

بررسی شکل‌های شیمیایی فسفر برای مدیریت فسفر خاک در اراضی تحت کشت پسته

رقیه شهریاری پور^{۱*}، احمد تاج آبادی پور^۲

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹

چکیده

داشتن اطلاعات کافی و دقیق در مورد فسفر معدنی خاک برای توسعه کشاورزی پایدار در مناطق خشک بسیار مهم است. همچنین آگاهی از تغییر شکل فسفر در خاک‌های مختلف برای توصیه کود فسفره بسیار مهم است. هدف از این مطالعه یافتن اثرات استفاده طولانی مدت از منابع مختلف فسفر بر میزان فسفر قابل استفاده برای گیاهان و تعیین شکل‌های معدنی فسفر موجود در خاک بود. برای این منظور ۱۶۸ نمونه خاک از دو عمق ۰-۴۰ و ۴۰-۸۰ سانتی‌متری از اراضی زیر کشت پسته شهرستان سیرجان جمع‌آوری شد. به منظور جداسازی و تعیین شکل‌های معدنی فسفر در خاک از روش جیانگ و گو استفاده شد. این روش، فسفر را به شکل‌های دی‌کلسیم فسفات، اکتاکلسیم فسفات، فسفات‌های آلومینیوم، فسفات‌های آهن، فسفات‌های محبوس و آپاتیت جدا می‌کند. نتایج نشان داد که مقدار فسفر کل در این نمونه‌های خاک بالا بود و فراوانی اشکال شیمیایی فسفر به ترتیب آپاتیت < فسفات آلومینیوم < فسفر قابل استفاده < فسفر محبوس ≤ فسفات آهن < اکتاکلسیم فسفات بود. این نتایج نشان داد که مصرف مداوم فسفر منجر به تبدیل فسفر موجود در خاک به فرم‌های غیرقابل دسترس مانند آپاتیت می‌شود. همچنین مقادیر بالای فسفر کل نشان می‌دهد که با مدیریت بهینه مصرف کودهای فسفره و شرایط خاک، می‌توان فسفر مورد نیاز گیاه را بدون استفاده منابع جدید تأمین کرد.

واژه‌های کلیدی: فسفر، شکل شیمیایی، عصاره گیری، پسته.

۱ استادیار گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۲ استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

* نویسنده مسئول: rshahriaripour@gmail.com

مقدمه

موجود در خاک و جذب سطحی بر روی سطوح ذرات خاک از دسترس خارج می‌شود (Nwoke *et al.*, 2004). ثابت شده است که فرایند رسوب و جذب سطحی در مقایسه با جذب میکروارگانسیم‌ها، مقدار بیشتری فسفر را از دسترس خارج می‌کنند (Condron & Newman, 2011). عوامل مختلف بر میزان دسترسی فسفر توسط گیاهان از جمله نوع خاک، pH خاک، کانی شناسی خاک، محتوای آهک، محتوای آهن و آلومینیوم در خاک، منبع کود فسفره و روش کاربرد آن تاثیر گذار هستند (Sharma *et al.*, 2013). علاوه بر این، ۴۲ درصد از کل ورودی فسفر خاک از طریق کاربرد کودها در خاک‌های کشاورزی است اما ۷۵ درصد این مقدار به شکل غیرقابل دسترس تبدیل می‌شود که در نتیجه خسارات اقتصادی بزرگ و همچنین مشکلات زیست محیطی ناشی از کوددهی بیش از حد را با خود به همراه دارد (Yang *et al.*, 2013). برای حل مشکلات بازده پایین کودهای فسفره و روش‌های کوددهی دارای هزینه سنگین، لازم است بخش‌های فسفر در خاک که مسئول در دسترس بودن فسفر هستند، شناسایی شوند (Wang *et al.*, 2010). شریعتمداری و همکاران (۲۰۰۷) عنوان نمودند که از میان ویژگی‌های خاک‌های آهکی استان اصفهان، کربن آلی موثرترین عامل بر توزیع شکل‌های فسفر است. مستشاری و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که مقدار فسفر کل از ۷۰۰ تا

فسفر دومین عنصر ضروری برای گیاه است و نقش کلیدی در رشد گیاه دارد. در دسترس بودن فسفر در خاک بستگی به شکل‌هایی از فسفر دارد که بر بهره‌وری اولیه اکوسیستم‌های کشاورزی تأثیر می‌گذارد (Williams *et al.*, 2013). کاربرد فسفر برای هر محصول در یک تناوب با توجه به راندمان پایین جذب فسفر افزوده شده، منجر به تجمع قابل توجه آن در خاک می‌شود (Brar *et al.*, 2004). در کوددهی مداوم، فسفر توسط آهن، آلومینیوم و کلسیم رسوب کرده و به شکل غیرقابل جذب برای گیاه در می‌آید (khan & Joergensen, 2009). در مقایسه با سایر عناصر غذایی، فسفر کمترین میزان قابلیت دسترسی برای گیاهان را دارد و به دلیل جذب آن توسط آهن و آلومینیوم در خاک شالیزار، در خاک تحرک کمتری دارد (Ahmed *et al.*, 2019). همچنین مشاهده شده است که در شیوه‌های مختلف مدیریت حاصلخیزی خاک، بخش‌های قابل استفاده فسفر نیز متفاوت می‌گردد (khan & Joergensen, 2009). با آگاهی از مقدار اولیه فسفر خاک و میزان بازبازی منابع اضافه شده، می‌توان مقدار کود فسفر مورد نیاز برای رسیدن به حد بحرانی فسفر در خاک را مشخص کرد. فرض بر این است که حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد از فسفر در دسترس از طریق جذب توسط میکروارگانسیم‌ها، رسوب توسط کاتیون‌های محلول

