Research Article

Agricultural Engineering., 48(3) (2025) 411- 431 ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2025.50252.1784 ISSN (E): 2588-5944

Long-term effect of phosphorus fertilizer on inorganic phosphorus changes and its availability in different layers of calcareous soil under pistachio cultivation

F. Abbaszadeh[1], N. Boromand[1], M. Hejazi-Mehrizi[1*], A. Soltangheisi[2]and H. Naghavi[3]

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
2. Environment Centre Wales, School of Environmental and Natural Sciences, Bangor University, Bangor, LL57 2UW, United Kingdom
3. Kerman Center for Agricultural and Natural Resources Research, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran

Received: 29 July 2025 Accepted: 25 September 2025 *Corresponding Author: mhejazi@uk.ac.ir

Abstract

Introduction: Pistachio is an important horticultural crop in Iran, extensively grown in arid and semi-arid regions, particularly in Kerman province. The cultivation of pistachios in calcareous soils presents significant challenges, including nutrient deficiencies, high salinity, elevated pH, and low organic matter content, all of which impair effective plant nutrition. Phosphorus stands as the second most important macronutrient after nitrogen in plant nutrition, playing a critical role in diverse metabolic functions essential for growth, development, and stress response. Understanding the dynamics of phosphorus (P) forms, especially non-labile P, in calcareous saline soils is crucial for optimizing P fertilizer use and minimizing adverse environmental impacts. Phosphorus fixation, a persistent issue associated with P fertilizer application, significantly reduces pistachio orchard productivity in eastern Iran. Excessive use of P fertilizers not only contributes to environmental issues such as nutrient imbalances, micronutrient deficiencies, and an increased risk of eutrophication, but also escalates production costs. Effective management of phosphorus fixation could reduce dependence on chemical fertilizers, limit phosphorus leaching into water sources, and alleviate eutrophication risks. This study investigates the vertical distribution of phosphorus forms, with a focus on non-labile P, in response to varying levels of phosphorus fertilizer application in pistachio-cultivated soils, aiming to inform sustainable nutrient management practices.

Materials and Methods : This study was conducted in a pistachio orchard in Kazem-Abad, located 39 km northwest of Kerman province (30°34'23"N, 56°49'44"E). The experiment followed a completely randomized design with three replicates to assess the effects of triple superphosphate (TSP) applied at rates of 200, 400, and 600 kg ha^{-1}, compared to a control treatment (no TSP). Soil samples were collected from four depths (0–10, 10–20, 20–30, and 30–50 cm), air-dried, and passed through a 2 mm sieve. Standard laboratory methods were used to determine the physicochemical properties of the soil. Inorganic phosphorus fractions (Pi fractions) were quantified using a sequential extraction method. Available P (Olsen P), total phosphorus (TP), total organic phosphorus (TPo), and total inorganic phosphorus (TPi) were also measured. Phosphorus concentrations in the extracts were determined using a colorimetric method. Data normality was assessed with the Kolmogorov-Smirnov test, and a Cox-Box transformation was applied when necessary to normalize the data. Analysis of variance (ANOVA) was performed using SAS 9.4 software to evaluate the effects of different phosphorus fertilizer levels on various phosphorus forms. Mean comparisons were conducted using the LSD at a 5% significance level ($p < 0.05$).

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Results and Discussion: The results showed that fertilization rate had a significant effect on available phosphorus at all soil depths ($p < 0.05$). Available phosphorus concentrations increased progressively with higher TSP application rates, with the highest levels observed at 600 kg ha^{-1}. Compared to the control, this rate resulted in an average increase of 50% in total organic phosphorus, 40% in total inorganic phosphorus, and 43% in total phosphorus in the sampled soil layers. The proportions of Pi fractions also increased consistently with higher fertilizer rates across all depths. Non-labile phosphorus was the predominant inorganic P forms in all treatments and depths. Notably, application of 200 kg ha^{-1} TSP enhanced both labile and moderately labile phosphorus, while higher rates (400 and 600 kg ha^{-1}) significantly increased non-labile phosphorus content. At 600 kg ha^{-1}, non-labile phosphorus concentrations were significantly higher than in the control. Statistical analysis showed significant correlations between available phosphorus, inorganic phosphorus fractions, and total phosphorus, with non-labile phosphorus exhibiting the strongest correlation with available phosphorus ($r = 0.59$). This suggests that non-labile phosphorus serves as a reservoir, releasing phosphorus to meet plant demands as labile P forms.

Conclusion: This study revealed that different levels of phosphorus fertilizer application significantly affect the distribution of phosphorus forms, such that higher phosphorus application rates increase the proportion of non-labile phosphorus. These findings highlight the critical role of non-labile phosphorus in sustaining long-term phosphorus availability for pistachio crops, thereby supporting soil fertility in calcareous and arid environments. Careful management of fertilizer application is essential to prevent excessive phosphorus accumulation and reduce environmental risks such as eutrophication. The results recommend using reduced rates of chemical fertilizers and exploring stabilized phosphorus sources as sustainable alternatives. Such strategies can reduce production costs, enhance soil health, and minimize environmental pollution, contributing to the long-term sustainability of pistachio cultivation in Iran.

Keywords: Available P, Calcareous soils, Pistachio, Phosphorus fractions, Sustainable agriculture

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۸. شماره ۳، ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

تأثیر بلندمدت کود فسفری بر تحولات فسفر معدنی و فراهمی آن در لایه‌های مختلف خاک آهکی تحت کشت پسته

فاطمه عباس زاده[۱]، ناصر برومند[۱]، مجید حجازی مهریزی[۱*]، امین سلطان قیسی[۲]و هرمزد نقوی[۳]

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- مرکز محیط زیست ولز، دانشکده علوم محیطی و طبیعی، دانشگاه بنگور، بنگور، LL57 2UW، بریتانیا

۳- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان ،کرمان، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳

کلمات کلیدی:

پسته

جزء بندی فسفر

خاک‌های آهکی

فراهمی فسفر

کشاورزی پایدار

* عهده دار مکاتبات

Email: mhejazi@uk.ac.ir

چکیده

آگاهی از شکل‌های فسفر به ویژه فسفر غیرقابل دسترس در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک می‌تواند در بهینه سازی مصرف کودهای شیمیایی و کاهش اثرات مخرب آن‌ها بر محیط زیست راهگشا باشد. این مطالعه با هدف درک تغییرات عمقی شکل‌های فسفر به ویژه فسفر غیرقابل دسترس خاک در پاسخ به سطوح مختلف کود فسفری در یک باغ تحت کشت پسته انجام شد. بدین منظور آزمایشی در قالب طرح پایه کاملا تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای کودی اعمال شده شامل سه سطح کودی (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار) از منبع کود فسفره سوپر فسفات تریپل همراه با تیمار شاهد بود. نمونه‌ها از ٤ عمق خاک برداشت و از روش عصاره‌گیری متوالی برای تعیین اجزای فسفر معدنی استفاده شد. همچنین مقادیر فسفر قابل جذب، فسفر کل (TP)، کل فسفر آلی (TPo) و کل فسفر معدنی (TPi) در نمونه‌های خاک اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که در تمامی لایه‌های نمونه‌برداری، اثر سطوح کودی بر فسفر قابل جذب معنی‌دار بود ($p<0.05$) و با افزایش سطح کودی به ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار مقدار آن افزایش یافت. با کاربرد ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل کل فسفر آلی، کل فسفر معدنی و فسفر کل به ترتیب ۵۰، ٤۰ و ٤۳ درصد به طور متوسط نسبت به تیمار شاهد در لایه‌های مختلف افزایش نشان داد. افزایش سطوح کودی سبب افزایش شکل‌های فسفر معدنی در تمامی لایه‌ها شد. در تمامی تیمارها و عمق‌های نمونه‌برداری شده، فسفر غیر قابل دسترس، بخش عمده فسفر معدنی را تشکیل داد و با افزایش سطح کودی به ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار مقدار آن در تمامی لایه‌ها نسبت به شاهد افزایش یافت. طبق داده‌های به دست آمده، همبستگی معنی‌داری بین فسفر قابل جذب با تمامی اجزای فسفر معدنی و فسفر کل مشاهده شد. فسفر غیر

قابل دسترس بالاترین میزان همبستگی با فسفر قابل جذب خاک نشان داد (r =۰/۵۹) که نشان می‌دهد فسفر غیر قابل دسترس قادر است با تبدیل تدریجی به شکل قابل جذب، نقش یک منبع ذخیره بلند مدت را در تامین فسفر مورد نیاز گیاهان ایفا کند.

مقدمه

پسته یکی از مهمترین محصولات باغی در ایران است که به طور گسترده در مناطق خشک و نیمه خشک به‌ویژه در استان کرمان کشت می‌شود. سطح زیر کشت باغات پسته در کشور حدود ۳۶۸ هزار هکتار می‌باشد که تقریبا ۵۷ درصد آن در استان کرمان قرار دارد. خاک‌های آهکی تحت کشت پسته، اغلب با چالش‌هایی نظیر کمبود عناصر غذایی، شوری، pH بالا و ماده آلی پایین مواجه‌اند که تغذیه مناسب این گیاه را دشوار می‌کند. فسفر به‌عنوان عنصری ضروری برای رشد گیاهان، نقش کلیدی در تولید محصولات کشاورزی مانند پسته دارد، اما تثبیت فسفر در خاک‌های آهکی کارایی کودهای فسفاته را کاهش داده و بخش عمده فسفر به‌صورت تثبیت‌شده (باقی‌مانده) انباشته می‌شود. فسفر محلول آزاد شده از کودهای شیمیایی در خاک‌های آهکی به مرور زمان به صورت ترکیبات کم محلول فسفات‌های‌کلسیم و در خاک‌های اسیدی به صورت فسفات‌های آهن وآلومنیوم رسوب می‌کنند (۲۴ و ۱۴) که این امر علاوه بر مصرف مقادیر بیشتر کودهای فسفره، سبب تجمع بخش عمده‌ی فسفر در شکل تثبیت شده می‌شود (۲۰). فسفر تثبیت شده می‌تواند به عنوان یک منبع بالقوه برای کاهش مصرف کودهای شیمیایی در کشاورزی، کاهش فشار بر ذخایر سنگ فسفات، کاهش خطر انتقال فسفر به آب و کاهش پدیده یوتریفیکاسیون[1] مورد توجه قرار گیرد (۹ و ۳۱). به همین دلیل برای ارائه راهکارهای مناسب جهت افزایش فراهمی فسفر تثبیت شده در خاک، آگاهی از وضعیت فسفر تثبیت شده امری ضروری است.

