J. Soil Plant Interact. 2026; 17(3): 75–88. https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.03703

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

Interaction Effect of Application Method and Rate of Phosphorus Fertilizer With Organic Manure on Inorganic Phosphorus Fractions in Pistachio-Grown Soil

Fatemeh Abbaszadeh, Naser Boroomand and Majid Hejazi-Mehrizi

Department of Soil Science, College of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
* Corresponding author, Email: mhejazi@uk.ac.ir

(Received: 24 May 2026; Revised: 8 July 2026; Accepted: 12 July 2026)

Abstract

Background and Objective: In calcareous soils of arid and semi-arid regions, knowledge of phosphorus (P) forms can be instrumental in optimizing the use of chemical fertilizers and reducing their detrimental effects on the environment. The aim of this study was to compare two methods of surface and subsurface application of different levels of triple superphosphate (TSP) and organic fertilizer (cow manure) on the forms of inorganic P in the subsurface layer (30–50 cm) of the soil.

Materials and Methods: The research was conducted as a randomized complete blocks design in a factorial arrangement with three replications. The fertilizer treatments included four levels of TSP (0, 200, 400, and 600 kg ha^{-1}) combined with two levels of cow manure (0 and 30 ton ha^{-1}), which were applied at two layers—surface (0–20 cm) and subsurface (30–50 cm) for four years under field conditions. At the end of the fourth year of fertilization, soil samples were taken from the 30–50 cm layer. Soil inorganic P forms were determined using the sequential extraction method, and available P was measured using $NaHCO_3$ extraction (Olsen method).

Results: The results showed that in both fertilizer application methods, with and without cow manure, the soil available P increased with increasing fertilizer levels. Application of 600 kg ha^{-1} TSP with cow manure notably increased soil available P by 41 and 42% in surface and subsurface applications, respectively. The results also indicated that in the 30–50 cm soil layer, only subsurface application caused a significant increase in labile P forms, including water-extractable P (by 70.4%) and $NaHCO_3$-extractable P (by 78.3%) compared to the control. In contrast, in this sampling layer, surface application of TSP led to an increase in moderately labile and non-labile P forms.

Conclusion: The results of this study demonstrated that the fertilizer application method and knowledge of soil inorganic P fractions can provide a valuable tool for determining P availability for pistachio plants.

Keywords: Inorganic phosphorus fractionation, Organic matter, Phosphorus Availability, Saline calcareous soil, Surface and sub-surface application.

How to Cite: Abbaszadeh, F., Boroomand, N., Hejazi-Mehrizi, M., 2026. Interaction effect of application method and rate of phosphorus fertilizer with organic manure on inorganic phosphorus fractions in pistachio-grown soil. J. Soil Plant Interact. 17(3), 75–88 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.03703

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۵؛ ۱۷(۳): ۸۸-۷۵، https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.03703

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

اثر برهمکنش روش و میزان کاربرد کود فسفره با کود آلی بر شکل‌های شیمیایی فسفر معدنی در خاک تحت کشت پسته

فاطمه عباس‌زاده، ناصر برومند و مجید حجازی مهریزی*

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

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mhejazi@uk.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۳/۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۱)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک، آگاهی از شکل‌های فسفر (P) می‌تواند در بهینه‌سازی مصرف کودهای شیمیایی و کاهش آثار مخرب آن‌ها بر محیط زیست راهگشا باشد. هدف از این پژوهش مقایسه دو روش کاربرد سطحی و جایگذاری عمقی سطوح مختلف سوپرفسفات تریپل (TSP) و کود آلی (کود گاوی) بر شکل‌های P معدنی در لایه زیرین (۵۰-۳۰ سانتی‌متری) خاک بود.

مواد و روش‌ها: پژوهشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به‌صورت فاکتوریل و با سه تکرار انجام شد. تیمارهای کودی شامل چهار سطح کود TSP (۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار) همراه با دو سطح کود گاوی (۰ و ۳۰ تن در هکتار) بود که در دو لایه رویین (۲۰-۰ سانتی‌متری) و زیرین (۵۰-۳۰ سانتی‌متری) به مدت چهار سال در شرایط مزرعه جایگذاری شدند. در پایان سال چهارم کوددهی، نمونه‌های خاک از لایه ۵۰-۳۰ سانتی‌متری برداشت شده و گونه‌های P معدنی با استفاده از روش عصاره‌گیری متوالی، و P قابل استفاده با روش عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم (روش اولسن) تعیین شدند.

نتایج: نتایج نشان داد با افزایش سطح کودی میزان P قابل استفاده خاک در هر دو سطح کاربرد کودی افزایش داشت. بیشترین میزان P قابل استفاده خاک نسبت به شاهد در تیمار ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار همراه با کود گاوی در هر دو عمق کاربرد سطحی (۴۱٪) و عمقی (۴۲٪) مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که در لایه ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متری خاک، کاربرد عمقی کود سبب افزایش شکل‌های قابل دسترس P خاک شامل P قابل استخراج با آب (۷۰/۴٪) و قابل استخراج با $NaHCO_3$ (۷۸/۳٪) در مقایسه با شاهد شد. در مقابل در لایه ۵۰-۳۰ سانتی‌متری، کاربرد سطحی TSP سبب افزایش شکل‌های نسبتاً در دسترس و غیرقابل‌دسترس P در خاک شد.

نتیجه‌گیری کلی: نتایج این پژوهش نشان داد، روش کاربرد کود و اطلاع از اجزای P معدنی خاک می‌تواند ابزار ارزشمندی در تعیین فراهمی P برای گیاه پسته فراهم کند.

واژه‌های کلیدی: جزءبندی فسفر معدنی، کاربرد سطحی و زیرسطحی، خاک آهکی و شور، ماده آلی، فراهمی فسفر.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

یکی از عناصر ضروری برای هر سلول گیاهی فسفر است که در فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه نقش حیاتی دارد. غلظت این عنصر در خاک بسیار کم بوده و تحرک کمی در مقایسه با دیگر ترکیبات و عناصر غذایی مانند نیترات و پتاسیم دارد. فسفر پس از نیتروژن مهم‌ترین عنصر برای رشد گیاهان بوده (Mou et al., 2020) که امنیت جهانی غذا به آن وابسته است (Chen and Greadel, 2016).