در منطقه پسته‌کاری در جنوب شرقی ایران برای درک بهتر رفتار فسفر بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بخشی از اراضی شهرستان سیرجان واقع در غرب استان کرمان را با مساحت تقریبی ۶۳ هزار هکتار شامل می‌شود (شکل ۱). متوسط ارتفاع منطقه از سطح دریا ۱۷۶۶ متر و میانگین دما و بارش سالیانه آن در یک دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴)، به ترتیب، ۱۸ درجه سلسیوس و ۱۳۳ میلی‌متر می‌باشد. مواد مادری منطقه، غالباً آهکی می‌باشند. کاربری اصلی منطقه، باغ پسته می‌باشد. رقم غالب پسته در این منطقه، بادامی است و سن درختان، به‌طور متوسط، ۲۵ سال می‌باشد. همچنین نوع کود فسفوری مصرفی در منطقه مطالعاتی غالباً سوپر فسفات ساده با متوسط مصرف ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار و شکل مصرف آن عمدتاً به صورت سطحی است.

مطالعات ستادی و صحرایی

ابتدا نقشه توپوگرافی منطقه (بخش گلستان) با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه گردید. پس از پیاده‌کردن محدوده مطالعاتی بر روی این نقشه و اسکن نمودن آن، با استفاده

۱۰۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک‌های استان قزوین تغییر می‌کند. ایشان ترتیب شکل‌های معدنی فسفر را به صورت آپاتیت < اکتاکلسیم فسفات > فسفات آلومینیوم < فسفات آهن > فسفر محبوس < دی کلسیم فسفات بیان نمودند. برای شناسایی بخش‌های مختلف فسفر و تحرک آن در خاک، از روش‌های مختلف عصاره‌گیری دنباله‌دار استفاده می‌شود (Condron & Newman, 2011). هر چند که ارزیابی اثرات طولانی مدت مصرف کودهای فسفره و قابلیت استفاده آن در خاک‌های آهکی ایران کمتر مورد توجه بوده است اما معمولاً روش جیانگ و گو برای مطالعه شکل‌های شیمیایی فسفر در این خاک‌ها استفاده می‌شود (Jiang & Gu, 1989). روش‌های جداسازی مختلف، شکل‌های متفاوت فسفر را بر اساس طبیعت و آلی یا معدنی بودن آن جزء به وسیله فرایندهای انحلال/واجذب به کمک عصاره‌گیرهایی با قدرت انحلال یا واجذب کم تا زیاد استخراج می‌کنند (Cross & Schlesinger, 1995). در مناطق خشک، مطالعات مختصری بر روی اثرات کوددهی و به ویژه کوددهی طولانی مدت بر شکل‌های مختلف فسفر در خاک‌های آهکی انجام شده است. بنابراین، هدف از این مطالعه تعیین وضعیت شکل‌های مختلف فسفر در خاک‌های آهکی با شرایط کاربرد طولانی مدت کودهای آلی و معدنی

از نرم‌افزار ایلویس^۱، منطقه مزبور زمین‌مرجع‌آشد. در ادامه، شبکه‌ای منظم با ابعاد ۲ × ۲ کیلومتر بر روی منطقه مطالعاتی اعمال گردید و بدین ترتیب، مختصات جغرافیایی ۸۴ نقطه مشاهداتی به‌دست آمد (شکل ۳-۱). با توجه به مختصات جغرافیایی نقاط تعیین‌شده در مطالعات ستادی و استفاده از سامانه مکان‌یاب جهانی^۲، موقعیت تمامی این نقاط در صحرا تعیین گردید. سپس، در هر نقطه، از دو عمق صفر تا ۴۰ و ۴۰ تا ۸۰ سانتی‌متر، نمونه‌برداری انجام گرفت و نمونه‌های برداشت‌شده برای انجام مطالعات آزمایشگاهی، به آزمایشگاه انتقال داده شدند.

برای جداسازی و تعیین شکل‌های معدنی فسفر در خاک از روش جیانگ و گو^۴ استفاده شد (Jiang & Gu, 1989). این روش، فسفر را به شکل‌های دی‌کلسیم فسفات (Ca₂-P)، اکتاکلسیم فسفات (Ca₈-P)، فسفات‌های آلومینیوم (Al-P)، فسفات‌های آهن (Fe-P)، فسفات‌های محبوس (OC-P) و آپاتیت (Ca₁₀-P) جدا می‌کند. خلاصه مراحل عصاره‌گیری در جدول (۱) آمده است. در هر مرحله، غلظت فسفر به روش آسکوربیک اسید یا روش آبی اندازه‌گیری شد (Murphy & Riley, 1962). فسفر کل نیز به روش هضم در اسید پرکلریک اندازه‌گیری شد (Ku, 1996).