در حال حاضر جهت تعیین وضعیت شکل‌های فسفر از جمله فسفر تثبیت شده از روش جزءبندی متوالی هدلی و همکاران[2] (۱۹۸۲) استفاده می‌شود (۳۴ و ۴۰). جزءبندی فسفر به روش هدلی و همکاران (۱۹۸۲) امکان طبقه‌بندی و اندازه‌گیری فسفر خاک را به گروه‌های شیمیایی و بیولوژیکی مختلف، از معدنی تا آلی و از فسفر قابل دسترس تا غیرقابل دسترس، بر اساس قدرت عصاره‌گیر فراهم می‌کند(۱۲). این روش می‌تواند پویایی فسفر خاک را در اکوسیستم‌های طبیعی (۴۰) و کشاورزی (۶ و۳۵) ارزیابی کند و به پیش‌بینی قابلیت دسترسی فسفر برای جذب توسط گیاه کمک کند(۴۱).

مصرف بی‌رویه کودهای فسفری، علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، اثرات منفی زیست‌محیطی نظیر برهم‌خوردن تعادل عناصر غذایی، کمبود عناصر ضروری کم مصرف و خطر یوتریفیکاسیون (غنی‌سازی بیش از حد آب‌ها) را به‌دنبال دارد(۵۲). با این حال، فسفر تثبیت‌شده می‌تواند به‌عنوان منبعی بالقوه برای تأمین طولانی‌مدت فسفر قابل جذب عمل کند، موضوعی که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که کودهای فسفری، مانند سوپرفسفات تریپل، فسفر قابل جذب خاک را افزایش می‌دهند، اما اطلاعات محدودی درباره توزیع عمقی اشکال فسفر، به‌ویژه فسفر تثبیت‌شده، در پسته‌زارهای ایران وجود دارد. دمیرکران و سنجیز[3] (۲۰۱۰) اثرات مواد مختلف کودهای شیمیایی را در ارتباط تغذیه پسته (درختان یک ساله) مورد بررسی و نشان دادند که کاربرد کودهای شیمیایی موجب افزایش مقدار فسفر در برگ‌های درختان پسته گردید. مشیری و

1- Eutrophication

2- Hedley *et al*

3- Demirkiran and Cengiz

همکاران[1] (۲۰۱۴) به بررسی پویایی فسفر در خاک با مصرف سنگ فسفات تیمار شده با اسیدها و مواد آلی مختلف پرداختند. در نتایج آنان بیان شده است که بیشترین مقدار فسفر قابل استفاده در خاک در اثر کاربرد کود سوپر فسفات تریپل بوده و پس از آن، خاک فسفات اسیدی شده با اسید سولفوریک و اسید فسفریک بیش‌ترین تاثیر را بر میزان فسفر قابل استفاده خاک داشتند.

در ایران سالیانه میزان مصرف کود فسفره برابر با ۹۸ هزار تن برآورد شده است (۲). این در حالی است که سالیانه بین ۹۰-۷۵ درصد از فسفر اضافه شده به خاک‌های ایران به دلیل بالا بودن میزان کربنات کلسیم خاک، کمبود ماده آلی، pH بالا در خاک به صورت غیر قابل دسترس (تثبیت شده) در می‌آید (۱). جهت تأمین نیاز فسفر پسته و افزایش عملکرد آن، استفاده مداوم و سالانه از کودهای شیمیایی فسفره به عنوان یک راه‌حل سریع توسط کشاورزان انجام می‌شود، اما مصرف سالانه و بیش از اندازه این کودها نه تنها موثر نبوده بلکه سبب تجمع فسفر در خاک در شکل‌های غیرقابل دسترس و نسبتا قابل دسترس، بر هم خوردن تعادل عناصر غذایی کم‌مصرف و همچنین آلودگی خاک به کادمیوم می‌شود. بنابراین استفاده بهینه از کودهای شیمیایی جهت استفاده پایدار از اراضی کشاورزی و حفظ محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر خلاف فسفر کل که اطلاعات اندکی از رفتار شیمیایی فسفر در خاک ارایه می‌کند، آگاهی از شکل‌های شیمیایی فسفر به ویژه فسفر باقی‌مانده در فهم و درک جنبه‌های حاصل خیزی خاک نقش مؤثری دارد. هدف این پژوهش، بررسی تغییرات عمقی اشکال شیمیایی فسفر، با تأکید بر فسفر غیرقابل دسترس (تثبیت شده)، در خاک‌های آهکی تحت کشت پسته در بخشی از اراضی کرمان تحت تأثیر سطوح مختلف کود فسفری بود. این مطالعه با هدف ارائه راهکارهایی برای بهینه‌سازی مصرف کود و کاهش اثرات زیست‌محیطی، به کشاورزی پایدار در مناطق خشک کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش، نمونه‌برداری و تجزیه خاک

این پژوهش در بخشی از اراضی زیر کشت پسته در منطقه کاظم‌آباد، واقع در ۳۹ کیلومتری شمال غربی استان کرمان انجام شد (30°34′23"N to 56°49′44"E) (شکل ۱). این منطقه دارای آب و هوای نیمه خشک و معتدل تا خنک است و متوسط ارتفاع از سطح دریا ۱۷۱۰ متر می‌باشد. متوسط دمای سالیانه ۱۵/۴ درجه سانتی‌گراد بوده و میانگین حداکثر و حداقل دما به ترتیب برابر ۷/۲۴ و ۷/۶ درجه سانتی گراد است. مواد مادری خاک، غالبا آهکی و خاک منطقه در رده هپلوکلسید[2] طبقه‌بندی می‌شود (۳۹). تیمارهای آزمایشی در یک باغ پسته به مساحت نیم هکتار، شامل چهار سطح کود فسفره (صفر، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار) در قالب طرح کاملا تصادفی به مدت پنج سال با سه تکرار اعمال شد. سالیانه براساس آزمون خاک سایر عناصر غذایی مورد نیاز پسته از کودهای رایج تأمین گردید. تیمارهای کود فسفره و سایر کودها (به‌جز کودهای نیتروژنی) در فصل زمستان، در محل سایه‌انداز درختان و در عمق توسعه ریشه‌های فعال (۵۰-۰ سانتی‌متری) اعمال شدند. کود نیتروژنی در چند نوبت همراه با آب آبیاری استفاده شد. نمونه‌برداری از خاک از محل سایه‌انداز درختان پسته‌ای با سن تقریبی ۳۰ سال و شرایط رشدی یکسان (بر اساس سلامت ظاهری و قطر تنه) در رقم رایج(اوحدی) انجام گرفت. برای این منظور دوازده نقطه نمونه‌برداری بر اساس وضعیت گیاه انتخاب شد و در مجموع، ۴۸ نمونه از چهار عمق (۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ و ۳۰-۵۰ سانتی‌متر) جمع‌آوری گردید. نمونه‌ها در دمای محیط خشک شده و پس از کوبیده شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، به آزمایشگاه منتقل شدند. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک با روش‌های

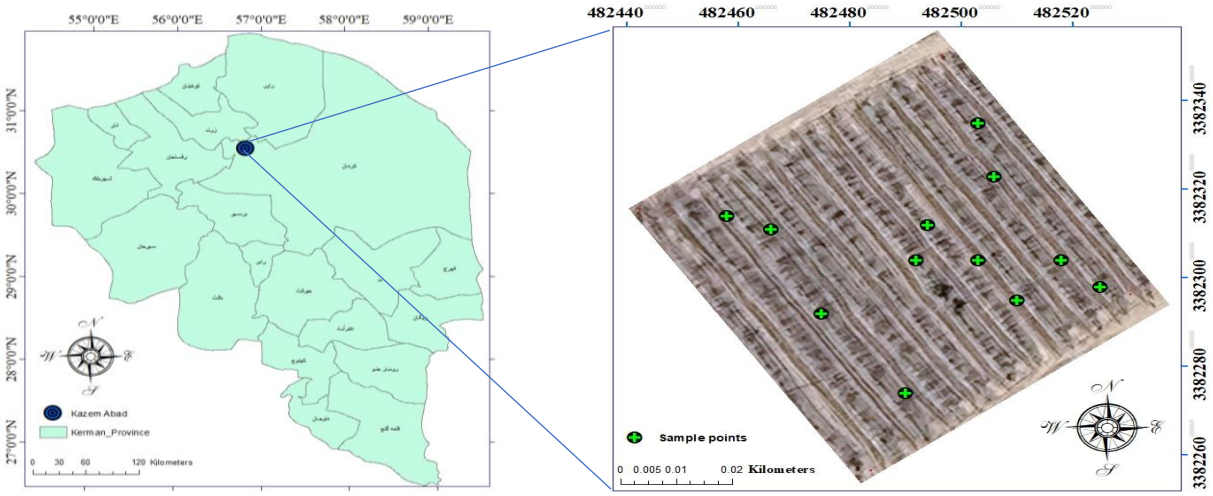
1- Moshiri *et al.*

2- Haplocalcids

استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. همچنین مقدار فسفر قابل جذب خاک به روش السن (۳۰) استخراج و میزان فسفر در عصاره با استفاده از روش رنگ‌سنجی تعیین شد (۲۷). جدول (۱)، برخی از ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در عمق ۵۰-۰ سانتی-متری را نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری شکل‌های شیمیایی فسفر

برای تفکیک شکل‌های فسفر معدنی از روش استخراج متوالی هدلی و همکاران (۱۹۸۲) اصلاح شده توسط تایسن و همکاران[1] (۲۰۰۵) استفاده شد. این روش به دلیل توانایی بالا در جداسازی کامل شکل‌های مختلف فسفر توسط پژوهشگران مختلف استفاده شده است (۴۰ و ۳۵).