بیش از ۸۷ درصد از خاک‌های زراعی ایران را خاک‌های آهکی تشکیل می‌دهند که به‌طور طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌شوند. زمین‌های کشاورزی در این مناطق به‌طور عمده با چالش‌هایی مانند شوری زیاد، کمبود ماده آلی و عناصر غذایی، آهک و pH زیاد مواجه هستند (Shahbazi and Besharati, 2013). یکی از محدودیت‌های عمده رشد گیاهان در این خاک‌ها، فراهمی کم فسفر است چرا که به‌دلیل وجود یون کلسیم و کانی‌های کربناته در خاک‌های آهکی، فسفر تثبیت شده و فراهمی آن برای گیاه کاهش می‌یابد. هرچه فعالیت یون کلسیم در محلول بیشتر باشد میزان رسوب کربنات کلسیم زیادتر بوده و مقدار فسفر بیشتری تثبیت می‌شود (Salardini, 2009). در خاک‌های این مناطق برای جبران کمبود فسفر مورد نیاز پسته و افزایش عملکرد، سالانه مقادیر زیادی کودهای شیمیایی فسفره توسط کشاورزان استفاده می‌شود که منجر به تجمع فسفر و افزایش فسفر کل در خاک شده است. علی‌رغم فسفر کل زیاد در این خاک‌ها، اما کاربرد درازمدت کودهای فسفره و کارایی کم آن‌ها، کمی مواد آلی و خشکی خاک، pH و کربنات کلسیم زیاد (Adnan, 2025) سبب شده است که مقدار جذب فسفر، کمتر از مقدار لازم برای تأمین رشد بهینه گیاه باشد. بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده در خاک‌های اسیدی و آهکی به‌دلیل واکنش‌های فسفر با اجزای خاک، کمتر از ۲۰ درصد کود فسفره مصرفی توسط گیاه برداشت می‌شود و مابقی به‌صورت تثبیت و به شکل غیرقابل‌جذب در خاک در می‌آید (Gatiboni et al., 2021).

روش کوددهی نیز نقش مهمی در کارآیی مصرف کود، هدررفت کود و عملکرد گیاه ایفا می کند. Mohseni et al. (2013) با مقایسه اثر دو روش کوددهی سطحی و کود-آبیاری بر عملکرد ذرت بیان داشتند که عملکرد ذرت در اکثر تیمارهای کود-آبیاری نسبت به روش پخش سطحی با یکدیگر اختلاف معنی‌داری داشت. بیشترین هدررفت عمقی نیترات در تیمار پخش سطحی مشاهده شد که ۱/۲۵ درصد بیش‌تر از روش کود-آبیاری بود. همچنین Heidari et al. (2017) با بررسی اثر دو روش پخش سطحی و نواری کود فسفاته بر عملکرد ذرت بیان داشتند عملکرد دانه در جای‌گذای نواری کود (۱۰۸۶۲ کیلوگرم در هکتار) نسبت به استفاده سطحی از کود (۹۹۶۵ کیلوگرم در هکتار) بیشتر بوده است.

بخش وسیعی از زمین‌های شمال غربی استان کرمان تحت کشت پسته است و هر ساله مقادیر قابل‌توجهی کود فسفره در باغات پسته، بدون بررسی وضعیت فسفر در لایه‌های مختلف خاک، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی اثر چگونگی کاربرد سوپرفسفات تریپل (TSP) بر شکل‌های فسفر معدنی در لایه زیرین خاک به‌عنوان بخشی که ریشه‌های فعال در آن قرار دارند بود. در این پژوهش فرض شده است که روش کاربرد کود می‌تواند بر فراهمی اجزای فسفر معدنی و همچنین فراهمی فسفر موثر باشد. آگاهی از اثر روش کاربرد کود بر شکل‌های فسفر معدنی می‌تواند در راستای مدیریت بهینه و پایدار کودهای فسفره در منطقه راهگشا باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی، نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های خاک

نمونه‌برداری از خاک یکی از باغات پسته منطقه کاظم‌آباد (30°34′23"N to 56°49′44"E) که دارای سابقه کوددهی مشخص بود انجام شد. چگونگی اعمال تیمارهای کودی در این باغ نمونه که میانگین سن درختان پسته (رقم اوحدی) ۳۰ سال بود، به‌صورت سالانه و تا چهار سال در فصل زمستان (اواخر بهمن‌ماه) شامل کود سوپرفسفات تریپل (TSP) و ماده آلی (کود گاوی) (جدول ۱) بود. کود TSP شامل چهار سطح ۰، ۲۰۰،

جدول ۱. برخی ویژگی‌های‌شیمیایی کود گاوی مورد استفاده

Table 1. Some chemical properties of the used cow manure

P_{total} (mg kg^{-1})	C/H (%)	C/N (%)	O (%)	H (%)	C (%)	N (%)	EC (dS m^{-1})	pH
1010	5.39	9.44	43	4.2	22.7	2.4	2.12	7.6

EC، N، C، H، O، و P_{total} به‌ترتیب نشان‌دهنده رسانایی الکتریکی، نیتروژن، کربن، هیدروژن، اکسیژن، و فسفر کل است.

EC, N, C, H, O, and P_{total} stand for electrical conductivity, nitrogen, carbon, hydrogen, oxygen, and total phosphorus, respectively.

۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار همراه با دو سطح کود گاوی (صفر و ۳۰ تن در هکتار) بود که به دو صورت سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متری) و عمقی در منطقه توسعه ریشه (۵۰-۳۰ سانتی-متری) اعمال شد. در پایان سال چهارم کوددهی، نمونه‌برداری از خاک درختانی در حد امکان یک دست (از نظر رقم، سن، و شرایط رشدی) انجام شد. چگونگی نمونه‌برداری خاک به‌صورت سیستماتیک و در سه تکرار بود. نمونه‌ها از لایه ۵۰-۳۰ سانتی-متری و در مجموع ۴۸ نمونه خاک، از دو طرف درخت پسته و از مکان سایه‌انداز درخت برداشت شد (شکل ۱).

نمونه‌های برداشت‌شده در دمای محیط هوا-خشک شده و پس از انتقال به آزمایشگاه از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه مورد بررسی با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد که در جدول (۲) آورده شده است. فسفر قابل جذب نیز بر اساس روش استاندارد آزمایشگاهی (Sparks et al., 1996) با بی‌کربنات سدیم استخراج شده و با استفاده از روش رنگ‌سنجی آبی مقدار فسفر عصاره تعیین شد.