تعیین شکل‌های شیمیایی فسفر

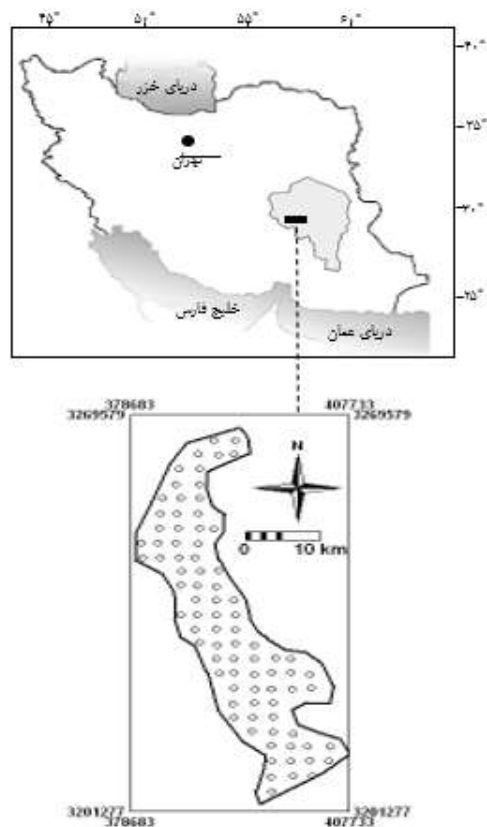
جدول ۱- خلاصه روش عصاره‌گیری دنباله‌ای و مشخصات شکل‌های معدنی فسفر.

مرحله عصاره‌گیری	ترکیب عصاره‌گیر	نسبت خاک به عصاره‌گیر	زمان تکان دادن (ساعت)	شکل استخراج‌شده
۱	بی‌کربنات سدیم ۰/۲۵ مولار با pH=۷/۵	۱:۵۰	۱	دی‌کلسیم فسفات
۲	استات آمونیوم ۰/۵ مولار با pH=۴/۲	۱:۵۰	۱	اکتاکلسیم فسفات
۳	فلورید آمونیوم ۰/۵ مولار با pH=۸/۲	۱:۵۰	۱	فسفات آلومینیوم
۴	هیدروکسید سدیم و کربنات سدیم ۰/۱ مولار	۱:۵۰	۲+۲*	فسفات آهن
۵	سیترات سدیم ۰/۳ مولار - یک گرم سدیم دیتیونات - سدیم بی‌کربنات ۰/۱ مولار	۱:۵۰	۱۶	فسفات محبوس
۶	اسید سولفوریک ۰/۵ مولار	۱:۵۰	۱	آپاتیت

دو ساعت تکان داده شده، ۱۶ ساعت در حالت سکون و دوباره ۲ ساعت تکان داده می‌شود.

³ Global Positioning System; GPS
4Jiang and Gu

¹ ILWIS
² Georeference



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی به همراه ۸۴ نقطه مشاهداتی.

تخمین‌گر وزن‌دهی معکوس فاصله^۱

به‌منظور ترسیم الگوی پراکنش داده‌های به‌دست آمده از هر ویژگی در منطقه مطالعاتی، از روش وزن‌دهی معکوس فاصله استفاده شد. تخمین‌گر وزن‌دهی معکوس فاصله، شیوه‌ای ساده برای درون‌یابی یک متغیر محسوب می‌شود. در این روش، فرض اساسی بر این است که مقدار همبستگی و تشابه بین همسایه‌ها با فاصله بین آن‌ها

متناسب است که می‌توان آن را به‌صورت تابعی با توان معکوس فاصله هر نقطه از نقاط همسایه تعریف کرد (Franke, 1962).

آنالیز داده‌ها

تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۱) انجام شد. به‌منظور رسم الگوی پراکنش نقاط از نرم‌افزار Surfer 8.0 استفاده شد.

¹ Inverse Distance Weighting (IDW)

نتایج و بحث

شکل‌های شیمیایی فسفر

خلاصه آماری شکل‌های شیمیایی فسفر در جدول‌های (۲) و (۳) به ترتیب برای عمق‌های ۰-۴۰ و ۴۰-۸۰ سانتی‌متری آورده شده است. همچنین الگوی پراکنش فسفر قابل استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار فسفر قابل استفاده خاک (Ca₂-P) در لایه سطحی بیشتر از لایه عمقی می‌باشد، هرچند بخش‌هایی وجود دارد که فسفر قابل استفاده در لایه سطحی و زیرین تقریباً با هم برابر است. اکتا کلسیم فسفات (Ca₈-P) که از شکل‌های فسفر غیر محلول خاک به‌شمار می‌رود، در بخش‌هایی از خاک سطحی بیشتر از لایه زیرین وجود داشته، اما در غالب نقاط، اکتا کلسیم فسفات در دو عمق با هم برابر است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود غلظت این شکل از فسفر خاک در لایه سطحی و عمقی عمدتاً در محدوده ۱۴-۲۴ میلی‌گرم می‌باشد.

