



چشم‌اندازی به امکان استفاده از اسیدهای آلی بعنوان مواد اصلاحی در مقابله با کمبود فسفر خاک

رضا خراسانی*

استادیار گروه علوم خاک دانشگاه فردوسی مشهد

khorasani@um.ac.ir

چکیده:

کم بودن فراهمی فسفر خاک غالباً یکی از عوامل محدود کننده رشد گیاه بشمار می‌رود. از اینرو استفاده از کودهای فسفر برای رشد گیاه ضروری بنظر می‌رسد. کاربرد کودهای شیمیایی فسفر در خاک دشواریهایی را نیز ایجاد می‌کند. از آنجایی که بیشتر فسفر در خاک به صورت غیر قابل استفاده برای گیاه است، با توجه به توانایی‌های طبیعی گیاه در مقابله با کمبود فسفر شاید بتوان ایده جدیدی در رابطه با استفاده از فسفر غیر قابل استفاده خاک پیشنهاد نمود. در این مقاله تحلیلی ضمن بیان مشکلات موجود در استفاده از کودهای شیمیایی فسفر، با تشریح ضرورت استفاده از منابع جدید برای فسفر خاک با الگوبرداری از توانایی‌های طبیعی گیاه، تلاش شده است نگرش جدیدی برای تامین فسفر گیاه با استفاده از ترکیبهای آلی بویژه اسیدهای آلی پیشنهاد گردد. همچنین با تشریح مکانیسم اثر این مواد در آزادسازی فسفر خاک و بیان مزیتها و محدودیتهای استفاده از آنها، به انجام مطالعات بیشتر در این زمینه توصیه شده است.

کلمات کلیدی: کود فسفر، اسیدهای آلی و تراوشات ریشه

مقدمه:

گیاهان مختلف دارای توانایی‌های متفاوت در کارایی استفاده از فسفر در خاک می‌باشند. برخی گیاهان قادرند در شرایط کمبود فسفر در خاک با کاهش کم عملکرد، رشد و نمو خود را کامل کنند. این گیاهان می‌توانند فسفر را به مقدار لازم از منبع فسفر غیر قابل استفاده تامین کنند. فسفر کل حتی در خاکهای حاوی فسفر قابل استفاده کم، به مقادیر زیاد وجود دارد ولی قسمت عمده آن به صورت ترکیبات پایدار و رسوبات می‌باشند که جزو منبع غیر قابل استفاده فسفر در خاک محسوب می‌شوند.

مکانیسمهای مختلفی برای تشریح این توانایی خاص برخی از گیاهان، در رشد و نمو و جذب فسفر در خاکهای حاوی فسفر قابل استفاده کم وجود دارد. یکی از این مکانیسمها، تراوش ترکیبات آلی از ریشه گیاه است که باعث حل شدن فسفر غیر قابل استفاده و تبدیل آن به فسفر قابل استفاده در خاک می‌شود و در نتیجه گیاه می‌تواند آنرا جذب کند، ترکیبات آلی مختلفی در تراوشات ریشه گیاهان شناسایی شده است که در آن میان اسیدهای آلی مثل اسید سیتریک، اسید اگزالیک، اسید مالیک و ... سهم بسزایی در افزایش قابلیت استفاده فسفر و برخی از عناصر دیگر مثل آهن دارد. برای اثبات توانایی این مواد در آزادسازی و حلالیت فسفر در خاک، آزمایشات زیادی با اضافه کردن مقادیر خالص مصنوعی از اسیدهای آلی به خاک انجام شده است که نتایج بدست آمده همواره حاکی از آزادسازی فسفر غیر قابل استفاده از خاک می‌باشد. بعنوان مثال مشاهده شده است که اضافه کردن اسیدهای سیتریک و اگزالیک به خاک در مقایسه با آب باعث افزایش زیاد قابلیت استفاده فسفر خاک می‌شود. این مطالب می‌تواند نگرش جدیدی در استفاده از این ترکیبات بعنوان کود (مواد اصلاحی) برای تامین فسفر خاک ایجاد کند. هدف اصلی از این مقاله تشریح محدودیتهای و مزیتهای نسبی استفاده از برخی ترکیبات آلی نظیر اسیدهای آلی که



تراوش آنها توسط ریشه یک واکنش طبیعی گیاه در شرایط کمبود فسفر خاک محسوب می‌شود، در افزایش فراهمی فسفر خاک است و همچنین پیشنهاد انجام مطالعات بیشتر برای بررسی استفاده از آنها نه بعنوان کود جایگزین فسفر بلکه به صورت مواد همراه برای محصولات و در شرایط خاص است.