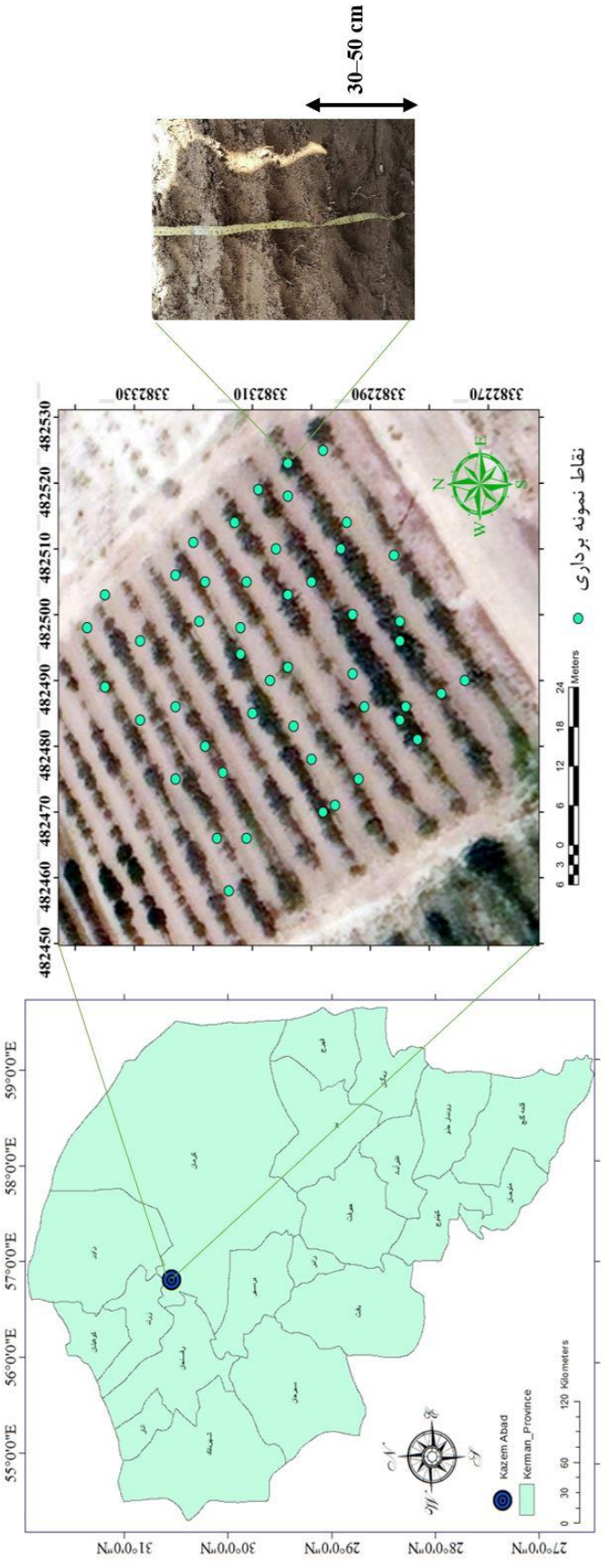
برای جداسازی و تعیین شکل‌های فسفر معدنی از روش استخراج متوالی Hedley et al. (1982) اصلاح‌شده توسط Sui et al. (1999) استفاده شد. برای تعیین اجزای فسفر معدنی به یک گرم از نمونه‌های خاک به‌طور متوالی ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر (H_2O-P)، بی‌کربنات سدیم نیم مولار ($NaHCO_3$-P)، سدیم هیدروکسید ۰/۱ مولار (NaOH-P)، اسید کلریدریک یک مولار (HCl-P) و مخلوط اسید سولفوریک (۹۸٪) و آب اکسیژنه (۳۰٪) (Residual-P) افزوده شد. نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت تکان داده شده و به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ (۳۰۰۰ دور در دقیقه) شدند. در نهایت با عبور از کاغذ صافی، فسفر موجود در عصاره‌ها با روش رنگ‌سنجی Murphy and Riley (1962) تعیین شدند. قرائت فسفر در عصاره‌های خاک در طول موج ۸۸۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل CECIL, SERIES 2 انجام شد.

طرح آزمایشی و تجزیه آماری داده‌ها

این پژوهش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به‌صورت فاکتوریل انجام شد و آثار اصلی و برهمکنش سطوح کود فسفره، کود گاوی و عمق کاربرد کود بر اجزای فسفر خاک مورد بررسی قرار گرفت. پیش از تجزیه واریانس داده‌ها، همگنی و نرمال‌بودن هر یک از ویژگی‌ها با استفاده از آزمون کولموگراف-اسمیرنوف بررسی شد. تجزیه واریانس با استفاده از مدل آنالیز چندمتغیره در نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شد. همچنین مقایسه میانگین شکل-های فسفر در سطح احتمال پنج درصد ($p < ۰/۰۵$) با استفاده از آزمون LSD انجام شده و نمودارها در Excel ترسیم شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اجزای فسفر معدنی تحت تاثیر آثار اصلی سطح کاربرد کود فسفره، کود گاوی، عمق کاربرد کود و آثار برهمکنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۳). برای ارائه آسان‌تر نتایج شکل‌های فسفر، اجزای فسفر معدنی در سه بخش قابل دسترس (فسفر قابل استخراج با آب و فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم)، فسفر نسبتاً در دسترس (فسفر قابل استخراج



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی و پراکنش نقاط نمونه‌برداری خاک

Fig. 1. Geographical location of the study area and soil sampling points distribution

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (لایه ۵۰-۳۰ سانتی‌متر) باغ پسته

Table 2. Physical and chemical properties of pistachio garden soil (30–50 cm layer)

ویژگی‌های خاک Soil properties	روش اندازه‌گیری Measurement method	مقدار Value
بافت خاک Soil texture		لوم شنی Sandy loam
شن Sand (%)	Hydrometer (Bouyoucos,1962)	63.5
سیلت Silt (%)		26.2
رس Clay (%)		10.3
چگالی ظاهری Bulk density (g cm^{-3})	Core sampling (Grossman et al., 2002)	1.63
واکنش $pH_{1:5}$	pH meter (Thomas, 1996)	7.3
رسانایی الکتریکی Electrical conductivity, $EC_{1:5}$ (dS m^{-1})	EC meter (Rhoades, 1996)	4.4
ماده آلی Organic matter (%)	Wet-oxidation (Walkley and Black, 1934)	0.78
کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent, CCE (%)	Volumetric Calcimeter (Shahbazi et al., 2020a)	27.9
فسفر قابل جذب Available P (mg kg^{-1})	Spectrophotometer (Sparks et al., 1996)	10.4

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر اجزای فسفر معدنی خاک

Table 3. Variance analysis of the effect of experimental treatments on soil inorganic P fractions

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean squares				
		H_2O-P	$NaHCO_3$-P	NaOH-P	HCl-P	Residual-P
سوپرفسفات تریپل (Triple superphosphate, TSP)	3	5.69*	572.80*	210.62*	4848.17*	10206.06*
کود گاوی Cow manure	1	0.61*	1247.86*	17.94*	5493.59*	6229.41*
عمق کاربرد Application depth	1	5.08*	516.40*	147.66*	6336.27*	18392.67*
سوپرفسفات تریپل× کود گاوی× عمق کاربرد TSP × Cow manure × Application depth	3	2.45*	972.30*	91.59*	8022.03*	7514.06*
ضریب تغییر Coefficient of variation	–	2.01	2.56	4.74	1.10	2.63

* و ns به‌ترتیب بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و نبود معنی‌دار است.

