

Evaluation of the Effects of Monopotassium Phosphate and Cow Manure on Phosphorus Dynamics and Soil Chemical Properties

A. Barvar¹, N. Boroomand^{1*}, M. Hejazi-Mehrizi¹, M. Sadat Hosseini²

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(*- Corresponding Author Email: n.broomand@uk.ac.ir)

2- Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran

Received: 21 May 2025

Revised: 11 August 2025

Accepted: 19 August 2025

Available Online: 19 August 2025

How to cite this article:

Barvar, A., Boroomand, N., Hejazi Mehrizi, M., & Sadat Hosseini, M. (2025). Evaluation of the effects of monopotassium phosphate and cow manure on phosphorus dynamics and soil chemical properties. *Journal of Water and Soil*, 39(3), 275-289. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93603.1483>

Introduction

Phosphorus as a vital nutrient for plant growth and development, contributes significantly to processes like photosynthesis, energy production, and root development. In soil, phosphorus mainly exists as phosphate, though much of it is not accessible to plants. There are several methods for providing phosphorus to plants: such as chemical, organic, and combination of chemical and organic phosphorus fertilizers. The chemical fertilizers rapidly supply plants with absorbable phosphorus. However, excessive use of the fertilizer can degrade soil quality and cause environmental pollution. Manure and compost as organic fertilizers release phosphorus slowly in the soil. In addition to providing phosphorus, they enhance the chemical and biological properties of the soil. Using combination of chemical and organic fertilizers can increase phosphorus availability, promote soil health, and improve the sustainability of agricultural production. Given the importance of understanding the various forms of phosphorus in the soil for better plant nutrient management, as well as evaluating the combined application of different levels of chemical fertilizers and animal manure on the different forms of phosphorus, this study was conducted to examine the impact of these two phosphorus sources on its dynamics in the soil.

Materials and Methods

To investigate the effects of mono-potassium phosphate (MKP) fertilizer on various forms of phosphorus in soil, a completely randomized factorial experimental design was conducted. The treatments included four levels of MKP fertilizer (0, 70, 140, and 210 kg ha⁻¹) and two levels of cow manure (0 and 40 tons ha⁻¹). The impacts of the treatments on soil electrical conductivity (EC), pH, organic carbon (OC), and different phosphorus (P) fractions (water-extractable, NaOH-extractable, HCl-extractable, NaHCO₃-extractable, Olsen-P, and residual P) were examined. After harvesting, soil samples were taken from a depth of 20 cm below the initial fertilizer application site to examine the different fractions of soil phosphorus. A composite soil sample was taken from each treatment and after being transported to the laboratory, air-dried and passed through a 2 mm sieve.

Results and Discussion

Overall, the results indicated that the addition of MKP and cow manure increased the soil EC and organic matter content. MKP fertilizer and cow manure significantly influenced various P fractions in the soil. Organic carbon content notably increased in the presence of cow manure. However, the interaction of high levels of phosphorus and cow manure resulted in a decrease in soil electrical conductivity (EC). The highest and lowest P concentrations were observed in the water-extractable fraction and residual P fraction, respectively. Organic matter predominantly enhanced the concentration of various P fractions, particularly water-soluble P. Organic matter



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93603.1483>

exhibited a positive and significant correlation with water-extractable P (0.57), NaHCO_3 -extractable P (0.44), NaOH-extractable P (0.44), and HCl-extractable P (0.6). The most pronounced effect of organic matter was on the water-extractable fraction, where its interaction with the MKP levels of 0, 70, 140, and 210 kg ha⁻¹ resulted in respective increases of 35%, 51%, 36%, and 62% compared to the control. The inclusion of manure in the soil boosts the levels of available, water-extractable phosphorus, as well as phosphorus extractable with bicarbonate and sodium, and also increases residual phosphorus. Furthermore, higher levels of monopotassium phosphate fertilizer enhance soil electrical conductivity and extractable phosphorus. However, in some instances, such as with acid-soluble phosphorus, they can lead to a decrease in the concentration. In general, the combined application of manure and monopotassium phosphate improved soil phosphorus content; however, their impact on other soil properties, such as pH and organic carbon may vary.

Conclusion

The simultaneous use of chemical and organic fertilizers can had a significant positive effect on the availability of phosphorus in the soil. As highlighted in the text, animal manure enhanced phosphorus availability to plants due to its phosphorus content and its influence on soil phosphorus solubility. Additionally, the observed sequence of phosphorus concentrations in different soil fractions (water > sodium > bicarbonate > acid > residue) reflected the distinct effects of these phosphorus sources, which, when combined, can improve the availability of this nutrient. Another important consideration was the need for further research to determine the optimal levels of these fertilizers. This would help identify the most effective combination and application rates for improving soil fertility and boosting agricultural productivity. Overall, such studies enable farmers and researchers to develop more effective strategies for managing phosphorus in soil, thereby contributing to the maintenance of soil health and higher agricultural yields.

