

Research Article

Agricultural Engineering, 45(2) (2022) 167-181

ISSN (E): 2588-526X

DOI: 10.22055/AGEN.2022.41502.1640

ISSN (P): 2588-5944

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

R. Shahriaripour

Assistant Professor, Department of Agriculture, Payamenour University of Tehran, Iran.

Received: 3 August 2022

Accepted: 14 September 2022

Abstract

Introduction: Phosphorus (P) is the second essential element and plays a key role in plant growth. The availability of P in the soil depends on the P fractions, which influence the primary productivity of agricultural ecosystems. Having sufficient and accurate information about soil mineral phosphorus is very important for the development of sustainable agriculture in arid regions. Awareness of phosphorus deformation in different soils is also very important for phosphorus fertilizer recommendation. When phosphorus is used in its soluble forms, it is rapidly converted into unusable forms for the plant. Native soil phosphorus is often in unusable form for the plant. Therefore, having enough information about phosphorus deformation in different soils is very important to recommend phosphorus fertilizer. The objective of this study was to find out the effects of long-term use of different sources of phosphorus on available P for pistachio plants in southeast Iran.

Materials and Methods: For that this research were taken depths from 0- 40 cm and 40- 60cm in 63000 ha of Sirjan pistachio orchards of Kerman province. Jiang and Gu method was used to isolate and determine the mineral forms of phosphorus in the soil. Each P fraction was extracted as follows: 1g (oven-dry weight) of sample soil weighed out into a 50 mL polyethylene centrifuge tube. A volume of 40 mL of the first extractant, NaHCO₃ (Table 1) was added and placed in an automated mechanical shaker at 25° C with 110 rpm for 1 h to allow time for the solution top equilibrate. The tubes were then centrifuged at 6000 × g for 15 min and the supernatant was carefully filtered through Whatman No. 42 with minimum loss of soil. Reactive P in the supernatant was determined using the ascorbic acid method at 882 nm. This method separates phosphorus in the forms of di calcium phosphate, octa calcium phosphate, aluminum phosphates, iron phosphates, occluded phosphates and apatite.

Results and Discussion: Results showed that the total P was high in these soil samples and the abundance of P fractions was in order to Ca₁₀-P type ≥ Al-P > Ca₂-P type > occluded P ≥ Fe-P > Ca₈-P type in two depths. These results suggested that continuous P application leads to plant available P convert into unavailable P forms such as Ca₁₀-P. results indicate that NaOH-extractable P has resulted from active Fe oxides. Also, by comparing two depths of soil in the study area, it can be concluded that the occupied phosphorus in the surface layer is more than the deep layer. Finally, it can be concluded that by increasing the stability of various forms of phosphorus, their contribution to other forms of phosphorus increases, so that the concentration of apatite is much higher than phosphate-calcium phosphate. Results showed the amount of available phosphorus (Ca₂-P) in the surface layer is more than the deep layer, which can be



attributed to surface application of Phosphorus fertilizers. However, there are sections where phosphorus in the surface layer and the bottom is almost equal. Amount of this form of P is less than Al-P and Fe-P. It may be due to increase in Al and Fe contents in calcareous soils.

Conclusion: High amounts of total P clarifies that by optimally managing the use of phosphorus fertilizers and soil conditions, the required P of the plant can be provided without additional use. From the results, it appears that in the calcareous soils the abundance of different forms of P was in order $\text{Ca}_{10}\text{-P} \geq \text{Al-P} > \text{Ca}_2\text{-P} > \text{occluded P} \geq \text{Fe-P} > \text{Ca}_8\text{-P}$. Furthermore, it observed that Fe-P, Al-P and Oc-P are important forms of P and on average constitute 30% of the sum of inorganic P forms. These findings demonstrate that the ability of NaOH to extract Al-P will be reduced with an increase in Al-P content and that NaOH is unable to remove Al-P completely. Therefore, it seems that more research is needed to find some light on whether NH_4F can be omitted from the regular P fractionation schemes in the highly calcareous soils of Iran.