* and ns indicate significant effect and non-significant effect at 5% probability level, respectively.

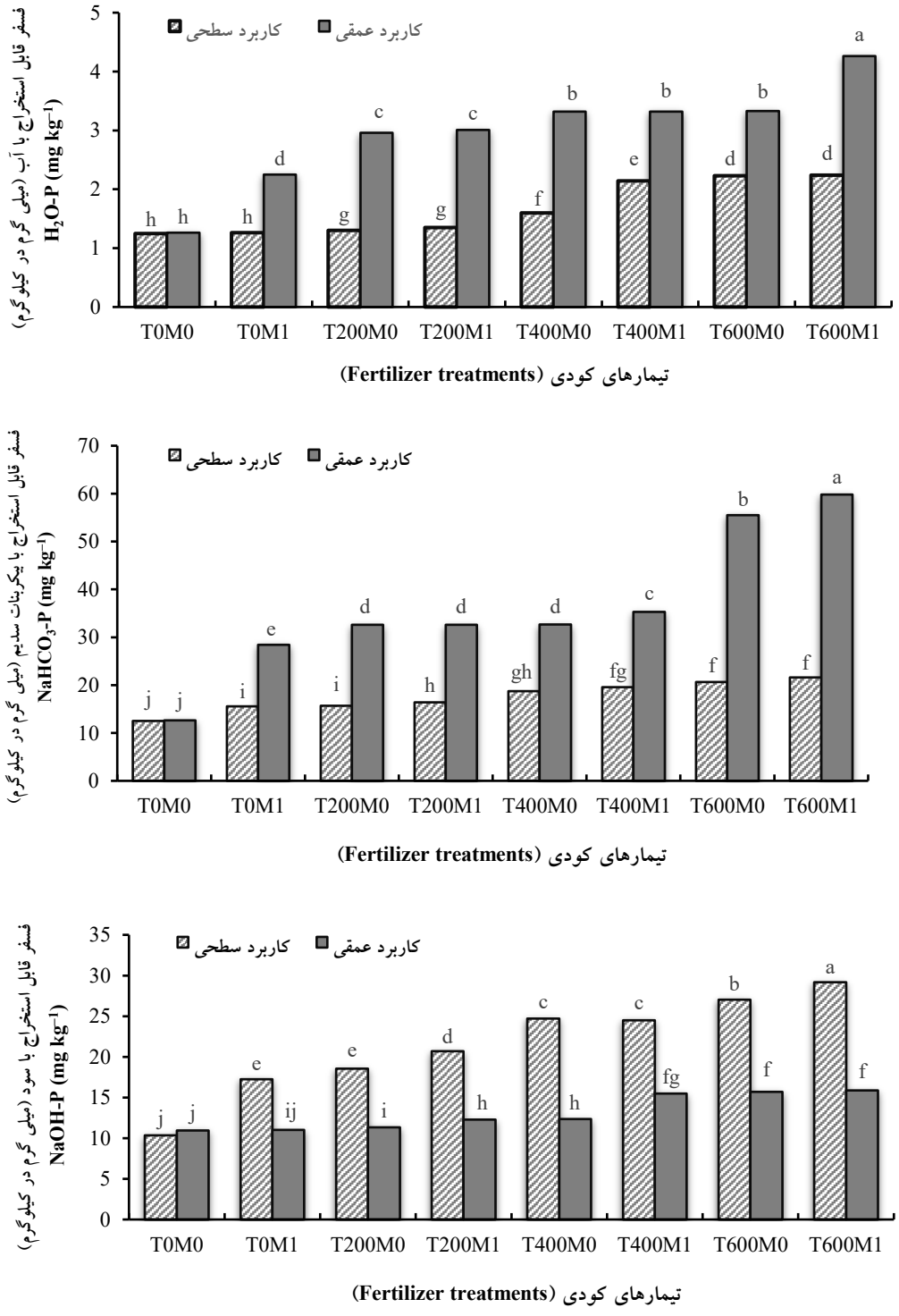
با سود) و فسفر غیرقابل دسترس (فسفر قابل استخراج با اسید و فسفر باقی‌مانده) تقسیم‌بندی شد. این تقسیم‌بندی بر اساس پژوهش Mao et al. (2023) انجام شده است.

نتایج نشان داد که در شرایط کاربرد سطحی و عمقی کود و همچنین کاربرد و عدم کاربرد کود گاوی، فسفر قابل استخراج با آب به‌طور معنی‌داری با افزایش سطح کودی افزایش یافت (شکل ۲). اما این افزایش در کاربرد عمقی کود بیشتر از کاربرد سطحی مشاهده شد. به‌طوری‌که کاربرد ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار TSP به همراه کود گاوی میزان فسفر قابل استخراج با آب را نسبت به تیمار بدون کود ۷۰/۴ درصد افزایش داد (شکل ۲). این افزایش برای کاربرد سطحی کود در این تیمار، ۴۴/۱ درصد نسبت به شاهد مشاهده شد. در هر دو عمق کاربرد کود، استفاده از کود گاوی سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل استخراج با آب شد (شکل ۲). Zhang et al. (2004) گزارش کردند که با افزودن مقادیر ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ تن در هکتار کمپوست، فسفر محلول در آب نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافت.

فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم نیز روندی مشابه با فسفر قابل استخراج با آب نشان داد و بر اساس نتایج تجزیه واریانس به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر آثار اصلی سطح و عمق کاربرد کود، کود گاوی و برهمکنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۳). همچنین نتایج نشان‌دهنده تأثیر افزایش سطح کاربرد کود بر افزایش فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم در شرایط کاربرد و عدم کاربرد کود گاوی در دو عمق مصرف کود شیمیایی بود. نتایج بیانگر افزایش فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم در کاربرد عمقی نسبت به کاربرد سطحی بود، به‌طوری‌که بیشترین میزان $NaHCO_3$-P در سطح ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار TSP همراه با کود گاوی به مقدار ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دیده شد. کاربرد کودهای آلی در تمامی سطوح کود TSP به جز سطح ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سبب افزایش معنی‌داری در میزان فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم شد (شکل ۲). Liu et al. (2023) بیان داشتند که کاربرد عمقی کود فسفر، اجزای فسفر معدنی به ویژه دی‌کلسیم فسفات، اکتاکلسیم فسفات را افزایش داد و همچنین سبب افزایش کارایی جذب فسفر نیز شد.