Keywords: Cow manure, Mono-potassium phosphate, Olsen P, Organic carbon, Phosphorus

ارزیابی اثرات مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر پویایی فسفر و ویژگی‌های شیمیایی خاک

افسانه برور^۱ - ناصر برومند^{۱*} - مجید حجازی مهریزی^۱ - محمد سادات حسینی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

چکیده

فسفر یکی از عناصر غذایی کلیدی در خاک به شمار می‌رود و مطالعه تأثیر کودهای فسفره بر نحوه توزیع و تحرک آن در خاک، می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف کود، ارتقاء عملکرد محصولات کشاورزی، و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از کاربرد بیش از حد کودهای شیمیایی ایفا کند. به‌منظور بررسی تأثیر مصرف کود مونوپتاسیم فسفات و کود آلی بر اشکال مختلف فسفر در خاک، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تیمارها شامل چهار سطح کود مونوپتاسیم فسفات (صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار) و دو سطح کود گاوی (صفر و ۳۰ تن در هکتار) بود. تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر میزان هدایت الکتریکی، pH، کربن آلی و اشکال مختلف فسفر در خاک (فرم قابل استخراج با آب و سود و اسید کلریدریک و بی‌کربنات، فسفر اولسن و فسفر باقیمانده) بررسی شد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن مونوپتاسیم فسفات و کود گاوی به خاک سبب افزایش میزان هدایت الکتریکی و ماده آلی خاک شد. نتایج نشان داد که کود مونوپتاسیم فسفات باعث افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی (تا ۴۹/۲ واحد) و کود دامی موجب افزایش کربن آلی خاک تا ۱،۷۴ درصد شد. حضور کود دامی در سطح ۲۱۰ کیلوگرم کود شیمیایی موجب کاهش هدایت الکتریکی نسبت به کاربرد تنها کود شیمیایی شد. بیشترین مقدار فسفر در بخش قابل استخراج با آب (Water-P) مشاهده شد که با کاربرد هم‌زمان کود دامی و فسفر شیمیایی، نسبت به شاهد، به‌ترتیب تا ۳۵، ۵۱، ۳۶/۹ و ۶۲/۱ درصد افزایش یافت. فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات (NaHCO₃-P) نیز در حضور کود دامی تا ۲۸/۳ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد. در مقابل، فسفر قابل حل در اسید کلریدریک (HCl-P) با افزایش سطح فسفر کاهش یافت؛ به‌ویژه در سطح ۲۱۰ کیلوگرم کود، نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری مشاهده شد. فسفر باقیمانده (Residual-P) نیز با کاربرد ۲۱۰ کیلوگرم فسفر و کود دامی، تا ۴۸،۵ درصد افزایش یافت. همبستگی معنی‌داری بین کربن آلی و فسفرهای قابل استخراج با آب ($r=0.57$) و اسید کلریدریک ($r=0.60$) مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: فرکشن‌بندی فسفر، فسفر محلول در آب، کود آلی، فسفر اولسن

(Bennett, 2016).

مقدمه

در کشاورزی پیشرفته، کشاورزان از کودهای شیمیایی فسفات‌ها برای افزایش رشد و عملکرد محصول استفاده می‌کنند. استفاده بیش از حد کودهای فسفره باعث تجمع بیش از حد فسفر در خاک می‌شود (Jiang *et al.*, 2021). مطالعات نشان داده که تنها ۱۰ تا ۲۰ درصد از کل فسفر اعمال شده به خاک توسط گیاهان جذب می‌شود (Helfenstein *et al.*, 2018). بخشی از فسفر وارد شده توسط کودها پس از آیشویی

فسفر (P) یک عنصر غذایی پرمصرف اساسی است که برای رشد و توسعه بهینه گیاه در بخش کشاورزی مورد نیاز است (Wahid *et al.*, 2020). فراهمی فسفر یک مسئله جدی است و عامل اصلی محدود کننده کاهش عملکرد محصول در اکوسیستم کشاورزی مدرن در نظر گرفته می‌شود (Metson, MacDonald, Haberman, Nesme, &

۱- گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
(*)- نویسنده مسؤل: Email: n.broomand@uk.ac.ir

۲- گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

از خاک خارج و وارد آب شده و بر کیفیت آن تأثیر می‌گذارد. مطالعات مختلف همچنین گزارش دادند که استفاده از مقادیر زیاد کودهای شیمیایی فسفر ممکن است سبب کاهش فراهمی عناصر غذایی ضروری مانند آهن، منگنز و روی شده (Fan, Zhou, Chen, Tang, & Xie, 2021) و این به نوبه خود جذب این عناصر توسط گیاهان را کاهش می‌دهد (Montalvo, Degryse, Da Silva, Baird, & McLaughlin, 2016). از بین کودهای مختلف فسفره، اخیراً مونوپتاسیم فسفات (KH_2PO_4) به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان منبع فسفر و پتاسیم در تولید محصولات باغی مورد استفاده قرار گرفته است (Meng, Xu, Dong, Wang, & Wang, 2017). با این حال، تفاوت قابل توجهی در مقدار توصیه شده و میزان کاربرد در خاک وجود داشته و در برخی موارد، اختلاف بیش از ده برابری در این مقدار گزارش شده است (Zhao & Tao, 2015).

کودهای آلی با تأمین همزمان ماده آلی و عناصر غذایی و بهبود فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک، می‌تواند نقش مهمی در بهبود خاک ایفا کند (Xiong et al., 2018). در مقایسه با کود شیمیایی، افزودن کودهای آلی به خاک می‌تواند علاوه بر بهبود حاصلخیزی خاک، میزان کربن آلی را نیز افزایش داده که این امر به‌عنوان یک عامل کلیدی در تعیین خواص و بهره‌وری خاک مورد استفاده قرار گیرد (Qiu, Wang, Huang, & Lin, 2014; Wang et al., 2017). فسفر موجود در ترکیبات آلی از یک طرف کاهش میزان اسیدیته خاک در پی آزاد شدن اسیدهای آلی در زمان تجزیه این مواد و از طرف دیگر سبب افزایش غلظت فسفر قابل دسترس در خاک می‌شود (Martins, Santos, Almeida, & Costa, 2008). کود گاوی منبع مناسب فسفر برای محصولات کشاورزی (Singh, Pandey, & Singh, 2011) و یک منبع جایگزین عالی برای کود شیمیایی فسفر است. استفاده از کود دامی در ترکیب با کود شیمیایی فسفر باعث افزایش فراهمی فسفر و بهبود عملکرد محصول می‌شود (Li et al., 2017; Tian et al., 2013). در مورد تأثیر استفاده از کودهای آلی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک، کاهش میزان اسیدیته (Mahmood et al., 2017)، افزایش ۴۴ درصدی ماده آلی خاک (Gangwar, Singh, Sharma, & Tomar, 2006) و افزایش فراهمی عناصر غذایی (Chiu, Ye, & Wong, 2006) گزارش شده است. از طرفی با توجه به اهمیت تأثیر میزان pH خاک و همچنین محتوای ماده آلی بر فراهمی و رفتار عنصر فسفر در خاک (Jindo et al., 2023)، به نظر می‌رسد که استفاده از کودهای آلی بر میزان فراهمی و همچنین فرم‌های مختلف این عنصر تأثیرگذار باشند.

