jones and Darrah, 1994) و Mn (Jauregui and Reisenauer, 1982) را افزایش می دهند. در شرایط کمبود عناصر غذایی در ترکیب ترشحات ریشه های گیاهان اسیده های سیتریک، مالیک و اگزالیک افزایش می یابد. اگزالات در ریزوسفر تعداد زیادی از گونه های گیاهی به فراوانی یافت شده و با برخی از اجزای خاک از جمله اکسیده های فلزی و کانی های رس واکنش پذیری بالایی نشان داده است (Luo و همکاران ۲۰۰۶). لذا احتمال دارد افزایش غلظت عناصر از جمله پتاسیم محلول و تبادل و فسفر در خاک ناشی از مکانیسم های میکروارگانیسم های تلقیح یافته و نیز ترشح اسیده های آلی توسط ریشه گیاهان باشد.

نتیجه گیری

میکروارگانیسم های زنده (باکتری ها و قارچ های سودمند) از طریق مکانیسم های مختلف منجر به تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات، رهاسازی پتاسیم، تأمین آهن و دیگر عناصر شده، با بهبود ساختمان خاک و خواص فیزیکوشیمیایی و بیولوژیک خاک از آبشویی و تلفات عناصر جلوگیری نموده و قابلیت دسترسی آن ها را افزایش می دهند. نتایج نشان داد که باکتری و قارچ مورد استفاده در این پژوهش باعث افزایش غلظت عناصر غذایی در خاک و در نتیجه موجب بهبود قابلیت استفاده آن ها در مقایسه با تیمارهای شاهد گردید. کشت گیاهان و ترشحات ریشه ای نیز تأثیر معنی داری بر غلظت عناصر غذایی داشت. از این رو جداسازی و شناسایی گونه های کارا و استفاده صحیح و مناسب از آن ها می تواند ضمن افزایش عملکرد کمی و کیفی محصولات کشاورزی و کاهش مصرف بخش قابل توجهی از انواع کودهای شیمیایی، حفظ محیط زیست را نیز به دنبال داشته باشد.

منابع

- دردی پور، ا.، فرشادی راد، ا. و ارزانش، م. ۱۳۸۹. تأثیر *Azospirillum lipoferum* و *chrococoum Azotobacter* بر آزادسازی پتاسیم خاک در کشت گلدانی سویا (*Glycine max* var. Williams). بوم شناسی کشاورزی، ۲(۴)، ۵۵۹-۵۵۳.
- رسولی صدقیانی، م.ح.، دره قیدی، ب.، خادوردیلو، ح. و مرادی، ن. ۱۳۹۴. تأثیر اسیده های آلی بر جذب و تثبیت آهن در خاک های آهکی و اسیدی. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۵، ۲۲۸-۲۱۵.
- Akande, M.O., Adediran, J.A., Oluwatoyinbo, F.I., Makinde E.A. and Adetunji, M.T. 2008. Suitability of poultry manure amended Sokoto rock phosphate on growth, nutrient uptake and yield of chilli pepper (*Capsicum fruitscens* L). Nigerian Journal of Soil Science, 18, 167-174.
- Argelis, D.T., Gonzala, D.A., Vizcaino, C. and Gartia, M.T. 1993. Biochemical mechanism of stone alteration carried out by filamentous fungi living in monuments. Biogeochemistry, 19, 129-147.
- Baker, W.W., Welch, S.C. and Banfield, F. 1998. Experimental observation of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering. American Mineralogist, 83, 1551- 1563.
- Chen, Y.L., Guo, Y.Q., Han, S.J., Zou, C.J., Zhou, Y.M. and Cheng, G.L. 2002. Effect of root derived organic acids on the activation of nutrients in the rhizosphere soil. Journal of Forestry Research, 13, 115-118.
- Chen, Y.X., Lin, Q., Luo, Y.M., He, Y.F., Zhen, S.J., Yu, Y.L., Tian, G.M. and Wong, M.H. 2003. The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil. Chemosphere, 50, 807- 811.
- Collins, R.N., Merrington, G.M., Mclaughlin, J. and Morel, J.L. 2003. Organic ligand and pH effects on isotopically exchangeable cadmium in polluted soils. Soil Science Society of American Journal, 67, 112-121.
- Darzi, M., Ghalavand, A. and Rejali, F. 2008. Effect of mycorrhiza, vermicompost and phpsphate biofertilizer application on flowing, biological yield and root colonization in fenel (*Feoniculum vulgare*). Iranian Journal of Crop Sciences, 10(1), 88-109.