ضرورت استفاده از منابع کودی جدید برای فسفر

همانطور که در گزارشات مختلف بیان شده است استفاده از کودهای شیمیایی برای تامین فسفر گیاه با مشکلات و محدودیتهایی روبرو است. قسمت عمده فسفر کودهای شیمیایی به فسفر غیر قابل استفاده در خاک تبدیل می‌شود. عواملی نظیر pH، جذب سطحی، رسوب و آلی شدن فسفر باعث کاهش قابلیت استفاده فسفر در خاک می‌شود. بر طبق مطالعات انجام شده توسط هول فورد (۱۹۹۷) بیش از ۸۰ درصد فسفر اضافه شده به خاک به صورت غیر قابل استفاده در می‌آید؛ این رقم حتی تا ۹۰ درصد هم گزارش شده است (منگل و کرکبی ۱۹۸۲). صرف نظر از مقدار دقیق این رقم باید گفت قسمت عمده کودی که به خاک داده می‌شود برای گیاه بطور مستقیم قابل استفاده نیست. این بهره‌وری کم فسفر در خاک در شرایطی است که میزان کود در حد مورد نیاز گیاه و منطبق بر توصیه‌های علمی کودی باشد. در جاهایی مثل کشور ما که استفاده کود فسفر بیش از نیاز گیاه معمول است با توجه به هزینه‌های زیاد تولید کودهای فسفر، از نظر اقتصادی بخصوص در نظامهای اقتصادی دولتی (پرداخت یارانه) هزینه‌های هنگفتی را به کشور تحمیل می‌کند (ملکوتی ۱۳۷۵).

علاوه بر مشکلات زیانبار اقتصادی، استفاده بی‌رویه کود فسفر و عدم توجه به اثرات باقی مانده کود، سالیانه باعث تجمع مقادیر عظیمی از فسفر در خاک می‌شود. این مسئله باعث تغییر خصوصیات فیزیکی و تخریب ساختمان خاک می‌شود که می‌تواند اثرات منفی زیادی در تولید محصولات کشاورزی و فرسایش خاک داشته باشد. استفاده بی‌رویه از کود فسفر همچنین باعث برهم خوردن توازن عناصر غذایی در خاک شده بطوریکه مقادیر زیاد فسفر علاوه بر برهم زدن توازن و تعادل بین عناصر نیتروژن و فسفر که برای رشد و نمو گیاهان بسیار مهم است، می‌تواند باعث کاهش قابلیت استفاده عناصری مانند آهن، منگنز، مس و روی شود. از طرف دیگر استفاده بی‌رویه از کود فسفر باعث بروز اثرات زیست محیطی منفی مانند آلوده شدن آبهای سطحی به فسفر و آلودگی کادمیم در خاک می‌شود. از نظر کشاورزی پایدار نیز استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی فسفر نه تنها باعث هدررفت سرمایه ملی در سطح وسیع می‌شود بلکه باعث می‌شود تداوم در استفاده از منابع طبیعی از جمله خاک و آب که از اصول اولیه کشاورزی پایدار محسوب می‌شود توسط عوامل مطرح شده در بالا مورد تهدید قرار گیرد.

البته شاید بتوان با اعمال مدیریتهای صحیح از قبیل استفاده از کودهای آلی، روش مناسب کوددهی، توصیه دقیق کودی و غیره این مشکلات را تا حدی کم کرد ولی توجه به تولید و کاربرد منابع دیگر کودی از قبیل ترکیبات آلی که امروزه در گستره‌های کوچک و برای اهداف خاص مثل تولید محصولات گلخانه‌ای و باغی مطرح شده است، شاید بتواند تاحدی مشکلات موجود را تعدیل کند.