فسفر در ترکیب با آلومینیوم (Al-P) یکی دیگر از شکل‌های فسفر خاک است که مقدار آن در قسمت عمده مناطق در محدوده ۱۶۰-۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است، در مقایسه مقادیر Ca₂-P و Al-P می‌توان به این نکته اشاره کرد که در مناطقی که با مقدار کمتر فسفر قابل استفاده روبرو بودیم، مقدار فسفات آلومینیوم بیشتر

از سایر مناطق است که می‌تواند به‌دلیل شرایط ایجاد شده توسط عصاره‌گیر این مرحله و واکنش ترکیبات کربناتی فسفر با آلومینیوم باشد. همچنین پراکنش غلظت فسفر در ترکیب با آهن در دو عمق خاک، به گونه‌ای است که این شکل از فسفر در لایه زیرین خیلی بیشتر از لایه سطحی است که نشان از وجود ترکیبات حاوی آهن در لایه زیرین دارد که احتمالاً منشأ آن کانی‌های حاوی آهن موجود در ترکیب سنگ مادر می‌باشد که به‌دلیل شرایط شیمیایی ایجاد شده ناشی از ترکیب عصاره‌گیر به جای کلسیم و منیزیم، وارد پیوند با فسفر خاک شده است. به جز نقاطی محدود، بقیه قسمت‌های منطقه مطالعاتی، فسفر محبوس کمتر از ۶۰ میلی‌گرم را دارند که نشان می‌دهد مقدار عوامل محبوس‌کننده فسفر در منطقه پایین بوده است. همچنین با مقایسه دو عمق خاک در منطقه مطالعاتی، به این نتیجه می‌توان رسید که فسفر محبوس در لایه سطحی بیشتر از لایه عمقی بوده است. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش پایداری شکل‌های مختلف فسفر، سهم آنها در میان شکل‌های دیگر فسفر افزایش پیدا می‌کند؛ به‌طوری که غلظت آپاتیت، خیلی بالاتر از فسفر اکتاکلسیم فسفات می‌باشد. پراکنش غلظت‌های آپاتیت، نشان می‌دهد همانند روند تغییرات غلظت اکتاکلسیم فسفات، غلظت آپاتیت در لایه عمقی بیشتر از لایه سطحی است. در هر دو عمق، کمترین مقدار

Juo (1963) گزارش دادند که منبع فسفر قابل جذب تمام شکل‌های فسفر معدنی است اما عمدتاً از فسفات‌های کلسیم، آلومینیوم و آهن تشکیل یافته است.

الگوی پراکنش تغییرات غلظت فسفر کل در شکل (۳) نشان داده شده است. این الگو نشان می‌دهد که حتی در مناطقی که با آزمایش نمونه برگ و بررسی علائم ظاهری با مشکل کمبود فسفر گیاه مواجه هستیم، غلظت فسفر کل مقادیر بالایی را به خود اختصاص داده است. می‌توان چنین نتیجه گرفت که با مدیریت صحیح در منطقه و اصلاح خصوصیات شیمیایی خاک تا حد امکان، بدون نیاز به استفاده از منابع جدید فسفر، مشکل کمبود فسفر را رفع کرد. برای مثال با افزودن مواد آلی به خاک تا حد زیادی می‌توان مشکل را رفع نمود. همچنین خلاصه آماری فسفر کل در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود دامنه تغییرات فسفر کل از ۱۹۶/۶۷ تا ۸۱۸/۵۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک با میانگین ۴۶۳/۱۸ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک می‌باشد. مقدار فسفر کل در خاک سطحی (۰-۴۰ سانتی‌متری) بیش از خاک عمقی (۴۰-۸۰ سانتی‌متری) است.

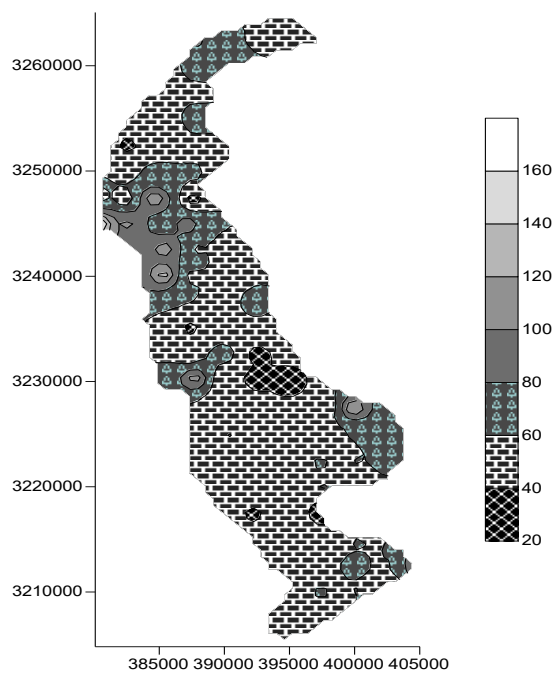
فسفر مربوط به اکتا کلسیم فسفات می‌باشد و بیشترین مقدار در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری مربوط به فسفات محبوس (Oc-P) است و در عمق ۴۰-۸۰ سانتی‌متری، آپاتیت (Ca₁₀-P) بالاترین مقدار را دارد. در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری مجموع مقادیر فسفات‌های کلسیم بیش از مجموع مقادیر فسفات‌های آهن و آلومینیوم است. اددهمی^۱ و همکاران نتیجه مشابهی را در خاک‌های با درصد بالای کربنات کلسیم معادل در جنوب ایران، به دست آوردند (Adhami et al., 2006). این در حالی است که در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری خاک، مقادیر فسفات‌های آهن و آلومینیوم بالاتر می‌باشد. حیدری و همکاران در پژوهشی در خاک‌های جنگلی شمال ایران، نشان دادند که در مجموع حدود ۸۵ درصد کل فسفر معدنی خاک مربوط به فسفات‌های کلسیم و مابقی مربوط به فسفات‌های آهن و آلومینیوم می‌باشد (حیدری و همکاران، ۱۳۹۲). نقی‌زاده اصل و همکاران (۱۳۹۰) عنوان داشتند که در بین شکل‌های فسفر تنها دی و اکتا کلسیم فسفات و فسفر پیوندی با اکسیدهای آلومینیوم با عصاره‌گیرهای مورد مطالعه همبستگی معنی‌دار داشتند. همچنین Chang &