شکل(۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکنش نقاط نمونه برداری

Figure (1) Geographical location of study area and soil samples distribution

جدول (۱) برخی از خصوصیات فیزیکو شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table (1) Soil physical and chemical properties of the study areas (0-50 cm)

ویژگی های خاک Soil properties	روش اندازه گیری Method	عمق (۵۰-۰ سانتی متری) depth (0-50cm)
Soil texture	Hydrometer (4)	Loam
Sand (%)		42.5
Silt (%)		34.0
Clay (%)		23.4
Bulk density (g/cm3)	(11)	1.63
pH (1:5)	pH meter (45)	7.9
EC (dS/m)	EC meter (34)	5.56
OM (%)	(51)	0.62
$CaCO_3$ (%)	(37)	29.04
Ca (meq/L)	Complexometric (3)	20.6
Mg (meq/L)		24.3
K(mg/Kg)	Flame photometer (15)	156.4
Cu (mg/ Kg)	Atomic absorption spectrometer (DTPA-TEA, 16)	0.56
Zn (mg/ Kg)		1.05
Mn (mg/ Kg)		0.32

1 - Tiessen *et al.*

یک گرم از نمونه‌های خاک به طور متوالی با ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر[1]، بیکربنات سدیم نیم مولار[2](pH=8.2)، سود ۰/۱ مولار[3]، اسید کلریدریک یک مولار[4] و مخلوط اسید سولفوریک غلیظ (۹۸٪) و آب اکسیژنه (۳۰٪)[5] به مدت ۱۶ ساعت شیک و پس از عصاره گیری، فسفر موجود در عصاره بر اساس روش رنگ-سنجی مورفی و رایلی[6] (۱۹۶۲) با استفاده از اسپکتروفوتومتر در طول موج ۸۸۰ نانومتر قرائت شد (شکل ۲). تفکیک شکل‌های فسفر به‌دلیل تأثیر مستقیم بر دسترسی‌پذیری این عنصر برای درختان پسته و مدیریت بهینه کودی اهمیت دارد. فسفر قابل استخراج با آب و فسفر قابل استخراج با بی کربنات سدیم به عنوان شکل-های قابل دسترس فسفر هستند که گیاه مستقیما از آن‌ها استفاده می‌کند یا در مدت زمان کوتاهی توسط میکروارگانیسم‌ها جذب می‌شوند و بر روی سطوح ترکیبات کریستالی و اسید ریبونوکلئیک دیده می‌شود. فسفر قابل استخراج با سدیم هیدروکسید حلالیت کمی داشته و نمی‌تواند در کوتاه مدت مستقیما توسط گیاه مورد استفاده قرار گیرد. این بخش از فسفر معدنی به عنوان فسفر نسبتا قابل دسترس شناخته شده که در آن فسفر در پیوند با Fe و Al می‌باشد. در واقع فسفات‌های آهن و آلومینیوم به وسیله سود استخراج می‌شوند (NaOH-Pi). از طرف دیگر، فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک و فسفر باقی‌مانده شکل غیر قابل دسترس هستند که گیاه به راحتی نمی‌تواند از آن‌ها استفاده کند و می‌توانند در درازمدت منبعی برای فسفر گیاه باشند (۲۲). فسفر غیر قابل دسترس شامل فسفر متصل به کلسیم (قابل استخراج با اسید کلریدریک)(۲۱) و فسفر باقیمانده است که این بخش به دلیل پایداری شیمیایی بسیار بالا به راحتی توسط گیاه جذب نمی شود(۵۲).

تعیین فسفر کل، کل فسفر معدنی و کل فسفر آلی خاک‌ها

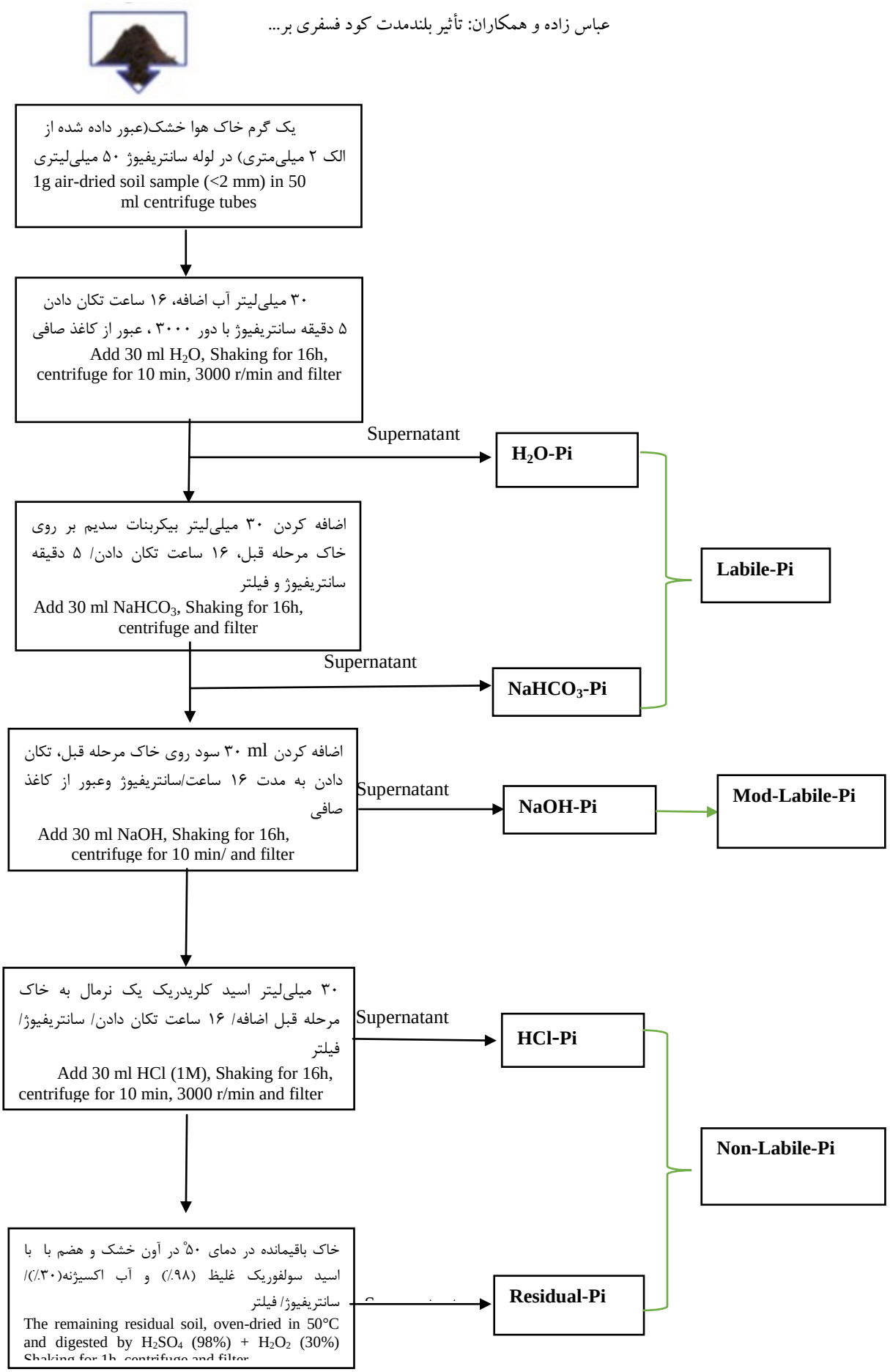
میزان فسفر کل نمونه‌ها با استفاده از روش سوزاندن در کوره و عصاره‌گیری با اسید سولفوریک تعیین شد (۵۰). در این روش پس از انتقال یک گرم از نمونه‌های خاک به کروزه‌های چینی در کوره به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد خاکستر شدند. پس از سرد شدن و انتقال به لوله سانتریفیوژ، اسید سولفوریک یک مولار به نمونه‌ها اضافه شد. نمونه‌ها پس از ۱۶ ساعت تکان دادن با دور ۲۰۰۰ در دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند. برای اندازه‌گیری فسفر معدنی کل، به یک گرم از نمونه‌های خاک اسید سولفوریک یک مولار اضافه و به مدت ۱۶ ساعت تکان داده شدند. پس از سانتریفیوژ و فیلتر، مقدار فسفر در عصاره به روش آبی یا اسید آسکوربیک تعیین شد (۲۷). کل فسفر آلی نیز از تفاوت بین فسفر کل از کل فسفر غیرآلی محاسبه گردید.

تجزیه و تحلیل آماری

نرمال‌بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف اسمیرنوف بررسی شد و در صورت نیاز، از تبدیل کاکس- باکس[7] (۵) برای نرمال‌سازی استفاده شد. تجزیه واریانس (ANOVA) برای بررسی اثر سطوح کود فسفره بر شکل‌های فسفر با نرم‌افزار SAS 9.4 انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ($p<0.05$) صورت پذیرفت. همبستگی بین پارامترها با آزمون پیرسون و نرم‌افزار SPSS 26.0 بررسی شد. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel ترسیم شدند.