Keywords: *Fractionation, phosphorus, chemical forms, strategic crops*

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

رقیه شهریاری پور

عضو هیات علمی گروه کشاورزی دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده	تاریخچه مقاله
<p>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 مقادیر مختلف فسفر بر میزان فسفر قابل استفاده برای گیاهان و تعیین شکل‌های معدنی فسفر موجود در خاک بود. برای این منظور ۸۴ نقطه نمونه برداری با فاصله منظم ۲ کیلومتر از یکدیگر به کمک نرم افزار ایلویس تعیین گردید و ۱۶۸ نمونه خاک از دو عمق ۰-۴۰ و ۴۰-۸۰ سانتی متری از اراضی زیر کشت پسته شهرستان سیرجان جمع آوری شد. به منظور جداسازی و تعیین شکل‌های معدنی فسفر در خاک از روش جیانگ و گو (عصاره گیری دنباله دار) استفاده شد. این روش، فسفر را به شکل‌های دی کلسیم فسفات، اکتاکلسیم فسفات، فسفات‌های آلومینیوم، فسفات‌های آهن، فسفات‌های محبوس و آپاتیت جدا می‌کند. نتایج نشان داد که مقدار فسفر کل در این نمونه‌های خاک به طور میانگین بالای ۴۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود و فراوانی اشکال شیمیایی فسفر به ترتیب آپاتیت <Apatite> فسفات آلومینیوم <Al-P> دی کلسیم فسفات <Ca₂-P> فسفر محبوس <Oc-P> فسفات آهن <Fe-P> اکتاکلسیم فسفات <Ca₈-P> بود.</p> <p>این نتایج نشان داد که مصرف مداوم فسفر منجر به تبدیل فسفر موجود در خاک به شکل‌های غیرقابل دسترس مانند آپاتیت می‌شود. همچنین مقادیر بالای فسفر کل نشان می‌دهد که با مدیریت بهینه مصرف کودهای فسفره و تغییر شرایط خاکی تا حد امکان مانند افزودن مواد آلی، می‌توان فسفر مورد نیاز را بدون استفاده منابع جدید تأمین کرد.</p>	<p>دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳</p> <p>کلمات کلیدی: فسفر، شکل‌های معدنی، عصاره گیری دنباله دار، محصول استراتژیک</p> <p>* عهده دار مکاتبات Email: shahriariipour@pnu.ac.ir</p>

مقدمه

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 (۲۴). کاربرد مقادیر زیاد کود فسفر در تناوب‌های کشت از یک طرف و تبدیل بخش زیادی از فسفر قابل استفاده به شکل‌های غیر قابل دسترس، باعث تجمع این عنصر در خاک می‌گردد (۴). در کوددهی مداوم، فسفر توسط آهن، آلومینیوم و کلسیم رسوب کرده و به شکل غیرقابل جذب برای گیاه در می‌آید (۱۲). 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 تحت کشت برنج، در خاک تحرک کمتری دارد (۲). با آگاهی از مقدار اولیه فسفر خاک و میزان بازیابی 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 ریزجانداران، رسوب توسط کاتیونهای محلول موجود در محلول خاک و جذب سطحی بر روی سطوح ذرات خاک از دسترس خارج می‌شود (۱۷). ثابت شده است که فرایند رسوب و جذب سطحی در مقایسه با جذب ریزجانداران، مقدار بیشتری فسفر را از دسترس خارج می‌کنند (۶). عوامل مختلف بر میزان دسترسی فسفر توسط گیاهان از جمله بافت خاک، pH خاک، کانی شناسی خاک، محتوای آهک، محتوای آهن و آلومینیوم در خاک، منبع کود فسفره و روش کاربرد آن تأثیرگذار هستند (۲۱). 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 (۲۵). 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 (۲۳). شریعتمداری و همکاران^۱ (۲۰) عنوان نمودند که از میان ویژگی‌های خاک‌های آهکی استان اصفهان، کربن آلی موثرترین عامل بر توزیع شکل‌های فسفر است. مستشاری و همکاران^۲ (۱۱) نیز گزارش کردند که مقدار فسفر کل از ۷۰۰ تا 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 (۱۱). برای شناسایی بخش‌های مختلف فسفر و تحرک آن در خاک، از روش‌های مختلف عصاره‌گیری دنباله‌دار استفاده می‌شود (۳). 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 (۱۱) برای مطالعه شکل‌های شیمیایی فسفر در این خاک‌ها استفاده می‌شود (۱۱). 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 (۷). 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 فسفره در یکی از مناطق پسته کاری (سیرجان) برای درک بهتر رفتار فسفر بود.