جدول ۲- خلاصه آماری شکل‌های شیمیایی فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری.

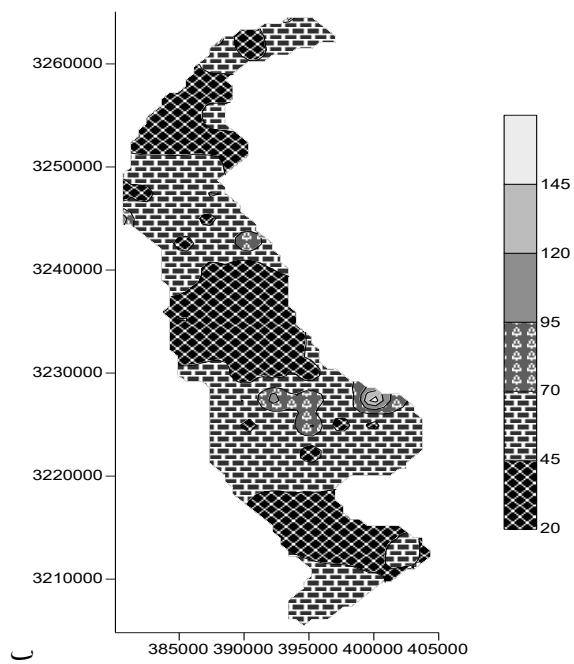
متغیر	دی‌کلسیم فسفات	اکتاکلسیم فسفات	فسفات آلومینیوم	فسفات آهن	فسفات محبوس	آپاتیت	فسفر کل
کمینه	۱۵/۹۴	۳/۱۹	۵۶/۲۴	۸/۸۷	۸/۱۱	۱۳/۷۰	۱۹۶/۶۷
بیشینه	۱۶۷/۸۹	۶۵/۹۵	۳۰۶/۸۳	۴۸/۹۵	۳۵۳/۷۴	۲۶۳/۹۶	۸۱۸/۵۲
میانگین	۵۸/۴۱	۲۱/۳۹	۱۳۸/۳۱	۲۲/۹۴	۳۹/۰۱	۱۳۷/۶۹	۴۶۳/۱۸
واریانس	۷۲۳/۶۵	۱۰۳/۹۷	۱۶۲۳/۹۷	۱۴۰/۹۵	۳۵۹۸/۷۷	۳۶۹۲	۱۵۵۶۲/۸۹
ضریب تغییرات (%)	۴۶	۴۷/۶۷	۲۹/۱۴	۵۱/۷۵	۱۰۰	۴۴/۱۳	۲۶/۹۳

جدول ۳- خلاصه آماری شکل‌های شیمیایی فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در عمق ۴۰-۸۰ سانتی‌متری.

متغیر	دی‌کلسیم فسفات	اکتاکلسیم فسفات	فسفات آلومینیوم	فسفات آهن	فسفات محبوس	آپاتیت	فسفر کل
کمینه	۱۸/۰۲	۳/۱۰	۵۵/۱۵	۸/۲۸	۷/۲۸	۳۱/۰۷	۲۰۷/۴۰
بیشینه	۱۶۲/۰۷	۳۳/۵۷	۲۹۹/۷۰	۳۵۲/۸۸	۱۰۸/۴۸	۳۸۴/۶۲	۷۳۷/۱۳
میانگین	۴۹/۷۸	۱۶/۵۷	۱۳۵/۲۳	۲۷/۵۳	۲۹/۸۳	۱۳۰/۸۷	۴۳۶/۲۲
واریانس	۶۰۳/۶۸	۴۴/۰۶	۱۴۸۸/۱۲	۱۷۶۹/۲۰	۴۶۰/۶۳	۳۳۲۷/۶۱	۱۲۴۷۰/۲۹
ضریب تغییرات (%)	۴۹/۳۶	۴۰	۲۸/۵۳	۱۰۰	۷۱/۹۵	۴۴	۲۵/۶۰