1 - H2O-P
2 NaHCO3-P
3 -NaOH-P
4- HCl-P
5 -H2O2-H2SO4-P
6 - Murphy and Riley

7 -Cox-Box Transformed



شکل (۲) طرح استخراج توالی فسفر معدنی در خاک آهکی (۲۱)

Figure (2) Schematic of inorganic phosphorus Sequence extraction in calcareous soil (Mao et al, 2023)

نتایج و بحث

منطقه مورد مطالعه دارای خاکی شور (EC=5.6) با بافت لوم و pH قلیایی (pH=7.9) می‌باشد. میزان متوسط کربن آلی و کربنات کلسیم معادل به ترتیب ۰/۶۲ و ۲۹/۰ درصد مشاهده شد. (جدول ۱). قابل توجه بودن میزان کربنات کلسیم نشان دهنده خاک قلیایی و آهکی است و افزایش pH می‌تواند دسترسی فسفر معدنی را کاهش دهد و همچنین دسترسی عناصر ریز مغذی مثل آهن، روی و منگنز را تحت تاثیر قرار دهد. چرا که معمولا عناصر ریز مغذی مثل روی و مس در خاک‌های قلیایی کم‌تر قابل دسترس‌اند. (میزان عناصر کم مصرف مس، روی، منگنز و آهن به ترتیب ۰/۵۶، ۱/۰۵، ۰/۳۲ و ۰/۷۰ میلی گرم در کیلوگرم می‌باشد)

تاثیر سطح کودی بر اجزای فسفر معدنی

فسفر قابل دسترس

فسفر قابل دسترس خاک که شامل فسفر قابل استخراج با آب و قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم می‌شود، قابل دسترس‌ترین شکل فسفر معدنی را تشکیل می‌دهد (۳۳). اثر سطوح کودی مختلف بر میزان فسفر قابل دسترس در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. در تمامی اعماق به‌جز لایه سطحی (۱۰-۰ سانتی‌متر)، افزایش سطح کودی تا ۶۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار، مقدار فسفر قابل‌دسترس را افزایش داد (شکل ۳). بیشترین مقدار فسفر قابل دسترس در عمق ۱۰-۰ سانتیمتری خاک و در تیمار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد، افزایش۵۱/۸ درصدی را نشان داد.

لامبی و همکاران[1] (۲۰۰۴) گزارش کردند که استفاده از کودهای فسفره در خاک‌های آهکی باعث افزایش میزان فسفر محلول (دی کلسیم فسفات) می‌شود. همچنین در مطالعه شهبازی و همکاران (۲۰۱۹) و شهابی‌فر (۲۰۱۹) افزایش فسفر محلول خاک به عنوان یکی از شکل‌های فسفر قابل دسترس در اثر کاربرد کودهای فسفره در خاک‌های آهکی مشاهده شد. در مطالعات ژانگ و همکاران[2] (۲۰۲۰) استفاده ۱۰ تا ۱۵ ساله از کودهای فسفره، اجزای فسفر قابل دسترس (فسفر قابل استخراج با رزین و فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم) را افزایش داد.

فسفر نسبتا قابل دسترس

فسفر نسبتاً قابل‌دسترس شامل فسفر متصل به اکسیدها و هیدروکسیدهای آمورف و بلورین آهن و آلومینیوم است که با سرعت کمتری نسبت به فسفر قابل‌دسترس در اختیار گیاه قرار می‌گیرد (۲۹ و ۲۱). نتایج نشان داد که این شکل از فسفر در تمامی اعماق به طور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) تحت تاثیر تیمارهای کودی قرار گرفت (شکل ۳). مشابه فسفر قابل‌دسترس، مقدار این جزء در اعماق ۱۰-۰، ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰ و ۵۰-۳۰ سانتی‌متر با افزایش سطح کود تا ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت و به‌ترتیب ۲/ ۱۳، ۷۴/۶، ۷۲/۸و ۶۱/۶ درصد نسبت به شاهد بیشتر بود. حجازی و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که با افزایش سطح کود شیمیایی (مونو فسفات پتاسیم) از ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، مقدار فسفر نسبتا قابل دسترس افزایش یافت. وو و همکاران[3] (۲۰۰۸) نیز بیان داشتند که استفاده طولانی مدت از کودهای شیمیایی این شکل از فسفر معدنی را افزایش می‌دهد. همچنین سیامپتی و همکاران[4] (۲۰۱۱) بیان کردند که پس از ۶ سال استفاده مداوم از کودهای شیمیایی، فسفر نسبتا قابل دسترس شکل غالب فسفر در خاک‌های سیاه چین می‌باشد.

فسفر غیرقابل دسترس

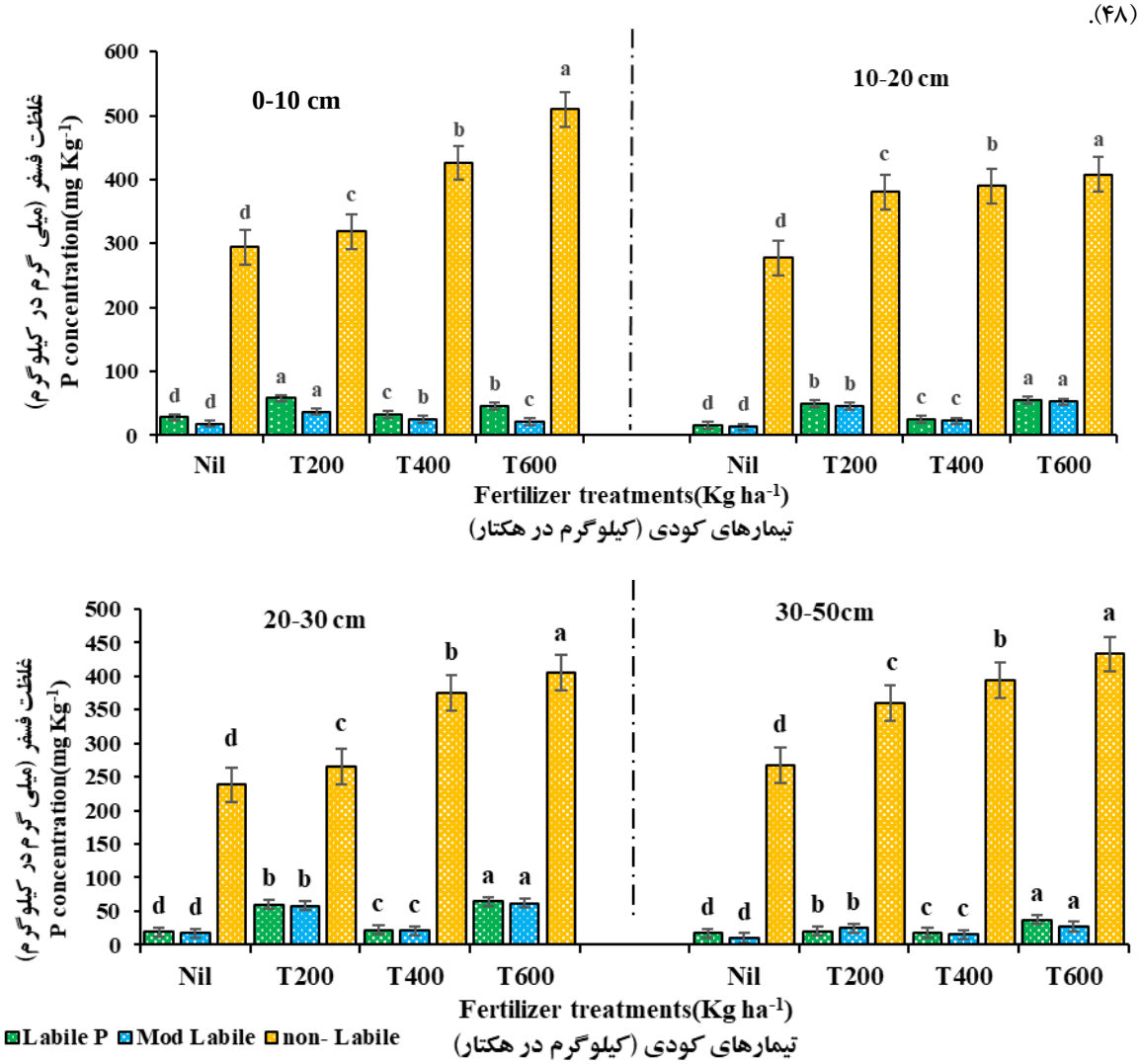
فسفر غیرقابل‌دسترس شامل فسفات‌های کلسیم و منیزیم (HCl-Pi) و فسفر باقی‌مانده (Residual-P) است که نامحلول‌ترین فازهای فسفر در خاک‌های آهکی مناطق

1 - Lombi *et al*

2 - Zhang *et al*
3 - Vu *et al*
4 - Ciampitti *et al*

خشک و نیمه‌خشک را تشکیل می‌دهند(۱۲ و ۲۱). در تمامی اعماق، افزایش سطح کود فسفره مقدار فسفر غیرقابل‌دسترس را به‌طور معنی‌داری افزایش داد ($p<0.05$). تیمار ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار، این جزء را در اعماق ۰–۱۰، ۱۰–۲۰، ۲۰–۳۰ و ۳۰–۵۰ سانتی‌متر به‌ترتیب ۴۲/۲ ، ۳۱/۸ ، ۴۱/۲ و ۳۸/۱ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (شکل ۳). فسفات‌های کلسیم در خاک از طریق واکنش فسفر محلول در خاک با کربنات کلسیم تشکیل شده و قابلیت جذب فسفر توسط گیاه را کاهش می‌دهند (۴۸).

در خاک‌های مورد مطالعه، به‌دلیل pH قلیایی و ماهیت آهکی، تشکیل فسفات‌های کلسیم قابل انتظار بود (۴۸). فسفر باقی‌مانده نیز به‌دلیل وجود کمپلکس‌های آلی فلزی و لیگنین پایدار، به‌سختی در دسترس گیاه قرار می‌گیرد (۴۶). شهبازی و همکاران (۲۰۱۹) و میسن و همکاران[1] (۲۰۰۹) نیز گزارش کردند که کاربرد کودهای فسفره، فسفر باقی‌مانده و HCl-Pi را افزایش می‌دهد.