به‌منظور مدیریت منطقی فسفر از دیدگاه حاصلخیزی و تغذیه گیاه و زیست‌محیطی؛ آگاهی از اشکال مختلف این عنصر در خاک ضروری به نظر می‌رسد (Cordell, Drangert, & White, 2009). چرا که این اطلاعات برای تشخیص فراهمی زیستی و تحرک فسفر در خاک مهم است (González Medeiros, Pérez Cid, & Fernández, 2015).

در مقایسه با منابع شیمیایی فسفر، منابع کود آلی برای تبدیل فسفر غیرقابل دسترس به فسفر قابل دسترس گیاه مفید هستند (Chen et al., 2021). این منابع جایگزین فسفر همچنین می‌توانند با تغییر ظرفیت جذب بر سینتیک فسفر در خاک تأثیر بگذارند (Gatiboni et al., 2019). جلالی و رنجبر (Jalali & Ranjbar, 2010) گزارش کردند که واکنش فسفر افزوده شده به خاک‌های آهکی کاملاً سریع بوده و بخش محلول در آب به‌دلیل ظرفیت جذب بالای خاک در مدت‌زمان بسیار کوتاهی افزایش قابل توجهی داشت. ابوالفضلی و همکاران (Abolfazli, Forghani, & Norouzi, 2012) تأثیر منابع مختلف آلی و شیمیایی فسفر بر اشکال مختلف این عنصر در خاک آهکی را بررسی و گزارش کردند که استفاده از منابع شیمیایی و آلی به‌صورت به‌صورت همزمان بر فسفر اولسن بیشترین تأثیر را داشت. بررسی اثر افزودن فسفر بر بخش‌های مختلف فسفر در خاک برای درک عرضه و پویایی فسفر خاک در زمین‌های کشاورزی مهم است. افزودن مقادیر مختلف فسفر به خاک از طریق کودهای شیمیایی بالطبع بر اشکال مختلف این عنصر تأثیرگذار می‌باشد. حال در کنار افزودن منابع شیمیایی، کاربرد منابع آلی همانند کود دامی نیز می‌تواند بر رفتار و اشکال مختلف این عنصر غذایی پرمصرف در خاک مؤثر باشد.

با توجه به نقش کلیدی فسفر در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه، بهینه‌سازی مدیریت تغذیه فسفری خاک، به‌ویژه در شرایط کم‌بازدهی منابع، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در کشاورزی پایدار به شمار می‌رود. پژوهش حاضر با تمرکز بر برهم‌کنش سطوح مختلف کود مونوپتاسیم فسفات و کود دامی، به‌دنبال درک عمیق‌تری از رفتار اشکال مختلف فسفر در خاک و اثرات متقابل مواد آلی و معدنی در بهبود فراهمی این عنصر حیاتی است. اهمیت این مطالعه از آن‌جا ناشی می‌شود که برخلاف رویکردهای متداول که تنها بر فسفر اولسن تمرکز دارند، در این پژوهش از رویکرد جامع فرکشن‌بندی استفاده خواهد شد تا همه اشکال فعال و غیرفعال فسفر مورد بررسی قرار گیرد. نوآوری اصلی این تحقیق در ارزیابی هم‌زمان اثر کود شیمیایی و ماده آلی بر توزیع اشکال مختلف فسفر (از جمله فسفر قابل استخراج با آب، بی کربنات، سود، اسید کلریدریک و فسفر باقیمانده) و تحلیل دقیق تعامل

آن‌ها با کربن آلی و pH خاک نهفته است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق اثر کاربرد مقادیر مختلف کود مونوپتاسیم فسفر و کود گاوی بر اشکال مختلف این عنصر در خاک باغ‌های پسته واقع در کاظم آباد استان کرمان با مختصات جغرافیایی ۲۹° ۳۴' ۳۰" و ۵۸° ۴۸' ۴۶" مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق در قالب یک طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل چهار سطح کود مونوپتاسیم فسفات (صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار) و کود گاوی (صفر و ۳۰ تن در هکتار) با سه تکرار بودند. زمین مورد مطالعه باغ پسته بوده که تیمارهای کودی (شامل سولفات پتاسیم و همچنین فرم سولفات عناصر میکرو شامل آهن و مس و منگنز و روی) در زمستان و تا اواخر بهمن‌ماه سال ۱۴۰۰ اعمال گردیدند. لازم به ذکر است که تمامی کودهای فوق به‌جز کودهای نیتروژنی در زمستان و در محل سایه‌انداز درختان به خاک اضافه شدند. کود سولفات آمونیوم از اوایل اردیبهشت‌ماه به همراه آب آبیاری و در چند نوبت مصرف شد. کود مونوپتاسیم فسفات و کود دامی به‌صورت سطحی در خاک پخش شدند (مونوپتاسیم فسفات در پنج سانتی‌متری سطح خاک جایگذاری شد).