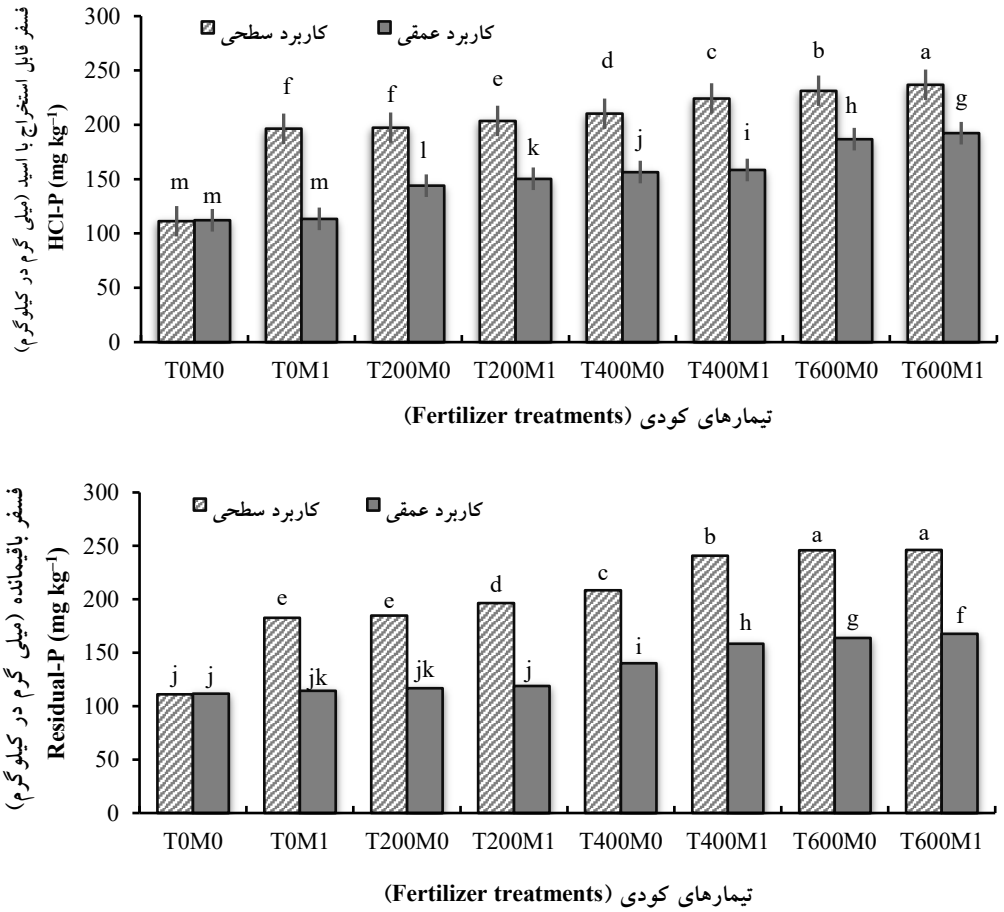
فسفر قابل استخراج با سود (نسبتاً قابل دسترس) روند متفاوتی نسبت به اجزای قابل دسترس (فسفر قابل استخراج با آب و بی‌کربنات سدیم) داشت. نتایج نشان داد که در هر دو عمق کاربرد کود، در شرایط کاربرد و بدون کاربرد کود آلی، با افزایش سطح کودی به ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل استخراج با سود نسبت به تیمار بدون کود شیمیایی و بدون کود آلی شد (جدول ۳). در مقابل کاربرد سطحی کود، تفاوت معنی‌داری برای مقدار NaOH-P در سطح ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در شرایط کاربرد و بدون کاربرد کود آلی ایجاد نکرد اما مقدار فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم در شرایط کاربرد و عدم کاربرد کود گاوی در سطح ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار تیمار کودی افزایش یافت. بیشترین میزان فسفر قابل استخراج با سود در تیمار ۶۰۰ کیلوگرم همراه با کود آلی با مقدار ۲۹/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد که میزان NaOH-P نسبت به تیمار بدون کود و کود گاوی ۶۲/۴ درصد افزایش یافت. درحالی‌که برای کاربرد عمقی این عدد برای تیمار ذکرشده ۳۵/۴ درصد بود (شکل ۲). افزودن کودهای آلی به تمامی سطوح TSP نیز میزان فسفر قابل استخراج با سود را در هر دو عمق کاربرد کود افزایش داد. آزادشدن برخی از عناصر از جمله آلومینیوم از کود در اثر کاهش pH و همچنین غلظت زیاد فسفر در ناحیه اطراف کود سبب افزایش کانی‌های فسفات آلومینیوم (Hooker et al., 1980; Sample, 1980) و در نتیجه افزایش در مقدار NaOH-P می‌شود.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فسفر قابل استخراج با اسید تحت تاثیر آثار اصلی سطح کاربرد کود، کود گاوی، عمق کاربرد و آثار برهمکنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۳). نتایج نشان داد در کاربرد سطحی کود در شرایط کاربرد و بدون کاربرد کود گاوی ، میزان فسفر قابل استخراج با اسید با افزایش سطح کودی نسبت به کاربرد عمقی افزایش یافت؛ به‌طوری‌که با کاربرد ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار کود TSP همراه با کود گاوی میزان HCl-P نسبت به تیمار بدون کود ۵۵/۶ درصد افزایش نشان داد. میزان افزایش



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر دو عمق کاربرد کودی (سطحی و عمقی) بر اجزای فسفر معدنی خاک در کاربرد سطوح مختلف کود سوپرفسفات تریپل (T) و کود آلی (M). T0: سطح کودی صفر، T200: ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، T400: ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار، T600: ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار، M0: بدون کود آلی، M1: کاربرد کود آلی ۳۰ تن در هکتار. حروف متفاوت روی ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 2. Mean comparisons of fertilizer application depth (surface and deep) effect on soil inorganic P fractions in different fertilizer levels of triple superphosphate (T) and organic manure (M). T0: no fertilizer, T200: 200 kg ha^{-1}, T400: 400 kg ha^{-1}, T600: 600 kg ha^{-1}, M0: no organic manure, M1: organic manure of 30 ton ha^{-1}. Bars with dissimilar letters are significantly different (LSD, $p < 0.05$).



ادامه شکل ۲.