1- Shariatmadari et al.

2- Mostashari et al.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بخشی از اراضی زیر کشت پسته شهرستان سیرجان واقع در جنوب 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، کشت پسته می‌باشد. رقم غالب پسته در این منطقه، بادامی است و سن درختان، به‌طور متوسط، ۲۵ سال است. 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 واقع در جنوب غرب شهرستان سیرجان) با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه گردید. پس از پیاده کردن محدوده مطالعاتی بر روی این نقشه و اسکن نمودن آن، با استفاده از نرم‌افزار ایلویس^۱، منطقه مزبور زمین‌مرجع^۲ شد. زمین مرجع کردن به زبان ساده همان تبدیل نقشه‌های قدیمی به نقاط با مختصات جرافیایی می‌باشد. در ادامه، شبکه‌ای منظم با ابعاد ۲ × ۲ کیلومتر بر روی منطقه مطالعاتی اعمال گردید و بدین ترتیب، مختصات جرافیایی ۸۴ نقطه مشاهداتی به دست آمد (شکل ۱). با توجه به مختصات جرافیایی نقاط تعیین شده در مطالعات ستادی و استفاده از سامانه مکان-یاب جهانی^۳، 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

برداشت شده برای انجام مطالعات آزمایشگاهی، به آزمایشگاه انتقال داده شدند.

تعیین شکل‌های شیمیایی فسفر

برای جداسازی و تعیین شکل‌های معدنی فسفر در خاک از روش جیانگ و گو^۴ استفاده شد (۱۱). 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) بر اساس حلالیتشان در محلول‌های مختلف، جداسازی می‌کند. خلاصه مراحل عصاره‌گیری در جدول (۱) آمده است. در هر مرحله، غلظت فسفر به روش آسکوربیک اسید یا روش آبی اندازه‌گیری شد (۱۵). فسفر کل نیز به روش هضم در اسید پرکلریک اندازه‌گیری شد (۱۳).

تخمین گر وزن‌دهی معکوس فاصله^۵

به‌منظور ترسیم الگوی پراکنش داده‌های به‌دست آمده از تغییرات غلظت فسفر در دو عمق مختلف خاک در منطقه مطالعاتی، از روش وزن‌دهی معکوس فاصله استفاده شد. تخمین گر وزن‌دهی معکوس فاصله، شیوه‌ای ساده برای درون‌یابی یک متغیر محسوب می‌شود و در این مطالعه تنها به جهت مقایسه تغییرات در دو عمق متفاوت، الگوهای پراکنش با استفاده از این روش رسم شدند و مقایسه تخمین‌گرها و رسم واریوگرام انجام نشد. 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 (۸).