پس از برداشت محصول نسبت به نمونه‌برداری خاک از عمق ۲۰ سانتی‌متر پایین‌تر از محل کارگذاری اولیه کود جهت بررسی بخش‌های مختلف فسفر خاک اقدام گردید. از هر تیمار یک نمونه خاک مرکب برداشت شده و پس از انتقال به آزمایشگاه هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل pH در گل اشباع (Thomas, 1996)، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع

(Rhoades, 1996) و کربن آلی به روش اکسیداسیون مرطوب (Wakley & Black, 1934) اندازه‌گیری شدند. اشکال مختلف فسفر در خاک به روش (Hedley, Stewart, & Chauhan, 1982) اندازه‌گیری شد (جدول ۱). در ضمن فسفر قابل دسترس خاک با استفاده از روش اولسن (محلول ۰/۵ نرمال بی‌کربنات سدیم در pH 8.5) استخراج گردید (Olsen, 1954).

میزان فسفر در عصاره‌ها پس از عصاره‌گیری توسط روش مورفی و ریلی (Murphy & Riley, 1962) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر و در طول موج ۶۶۰ نانومتر قرائت شد. درنهایت نتایج به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار SPSS 19 تجزیه و تحلیل شده و برای مقایسه میانگین نیز از آزمون Tukey و در سطح احتمال معنی‌داری ۹۵ درصد استفاده شد. برای بررسی همبستگی بین پارامترها نیز از روش پیرسون استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه و تحلیل برخی از خصوصیات شیمیایی خاک‌ها در جدول ۱ بیان شده‌اند. لازم به ذکر است که بافت خاک‌ها نیز clay بود (جدول ۲).

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثرات ساده سطوح کود مونوفسفات پتاسیم و برهمکنش مونوپتاسیم و ماده آلی بر pH خاک به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار بود. اثرات ساده و متقابل این تیمارها بر سایر پارامترهای اندازه‌گیری شده در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

جدول ۱- خلاصه روش اندازه‌گیری اشکال شیمیایی فسفر در خاک

Table 1- Summary of the method of measuring the chemical forms of phosphorus in the soil

بخش Fraction	نوع فسفر Phosphorus type	روش عصاره‌گیری Extraction method
1	Water-P	به ۰/۵ گرم خاک ۱۵ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه کرده و پس از ۱۶ ساعت عصاره‌گیری شد. To 0.5 g of soil, 15 mL of distilled water was added, and extraction was carried out after 16 hours.
2	NaHCO ₃ -P	به خاک مرحله قبل ۱۵ میلی‌لیتر بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار با pH 8.2 اضافه کرده و بعد از ۱۶ ساعت عصاره‌گیری شد. To the soil from the previous step, 15 mL of 0.5 M sodium bicarbonate (pH 8.2) was added, and extraction was carried out after 16 hours.
3	NaOH-P	به خاک مرحله قبل ۱۵ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۰/۵ مولار اضافه شده و پس از ۱۶ ساعت عصاره‌گیری شد. To the soil from the previous step, 15 mL of 0.5 M sodium hydroxide was added, and extraction was carried out after 16 hours.
4	HCl-P	به خاک مرحله قبل ۱۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۱ مولار اضافه شده و بعد از ۱۶ ساعت عصاره‌گیری شد. To the soil from the previous step, 15 mL of 1 M hydrochloric acid was added, and extraction was carried out after 16 hours.
5	Residual-P	به خاک باقیمانده ۳ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ و ۱ میلی‌لیتر پرکلریک اسید اضافه شده و پس از ۱۶ ساعت حرارت داده شده و عصاره‌گیری شدند. To the remaining soil, 3 mL of concentrated nitric acid and 1 mL of perchloric acid were added, then heated for 16 hours, and extraction was carried out.

جدول ۲- نتایج آنالیز شیمیایی اولیه خاک‌ها

Table 2- Result of initial chemical analysis of soils

پارامتر Parameters	P210OM1	P210OM0	P140OM1	P140OM0	P70OM1	P70OM0	P0OM1	P0OM0
کربنات کلسیم معادل Calcium Carbonate equivalent (percent)	18.5	22	17.5	22.5	18	20.5	15.5	22.5
نیتروژن کل Total nitrogen (percent)	727	312	658	419	1089	472	955	423
پتاسیم قابل دسترس Available potassium (mg.kg ⁻¹)	370	216	385	295	340	285	310	380

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

Table 3- Variance analysis of the effect of experimental treatments on soil chemical properties

منابع تغییرات Sources of variances	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Mean squares								اسیدیته خاک Soil pH
		Residual-P	HCl-P	NaOH-P	NaHCO ₃ -P	H ₂ O-P	Olsen-P	کربن آلی Organic matter	هدایت الکتریکی Electrical conductivity	
سطوح فسفر P levels	3	10522**	396.4**	587.4**	928.4**	17.9**	4481**	0.106**	28.49**	0.077**
ماده آلی Organic matter	1	12382**	396.2**	3440**	1909**	55.1**	2320.2**	1.74**	196.19**	0.029 ^{ns}
فسفر × ماده آلی Organic × P matter	3	2420**	156.3**	1326**	225.3**	2.65**	1565.3**	0.062**	46.74**	0.037*
خطا Error	16	1.02	1.32	1.24	11.26	0.055	9.62	0.005	0.144	0.011
ضریب تغییرات Coefficient of variances		11.6	10.3	7.5	12.2	9.1	10.1	9.3	8.8	6.2