یافتن الگوی مناسب در تولید مواد اصلاحی (کود) جدید

عوامل متعددی باید در تولید کود در نظر گرفته شود که از این میان می‌توان به هزینه‌های تولید، سلامت محیط زیست و کارایی مصرف کود اشاره کرد. با توجه به اهتمام جهانی به داشتن محیطی پاک، امن و عاری از آلودگی، قطعاً کودهایی که کمترین آثار منفی را بر محیط زیست بویژه آب و خاک بگذارند می‌توانند مورد توجه بیشتر قرار گیرند. از طرف



دیگر، توجه به مسائل زیست محیطی می‌تواند در راستای اهداف کشاورزی پایدار که همانا استفاده بهینه از منابع طبیعی است نیز باشد. با توجه به مسائل زیست محیطی و کشاورزی پایدار و همچنین هزینه های تولید و بحث مربوط به کارایی مصرف کود فسفر باید در پی یافتن الگوی مناسبتری برای تولید و استفاده از منابع جدید به عنوان کود بود. گیاهان به طور طبیعی از نظر مصرف انرژی برای ادامه حیات کم هزینه ترین و کارآمدترین راه را انتخاب می‌کنند که آن راه غالباً امن ترین راه نیز برای زیست و زیستگاه گیاه و در نتیجه محیط زیست انسان محسوب می‌شود؛ لذا الگوبرداری از توانایی گیاه در مقابله با تنشهای مختلف از جمله تنش کمبود عناصر مثل فسفر می‌تواند بهترین روش برای کمک به گیاه باشد. حال سوال اینجاست که گیاه چگونه با کمبود فسفر خاک بطور طبیعی مقابله می‌کند؟ عواملی مثل مورفولوژی ریشه و گسترش سطح تماس، «کنیتک جذب»^۱ و فیزیولوژی گیاه از طریق تراوشات ریشه در این مورد سهم هستند. با توجه به اهداف این مقاله، مورد آخر یعنی تراوشات ریشه بیشتر مورد بحث قرار می‌گیرد.

تراوشات ریشه و مقابله طبیعی گیاه با کمبود فسفر خاک

تراوشات ریشه از نظر ساختاری به دو گروه ترکیباتی با وزن مولکولی کم و ترکیباتی با وزن مولکولی زیاد تقسیم می‌شوند. ترکیبات با وزن مولکولی کم که در مقادیر زیادتر تراوش می‌شوند و شامل اسیدهای آلی، قندها، آمینو اسیدها، فلاونیدها و فیتوسیدروفورها هستند، بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (ویس ۱۹۹۰). گیاه وقتی در معرض کمبود فسفر قرار می‌گیرد، بعنوان یک واکنش طبیعی اقدام به تراوش ترکیبات آلی جهت افزایش قابلیت فسفر در خاک می‌کند. پژوهشها نشان داده‌اند که اسیدهای آلی مثل اسید سیتریک، اسید اگزالییک، اسید مالیک و غیره نقش بسزایی در افزایش قابلیت استفاده فسفر از منبع فسفر غیر قابل استفاده خاک دارند (استانتون و لپرینس ۱۹۹۶؛ ونکلاس و همکاران ۲۰۰۳). تحقیقات نشان داده است که گیاه در مواجهه با کمبود فسفر مقادیر بیشتری از ترکیبات آلی تراوش می‌کند (گرک و همکاران ۲۰۰۰؛ ۸ نیومن و رامهلد ۱۹۹۹). اکثر گیاهان بصورت طبیعی در هنگام مواجهه شدن با کمبود فسفر خاک، اقدام به تولید اسیدهای آلی می‌کنند که منجر به فراهمی بیشتر فسفر خاک می‌شود. تحقیقات نشان داده است که گیاهان ویژه‌ای که دارای «ریشه‌های خوشه‌ای»^۲ هستند وقتی در معرض کمبود فسفر قرار می‌گیرند، اختصاصاً مقدار زیادی اسید سیتریک تراوش کرده و باعث حلالیت بیشتر فسفر خاک می‌گردد (کانیا و همکاران ۲۰۰۱). مکانیسمهای مختلفی برای افزایش فراهمی فسفر توسط اسیدهای آلی وجود دارد که عبارتند از: ۱- کاهش pH محلول خاک (در خاکهای آهکی)، ۲- رقابت آنیونهای آلی مثل سترات، اگزالات و... با فسفات برای تصاحب جایگاه‌های جذب سطحی، ۳- کمپلکس کردن کاتیونهایی (مثل کلسیم در خاکهای آهکی و آهن و آلومنیوم در خاکهای اسیدی) که با فسفات ترکیب پایدار ایجاد می‌کنند، ۴- تبادل لیگاندی^۳ و افزایش لیگاندی^۴ در سطح اکسیدها و هیدروکسیدها (جونز و لئوپرت ۲۰۰۶؛ راندال و همکاران ۲۰۰۱).