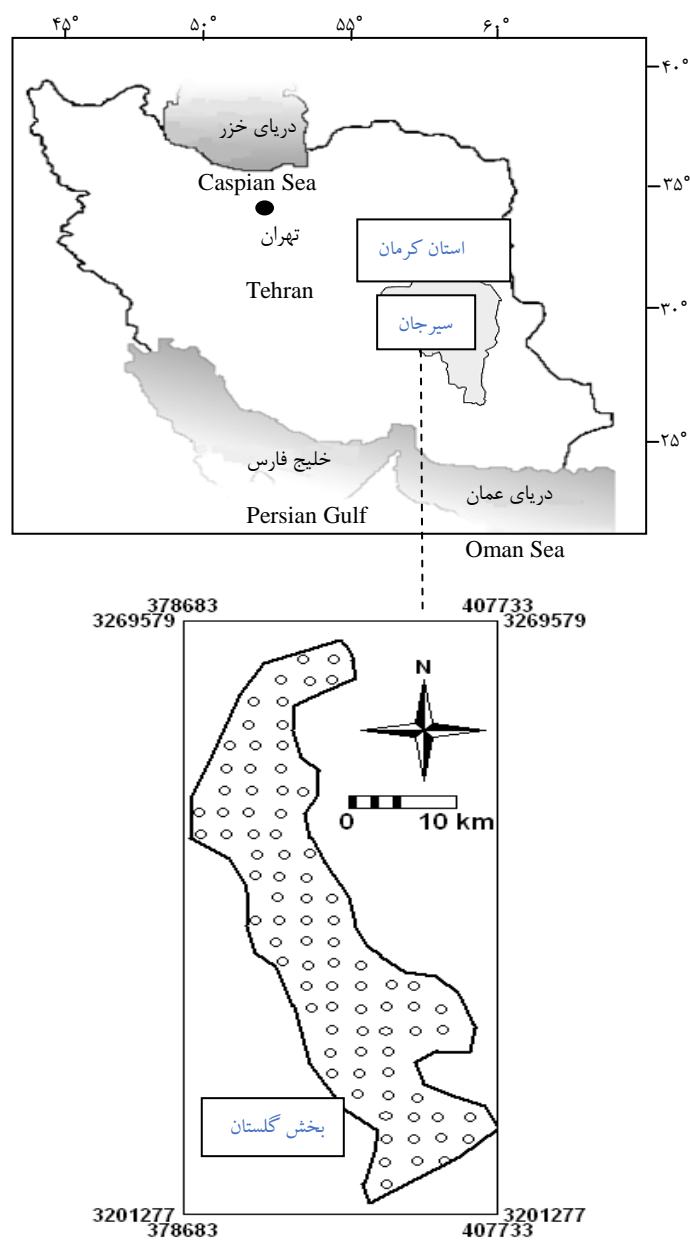
آنالیز داده‌ها

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

4-Jiang and Gu
5- Inverse Distance Weighting (IDW)

1- ILWIS
2- Georeference
3- Global Positioning System; GPS

رقیه شهریاری پور: بررسی شکل‌های شیمیایی فسفر برای...



شکل (۱) موقعیت منطقه مطالعاتی به همراه ۸۴ نقطه مشاهداتی

Figure (1) The location of the study area along with 84 observation points

جدول (۱) خلاصه روش عصاره‌گیری دنباله‌ای و مشخصات شکل‌های معدنی فسفر

Table(1) Summary of sequential extraction method and characteristics of mineral forms of phosphorus

مرحله عصاره‌گیری Step	ترکیب عصاره‌گیر Extractants	نسبت خاک به عصاره‌گیر soil:extractant	زمان تکان دادن (ساعت) Shaking time(hour)	شکل استخراج‌شده Extracted form
1	بی‌کربنات سدیم 0.25 مولار با pH=7.5 0.25 M NaHCO ₃	1:50	1	دی‌کلسیم فسفات Ca ₂ -P
2	استات آمونیوم 0.5 مولار با pH=4.2 0.5 M NH ₄ Ac ^a	1:50	1	اکتاکلسیم فسفات Ca ₈ -P
3	فلورید آمونیوم 0.5 مولار با pH=8.2 0.5 M NH ₄ F	1:50	1	فسفات آلومینیوم Al-P
4	هیدروکسید سدیم و کربنات سدیم 0.1 مولار 0.1 M NaOH-Na ₂ CO ₃	1:50	2+2*	فسفات آهن Fe-P
5	سیترات سدیم 0.3 مولار - یک گرم سدیم دیتیونات - سدیم بی‌کربنات 0.1 مولار 0.3 M CD ^b	1:50	16	فسفات محبوس Occluded-P(Oc-P)
6	اسید سولفوریک 0.5 مولار 0.5 M H ₂ SO ₄	1:50	1	آپاتیت Apatite

*به این معنی است که محلول دو ساعت تکان داده شده سپس 16 ساعت در حالت سکون و مجدداً دو ساعت تکان داده می‌شود.

*It means that the solution is shaken for two hours, and then it is kept at rest for 16 hours and shaken again for two hours ammonium acetate.

a 0.3 M Sodium citrate (20 mL) d dithionite (1.0 g) - 0/1 M sodium hydroxide(5 mL).