- Harley, A.D. and Gilkes, R.J. 2000. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56, 11–36.
- Helmeke, P.A. and Sparks, D.L. 1996. *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Hu, X., Chen, J. and Guo, J. 2006. Two phosphate- and potassium-solubilizing bacteria isolated from Tianmu Mountain, Zhejiang, China. *World journal of Microbiology and Biotechnology*, 22(9), 983-990.
- Jauregui, M.A. and Reisenauer, H.M. 1982. Dissolution of oxides of manganese and iron by root exudate components. *Soil Science Society of American Journal*, 46, 314-317.
- Jones, D.L. and Darrah, P.R. 1994. Role of root derived organic acid in the mobilization of nutrient from the rhizosphere. *Plant Soil*, 166, 247-257.
- Krafczyk, I., Trollenier, G. and Beringer, H. 1984. Soluble root exudates of maize: influence of potassium supply and rhizosphere microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 16, 315-322.
- Lian, B., Fu, P.Q., Mo, D.M. and Liu, C.Q. 2002. A comprehensive review of the mechanism of potassium releasing by silicate bacteria. *Acta Mineralogica Sinica*, 22, 179–183.
- Lian, B., Wang, B., Pan, M., Liu, C. and Teng, H.H. 2007. Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*. *Geochimical et Cosmochimica Acta*, 72, 87–98.
- Luo, L., Zhang, S., Shan, X.Q. and Zhu, Y.G. 2006. Oxalate and root exudates enhance the desorption of p,p - DDT from soils. *Chemosphere*, 63, 1273-1279.
- Meena, V.S., Maurya, B.R. and Bahadur, I. 2014. Potassium solubilization by bacterial strain in waste mica. *Bangladesh Journal of Botany*, 43(2), 235–237.
- Nelson, D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp. 539–579.
- Nielsen, N.E. 1976. The effect of plants on the copper concentration in the soil solution. *Plant Soil*, 45, 679-687.
- Omkar, S. 2012. Isolation and characterization of phosphate solubilising bacteria from rhizospheric soil samples. *Online International Interdisciplinary Research Journal*, 2(4), 28-29.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. and Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extracting with sodium bicarbonate. USDA Cric. 939. U. S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Samadi, A., Dovlati, B. and Barin, M. 2008. Effect of continuous cropping on potassium forms and potassium adsorption characteristics in calcareous soils of Iran. *Australian Journal of Soil Research*, 46, 265–272.
- Sheng, X.F. and Huang, W.Y. 2002. Study on the conditions of potassium release by strain NBT of silicate bacteria. *Science of Agriculture*, 35, 673–677.
- Sparks D.L., Huang P.M. 1985. Physical chemistry of soil potassium. In: Munson RD (ed.) *Potassium in agriculture*. American Society of Agronomy Journal, Madison, pp. 201–276.
- Syers J.K. 2003. Potassium in soils: current concepts. In: Johnston AE (ed.) *Proceedings of the IPI Golden Jubilee Congress 1952–2002 held at Basel Switzerland 8–10 Oct 2002. Feed the soil to feed the people. The role of potash in sustainable agriculture*. International Potash Institute, Basel. pp. 301–310.
- Tandon H.L.S. 1998. *Methods of Analysis of Soils, Plants, Waters and Fertilizers*. Fertilizers Development and Consultancy Organization, New Dehli.
- Ulman, W.J., Krichman, D.L. and Welch, W.A. 1996. Laboratory evidence by microbioally mediated silicate mineral dissolution in nature. *Chemical Geology*, 132, 11-17.
- Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Welch, S.A. and Ullman, W.J. 1993. The effect of organic acids on plagioclase dissolution rates and stoichiometry. *Geochim Cosmochim Acta*, 57, 2725–2736.
- Zhang, A.M., Zhao, G.Y., Gao, T.G., Wang, W., Li, J., Zhang, S.F. and Zhu, B.C. 2013. Solubilization of insoluble potassium and phosphate by *Paenibacillus kribensis* CX-7: a soil microorganism with biological control potential. *African Journal of Microbiol Research*, 7, 41–47.
- Zord, C., Senbayram, M. and Peiter, E. 2014. Potassium in agriculture – status and perspective. *Journal of Plant Physiology*. 171, 656–659.



Topic for submission: Soil Fertility, Plant Nutrition and Greenhouse Cultivation

The effect of silicate solubilizing microorganisms on non-exchangeable potassium dissolution and availability of soil nutrients

Ashrafi-Saeidlou^{*1}, S., Samadi², A., Rasouli-Sadaghiani², M.H., Sepehr³, E., Barin⁴, M.

¹ PHD Student, Soil Science Department, Faculty of Agriculture University of Urmia, Iran

² Prof., Soil Science Department, Faculty of Agriculture University of Urmia, Iran

³ Associate Prof., Soil Science Department, Faculty of Agriculture University of Urmia, Iran

⁴ Assistant Prof., Soil Science Department, Faculty of Agriculture University of Urmia, Iran

Abstract

Microorganisms play a key role in the nutrients natural cycle. The present study was done to investigate the ability of silicate solubilizing microorganisms in the potassium dissolution and release from different minerals and alteration of soil native potassium forms. The experiment carried out as factorial based on a completely randomized design in three replications in greenhouse conditions. The first factor involves microbial inoculation (bacteria, fungus, Cont⁺ and Cont⁻) and the second factor was the type of plant including maize and rapeseed. The results showed that the microbial inoculation and plant presence had a significant impact on all measured parameters ($p < 0.001$). The bacteria had the most influence on soil soluble potassium and phosphorus content, so that in the case of bacterial inoculation, K and P concentrations increased 1.39 and 1.51 times compared to fungal treatment. Under maize and rapeseed cultivation, exchangeable potassium concentration increased 39.49% and 49.03% in the presence of bacteria and 28.98% and 37.08% in the presence of fungi, respectively. Generally, it can be concluded that the inoculation of effective microbial strains leads to an increase in soil nutrients availability. Therefore, identification of microbial strains with the ability of nutrients dissolution and using their ability can prevent the risks of environmental pollution caused by excessive consumption of chemical fertilizers by supplying sufficient amounts of nutrients, preventing nutrients leaching, and improving the soil physical, chemical and biological quality.

Keywords: microbial inoculation, macronutrients, K-bearing minerals, maize

* Corresponding author, Email: sanazashrafi92@yahoo.com