افزایش قابلیت استفاده فسفر بر اثر اضافه کردن اسیدهای آلی به خاک

پژوهشهای مختلف نشان داده‌اند که اضافه کردن اسیدهای آلی (یا نمکهایی از آنیونهای آلی آنها) باعث افزایش فراهمی فسفر خاک می‌گردد. اشتورم و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که در اثر اضافه کردن اسیدهای آلی یافت شده در

1-Uptake Kinetics

2-Cluster roots

3-Ligand exchange

4-Ligand enhanced



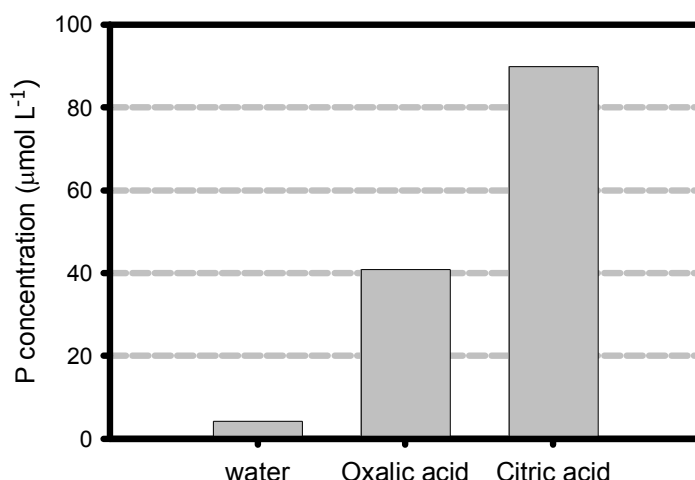
اولین کنگره چالش‌های کود در ایران: نیم قرن مصرف کود

۱۲-۱۰ اسفند ۸۹ تهران - هتل المپیک

The 1st Iranian Fertilizer Challenges Congress
Half a Century of the Fertilizer Consumption

تراوشات ریشه گیاهان (اسیدهای سیتریک، اگزالیک و مالیک) به یک خاک آهکی، در شرایط کمبود فسفر، فراهمی فسفر افزایش یافت، البته این افزایش تابعی از غلظت، pH و زمان تماس آنها با خاک بود؛ در pH ۷/۵ میزان آزادسازی فسفر در اسید اگزالیک بیشتر از اسید سیتریک و اسید مالیک بود این روند در غلظتهای زیاد (۱۰۰ میلی‌مولار) بیشتر حاکم بود، بطوریکه در این غلظت مقدار فسفر استخراج شده برای اسیدهای اگزالیک، سیتریک و مالیک به ترتیب حدود ۵۷، ۳۲ و ۲۵ میکرومول بر کیلوگرم خاک بود. در همین تحقیق روند افزایش فراهمی فسفر در خاکهای اسیدی (pH=۳/۵) برای اسیدهای سیتریک و مالیک بیشتر از اسید اگزالیک گزارش شد. در تحقیقی دیگر در یک خاک اکسی‌سول با pH اسیدی برابر ۵/۶ با ظرفیت زیاد تثبیت فسفر بعد از اضافه کردن ۱۰۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک و دوره تعادل ۱۰ روزه، میزان فسفر آزاد شده در فاز محلول خاک برای اسید سیتریک و اسید اگزالیک به ترتیب حدود ۲۲ و ۱۰ مرتبه نسبت به آب بیشتر بود (شکل ۱) (چاپ نشده از کارهای مؤلف). کارایی بیشتر آنیون اگزالات نسبت به سترات در پژوهش دیگر توسط خادمی و همکاران (۲۰۰۹) در سه خاک آهکی نیز گزارش شد.