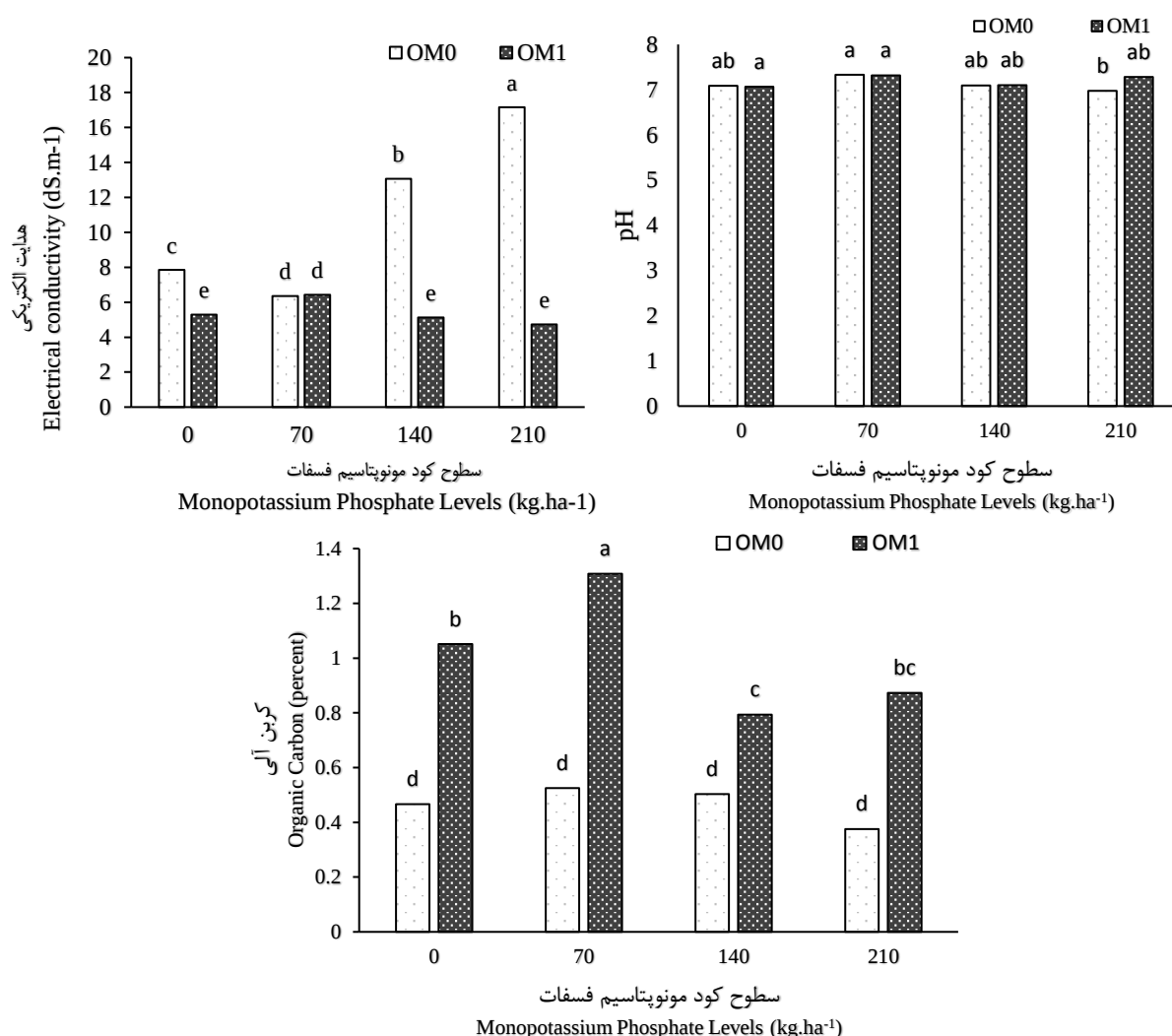
ns, * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد می‌باشند.

ns, * and ** are non-significance and significance at five and one percent level, respectively.

نتیجه‌ای تقریباً قابل انتظار بود. حمد و همکاران (Hammad *et al.*, 2020) به بررسی تأثیر کودهای آلی و شیمیایی مختلف بر ویژگی‌های شیمیایی خاک پرداخته و گزارش کردند که میزان کربن آلی خاک پس از استفاده از ترکیبات آلی در مقایسه با شاهد افزایش یافت. بررسی تأثیر هر یکی از سطوح کود فسفره با شاهد و همچنین حضور و عدم حضور ماده آلی در این مطالعه نتوانست تأثیر آن‌چنانی بر میزان pH خاک داشته باشد. نکته قابل توجه اما کاهش میزان هدایت الکتریکی در برهمکنش حضور ماده آلی با دو سطح ۱۴۰ و ۲۱۰ کود فسفره بود. افزایش میزان هدایت الکتریکی در خاک پس از افزودن کود مونوپتاسیم فسفات نتیجه‌ای دور از انتظار نبود.

نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مختلف کود مونوپتاسیم فسفات و کود دامی نشان داد که سطوح مختلف مونوپتاسیم فسفات و کود دامی تأثیر معنی‌داری بر میزان pH خاک نداشتند. هدایت الکتریکی خاک به شدت تحت تأثیر سطوح کود مونوپتاسیم فسفات بوده و با افزایش میزان این کود در خاک هدایت الکتریکی نیز افزایش معنی‌داری داشت. برعکس روند مشاهده شده در مورد هدایت الکتریکی، کربن آلی خاک همان‌گونه که انتظار می‌رفت تحت تأثیر کود دامی بوده و حضور آن در تمامی سطوح کود مونوپتاسیم فسفات سبب افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک شد (شکل ۱).