Fig. 2. Continued

فسفر قابل استخراج با اسید در کاربرد عمقی کود نیز نسبت به تیمار بدون کود ۴۱/۶ درصد بود. در هر دو عمق کاربرد با افزودن کود گاوی به تمامی سطوح TSP، میزان فسفر قابل استخراج با اسید افزایش یافت (شکل ۲). کلسیم موجود در کودهای شیمیایی و آلی می‌تواند سبب افزایش در مقدار این بخش از فسفر معدنی خاک شود. Verma et al. (2005) بیان داشتند که در اثر استفاده از کود TSP و کلسیم موجود در این کود میزان فسفات کلسیم افزایش می‌یابد. همچنین Schwartz et al. (2005) گزارش کردند که کلسیم موجود در کودهای آلی موجب کاهش حلالیت فسفر شده و در نهایت باعث تجمع فسفات‌های کلسیم در خاک می‌شود. Shahriaripour (2022) بیان داشت که استفاده مداوم از فسفر، سبب تبدیل‌شدن آن به شکل‌های غیرقابل دسترس در باغات پسته شده و با افزودن ماده آلی به خاک می‌توان فسفر را بدون افزودن منبع جدید در خاک تأمین کرد.

تنها ۲۰–۱۰ درصد از کودهای فسفره مورد استفاده به‌وسیله گیاه استفاده شده و حدود ۸۰ درصد آن به‌صورت فسفر باقی‌مانده در خاک تجمع می‌یابد (Barrow, 1985). این تجمع می‌تواند در شکل آلی یا معدنی باشد که در درازمدت آزاد شده و در دسترس گیاه قرار گرفته و یا توسط گیاهان کشت‌شده بعدی مورد استفاده قرار گیرند (Black, 2013). فسفر باقی‌مانده به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر برهمکنش سطح کاربرد کود، کود گاوی و عمق کاربرد قرار گرفت ($p < ۰/۰۵$) (جدول ۳). نتایج نشان داد در هر دو عمق کاربرد کود، در شرایط کاربرد و بدون کاربرد کود گاوی ، فسفر باقی‌مانده به‌طور معنی‌داری در پاسخ به افزایش سطح کودی

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر فسفر قابل جذب خاک

Table 4. Variance analysis of the effect of experimental treatments on soil available P

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean squares
سوپرفسفات تریپل (Triple superphosphate, TSP)	3	60.78*
کود گاوی Cow manure	1	6.27*
عمق کاربرد Application depth	1	0.36ns
سوپرفسفات تریپل × کود گاوی × عمق کاربرد TSP × Cow manure × Application depth	3	0.78*
ضریب تغییر Coefficient of variation	–	5.38

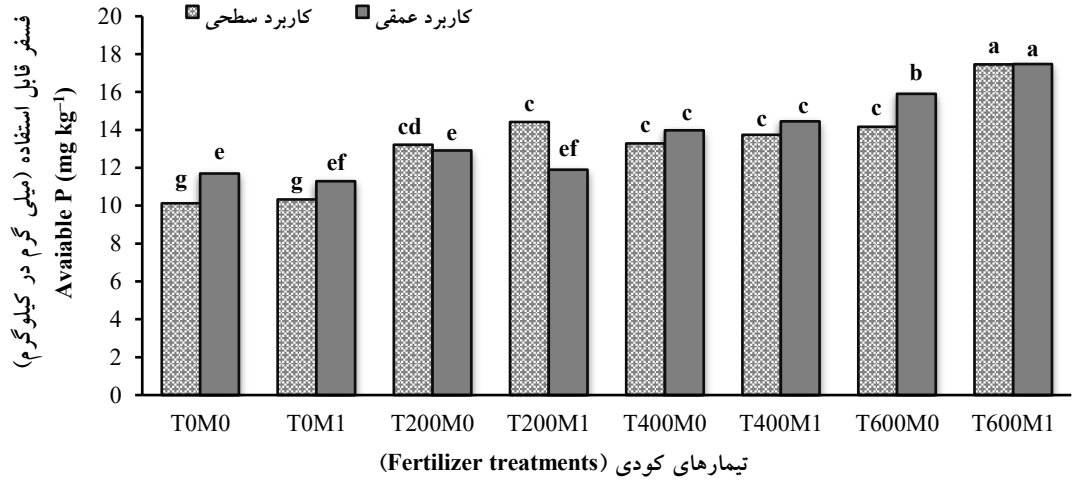
* و ns به‌ترتیب بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و نبود معنی‌دار است.

* and ns indicate significant effect and non-significant effect at 5% probability level, respectively.

افزایش یافت. اما این افزایش در کاربرد سطحی کود بیشتر از کاربرد عمقی مشاهده شد (شکل ۲). میزان افزایش فسفر باقی‌مانده در تیمار ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار با کود گاوی نسبت به تیمار بدون کود شیمیایی و بدون کود آلی ۵۴/۷ درصد بود که برای کاربرد عمقی ۳۲/۱ درصد مشاهده شد. از دلایل احتمالی این نتیجه این است که در کاربرد عمقی کود، احتمالاً نسبت کمتری از فسفر وارد فاز باقی‌مانده شده و بیشتر در فازهای قابل‌دسترس‌تر تجمع می‌یابد. نتایج Shabazi et al. (2020b) نیز نشان داد که در اثر کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کود شیمیایی فسفره، میزان فسفر باقی‌مانده افزایش یافت. با افزودن کود آلی به تمامی سطوح کود TSP، مقدار فسفر باقی‌مانده به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۲). در پژوهش Lemming et al. (2019) نیز مشاهده شد که استفاده درازمدت از کود آلی (کود گاوی) میزان فسفر باقی‌مانده را به‌طور چشم‌گیری نسبت به سایر تیمارها افزایش داد. به‌طور کلی کاربرد عمقی کود با افزایش بخش‌های در دسترس، فراهمی فسفر را افزایش داد درحالی‌که کاربرد سطحی بخش‌های نسبتاً در دسترس و غیرقابل دسترس را افزایش داد.