اضافه کردن اسیدهای آلی باعث افزایش جذب فسفر توسط گیاه نیز می‌شود. اثر اضافه کردن اسید اگزالیک به خاک بر روی جذب گیاه در مقیاس آزمایشگاهی با بررسی فسفر نشاندار ۳۳ نشان داد که تجمع فسفر در اندامهای هوایی در گیاه گندم (خادمی و همکاران ۲۰۱۰) و در گیاه ذرت (اشتورم و اوون و همکاران ۲۰۰۱) نسبت به کنترل (بدون اضافه کردن اسید آلی) به علت افزایش فراهمی فسفر چند برابر بیشتر بود.



شکل ۱: غلظت فسفر محلول خاک بعد از اضافه کردن اسیدهای سیتریک و اگزالیک در یک خاک اسیدی

بررسی ایده امکان استفاده از اسیدها آلی بعنوان کود

همه این شواهد موید این مطلب است که اضافه کردن اسیدهای آلی به خاک باعث «تحرک شیمیایی» بیشتر فسفر خاک می‌گردد. همچنین مصرف این مواد باعث افزایش فراهمی عناصر دیگر مانند آهن، روی، مس و منگنز نیز می‌شود (خادمی و همکاران ۲۰۰۹). اما در استفاده از این مواد بعنوان کود باید به دو عامل مهم توجه کرد یکی کارایی این مواد در آزادسازی فسفر غیر قابل استفاده است و دوم بحث مربوط به تجزیه میکروبی و پایداری این مواد در خاک است.

برای بررسی کارایی اول باید به این سوال جواب داد که چه غلظتی از اسیدهای آلی باید به خاک اضافه شود. در کارهای آزمایشگاهی ملاک کار بر مبنای غلظت تراوش این مواد توسط ریشه در منطقه ریزوسفر است ولی چون کار در منطقه ریزوسفر بسیار سخت است و با توجه به اثرات متقابل مواد تراوش شده با خاک و میکروارگانیسمها امکان تعیین غلظت دقیق تراوشات گیاه وجود ندارد، با استفاده از مدل‌های خاص می‌توان آنرا تخمین زد. اشتورم و همکاران (۲۰۰۵) غلظتهای ۱ تا ۱۰۰ میلی مولار اسیدهای آلی را به یک خاک آهکی اضافه کردند و بیان کردند این دامنه غلظتی در ریزوسفر باید تأمین شود تا فراهمی فسفر در خاک افزایش یابد. رسیدن به غلظتهای بالا مستلزم تراوش مقادیر زیاد کربن در خاک می‌باشد که از نظر تعادل کربن در گیاه مهم می‌باشد؛ آنان بیان کردند که مثلاً غلظت ۱۰ میلی مولار از اسیدهای آلی اضافه شده به خاک باعث افزایش فسفر محلول آزاد شده توسط سیترات به مقدار ۱/۹ میکرومولار (معادل ۰/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و توسط اگزالات ۰/۸ میکرومولار (معادل ۰/۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) می‌شود، که این حاکی از کارایی خیلی کم این اسیدهای آلی بود. این نتایج نباید خیلی نا امید کننده باشد؛ وقتی به مشخصات خاک مورد آزمایش که از کشور سوئد برداشت شده است توجه شود معلوم می‌شود که از یک طرف این خاک مشخصات یک خاک آهکی که در مناطق خشک یافت می‌شود را ندارد (میانگین بارندگی سالانه ۳۸۸ میلی‌لیتر، کربن آلی ۸/۲ درصد و میانگین دما ۷/۱ درجه سانتیگراد) و از طرف دیگر مقدار اولیه فسفر این خاک خیلی خیلی کم است (فسفر استخراج شده برابر ۰/۰۰۹ میلی مول بر کیلوگرم خاک معادل ۰/۳ میلی گرم بر کیلوگرم است)