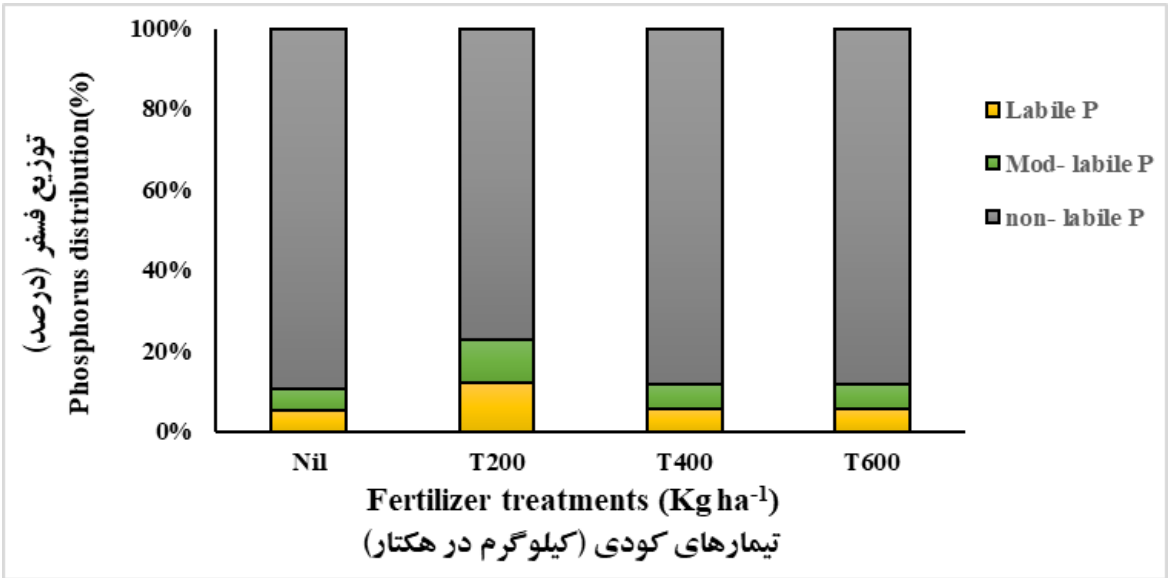
شکل (۳) تاثیر سطوح مختلف کودی بر اجزای فسفر معدنی در اعماق مختلف خاک

Figure (3) The effect of different fertilizer surfaces on inorganic P fractionation at different soil depths

1 - Meason *et al*

توزیع نسبی اجزای فسفر تحت تاثیر تیمارهای کودی

مطالعه توزیع نسبی اجزای فسفر در خاک‌ها به ارزیابی بهتر وضعیت فسفر و بررسی سرنوشت کودهای فسفره در خاک کمک می‌کند. برای ارائه راحت‌تر نتایج و ساده‌تر شدن تغییرات شکل‌های فسفر، سهم نسبی اجزای فسفر در تیمارهای مختلف در کل پروفیل خاک (عمق ۵۰-۰ سانتی‌متری) در شکل ۴ نشان داده شده است. در تمامی سطوح کودی، بیشترین سهم فسفر معدنی به فسفر غیر قابل دسترس و کمترین سهم به فسفر قابل دسترس اختصاص داشت. همچنین نتایج نشان داد که افزایش سطح کودی منجر به افزایش سهم فسفر غیر قابل دسترس در خاک شده است. توزیع نسبی فسفر معدنی در خاک به ترتیب فسفر غیرقابل دسترس> فسفر نسبتا در دسترس > فسفر قابل دسترس بود. از آنجایی که فسفر غیر قابل دسترس شامل فسفر قابل استخراج با اسید و فسفر باقی‌مانده می‌باشد، بالا بودن سهم فسفر غیر قابل دسترس را می‌توان عمدتاً ناشی از غلظت بالای کلسیم و ویژگی‌های ذاتی خاک‌های آهکی دانست (۴۲، ۲۳ و ۱۰). نتایج نشان داد که افزایش سطح کودی به تیمار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سهم بخش قابل دسترس و نسبتا قابل دسترس فسفر را افزایش داد در حالی که افزایش سطح کودی به ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار سهم بخش غیر قابل دسترس را افزایش داد. این نتایج نشان می‌دهد در نتیجه استفاده مداوم و بی‌رویه از کود شیمیایی، بخش عمده‌ی فسفر افزوده شده به خاک به شکل غیر قابل دسترس در می‌آید، لذا افزایش سطح کودی لزوما راه افزایش فسفر قابل جذب گیاه نیست.



شکل (٤) سهم نسبی شکل های فسفر معدنی در سطوح مختلف کودی در عمق ۵۰-۰ سانتی‌متری

Figure (4) Proportion of each inorganic P fractions in fertilizer treatments at 0-50 cm depth

تاثیر سطوح کودی بر فسفر کل، کل فسفر آلی و کل معدنی

کاربرد تیمارهای کودی تأثیر معنی‌داری بر میزان فسفر کل معدنی (TPi) خاک داشت. در تمامی اعماق مورد مطالعه، با افزایش سطح کوددهی میزان فسفر کل معدنی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. بیشترین مقدار آن مربوط به تیمار ۶۰۰ کیلوگرم درهکتار بود که در اعماق مختلف به ترتیب افزایش ۳۶، ۲۶، ۳۹ و ۳۵ درصدی را نسبت به تیمارشاهد نشان داد. واتیاناتان و همکاران[1] (۱۹۹۲) نیز بیان داشتند که استفاده دراز مدت کودهای فسفره، مقدار کل فسفر معدنی را افزایش می‌دهد. آن‌ها نشان دادند که نیمی از این افزایش مربوط به معدنی شدن فسفر آلی طی کشت و کار و نیم دیگر احتمالا مربوط به استفاده از کودهای فسفردار می‌باشد.

فسفر کل آلی نیز در تمامی لایه‌ها تحت تأثیر تیمارهای کودی قرار گرفت ($p<0.05$) به طوری‌که با افزایش سطح کودی میزان کل فسفر آلی در تمامی لایه‌ها افزایش یافت و سطح ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل بیشترین تأثیر را در افزایش کل فسفر آلی خاک در تمامی اعماق نمونه‌برداری به همراه داشت (شکل۵). شهبازی و همکاران (۲۰۱۹) گزارش نمودند که احتمالاً افزایش فسفر آلی خاک در اثر استفاده از کودهای شیمیایی و آلی، به دلیل افزایش زیست توده ریز جانداران و همچنین افزایش مستقیم فسفر آلی خاک می‌باشد. ولاسکوز و همکاران[2] (۲۰۱۶) بیان داشتند که کوددهی با کود شیمیایی در خاک‌های آندوسول مقدار فسفر کل آلی را افزایش می‌دهد.

افزایش سطح کودی به طور معنی‌داری سبب افزایش فسفر کل در تمامی اعماق شد. به طوری‌که بیشترین مقادیر فسفر کل در تیمار ۶۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار مشاهده شد. کاربرد ۶۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار سبب به ترتیب افزایش ۴۳/۳، ۴۲/۴، ۴۱/۱ و ۴۰/۷ درصد فسفر کل در اعماق ۱۰-۰، ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰ و ۵۰-۳۰ سانتی‌متری در مقایسه با تیمار شاهد شد. لوو و همکاران[3] (۲۰۲۰) بیان داشتند که استفاده از کودهای شیمیایی میزان فسفر کل را افزایش می دهد. آنان در نتایج خود گزارش کردند که در لایه ۲۰-۰ سانتی‌متری فسفر کل نسبت به شاهد ۲۷ درصد افزایش داشته است. مائو و همکاران[4] (۲۰۱۵) با مطالعه در خاک‌های آهکی، بیان داشتند که استفاده از کودهای شیمیایی میزان فسفر کل خاک‌ها را نسبت به سطح اولیه افزایش داده است. آنان دلیل این امر را ورود بیش‌تر فسفر از طریق کودها بیان کردند. همچنین کیونگ و همکاران[5] (۲۰۲۰) گزارش کردند پس از ۲۹ سال ورود مداوم فسفر با غلظت بالا، فسفر کل در تیمار دارای کود شیمیایی در مقایسه با مقدار اولیه آن در عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری خاک به طور قابل‌توجهی افزایش یافت. لوو و همکاران[6] (۲۰۲۴) نیز گزارش کردند که استفاده از کودهای شیمیایی به طور قابل توجهی میزان فسفر کل خاک را افزایش داد.

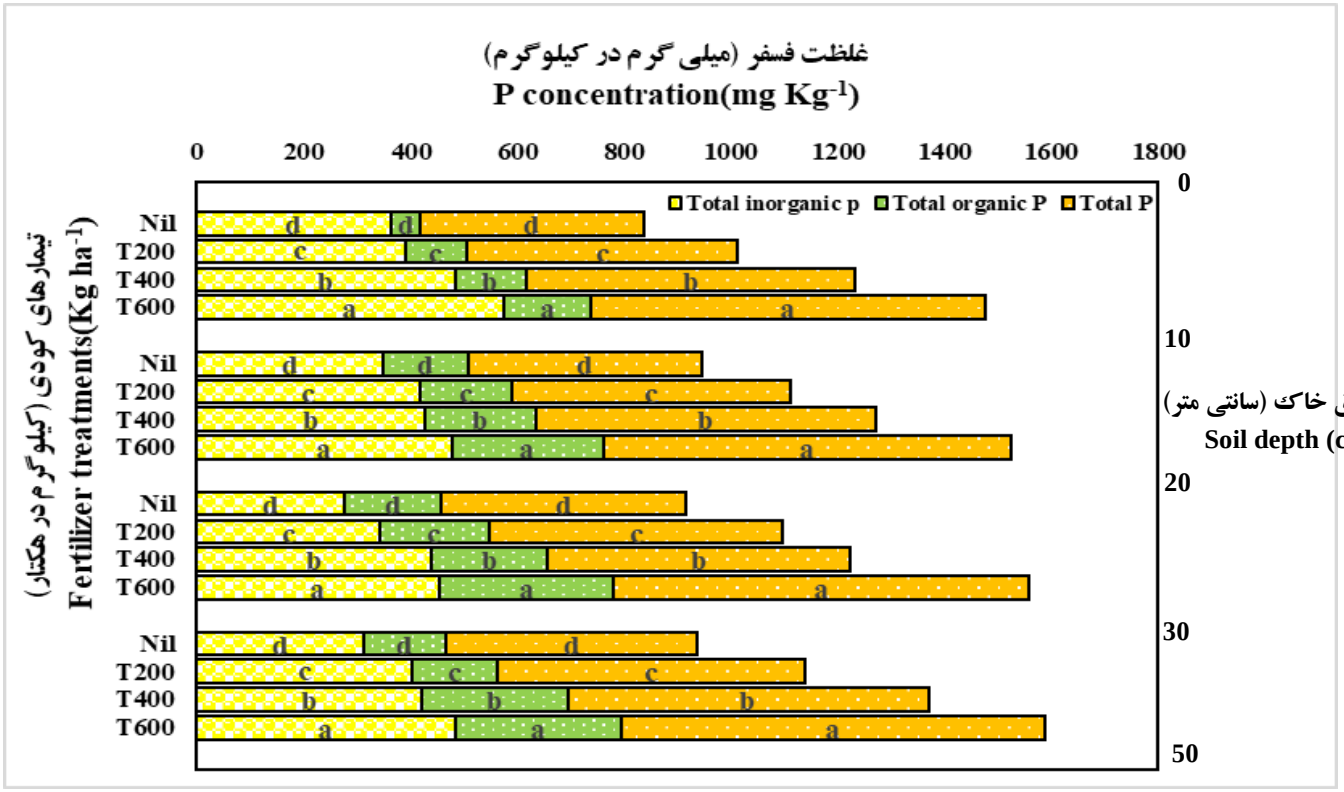
تأثیر تیمارهای کودی بر میزان فسفر قابل جذب (فسفر قابل استخراج با عصاره گیر السن)