فسفر قابل استفاده

فسفر السن شاخص مهمی از فسفر قابل استفاده خاک است (Sun et al., 2022). این فسفر شاخص خوبی برای فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی با pH زیاد محسوب می‌شود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فسفر قابل استفاده تحت تأثیر برهمکنش سطح کاربرد کود، کود گاوی و عمق کاربرد کود قرار گرفت. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد عمقی و سطحی کود تأثیر معنی‌داری بر فسفر قابل استفاده نداشت (جدول ۴). با افزایش سطح کودی، میزان فسفر قابل استفاده در هر دو سطح کاربرد کودی افزایش داشت به‌طوری‌که بیشترین میزان فسفر قابل استفاده خاک نسبت به شاهد در تیمار ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار همراه با کود گاوی در هر دو عمق کاربرد سطحی (۴۱٪) و عمقی (۴۲٪) مشاهده شد (شکل ۳). Liu et al. (2023) بیان داشتند که مصرف سطحی کود، میزان فسفر قابل دسترس را در لایه ۸–۰ سانتی‌متری خاک افزایش داد اگرچه تفاوت معنی‌داری بین فسفر قابل دسترس در لایه ۲۸–۸ سانتی‌متری خاک در حالت کوددهی سطحی و بدون کوددهی مشاهده نکردند. همچنین نتایج نشان



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر دو عمق کاربرد کودی (سطحی و عمقی) بر فسفر قابل جذب خاک در کاربرد سطوح مختلف کود سوپر فسفات تریپل (T) و کود آلی (M). T0: سطح کودی صفر، T200: ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، T400: ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار، T600: ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار، M0: بدون کود آلی، M1: کاربرد کود آلی ۳۰ تن در هکتار. حروف متفاوت روی ستون‌ها، نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig 3. Mean comparisons of fertilizer application depth (surface and deep) effect on soil available P in different fertilizer levels of triple superphosphate (T) and organic manure (M). T0: no fertilizer, T200: 200 kg ha^{-1}, T400: 400 kg ha^{-1}, T600: 600 kg ha^{-1}, M0: no organic manure, M1: organic manure of 30 ton ha^{-1}. Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

داد که به غیر از سطح ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار TSP، در سایر سطوح کود فسفره کاربرد کود گاوی تغییر معنی‌داری در فسفر قابل استفاده خاک ایجاد نکرد. در سطح ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار و هر دو کاربرد سطحی و عمقی TSP، کاربرد کود گاوی سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل استفاده خاک شد. کاهش pH و افزایش حلالیت فسفات‌های کلسیم در اثر افزودن کود آلی می‌تواند از دلایل افزایش فسفر قابل دسترس خاک باشد (Hao et al., 2008). Sun et al. (2023) با بررسی خاک سرخ چین در کشت متناوب ذرت و گندم بیان داشتند که پس از گذشت ۲۸ سال در استفاده از کودهای شیمیایی و کود شیمیایی همراه با کاه و کلش، به‌ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود افزوده‌شده، میزان فسفر السن خاک به‌ترتیب ۵/۹ و ۶/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش یافت.

ارتباط بین شکل‌های شیمیایی فسفر و فسفر قابل استفاده خاک

آزمون همبستگی پیرسون برای شناخت سهم هر یک از اجزای معدنی فسفر در افزایش فسفر قابل استفاده انجام شد (جدول ۵). فسفر قابل استفاده با اجزای فسفر معدنی همبستگی مثبت و منفی معنی‌داری در سطوح احتمال یک و پنج درصد نشان داد (جدول ۵). همبستگی مشاهده‌شده میان شکل‌های مختلف فسفر و فسفر قابل استفاده احتمالاً از وجود یک رابطه پویا بین آن‌ها در خاک حکایت دارد. نتایج ارائه‌شده در جدول (۵) بیانگر ارتباط مثبت و معنی‌دار بین فسفر قابل جذب و فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک (ضریب همبستگی ۰/۴۸+، $p <$ ۰/۰۱) بود؛ به‌این مفهوم که با افزایش فسفر قابل استفاده، میزان فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک افزایش یافته است. بنابراین به‌نظر می‌رسد افزایش فسفر قابل استفاده خاک از راه مصرف بیشتر کود، شرایط را برای رسوب بیشتر فسفر به شکل HCl-P فراهم کرده است. در پژوهش‌های Verma et al. (2005) و Zhang et al. (2004) نیز به همبستگی مثبت بین فسفر قابل جذب و فسفر قابل استخراج با اسید اشاره شده است. همچنین همبستگی منفی و معنی‌دار بین فسفر قابل استفاده و H_2O-P نشان می‌دهد که کاهش

جدول ۵. ضرایب همبستگی بین اجزای معدنی فسفر با فسفر قابل جذب خاک

Table 5. The correlation coefficients between soil inorganic P fractions and available P

	فسفر قابل استخراج با آب H_2O-P	فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم $NaHCO_3$-P	فسفر قابل استخراج با سود NaOH-P	فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک HCl-P	فسفر باقی‌مانده Residual-P	فسفر قابل استفاده Available-P
فسفر قابل استخراج با آب H_2O-P	1					
فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم NaHCO3-P	ns	1				
فسفر قابل استخراج با سود NaOH-P	–0.54**	ns	1			
فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک HCl-P	0.48**	ns	–0.46**	1		
فسفر باقی‌مانده Residual-P	0.34*	–0.52**	ns	ns	1	
فسفر قابل استفاده Available-P	ns	ns	ns	0.48**	ns	1

* و ** به‌ترتیب بیانگر همبستگی معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد است.

* and ** indicate significant correlations at 5 and 1% probability levels, respectively.

مقدار NaOH-P با افزایش فسفر محلول خاک همراه بوده و بر همین اساس NaOH-P می‌تواند به عنوان یک منبع بخشی از فسفر مورد نیاز گیاه را تأمین کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که شکل‌های مختلف فسفر معدنی خاک تحت تأثیر سطوح مختلف کود فسفره قرار گرفتند، به‌طوری‌که با افزایش سطح کودی اجزای فسفر معدنی خاک افزایش یافتند. با این‌حال، روش کاربرد کود نقش تعیین‌کننده‌تری در افزایش فراهمی فسفر خاک داشت. کاربرد عمقی سوپرفسفات تریپل همراه با کود گاوی، فسفر را در فاز قابل دسترس برای گیاه قرار داد، درحالی‌که کاربرد سطحی منجر به تثبیت بیشتر فسفر و انتقال آن به شکل‌های غیرقابل دسترس شد. کاربرد عمقی کود در لایه توسعه ریشه گیاه، فراهمی فسفر برای پسته را افزایش داده و از تثبیت آن جلوگیری کرد. بنابراین، کاربرد عمقی (چال–کودی) سوپرفسفات تریپل همراه با کود آلی می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش فراهمی فسفر قابل استفاده و نیل به‌سمت مدیریت پایدار تغذیه در خاک‌های آهکی تحت کشت پسته باشد.