نتایج و بحث

شکل‌های شیمیایی فسفر

فسفر خاک در لایه سطحی و عمقی عمدتاً در محدوده ۲۴-۱۴ 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 روبه‌رو بودیم، مقدار فسفات آلومینیوم بیشتر از سایر مناطق است که می‌تواند به دلیل 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

خلاصه آماری شکل‌های شیمیایی فسفر در جدول‌های (۲) و (۳) به ترتیب برای عمق‌های ۴۰-۰ و ۸۰-۴۰ 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. اکتاکلسیم 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، اکتاکلسیم فسفات در دو عمق با هم برابر است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود غلظت این شکل از

(۹). نقی زاده اصل و همکاران^۳ (۱۷) 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 جیانگ و گو (۱۱) 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.

منشأ آن کانی‌های حاوی آهن موجود در ترکیب سنگ مادر می‌باشد که به دلیل 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؛ به طوری 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 فسفر مربوط به اکتاکلسیم 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) با میانگین ۱۳۰/۸۷ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، بالاترین مقدار را دارد. در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری مجموع مقادیر فسفات‌های کلسیم بیش از مجموع مقادیر فسفات‌های آهن و آلومینیوم است. ادهمی و همکاران^۱ نتیجه مشابهی را در خاک‌های با درصد بالای کربنات کلسیم معادل در جنوب ایران، به دست آوردند (۱). این در حالی است که در عمق ۴۰-۸۰ سانتی‌متری خاک، مقادیر فسفات‌های آهن و آلومینیوم بالاتر می‌باشد. حیدری و همکاران^۲ 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

1- Adhami *et al.*2- Heydari *et al.*3- Naghizadeh *et al.*

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

Table(2) Statistical summary of chemical forms of phosphorus (mg/kg) at a depth of 0-40 cm

متغیر variable	دی کلسیم فسفات Ca ₂ -P	اکتا کلسیم فسفات Ca ₈ -P	فسفات آلومینیوم Al-P	فسفات آهن Fe-P	فسفات محبوس Oc-P	آپاتیت Apatite	فسفر کل Total-P
کمینه minimum	15.94	3.19	56.24	8.87	8.11	13.70	196.67
بیشینه maximum	167.89	65.95	306.83	48.95	353.74	263.96	818.52
میانگین average	58.41	21.39	138.31	22.94	39.01	137.69	463.18
واریانس variance	723.65	103.97	1623.97	140.95	3598.77	3692	15562.89
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	46	47.67	29.14	51.75	100	44.13	26.93

جدول (۳) خلاصه آماری شکل‌های شیمیایی فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در عمق ۰-۸۰ سانتی‌متری

Table (3) Statistical summary of chemical forms of phosphorus (mg/kg) at a depth of 0-40 cm