که شاید کم بودن کارایی اسیدهای آلی به دلیل مقدار کم فسفر معدنی این خاک باشد. در تحقیقی مشابه که توسط خادمی و همکاران (۲۰۱۰) بر روی خاکهای آهکی مناطق خشک (کرج) با فسفر قابل استفاده ۵ میلیگرم بر کیلوگرم انجام شد به مراتب کارایی بیشتری در آزادسازی فسفر خاک توسط اسیدهای آلی سیتریک و اگزالیک و آنیونهای آلی آن مشاهده شد. البته در این تحقیق به خاک حدود ۱۵/۵ میلیگرم بر کیلوگرم فسفر نشاندار افزوده شد. برای مثال اضافه کردن ۱۰ میلی مولار اسید اگزالیک حدود ۲ درصد از فسفر نشاندار اضافه شده را آزاد کرد که معادل ۰/۳۱ میلیگرم بر کیلوگرم است. آزادسازی این مقدار فسفر (۲ درصد) فقط از منبع کود اضافه شده بود قطعاً مقداری فسفر از منبع فسفر خود خاک نیز آزاد شده است ولی با این روش (اندازه‌گیری فسفر نشاندار) قابل اندازه‌گیری نبوده است. مقایسه نتایج این دو خاک آهکی کارایی‌های متفاوتی از اسیدهای آلی (مثلاً اگزالیک اسید) نشان می‌دهد که بیانگر این واقعیت است که رفتار اسیدهای آلی در خاکها مختلف در آزادسازی فسفر متفاوت است. قطعاً هر چه مقدار فسفر قابل استفاده و غیر قابل استفاده خاک بیشتر باشد کارایی اسیدهای آلی بیشتر خواهد بود.

عامل دوم پایداری اسیدهای آلی در خاک در رابطه با تجزیه میکروبی آنها است. روش مناسبی که برای تعیین مقدار تجزیه میکروبی در خاکهای آهکی بکار می‌رود اندازه‌گیری کربن نشاندار CO_2 متصاعد شده از تجزیه اسیدهای آلی اضافه شده به خاک است (اشتورم و همکاران ۲۰۰۱). مطالعات نشان دادند که در خاکهای آهکی مقاومت به تجزیه میکروبی اسید اگزالات بیشتر از اسید سیتریک است که مربوط به پایداری بیشتر اگزالات کلسیم در خاک می‌باشد (خادمی و همکاران ۲۰۱۰؛ اشتورم و اوون و همکاران ۲۰۰۱). برای مصرف این مواد اصلاحی در خاک باید اطلاعات لازم در زمینه پایداری آنها در خاک از طریق پژوهشهای مختلف بدست آید.

نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب بالا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در خاکهای آهکی اسید اگزالیک نسبت به اسیدهای آلی دیگر مورد مطالعه تا به حال، پایداری و کارایی بیشتری در این خاکها در آزادسازی فسفر دارد. البته با توجه به کارایی عمومی کم اسیدهای آلی از جمله اسید اگزالیک و اسید سیتریک و هزینه‌های زیاد آنها نمی‌توان آنها را به عنوان یک کود جایگزین مطرح کرد. با توجه به وجود خاکهایی در کشور ما که سالیان متوالی بدون توجه به توصیه کودی در اثر استفاده بی‌رویه کود، فسفر زیادی دریافت کرده‌اند و با توجه به اینکه هر چه مقدار فسفر قابل استفاده و غیر قابل استفاده خاک بیشتر باشد کارایی اسیدهای آلی بیشتر خواهد بود شاید اضافه کردن این مواد به خاک بتواند اثر باقیمانده فسفر خاک را برای سالهای بعد بیشتر کند که بدین ترتیب مصرف بیش از حد کود فسفر با داشتن محدودیتها و مشکلات زیادی که در این مقاله بحث شد، تعدیل گردد. اصل این موضوع یعنی اضافه کردن این مواد به خاک با در نظر گرفتن توجیهات اقتصادی آن به همراه مقدار مصرف، نحوه مصرف (مثلاً بصورت یک ماده مکمل با کود فسفر یا تنها)، روش کوددهی (جامد یا محلول) و زمینه مصرف (محصولات گران قیمت گلخانه‌ای، محصولات خارج از فصل، گیاهان زیتنی، گیاهان دارویی محصولات زراعی با کارایی زیاد فسفر و...) می‌تواند بعنوان یک ایده در پژوهشهای آینده مورد کنکاش دقیقتر قرار گیرد.