افزایش میزان کربن آلی خاک در تیمارهای حاوی کود دامی،

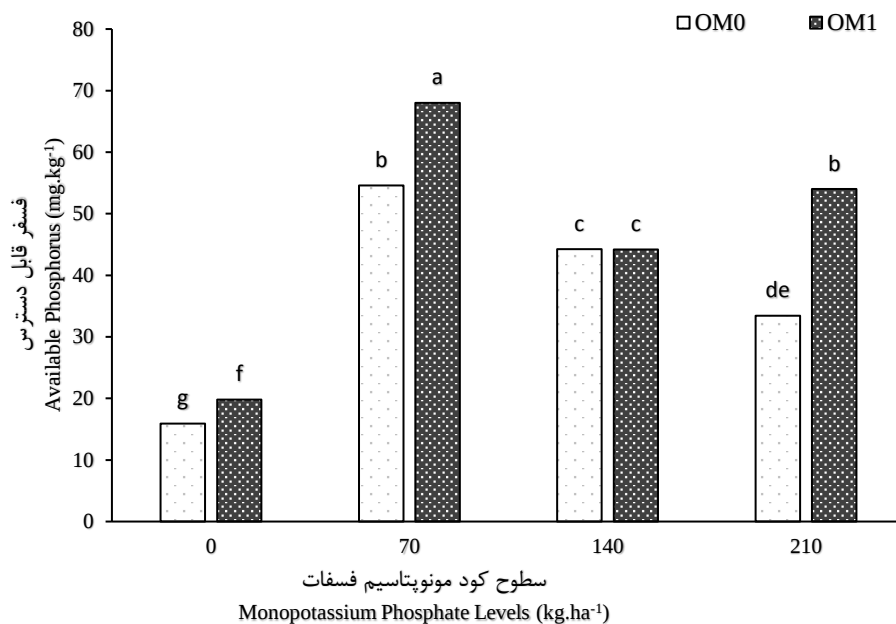


شکل ۱- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر pH، هدایت الکتریکی و کربن آلی خاک (ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 1- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on pH, electrical conductivity and soil organic carbon

میزان کربن آلی شود. البته که این مورد نیازمند بررسی بیشتر در زمینه فعالیت‌های میکروبی در خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد. نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی نشان داد که در شرایط کاربرد و عدم کاربرد ماده آلی، کاربرد سطوح مختلف کود فسفره سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل جذب خاک شد. کاربرد کود دامی در سه سطح صفر (۲۲ درصد)، ۷۰ (۳۴/۳ درصد) و ۲۱۰ (۶۳/۶ درصد) کیلوگرم در هکتار کود سبب افزایش فسفر قابل دسترس خاک شد (شکل ۲).

همچنین افزایش میزان هدایت الکتریکی خاک پس از افزودن کودهای آلی نیز در مطالعات دیگری گزارش شده که دلیل این امر آزادسازی کاتیون و آنیون‌های مختلف پس از تجزیه مواد آلی را بیان کردند (Azeez & Van Averbeke, 2012). با این حال اما نکته قابل توجه کاهش کربن آلی در حضور کود دامی در سطوح بالای فسفر بود. در مورد علت احتمالی این امر شاید بتوان به افزایش فعالیت میکروبی در سطوح بالای فسفر در خاک اشاره کرد (Chen & Xiao, 2023) که توانسته سبب افزایش تجزیه کود دامی و به تبع آن کاهش



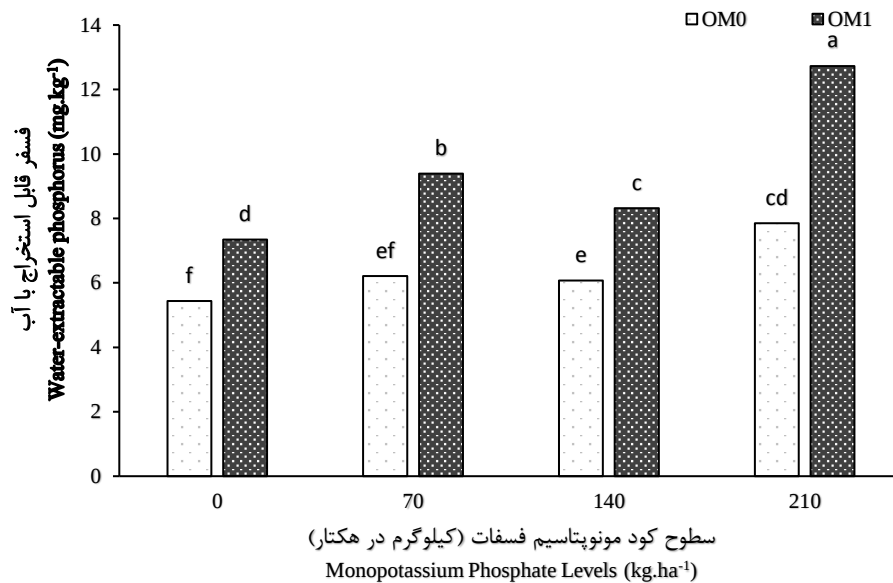
شکل ۲- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر قابل جذب خاک (ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 2- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on available phosphorus

هکتار کود فسفره به ترتیب سبب افزایش ۱۴/۱، ۱۱/۷ و ۴۴/۵ درصدی میزان فسفر قابل استخراج با آب در مقایسه با سطح صفر شد. برهمکنش کود دامی و مونوپتاسیم فسفات نیز روند مثبتی داشته و میزان افزایش اندازه‌گیری شده در کاربرد کود دامی و چهار سطح صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ مونوپتاسیم فسفات به ترتیب ۳۵/۱، ۵۱/۲، ۳۶/۹ و ۶۲/۱ درصد در مقایسه با شاهد بدون ماده آلی بود (شکل ۳).