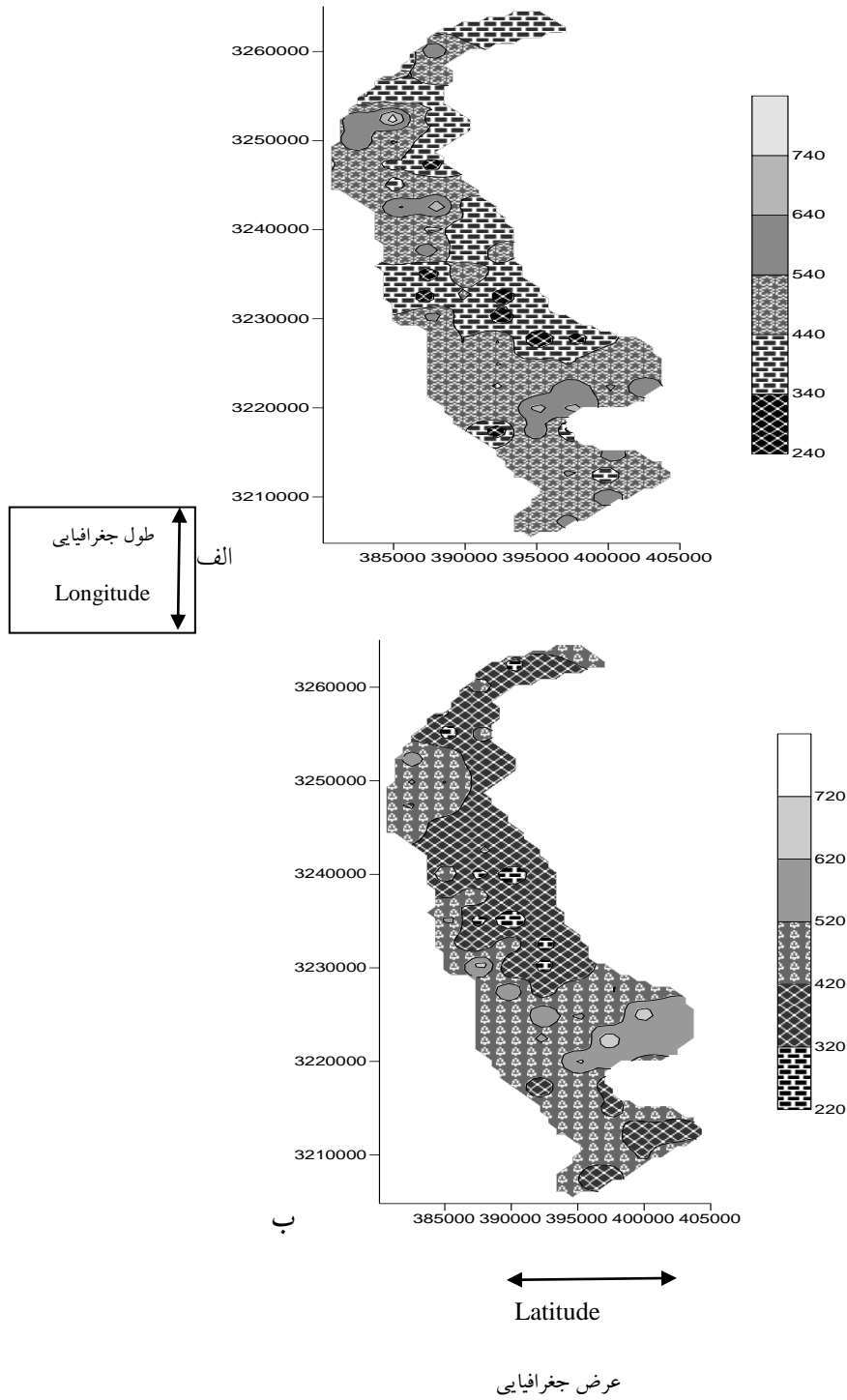
متغیر variable	دی کلسیم فسفات Ca ₂ -P	اکتا کلسیم فسفات Ca ₈ -P	فسفات آلومینیوم Al-P	فسفات آهن Fe-P	فسفات محبوس Oc-P	آپاتیت Apatite	فسفر کل Total P
کمینه minimum	18.02	3.10	55.15	8.28	7.28	31.07	207.40
بیشینه maximum	162.07	33.57	299.70	352.88	108.48	384.62	737.13
میانگین average	49.78	16.57	135.23	27.53	29.83	130.87	436.22
واریانس variance	603.68	44.06	1488.12	1769.20	460.63	3327.61	12470.29
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	49.36	40	28.53	100	71.95	44	25.60

رقیه شهریاری پور: بررسی شکل های شیمیایی فسفر برای...



شکل (۲) الگوی پراکنش تغییرات شکل محلول فسفر (Ca_2-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)

Figure (2) The distribution pattern of changes in the form of phosphorus solution (Ca_2-P) (mg/kg soil) using the IDW at a depth of 0-40 cm (a) and a depth of 40-80 cm (b)



شکل (۳) الگوی پراکنش تغییرات فسفر کل (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)

figure (3) Distribution pattern of changes in total phosphorus (mg/kg soil) using IDW at a depth of 0-40 cm (a) and a depth of 40-80 cm (b)