پیشنهادهای

پیشنهاد می‌شود تحقیقات بیشتری در این زمینه یعنی اثر اضافه کردن اسیدهای آلی به خاکهای مختلف با مقادیر متفاوت فسفر بویژه خاکهایی با اثرات باقی‌مانده بیشتر برای فسفر، محصولات مختلف بویژه آنهایی که کارایی بیشتری در استفاده از فسفر کم خاک دارند و همچنین محصولاتی که تولید آنها در مقیاس کوچک توجیه اقتصادی بیشتری دارد، انجام گیرد.



منابع

۱. ملکوتی، م.ج. ۱۳۷۵. کشاورزی پایدار و افزایش عملکرد با بهینه سازی مصرف کود در ایران. چاپ اول، نشر آموزش کشاورزی.
2. Gerke J., L. Beissner, and W. Römer. 2000a. The quantitative effect of chemical phosphate mobilization by carboxylate anions on P uptake by a single root. I. The basic concept and determination of soil parameters. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163: 207-212.
3. Holford I.C.R. 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Aust. J. Soil Res.* 35: 227-239.
4. Johnson S.E., and R.H. Loeppert. 2006. Role of organic acids in phosphate mobilization from Iron oxide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:222-234.
5. Kania A., G. Neumann, S. Cesco, R. Pinton, and V. Römheld. 2001. Use of plasma membrane vesicles for examination of phosphorus deficiency-induced root excretion of citrate in cluster root of white lupin (*Lupinus albus* L.). In: Horst et al. (eds) *Plant Nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research. Proceedings of the XIV International Plant Nutrition Colloquium.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp 546-547.
6. Khademi Z., D.L. Jones, M.J. Malakouti, F. Asadi, and M. Ardebili. 2009. Organic acid mediated nutrient extraction efficiency in three calcareous soils. *Aust. J. Soil Res.* 47:213-220
7. Khademi Z., D.L. Jones, M.J. Malakouti, and F. Asadi. 2010. Organic acids differ in enhancing phosphorus uptake by *Triticum aestivum* L., effects of rhizosphere concentration and counterion. *Plant Soil* 334:151-159
8. Mengel K., and E.A. Kirkby. 1982. *Principle of plant nutrition.* 5th edition, Springer.
9. Neumann G., and V. Römheld. 1999. Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. *Plant Soil* 211: 121-130.
10. Randall P.J., J.E. Hayes, P.J. Hocking, and A.E. Richardson. 2001 Root exudates in phosphorus acquisition by plants. In *Plant nutrient acquisition: new perspectives.* Eds Ae N et al, pp. 71-100. Springer.
11. Staunton S., and F. Leprince. 1996. Effect of pH and some organic anions on the solubility of soil phosphate: implications for P bioavailability. *Eur J Soil Sci* 47: 231-239.
12. Ström L., D.L. Godbold, and D.L. Jones. 2001 Procedure for Determining the Biodegradation of Radiolabeled Substrates in a Calcareous Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:347-351
13. Ström L., A.G. Owen, D.L. Godbold, and D.L. Jones. 2001. Organic acid behavior in calcareous soil: sorption and biodegradation rates. *Soil Biol. Biochem.* 33:2125-2133
14. Ström L., A.G. Owen, D.L. Godbold, and D.L. Jones. 2002. Organic acid mediated P mobilization in the rhizosphere and uptake by maize roots. *Soil Biol. Biochem.* 34:703-710
15. Ström L., A.G. Owen, D.L. Godbold, and D.L. Jones. 2005. Organic acid behaviour in a calcareous soil implications for rhizosphere nutrient cycling. *Soil Biol. Biochem.* 37: 2046-2054
16. Veneklaas E.J., T. Stevens, G.R. Cawthray, N.C. Turner, A.M. Grigg, and H. Lambers. 2003. Chickpea and white lupin rhizosphere carboxylates vary with soil properties and enhance phosphorus uptake. *Plant Soil* 248:187-197.
17. Whipps J.M. 1990. Carbon Economy. In J M Lynch (ed.) *The Rhizosphere.* John Wiley and Sons, West Sussex. pp. 59-98.