میزان فسفر قابل استخراج با آب در مقایسه با سایر اشکال این عنصر در خاک کمترین مقدار را داشته که علت این امر جذب این بخش توسط گیاه در طی زمان می‌باشد. در مطالعه انجام شده توسط زیگوبا و همکاران (Nziguheba, Palm, Buresh, & Smithson, 1998) بر روی تأثیر منابع مختلف شیمیایی و آلی بر اشکال مختلف فسفر در خاک گزارش شد که برهمکنش بقایای ذرت و کود سوپر فسفات تریپل سبب افزایش فسفر قابل استخراج با آب شده که در بین اشکال مختلف شیمیایی فسفر بیشترین مقدار بوده که با نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه حاضر نیز همخوانی دارد. افزایش فسفر قابل استخراج با آب در برهمکنش کود شیمیایی و آلی احتمالاً ناشی از فسفر محلول کود دامی به خاک، معدنی شدن فسفر آلی، رقابت اسیدهای آلی با فسفر در جذب سطحی و تبدیل از شکل‌های دیگر فسفر باشد. نتایج این مطالعه با تحقیق هائو و همکاران (Hao, Godlinski, & Chang, 2008) مبنی بر افزایش فسفر محلول بعد از کاربرد کود حیوانی مطابقت دارد.

در مطالعه انجام شده توسط پوته و همکاران (Pote, Lory, & Zhang, 2003) مشخص شد که استفاده از منابع آلی و شیمیایی در خاک‌هایی با فسفر اولیه بالا سبب افزایش فسفر قابل دسترس خاک شدند. در مطالعه دیگری نیز مشخص شد که استفاده منابع آلی مختلف و کودهای شیمیایی فسفر سبب افزایش فسفر اولسن شد که با نتایج این مطالعه نیز همخوانی داشت (Battisti, Moretti, Sacco, & Grignani, & Zavattaro, 2022). در مورد علل احتمالی افزایش فسفر قابل دسترس در زمان افزودن ترکیبات آلی، گزارش شده که احتمالاً کاهش رسوب فسفات کلسیم و نرخ رسوب فسفات کم محلول و افزایش فسفر اولیه خاک از جمله این عوامل می‌باشند (Mao et al., 2015). با افزایش میزان ورودی کود مونوپتاسیم فسفات در خاک، فسفر قابل دسترس برخلاف انتظار کاهش یافت. در مورد علت احتمالی این امر می‌توان به رسوب فسفر در خاک اشاره کرد. در این مورد مطالعات نشان داده که فسفر وارد شده به خاک از طریق کودهای شیمیایی به‌راحتی توسط یون‌های آهن و آلومینیوم در خاک‌های اسیدی یا توسط یون‌های کلسیم و منیزیم در خاک‌های قلیایی جذب شده و رسوب می‌دهد (Naeem, Masood, Turan, & Iqbal, 2021; Penn & Camberato, 2019). کاربرد کود دامی و همچنین افزایش سطوح کود مونوپتاسیم فسفات سبب افزایش غلظت فسفر قابل استخراج با آب در این مطالعه شد. نتایج همچنین نشان داد که در کاربرد و عدم کاربرد کود دامی، افزایش سطوح مونوپتاسیم فسفات سبب افزایش غلظت فسفر قابل استخراج با آب شد. سه سطح ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در



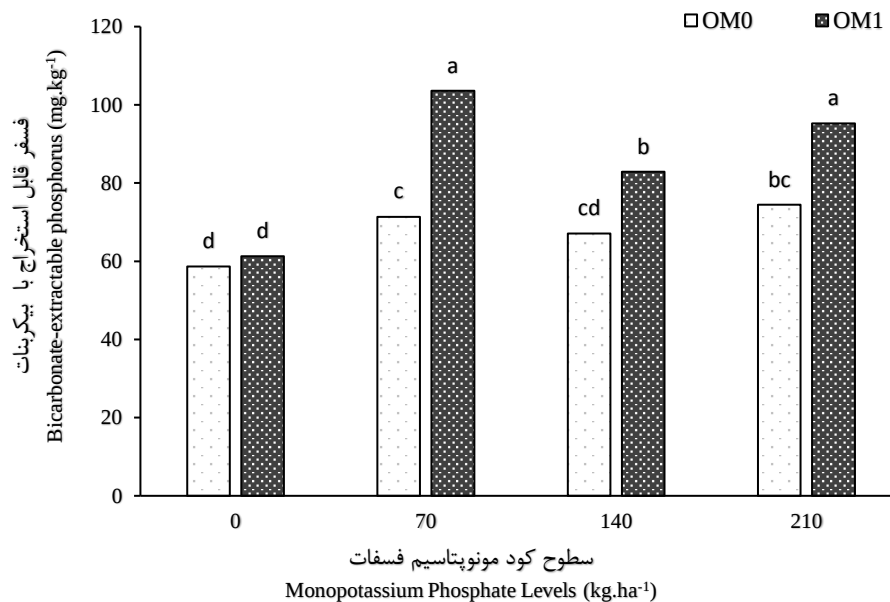
شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر قابل استخراج با آب

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 3- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on phosphorus extractable with water

کود به‌ترتیب ۲۲/۴، ۱۵/۵ و ۲۷/۵ درصد بود (شکل ۴). هر یک از سطوح کود مونوپتاسیم فسفات، کاربرد کود دامی نیز تأثیر مثبتی داشته به‌طوری‌که در چهار سطح صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ در مقایسه با تیمار بدون ماده آلی به‌ترتیب افزایش ۵/۱، ۴۵، ۲۲/۳ و ۲۸/۳ درصدی در میزان فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات مشاهده شد.