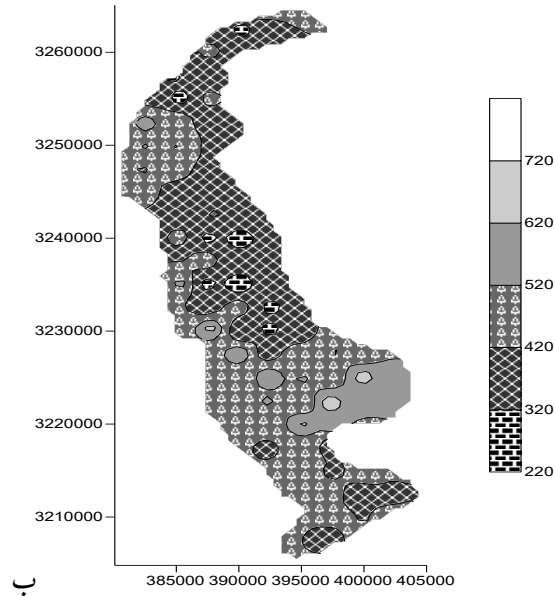
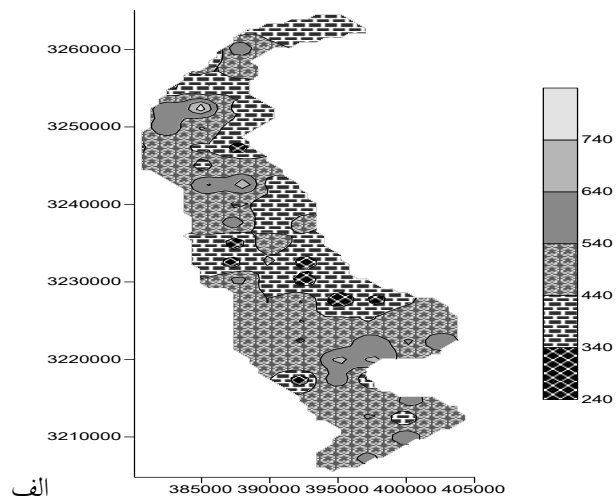


الف



ب

شکل ۲- الگوی پراکنش تغییرات شکل محلول فسفر (Ca2-P) (میلی گرم در کیلوگرم خاک) با استفاده از تخمین گر معکوس فاصله در عمق ۰-۴۰ سانتی متری (الف) و عمق ۴۰-۸۰ سانتی متری (ب).



شکل ۳- الگوی پراکنش تغییرات فسفر کل (میلی گرم در کیلوگرم خاک) با استفاده از تخمین گر معکوس فاصله در عمق ۴۰-۰ سانتی متری (الف) و عمق ۸۰-۴۰ سانتی متری (ب).

همبستگی شکل‌های شیمیایی فسفر با یکدیگر و فسفر کل خاک (Tiessen *et al.*, 1984). وجود این رابطه پویا اهمیت زیادی در فرایندهای واکنش‌های کود فسفر و جذب فسفر به وسیله گیاه دارد. ضرایب همبستگی بین شکل‌های مختلف فسفر با یکدیگر و با فسفر کل در جدول‌های (۴) و (۵) به ترتیب برای عمق‌های ۰-۴۰ و ۴۰-۸۰ وجود همبستگی‌های معنادار بین شکل‌های مختلف فسفر گویای این مطلب است که احتمالاً بین این شکل‌ها در خاک‌های مطالعه شده رابطه‌ای پویا برقرار است

فسفر کل با آپاتیت بود. علت این امر را می‌توان در شرایط شیمیایی خاک‌های آهکی جست و جو کرد؛ چرا که به علت بالا بودن pH در این خاک‌ها، به سرعت فسفر قابل استفاده به فرم‌های غیر قابل استفاده و رسوب یافته تبدیل می‌شود. نجفی و توفیقی گزارش کردند در خاک‌های آهکی، دی‌کلسیم فسفات با همه شکل‌های فسفر معدنی غیر از آپاتیت رابطه‌ای معنادار دارد (نجفی و توفیقی، ۱۳۸۸). محققان بین دی‌کلسیم فسفات و اکتاکلسیم فسفات همبستگی مثبت و معنی‌دار به دست آوردند (Samadi & Gilkes, 1998).

سانتی‌متری خاک آورده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو عمق، دی‌کلسیم فسفات با اکتاکلسیم فسفات همبستگی معنی‌داری دارد. اکتاکلسیم فسفات علاوه بر دی‌کلسیم فسفات با فسفات آهن نیز همبستگی معنی‌داری دارد. در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری، فسفات آهن با آپاتیت نیز همبستگی نشان می‌دهد. فسفات‌های آلومینیوم و محبوس تنها با مقدار فسفر کل همبستگی معنی‌دار دارند و با سایر شکل‌های فسفر رابطه معنی‌داری ندارند. در عمق ۴۰-۸۰ سانتی‌متری، آپاتیت تنها با فسفر کل همبستگی معنی‌دار دارد. بیشترین مقدار همبستگی

جدول ۴- ضرایب همبستگی شکل‌های شیمیایی فسفر و فسفر کل در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری خاک.