فسفر قابل استخراج با عصاره گیر السن شاخص مهمی از فسفر قابل جذب خاک است (۴۳). این فسفر شاخص خوبی از دسترس بودن فسفر در خاک‌های آهکی با pH بالا محسوب می‌شود. تیمارهای کودی فسفر قابل جذب را تحت تأثیر قرار دادند ($p<0.05$). در تمامی اعماق میزان فسفر قابل جذب با افزایش سطح کودی افزایش یافت به طوری‌که بیشترین فسفر قابل جذب خاک در سطح ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار اندازه‌گیری شد(شکل ۷). فسفر قابل جذب خاک در سطح کودی ۶۰۰ کیلوگرم

1 - Vaithiyanathan *et al*
2 - Velásquez *et al*
3 - Lu *et al*
4 - Mao *et al*
5 - Qiong *et al*
6 - Lu *et al*

در هکتار نسبت به شاهد در لایه‌های ۱۰-۰، ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰ و ۵۰-۳۰ سانتی‌متری به ترتیب ۷۱، ۶۹، ۷۰ و ۴۶ درصد افزایش نشان داد. سان و همکاران[1] (۲۰۲۲) با مطالعه بر روی خاک سرخ چین در کشت متناوب ذرت و گندم بیان داشتند که بعد از گذشت ۲۸ سال در استفاده از کودهای شیمیایی، به ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اضافه شده، میزان فسفر قابل استخراج با عصاره گیر السن ۵/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش یافت. همچنین سانگ و همکاران[2](۲۰۱۷) گزارش کردند که استفاده از کودهای شیمیایی میزان فسفر قابل جذب گیاه را افزایش می‌دهد. روند تغییرات عمقی فسفر قابل جذب خاک در تمامی تیمارهای کودی روند ثابت و کاهشی را نشان داد.

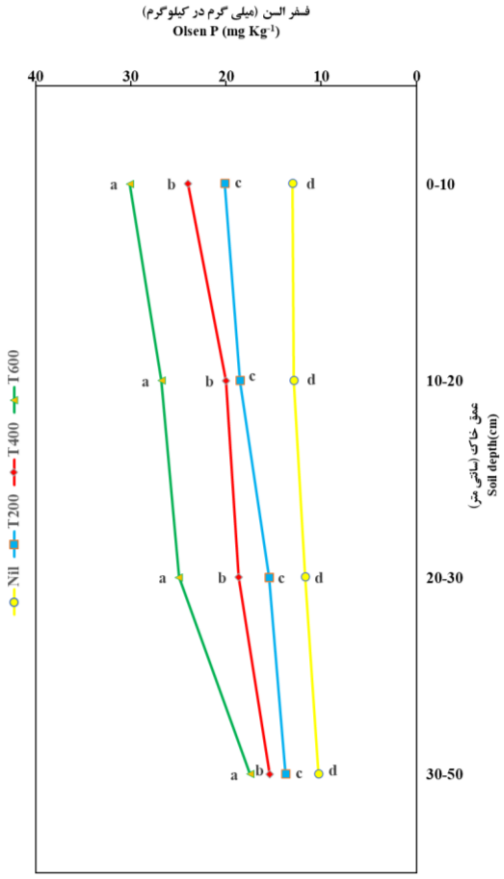
این روند کاهشی در تیمار ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به سایر تیمارها بیشتر بود (شکل ۶). این کاهش برای تیمارهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار به ترتیب ۳۱، ۳۵ و ۴۲ درصد بین دو عمق ۱۰-۰ و ۵۰-۳۰ سانتی متری مشاهده شد. این امر تأثیر منفی افزایش سطح کودی بر میزان فسفر قابل دسترس را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد با افزایش سطح کودی در خاک‌های آهکی بخش عمده فسفر محلول آزاد شده از کود به شکل‌های پایدار و نامحلول فسفر تبدیل و از دسترس گیاه خارج می‌شود.



شکل (۵) تاثیر سطوح مختلف کود شیمیایی بر میزان فسفر کل معدنی، کل آلی و فسفر کل

Figure (5) The effect of different fertilizer surfaces on total inorganic P, total organic P and total P

1 - Sun *et al*
2 - Song *et al*



شکل (٦) تغییرات عمقی فسفر قابل جذب خاک(Olsen-P) در سطوح مختلف کودی

Figure (6) The depth changes of Olsen P at different fertilizer surfaces

بررسی ارتباط بین شکل‌های فسفر معدنی و فسفر قابل جذب

آزمون همبستگی پیرسون در پروفیل خاک (۵۰-۰ سانتی‌متری) جهت تعیین سهم هر یک از اشکال فسفر در افزایش فسفر قابل جذب گیاه انجام شد (جدول ۲). فسفر قابل جذب(Olsen- P) با تمامی اشکال فسفر معدنی همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطوح احتمال یک و پنج درصد نشان داد (جدول۲). همبستگی مشاهده شده میان اشکال مختلف فسفر و فسفر قابل استخراج با عصاره گیر السن احتمالاً از وجود یک رابطه پویا بین آن‌ها در خاک حکایت دارد.

همچین نتایج ارائه شده در جدول ۲ بیانگر ارتباط مثبت و معنی‌دار بین فسفر قابل جذب و کل فسفر معدنی و فسفر کل بوده ($p<0.01$) و با افزایش این شکل‌های فسفر، میزان فسفر قابل جذب افزایش یافت. بیشترین میزان همبستگی بین فسفر قابل جذب و فسفر غیر قابل دسترس در بین اجزای فسفر معدنی بود($r=0.59$) که نشان دهنده رها شدن فسفر از این شکل فسفر معدنی در مدت عصاره‌گیری فسفر قابل دسترس است. به عبارت دیگر زمانی که تخلیه فسفر توسط میگروارگانیسم‌ها و گیاهان از افق‌های سطحی خاک و انتقال عناصر به لایه‌های پایین‌تر خاک اتفاق می‌افتد در نتیجه از منابع مقاوم‌تری مثل فسفر غیر قابل دسترس برای تأمین فسفر استفاده می‌شود (۲۵).

جدول (۲) ضرایب همبستگی (r) بین شکل های فسفر با فسفر قابل دسترس در عمق ۵۰-۰ سانتی‌متری خاک (n=48)

Table (2) Pearson's correlation coefficients (r) among P fractions and Olsen P considering 0-50 cm depth (n=40)

	فسفر قابل دسترس Labile Pi	فسفر نسبتا قابل دسترس Mod- labile Pi	فسفر غیر قابل دسترس non- labile Pi	کل فسفر آلی Total organic-P	کل فسفر معدنی Total inorganic-P	فسفر کل Total-P
فسفر قابل جذب Olsen-P	0.50^{**}	0.29^{*}	0.59^{*}	ns	0.74^{**}	$.47^{**}$