همبستگی شکل‌های شیمیایی فسفر با یکدیگر و فسفر کل خاک

وجود همبستگی‌های معنادار بین شکل‌های مختلف فسفر گویای این مطلب است که احتمالاً بین این شکل‌ها در خاک‌های مطالعه شده رابطه‌ای پویا برقرار است (۲۲). وجود این رابطه پویا اهمیت زیادی در فرایندهای واکنش‌های کود فسفر و جذب فسفر به‌وسیله گیاه دارد. ضرایب همبستگی بین شکل‌های مختلف فسفر با یکدیگر و با فسفر کل در جدول‌های (۴) و (۵) به‌ترتیب برای عمق‌های ۰-۴۰ و ۴۰-۸۰ 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 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 پ هاش در این خاک‌ها، به سرعت فسفر قابل استفاده به فرم‌های غیر قابل استفاده و رسوب یافته تبدیل می‌شود (رفرنس؟). نجفی و توفیقی (۱۶) گزارش کردند در خاک‌های آهکی، دی‌کلسیم فسفات با همه شکل‌های فسفر معدنی غیر از آپاتیت رابطه‌ای معنادار دارد (۱۶). محققان بین دی‌کلسیم فسفات و اکتاکلسیم فسفات همبستگی مثبت و معنی‌دار به دست آوردند (۱۹).

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

Table(4) Correlation coefficients of chemical forms of phosphorus and total phosphorus in soil depth of 0-40 cm

فسفر کل Total P	آپاتیت Apatite	فسفات محبوس Oc-P	فسفات آهن Fe-P	فسفات آلومینیوم Al-P	اکتاکلسیم فسفات Ca ₈ -P	دی‌کلسیم فسفات Ca ₂ -P
						دی‌کلسیم فسفات Ca ₂ -P
0.31**	0.06	-0.08	-0.11	0.06	0.31**	1
						اکتاکلسیم فسفات Ca ₈ -P
0.37**	0.20	-0.09	0.34**	0.18	1	
						آلومینیوم فسفات Al-P
0.49**	0.12	0.13	0.03	1		
						آهن فسفات Fe-P
0.29**	0.30**	0.03	1			
						محبوس Oc-P
0.54**	0.19	1				
						آپاتیت Apatite
0.70**	1					
						فسفر کل Total P
1						

** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

Significant at the probability level of 0.01

جدول (۵) ضرایب همبستگی شکل‌های شیمیایی فسفر و فسفر کل در عمق ۸۰-۴۰ سانتی‌متری خاک
 Table (4) Correlation coefficients of chemical forms of phosphorus and total phosphorus in soil depth of 40-80 cm

فسفر کل Total P	آپاتیت Apatite	فسفات محبوس Oc-P	فسفات آهن Fe-P	فسفات آلومینیوم Al-P	اکتاکلسیم فسفات Ca ₈ -P	دی‌کلسیم فسفات Ca ₂ -P
0.33**	0.05	0.005	0.08	0.18	0.45**	1
0.46**	0.21	0.001	0.27*	0.17	1	
0.57**	0.16	0.19	0.05	1		
0.46**	-0.04	0.11	1			
0.42**	0.19	1				
0.64**	1					
1						

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

**&* Significant at the probability level of 0.01 and 0.05 respectively

نتیجه‌گیری

افزودن مواد آلی 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 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 جزء به جزء فسفر در خاک‌های بسیار آهکی ایران حذف کرد، مورد نیاز است. یکی از این روش‌ها می‌تواند کاربرد مواد آلی در خاک باشد که دسترسی به این اهداف را تسهیل می‌کند.

از نتایج گزارش شده در این مطالعه، به نظر می‌رسد که در خاک‌های آهکی مورد آزمایش، فراوانی اشکال مختلف فسفر به ترتیب آپاتیت < فسفات آلومینیوم < فسفر قابل استفاده < فسفر محبوس < 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 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 مانند