فسفر کل	آپاتیت	فسفات محبوس	فسفات آهن	فسفات آلومینیوم	اکتاکلسیم فسفات	دی‌کلسیم فسفات	
۰/۳۱**	۰/۰۶	-۰/۰۸	-۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۳۱**	۱	دی‌کلسیم فسفات
۰/۳۷**	۰/۲۰	-۰/۰۹	۰/۳۴**	۰/۱۸	۱		اکتاکلسیم فسفات
۰/۴۹**	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۰۳	۱			فسفات آلومینیوم
۰/۲۹**	۰/۳۰**	۰/۰۳	۱				فسفات آهن
۰/۵۴**	۰/۱۹	۱					فسفات محبوس
۰/۷۰**	۱						آپاتیت
۱							فسفر کل

** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

جدول ۵- ضرایب همبستگی شکل‌های شیمیایی فسفر و فسفر کل در عمق ۸۰-۴۰ سانتی‌متری خاک.

فسفر کل	آپاتیت	فسفات محبوس	فسفات آهن	فسفات آلومینیوم	اکتاکلسیم فسفات	دی‌کلسیم فسفات	
۰/۳۳**	۰/۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۴۵**	۱	دی‌کلسیم فسفات
۰/۴۶**	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۰/۲۷*	۰/۱۷	۱		اکتاکلسیم فسفات
۰/۵۷**	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۰۵	۱			فسفات آلومینیوم
۰/۴۶**	-۰/۰۴	۰/۱۱	۱				فسفات آهن
۰/۴۲**	۰/۱۹	۱					فسفات محبوس
۰/۶۴**	۱						آپاتیت
۱							فسفر کل

* معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵، ** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

نتیجه‌گیری

شد که بخش اعظم فسفر قابل استفاده به دلیل شرایط شیمیایی خاک‌های این منطقه به سرعت به حالت رسوب در می‌آید و از دسترس گیاه خارج می‌شود. به نظر می‌رسد باید به سرعت به سراغ روش‌هایی رفت که فسفر را در خاک به فرم قابل استفاده تبدیل کند یا حتی مدت زمان رسوب یافتگی را افزایش دهد. همچنین این یافته‌ها نشان می‌دهد که توانایی هیدروکسید سدیم برای استخراج فسفات آلومینیوم با افزایش محتوای فسفات آلومینیوم کاهش می‌یابد و هیدروکسید سدیم قادر به حذف فسفات

از نتایج گزارش شده در این مطالعه، به نظر می‌رسد که در خاک‌های آهکی مورد آزمایش، فراوانی اشکال مختلف فسفر به ترتیب آپاتیت \leq فسفات آلومینیوم $<$ فسفر قابل استفاده $<$ فسفر محبوس \leq فسفات آهن $<$ اکتاکلسیم فسفات بوده است. علاوه بر این، مشاهده شد که فسفات آهن، فسفات آلومینیوم و فسفر محبوس اشکال مهمی از فسفر هستند و به طور متوسط ۳۰٪ از مجموع فرم‌های فسفر معدنی را تشکیل می‌دهند. در عمل مشاهده

جزء به جزء فسفر در خاک‌های بسیار آهکی ایران حذف کرد، مورد نیاز است.

آلومینیوم به طور کامل نیست. بنابراین، به نظر می‌رسد که تحقیقات بیشتری برای روشن شدن این موضوع که آیا می‌توان فلورید آمونیوم را از روش‌های معمول عصاره‌گیری

4. Adhami, E., Maftoun, M., Ronaghi, A., Karimian, N., Yasrebi, J., & Assad, M. T. (2006). Inorganic phosphorus fractionation of highly calcareous soils of Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(13-14), 1877-1888.
5. Ahmed W, J. Huang, K. Liu, M. Qaswar, and H. Zhang. (2019). Changes in phosphorus fractions associated with soil chemical properties under long-term organic and inorganic fertilization in paddy soils of southern China. *PLOS ONE* 14(5): e0216881.
6. Ahmed, W., Jing, H., Kaillou, L., Qaswar, M., Khan, M. N., Jin, C., ... & Zhang, H. (2019). Changes in phosphorus fractions associated with soil chemical properties under long-term organic and inorganic fertilization in paddy soils of southern China. *PloS one*, 14(5), e0216881.
7. Brar, B. S. (2004). Soil quality, crop productivity and sustainability experiences under long term maize-wheat-cowpea cropping sequence in Inceptisol. *Research bulletin (Punjab Agricultural University. Department of Soils)*.

منابع

۱. حیدری، نسیم، ریحانی‌تبار، عادل، نجفی، نصرت‌اله. و اوستان، شاهین. (۱۳۹۲). توزیع شکل‌های مختلف فسفر در برخی خاک‌های استان آذربایجان شرقی و رابطه آن با برخی ویژگی‌های خاک. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۴ (۳)، ۲۷۹-۲۷۱.
۲. نجفی، نصرت‌اله. و توفیقی، حسن. (۱۳۸۵). بررسی اثر ریزوسفر گیاه برنج بر شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌های شالیزار شمال ایران: شکل‌های فسفر بومی خاک. *مجله علوم کشاورزی ایران*، ۳۷ (۵)، ۹۳۳-۹۱۹.
۳. نقی‌زاده اصل، زهرا، دردی‌پور، اسماعیل، قلی‌زاده، عبدالطیف، کیانی، فرشاد. و امامی، حجت. (۱۳۹۰). بررسی رابطه بین فسفر عصاره‌گیری شده به وسیله چند عصاره‌گیر و شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌های استان گلستان. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*. ۲۵ (۳)، ۵۱۷-۵۰۹.