تشکر و سپاسگزاری

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شد که بدین وسیله قدردانی می‌گردد.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده References

1. Adnan, M., Fahad, S., Saleem, M.H., Lal, R., 2025. Sustainable phosphorus management in calcareous soils: problems and prospects. J. Plant Nutr. 1–22. http://doi.org/10.1080/01904167.2025.2477269.
2. Barrow, N.J., 1985. Reaction of onions and cations with variable–charge soils. Adv. Agron. 38, 183–230.
3. Black, C.A., 2013. Soil Fertility Evaluation and Control. CRC Press, Boca Raton, NY, 731p.
4. Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agron. J. 54(5), 464–465. http://dx.doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x.
5. Chen, M., Graedel, T.E., 2016. A half-century of global phosphorus flows, stocks, production, consumption, recycling, and environmental impacts. J. Glob. Environ. Change. 36, 139–152. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.12.005.
6. Gatiboni, L.C., Schmitt, D.E., Tiecher, T., Veloso, M.G., dos Santos, D.R., Kaminski, J., Brunetto, G., 2021. Plant uptake of legacy phosphorus from soils without P fertilization. Nutr. Cycling Agroecosyst. 119, 139–151. https://doi.org/10.1007/s10705-020-10109-2.
7. Grossman, R.B., Reinsch, T.G., 2002. Bulk density and linear extensibility. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods. ASA/SSSA, Madison, WI, pp. 202–228.
8. Hao, L., Zhang, J., Christie, P., Li, X., 2008. Response of two maize inbred lines with contrasting phosphorus efficiency and root morphology to mycorrhizal colonization at different soil phosphorus supply levels. J. Plant Nutr. 31(6), 1059–1073.
9. Hedley, M.J., Stewart, J.W.B., Chauhan, B.S., 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. Soil Sci. Soc. Am. J. 46(5), 970–976. https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x.
10. Heidari, A., Alizadeh, H.H.A., Yazdanpanah, A.R., Parian, J.A., 2017. The effect of different tillage methods and fertilizer application on soil physical properties and corn yield. J. Water Soil Sci. 20(78), 103–112. https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.78.103. (In Persian with English abstract)
11. Hooker, M.L., Peterson, G.A., Sander, D.H., Daigger, L.A., 1980. Phosphate fractions in calcareous soils as altered by time and amounts of added phosphate. Soil Sci. Soc. Am. J. 44(2), 269–277.
12. Lemming, C., Oberson, A., Magid, J., Bruun, S., Scheutz, C., Frossard, E., Jensen, L.S., 2019. Residual phosphorus availability after long-term soil application of organic waste. Agric. Ecosyst. Environ. 270, 65–75.
13. Liu, C., Yan, H., Wang, W., Han, R., Li, Z., Lin, X., Wang, D., 2023. Layered application of phosphate fertilizer increased winter wheat yield by promoting root proliferation and phosphorus accumulation. Soil Tillage Res. 225, 105546. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105546.
14. Mao, Y., Hu, W., Li, Y., Li, Y., Lei, B., Zheng, Y., 2023. Long-term cattle manure addition enhances soil-available phosphorus fractions in subtropical open-field rotated vegetable systems. J. Front. Plant Sci. 14, 1138207. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1138207.
15. Mohseni, A., Mirseyed, H.H., Abbasi, F., 2013. Comparison of fertigation with surface broadcast fertilizer method in water, fertilizer use efficiency, yield, yield components of corn and losses of nitrogen. J. Water Soil 26(5), 1181–1189. https://doi.org/10.22067/jsw.v1391i0.17046. (In Persian with English abstract)
16. Mou, X.M., Wu, Y., Niu, Z., Jia, B., Guan, Z.H., Chen, J., Li, H., Cui, H., Kuzyakov, Y., Li, X.G., 2020. Soil phosphorus accumulation changes with decreasing temperature along a 2300 m altitude gradient. Agric. Ecosyst. Environ. J. 301, 107050. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107050.
17. Murphy, J.A.M.E.S., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chim. Acta. J. 27, 31v36. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5.
18. Rhoades, J.D.,1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, R.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods. ASA/SSSA, Madison, WI, pp. 417–435.
19. Sample, E.C., Soper, R.J., Racz, G.J., 1980. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: Khasawneh, F.E., Sample, E.C., Kamprath, E.J. (Eds.), The Role of Phosphorus in Agriculture. ASA, CSSA, and SSSA Books. pp. 263–310. https://doi.org/10.2134/1980.roleofphosphorus.c12.
20. Salardini, A., 2009. Soil Fertility. Tehran University Press, Tehran. (In Persian)
21. Schwartz, R.C., Dao, T.H., 2005. Phosphorus extractability of soils amended with stockpiled and composted cattle manure. J. Environ. Qual. 34(3), 970–978.
22. Shahbazi, K., Romić, M., Ferguson, R., Suvannang, N., 2020a. Standard operating procedure for soil calcium carbonate equivalent - Volumetric Calcimeter method. Rome, FAO, 1, 1–13. https://openknowledge.fao.org/items/c4ed881b-6edf-41f5-a11a-a30f5fadfa2d.
23. Shahbazi, F., Hosseinpur, A.R., Motaghian, H.R., 2020b. The interaction between P fertilizer and vermicompost on the availability, fractions of P and *Zea mays* L. growth indices in a calcareous soil. J. Water Soil Sci. 24(1), 57–68. (In Persian with English abstract)

24. Shahbazi, K., Besharati, H., 2013. Overview of agricultural soil fertility status of Iran. J. Land Manage. 1(1), 1–15. https://doi.org/10.22092/lmj.2013.100072. (In Persian with English abstract)
25. Shahriaripour, R., 2022. Investigation of chemical forms of phosphorus for soil phosphorus management in pistachio orchards. Agric. Eng. 45(2), 167–181. (In Persian with English abstract)
26. Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H. (Eds.), 1996. Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods. ASA/SSSA, Madison, WI, 1390 p.
27. Sui, Y., Thompson, M.L., Shang, C., 1999. Fractionation of phosphorus in a Mollisol amended with biosolids. Soil Sci. Soc. Am. J. 63(5), 1174–1180.
28. Thomas, G.W., 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A. and Loeppert, R.H. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods. ASA/SSSA, Madison, WI, pp. 475–490.
29. Verma, S., Subehia, S.K., Sharma, S.P., 2005. Phosphorus fractions in an acid soil continuously fertilized with mineral and organic fertilizers. Biol. Fertil. Soils. 41(4), 295–300. http://doi.org/10.1007/s00374-004-0810-y.
30. Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37(1), 29–38. http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003.
31. Zhang, F., Kang, S., Zhang, J., Zhang, R., Li, F., 2004. Nitrogen fertilization on uptake of soil inorganic phosphorus fractions in the wheat root zone. Soil Sci. Soc. Am. J. 68, 1890–1895.