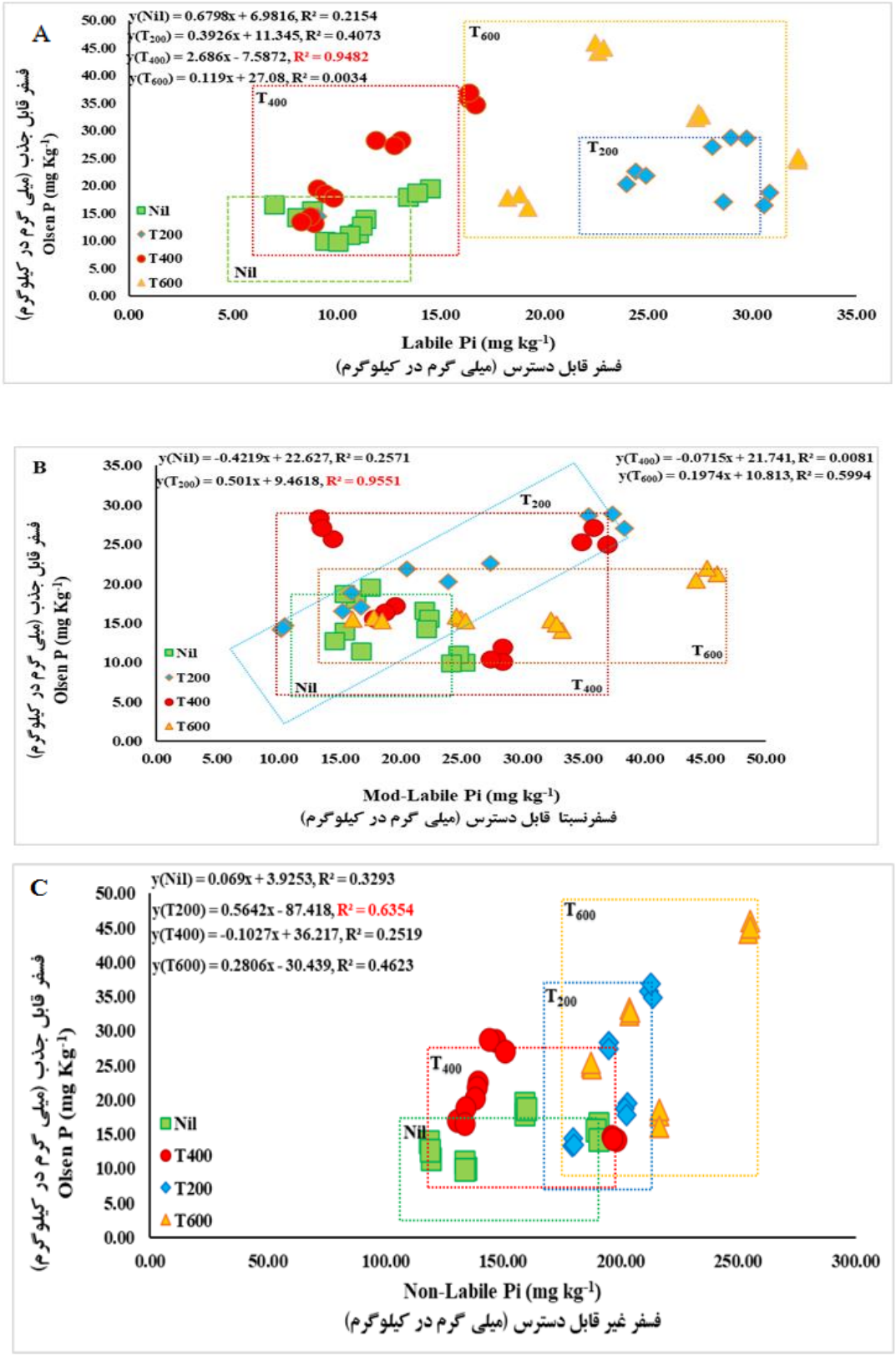
***and* significant at p<0. 01and p<0.05, respectively*

ارتباط بین اجزای فسفر معدنی (قابل دسترس، نسبتاً قابل دسترس و غیر قابل دسترس) و فسفر قابل جذب خاک در تیمارهای کودی مختلف در طول پروفیل خاک ۵۰-۰ سانتی‌متری در شکل (۷) نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است در همه ی تیمارهای کودی مورد مطالعه، فسفر قابل جذب با تمامی اجزای فسفر معدنی رابطهٔ مثبت دارد.

در بخش فسفر قابل دسترس، در میان تیمارهای کودی، تیمار ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار بیشترین همبستگی را با فسفر قابل استخراج با عصاره گیر السن (قابل جذب) نشان داد. در عین حال برای سایر اجزای فسفر معدنی (نسبتاً قابل دسترس و غیر قابل دسترس)، بیشترین همبستگی به تیمار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار اختصاص داشت (شکل ۸).

این نتایج نشان داد که افزایش سطح کودی تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار مناسب بوده و سبب افزایش فسفر قابل دسترس گردید. با این حال، با افزایش سطح کوددهی، دسترسی گیاه به فسفر کاهش یافته و فسفر بیشتر به شکل‌های غیر قابل جذب برای گیاه تبدیل شد.

این نتایج می‌تواند توجیه‌کننده توزیع نسبی بالاتر فسفر قابل دسترس و نسبتاً قابل دسترس در تیمار کودی ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به سایر تیمارها باشد (شکل ۴). به‌علاوه، بر طبق داده‌های به‌دست آمده بخش غیر قابل دسترس و نسبتاً قابل دسترس تحت تأثیر افزودن بیش از حد کود فسفری قرار نگرفت؛ این نتیجه با یافته‌های سونگ و همکاران (۲۰۱۷) همسو می باشد. از میزان متوسط مصرف کودهای فسفره در استان آمار دقیقی در دست نیست اما طبق نظریه کارشناسان این میزان از ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار بیشتر می‌باشد(۲۸). بنابراین بر طبق این نتایج، قسمت اعظم کودهای شیمیایی مورد استفاده در بخش غیر قابل دسترس قرار می‌گیرند. این امر پیامدهای مهمی برای تولید پایدار پسته دارد و نشان می‌دهد که باید از سطوح کمتر کود فسفره استفاده کرد به ویژه اگر تولید پایدار و حفظ محیط زیست مد نظر باشد.



شکل (۷) ارتباط فسفر قابل جذب با تیمارهای مختلف کودی در اجزای فسفر معدنی: A) فسفر قابل دسترس، B) فسفر نسبتا قابل دسترس، C) فسفر غیر قابل دسترس

Figure (7) Correlation Olsen P with different fertilizer treatment at P fractions, A) labile P, B) Mod- labile P, C) Non-labile P

نتیجه‌گیری

فسفر معدنی به عنوان یک منبع تأمین کننده فسفر گیاهی مورد توجه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از سطوح مختلف کود شیمیایی، شکل‌های فسفر را تحت تأثیر قرار داده به طوری که با افزایش سطح کودی بخش غیر قابل دسترس فسفر افزایش یافت. بر طبق داده‌های به دست آمده از این پژوهش، فسفر غیر قابل دسترس، شکل غالب فسفر را در خاک‌های آهکی مورد مطالعه نشان داد. ارتباط بین فسفر قابل استخراج با عصاره گیر السن با فسفر قابل دسترس، نسبتاً قابل دسترس و غیر قابل دسترس در تیمارهای کودی نشان داد که میزان فسفر قابل‌جذب در تیمار کودی ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، بیشترین میزان همبستگی را با جز در دسترس و نسبتاً در دسترس فسفر داراست. این یافته‌ها نشان داد که باید به تعادل فسفر توجه دقیقی شود تا از ورود بیش از حد فسفر به خاک به ویژه در مورد پسته جلوگیری به عمل آید. لذا کاربرد سطوح کمتر کود شیمیایی و همچنین استفاده از فسفر تثبیت شده به عنوان یک منبع بالقوه فسفر جهت کاهش هزینه‌ها و همچنین کاهش آلودگی ناشی از استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی توصیه می‌شود. استفاده از اصلاح کننده آلی و معدنی و همچنین میکروارگانیسم‌های محرک رشد و حل کننده فسفات می‌تواند در تأمین فسفر گیاه از فسفر غیر قابل دسترس راهگشا باشد که نیاز به بررسی بیشتر در مطالعات آینده دارد.

References

1. Adnan, M., Fahad, S., Saleem, M. H., and Lal, R. 2025. Sustainable phosphorus management in calcareous soils: problems and prospects. Journal of Plant Nutrition, 1-22. https://doi.org/10.1080/01904167.2025.2477269

2. Amirhosseini, K., Haghani, Z., and Motesharezadeh, B. 2022. Comparative analysis of the trend of chemical fertilizer consumption in Iran and some other Middle Eastern and North African countries, 17th Iranian Soil Science Congress: Soil Perspectives in the New Century of Iran, Karaj. https://civilica.com/doc/131235. (In Persian).

3. Botha, C.R., and Webb, M.M. 1952. The versenate method for the determination of calcium and magnesium in mineralized waters containing large concentrations of interfering ions. Institute of Water Engineers Journal, 6.

4. Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Journal of Agronomy, 54: 464 465.https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x

5. Box, G.E., and Cox, D.R., 1964. An analysis of transformations. Journal of the Royal Statistical Society. Ser. B, 211–252. https://doi.org/10.1111/j.2517 6161.1964.tb00553.x

6. Condron, L.M and Newman, S. 2011. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. Journal of Soils Sediment, 11: 830–840. https://doi.org/10.1007/s11368-011-0363-2

7. Ciampitti, I.A., Picone, L.I., Rubio, G., and García, F.O. 2011. Pathways of Phosphorous Fraction Dynamics in Field Crop Rotations of the Pampas of Argentina. Journal of Soil Science Society of America, 75: 918–926. https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0361.

8. Demirkiran, A. R., and Cengiz, M. C. 2010. Effect of different organic materials and chemical fertilizers on nutrition of pistachio (Pistachio Vera L.) in organic arboriculture. African Journal of Biotechnology, 9(38): 6320-6328. https://doi.org/10.5897/AJB10.563

9. Doydora, S., Gatiboni, L., Grieger, K., Hesterberg, D., Jones, J.L., McLamore, E.S., Peters, R., Sozzani, R., Van den Broeck, L., and Duckworth, O.W. 2020. Accessing legacy phosphorus in soils. Journal of Soil systems, 4(4): p.74. https://doi.org/10.3390/soilsystems4040074

10. Gerdelidani, A. F., and Hosseini, H. M. 2017. Effects of sugar cane bagasse biochar and spent mushroom compost on phosphorus fractionation in calcareous soils. Journal of Soil Research, 56(2):136-144. https://doi.org/10.1071/SR1709.

11. Grossman, R.B and Reinsch, T.G. 2002. Bulk density and linear extensibility. p. 202-228. In Dane, J.H and Topp, G.C. (ed.), Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America. Book Series No. 5. ASA and SSSA, Madison, WI.

12. Hedley, M.J., Stewart, W.B., and Chauhan, B.S.1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. Journal of Soil Science Society of America, 49:970-976. https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x.