- compost amended with inorganic P fertilizers. *Bioresource technology*, 100(1), 303-309.
15. Ku, S. (1996). Phosphorus. PP. 869-920. In: Sparks, D.L., (Eds), Methods of soil analysis, Part3, Chemical Methods. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, WI.
 16. Mostashari, M., Muazardalan, M., Karimian, N., Hosseini, H. M., & Rezai, H. (2008). Phosphorus fractions of selected calcareous soils of Qazvin province and their relationships with soil characteristics. *Am Eurasian J Agric Environ Sci*, 3(4), 547-553.
 17. Murphy, J. A. M. E. S., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta*, 27, 31-36.
 18. Nwoke, O. C., Vanlauwe, B., Diels, J., Sanginga, N., & Osonubi, O. (2004). The distribution of phosphorus fractions and desorption characteristics of some soils in the moist savanna zone of West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69(2), 127-141.
 19. Samadi, A., & Gilkes, R. J. (1998). Forms of phosphorus in virgin and fertilised calcareous soils of Western Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 36(4), 585-602.
 8. Chang, S. C., & Juo, S. R. (1963). Available phosphorus in relation to forms of phosphates in soils. *Soil Science*, 95(2), 91-96.
 9. Condrón, L. M., & Newman, S. (2011). Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. *Journal of Soils and Sediments*, 11(5), 830-840.
 10. Cross, A. F., & Schlesinger, W. H. (1995). A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, 64(3-4), 197-214.
 11. Franke, R. (1982). Scattered data interpolation: tests of some methods. *Mathematics of computation*, 38(157), 181-200.
 12. Hue, N. V., & Fox, R. L. (2010). Predicting plant phosphorus requirements for Hawaii soils using a combination of phosphorus sorption isotherms and chemical extraction methods. *Communications in soil science and plant analysis*, 41(2), 133-143.
 13. Jiang, B., & Gu, Y. (1989). A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Fertilizer research*, 20(3), 159-165.
 14. Khan, K. S., & Joergensen, R. G. (2009). Changes in microbial biomass and P fractions in biogenic household waste

- dung. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 32(3), 421-426.
23. Wang, Y. P., Law, R. M., & Pak, B. (2010). A global model of carbon, nitrogen and phosphorus cycles for the terrestrial biosphere. *Biogeosciences*, 7(7), 2261-2282.
24. Williams, A., Börjesson, G., & Hedlund, K. (2013). The effects of 55 years of different inorganic fertiliser regimes on soil properties and microbial community composition. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 41-46.
25. Yang, X., Post, W. M., Thornton, P. E., & Jain, A. (2013). The distribution of soil phosphorus for global biogeochemical modeling. *Biogeosciences*, 10(4), 2525-2537.
20. Shariatmadari, H., Shirvani, M., & Dehghan, R. A. (2007). Availability of organic and inorganic phosphorus fractions to wheat in toposequences of calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38(19-20), 2601-2617.
21. Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1), 587.
22. Tomar, N. K., Khanna, S. S., & Gupta, A. P. (1984). Transformation of phosphates varying in citrate and water solubility in a calcareous soil after incubation with cattle

Investigation of chemical forms of phosphorus for soil phosphorus management in pistachio orchards

Roghayeh Shahriaripour^{*1}, Ahmad Tajabadipour²

Abstract

Having adequate and precise information about soil inorganic phosphorus is very important for the development of sustainable agriculture in arid regions. Moreover, understanding the transformation of phosphorus forms in different soils is essential for recommending appropriate phosphorus fertilizers. The aim of this study was to evaluate the effects of long-term application use of different phosphorus sources on plant-available phosphorus and to identify the mineral forms of phosphorus present in the soil. For this purpose, 168 soil samples were collected from two depths (0–40 cm and 40–80 cm) in pistachio orchards located in Sirjan County. The Jiang and Gu method was used to fractionate and identify different mineral forms of phosphorus in the soil. This method separates phosphorus into di-calcium phosphate, octa-calcium phosphate, aluminum phosphates, iron phosphates, occluded phosphates, and apatite. The results showed that the total phosphorus content was high in these soil samples, and the abundance of phosphorus fractions followed the order: apatite > aluminum phosphate > plant-available phosphorus > occluded phosphorus ≥ iron phosphate > octa-calcium phosphate. These findings indicate that continuous phosphorus application leads to the conversion of available phosphorus into less unavailable forms such as apatite. In addition, the high levels of total phosphorus suggest that, with optimal management of phosphorus fertilizer use and soil conditions, the phosphorus requirements of pistachio plants can be met without further fertilizer additions.

Key Words: chemical forms, fractionation, pistachio, phosphorus.

1 Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

2 Professor, Soil Sciences and Engineering Department, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

*Corresponding Author: rshahriaripour@gmail.com