Reference

1. Adhami E, M. Maftoun, A. Ronaghi, N. Karimian, J. Yasrebi, and M.T. Assad. 2006. Inorganic phosphorus fractionation of highly calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37: 1877–1888. doi:10.1080/00103620600767116.
2. 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 DOI 10.1371/journal.pone.0216881.
3. Behera, B. C., S. K. Singdevsachan, R. R. Mishra, S. K. Dutta, and H. N. Thatoi. 2014. Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove—A review. *Biocatalysis and Agricultural. Biotechnology*. 3: 97–110.
4. Brar, B., S. Singh, N. S. Dhillon and S. S. Benipal. 2004. Soil quality, crop productivity and sustainability experience under long-term maize-wheat-cowpea cropping in inceptisol. *Research Bulletin*. Pp. 41, All India coordinated research project of long-term fertilizer experiment, Indian Institute of soil science, Bhopal.
5. Chang, S. C. and S. R. Juo. 1963. Available phosphorus in relation to forms of phosphates in soils. *Soil Science*. 95: 91-96.
6. Condron LM, and S. Newman. 2011. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. *Journal of Soils & Sediments*. 11(5):830–40.
7. Cross A.F, and W.H. Schlesinger. 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.
8. Franke, R.1982. Scattered data interpolation: tests of some methods. *Math Computing*. 38: 181-200.
9. Heydari, N., Reyhani-Tabar, A., Najafi, N. and Ustan, Sh. 2012. Distribution of different forms of phosphorus in some soils of East Azarbaijan province and its relationship with some soil characteristics. *Journal of water and soil research in Iran*. 44 (3): 279-271. (In persian).
10. Hue, N. V. and R. L. Fox. 2010. Predicting plant phosphorus requirements for Hawaii
11. soils using a combination of phosphorus sorption isotherms and chemical extraction methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 41: 133–143.
12. Jiang B, and Y. Gu. 1989. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Fertilizer Research*. 20, 159–165. doi:10.1007/BF01054551.
13. Khan, K.S., and R.G. Joergensen. 2009. Changes in microbial biomass and P fractions in biogenic household waste compost amended with inorganic P fertilizers. *Bioresource technology*. 100(1):303–309.
14. 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.*
15. Mostashari, M., M., Muazardalan, N., Karimian, H., Rezai and Hosseini, H. M. 2009. Phosphorus fractions of selected calcareous soils of Qazvin province and their relationships with soil characteristics. *Iranian Journal of Soil Research*, 23: 11-23.
16. Murphy, J., and J.P., Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*. 27, 31-36.

17. Najafi, N. and Tawfighi, H. 2015. Investigating the effect of rice plant rhizosphere on the forms of inorganic phosphorus in the paddy soils of northern Iran: forms of native soil phosphorus. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 37 (5): 919-933. (In persian).
18. Naghizadeh Asl, Z., Dordipour, A., Qolizadeh, A., Kiani, F. and Emami, h. 2018. Investigating the relationship between phosphorus extracted by multiple extractors and the forms of inorganic phosphorus in the soils of Golestan province. *Water and soil (agricultural sciences and industries) magazine*. 25(3):509-517. (In persian).
19. Nwoke, O. C., B. Vanlauwe, J. Diels, N. Sanginga, and O., Osonubi. 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: 127-41.
20. Samadi, A. and R. J. Gilkes. 1998. Forms of phosphorus in virgin and fertilized calcareous soils of Western Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 36:585-601.
21. Shariatmadari, H., Shirvani, M., and Dehghan, R.A. 2007. Availability of organic and inorganic phosphorus fractions to wheat in four toposequence of calcareous soils. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 38: 2601-2617.
22. Sharma, S. B., R. Z. Sayyed, M. H. Trivedi, and T. A Gobi. 2013. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*. 2:587-601.
23. Tiessen, H., J.W.B. Stewart and C.V. Cole. 1984. Transformation of phosphates varying in citrate and water solubility in a calcareous soil after incubation with cattle dung. *Journal of Indian Society of Soil Science*, 32: 421-426.
24. Wang, Y. P., R.M. Law and B. Pak. 2010. A global model of carbon, nitrogen and phosphorus cycles for the terrestrial biosphere. *Biogeosciences*. 7: 2261–2282
25. Williams A, G. Borjesson and K. Hedlund. 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.
26. Yang, X., W. M. Post, P. E. Thornton and A. Jain. 2013. The distribution of soil phosphorus for global biogeochemical modeling. *Biogeosciences*. 10: 2525–2537.