13. Hejazi-mehrizi, M., Aeeneh-heydari, M., and Abbaszadeh, F. 2015. Distribution of inorganic phosphorus fractions in calcareous soil treated with poultry manure and phosphorus at different lodging times. Journal of Soil Research, 29(3): 297-308. (In Persian).Doi/10.22092/ijsr.2015.103438

14. Kizewski, F., Liu, Y. T., Morris, A., and Hesterberg, D. 2011. Spectroscopic approaches for phosphorus speciation in soils and other environmental systems. Journal of Environmental Quality, 40(3): 751-766. https://doi.org/10.2134/jeq2010.0169

15. Lavkulich, L. M. 1981. Methods Manual, Pedology Laboratory. Department of Soil Science, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada. pp: 360.

16. Lindsay, W.L., and Norvell., W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Journal of Soil Science Society of America ,42: 421-428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x

17. Lombi, E., McLauglin, M. J., Armstrong, R. D., and Holloway, R. E. 2004. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. Journal of Soil Science Society of America 68: 682-689. https://doi.org/10.2136/sssaj2004.6820

18. Lu, E., Li, C., Geng, Y., Liang, T., and Zhang, J. 2024. Effects of Long-Term Fertilization on Phosphorus Form and Availability in Black Soil. Journal of Applied Sciences, 14(24): 11673. https://doi.org/10.3390/app142411673

19. Lu, X., Mahdi, A. K., Han, X. Z., Chen, X., Yan, J., Biswas, A., and Zou, W. X. 2020. Long-term application of fertilizer and manures affect P fractions in Mollisol. Journal of Scientific Reports, 10(1): 14793.DOI:10.1038/s41598-020-71448-2

20. Mahdi, H. H., and Mouhamad, R. S. 2018. Behavior of phosphorus in the calcareous soil. Journal of Advances in Agricultural Technology & Plant Sciences, 1(4): 180018.

21. Mao, Y., Hu, W., Li, Y., Li, Y., Lei, B., and Zheng, Y. 2023. Long-term cattle manure addition enhances soil-available phosphorus fractions in subtropical open-field rotated vegetable systems. Journal of Frontiers in Plant Science, 14:1138207. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1138207

22. Mao, X., Xu, X., Lu, K., Gielen, G., Luo, J., He, L., Donnison, A., Xu, Z., Xu, J., Yang, W., and Song, Z., 2015. Effect of 17 years of organic and inorganic fertilizer applications on soil phosphorus dynamics in a rice–wheat rotation cropping system in eastern China. Journal of soils and sediments, 15(9): pp.1889-1899. Doi 10.1007/s11368-015-1137-z

23. Meason, D. F., Idol, T. W., Friday, J. B., and Scowcroft, P. G. 2009. Effects of fertilisation on phosphorus pools in the volcanic soil of a managed tropical forest. Journal of Forest ecology and management, 258(10): 2199-2206. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.04.001

24. Menezes-Blackburn, D., Sun, J., Lehto, N.J., Zhang, H., Stutter, M., Giles, C.D., Darch, T., George, T.S., Shand, C., Lumsdon, D., and Blackwell, M., 2019. Simultaneous quantification of soil phosphorus labile pool and desorption kinetics using DGTs and 3D-DIFS. Journal of Environmental Science & Technology, 53(12): pp.6718-6728. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00320

25. Mohebbi, M. J., Heidari, A. 2015. Distribution of Phosphorus forms in the Kelardasht Forest Soils. Journal of Soil Research, 31(2): 231-245. (in Persian).Dio: 10.22092/ijsr.2017.113106

26. Moshiri, F., Tehrani, M., Shahbazi, K., Maboudi, N., and Tabakhian, SH. 2014. The Study of dynamics of phosphorus in soil using phosphate rock treated with different acids and organic matter. Soil and water research institute of Iran, 53p. (In Persian). https://civilica.com/doc/1091717

27. Murphy, J., and Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. Journal of Analytica Chimica Acta, 27:31-36. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5

28. Naghavi, H. 2010. Investigating status of available phosphorus in the soils of Kerman province and an insight into its fertilizer resource needs in the past compared to its supplied amounts using thirty years of laboratory data. The 1st Iranian Fertilizer Challengs Congress, March, Tehran. (In Persian). https://civilica.com/doc/102660

a. Negassa, W., and Leinweber, P. 2009. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review , Journal of Plant Nutrition and Soil Science,172 (3): 305–325. https://doi.org/10.1002/jpln.200800223

29. Olsen, S. R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate, No. 939. US Department of Agriculture.

30. Pavinato, P. S., Cherubin, M. R., Soltangheisi, A., Rocha, G. C., Chadwick, D. R., and Jones, D. L. 2020. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. Journal of Scientific Reports, 10(1): 15615. DOI: 10.1038/s41598-020-72302-1

31. Qiong, W.A.N.G., ZHANG, W.W., Ping, Z.H.U., Chang, P.E.N.G., Le, W.A.N.G., ZHANG, S.X., and COLINET, G. 2022. Effect of long-term fertilization on phosphorus fractions in different soil layers and their quantitative relationships with soil properties. Journal of Integrative Agriculture, 21(9): pp.2720-2733. https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.07.018

a. Reddy, K. R., Wetzel, R. G., and Kadlec, R. H. 2005. Biogeochemistry of phosphorus in wetlands. Journal of Phosphorus: Agriculture and the Environment, 46: 263-316. https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c9

32. Roades, J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. pp. 417-435. In: Sparks, R.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods, SSSA, Madison, WI. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14

33. Rodrigues, M., Soltangheisi, A., Abdala, D. B., Ebuele, V. O., Thoss, V., Withers, P. J. A., and Pavinato, P. S. 2023. Long-term land use and tillage influence on phosphorus species in Brazilian Oxisols: A multi-technique assessment by chemical P fractionation, 31P NMR and P K-edge XANES spectroscopies. Journal of Soil and Tillage Research, 229:105683. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105683

34. Shahabifar, J. 2019. Effect of Fertilizer Sources on Chemical and Organic Forms of Phosphorus under Wheat Cultivation in a Calcareous Soil. Journal of Applied Soil Research, 8(1): 92-107. (In Persian).

35. Shahbazi, K., 2020. Standard operating procedure for soil calcium carbonate equivalent Titrimetric method. Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp.1-13.

36. Shahbazi, F., Hosseinpur, A.R., and Motaghian H.R. 2019. Effect of P fertilizer and sewage sludge on availability and fractions of P and maize (*Zea Mays* L.) indices in a calcareous soil. Journal of Soil Management and Sustainable Productio, 9(2): 45-63. (In Persian). 10.22069/ejsms.2019.15468.1832.

37. Soil Survey Staff Keys to Soil Taxonomy.2022. 13th ed.; U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: Washington, DC, USA.

38. Soltangheisi, A., Haygarth, P.M., Pavinato, P.S., Cherubin, M.R., Teles, A.P.B., de Oliveira Bordonal, R., Carvalho, J.L.N., Withers, P.J. and Martinelli, L.A., 2021. Long term sugarcane straw removal affects soil phosphorus dynamics. Journal of Soil and Tillage Research, 208: p.104898. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104898

39. Soltangheisi, A., de Moraes, M.T., Cherubin, M.R., Alvarez, D.O., de Souza, L.F., Bieluczyk, W., Navroski, D., Teles, A.P.B., Pavinato, P.S., Martinelli, L.A., and Tsai, S.M., 2019. Forest conversion to pasture affects soil phosphorus dynamics and nutritional status in Brazilian Amazon. Journal of Soil and Tillage Research, 194: p.104330. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104330

40. Song, K., Y. Xue, X. Zheng, W. Lv, H. Qiao, Q. Qin., and Yang, J. 2017. Effects of the continuous use of organic manure and chemical fertilizer on soil inorganic phosphorus fractions in calcareous soil. Journal of Scientific Reports 7: 1164- 1173. DOI:10.1038/s41598-017-01232-2

41. Sun, F., Sun, N., Ma, X., Zhou, B., Zhu, P., Gao, H., and Xu, M. 2022. The application of fertilizer phosphorus affected Olsen p and the phosphorus fractions of Hedley method in black soil. Journal of Agronomy, 12(12): 3146. https://doi.org/10.3390/agronomy12123146

42. Taalab, A. S., Ageeb, G. W., Siam, H. S., and Mahmoud, S. A. 2019. Some Characteristics of Calcareous soils. A review. Middle East Journal of agriculture research, 8(1): 96-105.

43. Thomas, G.W., 1996. Soil pH and soil acidity. Methods of soil analysis: part 3 chemical methods, Bartels JM (ed.). Madison, WI: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 5: pp.475-490. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16

44. Turner, B. L., and Kim, P. J. 2024. Terminology for residual and legacy phosphorus. Journal of Plant and Soil, 501(1):237-239. DOI:10.1007/s11104-024-06538-5

45. Velásquez, G., Calabi-Floody, M., Poblete-Grant, P., Rumpel, C., Demanet, R., Condron, L., and Mora, M. L. 2016. Fertilizer effects on phosphorus fractions and organic matter in Andisols. Journal of soil science and plant nutrition, 16(2): 294-309. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000024

46. Vu, D.T., Tang, C., and Armstrong, R.D. 2008. Changes and availability of P fractions following 65 years of P application to calcareous soil in Mediterranean climate. Journal of Plant Soil, 304(1):21-33. DOI:10.1007/s11104-007-9516-x

47. Vaithiyanathan P., and Correll D.L. 1992. The Rhode River watershed: phosphorus distribution and export in forest and agricultural soils. Journal of Environmental Quality, 21: 280–288. https://doi.org/10.2134/jeq1992.00472425002100020021x

48. Walker, T. W., and Adams, A. F. R. 1958. Studies on soil organic matter: I. Influence of phosphorus content of parent material on accumulation of carbon, nitrogen, sulfur and organic phosphorus in grassland soils. Journal of Soil Science, 85(6): pp.307-318.

49. Walkley, A.J., and Black, I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Journal of Soil Science, 37(1):29–38. http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003

50. Zhang, H., Shi, L., Lu, H., Shao, Y., Liu, S., and Fu, S. 2020. Drought promotes soil phosphorus transformation and reduces phosphorus bioavailability in a temperate forest. Journal of Science of the Total Environment, 732: 139295. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139295