تأثیر افزایش میزان کود مونوپتاسیم فسفات در خاک و همچنین حضور کود دامی به‌عنوان یک منبع آلی بر میزان فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات مثبت بوده و غلظت این بخش از فسفر در کاربرد و عدم کاربرد کود دامی افزایش یافت. نتایج مقایسه میانگین برهمکنش این دو نشان داد که در سه سطح ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار کود مونوپتاسیم فسفات، میزان افزایش این پارامتر در مقایسه با شاهد بدون



شکل ۴- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 4- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on phosphorus extractable with bicarbonate

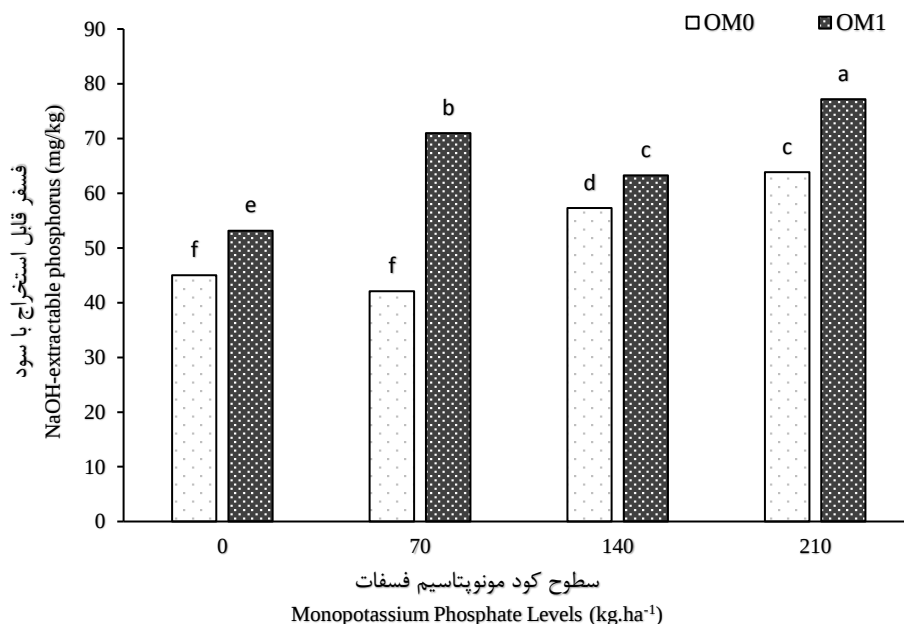
در هکتار مونوپتاسیم فسفات، میزان افزایش اندازه‌گیری شده در حضور کود دامی در مقایسه با شاهد (بدون کود) به ترتیب ۱۷/۷، ۶۹، ۱۰/۵ و ۲۲/۲ درصد بود (شکل ۵).

بخش فسفر قابل استخراج با سود توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم جذب شده است (Zhang, Li, & Li, 2019). افزایش در میزان فسفر قابل استخراج با سود طبق گزارش‌های سایر محققین احتمالاً به دلیل آزاد شدن فسفر محلول بخش آلی اضافه شده به خاک می‌باشد (Negassa & Leinweber, 2009). اختر و همکاران (Akhtar, McCallister, & Eskridge, 2002) علت افزایش فسفر قابل استخراج با سود را تغییرات شرایط رداکس خاک پس از افزودن ماده آلی بیان کردند که سبب حالیت اکسیدهای آهن و آلومینیوم می‌شود.

افزایش سطوح کود مونوپتاسیم فسفات در خاک تأثیر منفی بر میزان فسفر قابل حل در اسید را داشته و سبب کاهش آن در مقایسه با تیمار بدون کود شد. این میزان کاهش که اختلاف معنی‌داری نیز با شاهد داشته در سه سطح ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار کود به ترتیب درصد بود (شکل ۶). تأثیر کاربرد کود دامی نیز متفاوت بوده به‌طوری‌که در سه سطح صفر، ۱۴۰ و ۲۱۰ کود حضور ماده آلی به ترتیب سبب افزایش ۳/۱، ۷/۹ و ۳/۹ درصدی فسفر قابل استخراج با اسید شده و در سطح ۱۴۰ سبب کاهش ۲ درصدی آن شد.

این بخش از فسفر خاک به‌طور کلی نشان‌دهنده میزانی از فسفر بوده که به‌صورت غیراختصاصی جذب سطوح اجزای خاک می‌شود و همراه با فسفر قابل استخراج با آب، قابل دسترس‌ترین قسمت فسفر خاک می‌باشند (Reddy, Rao, & Singh, 2005). افزایش میزان فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم در زمان استفاده از کودهای آلی توسط محققین دیگری نیز گزارش شده که با نتایج به دست آمده در این مطالعه نیز همخوانی داشت (Uygun & Karabatak, 2009; Waldrip, He, & Erich, 2011). این محققین دلایلی همچون آزاد شدن فسفر این ترکیبات و همچنین اثر آن‌ها بر کاهش میزان pH خاک را به‌عنوان عوامل اصلی در این افزایش بیان کردند. در گزارش دیگری نیز بیان شده که انتشار اسیدهای آلی در خاک اطراف و همچنین سایر متابولیت‌های ثانویه میکروبی، به دلیل استفاده از کود دامی نیز بر بخش‌های فسفر خاک و فراهمی آن تأثیر مثبت می‌گذارد (Malik, Marschner, & Khan, 2012).

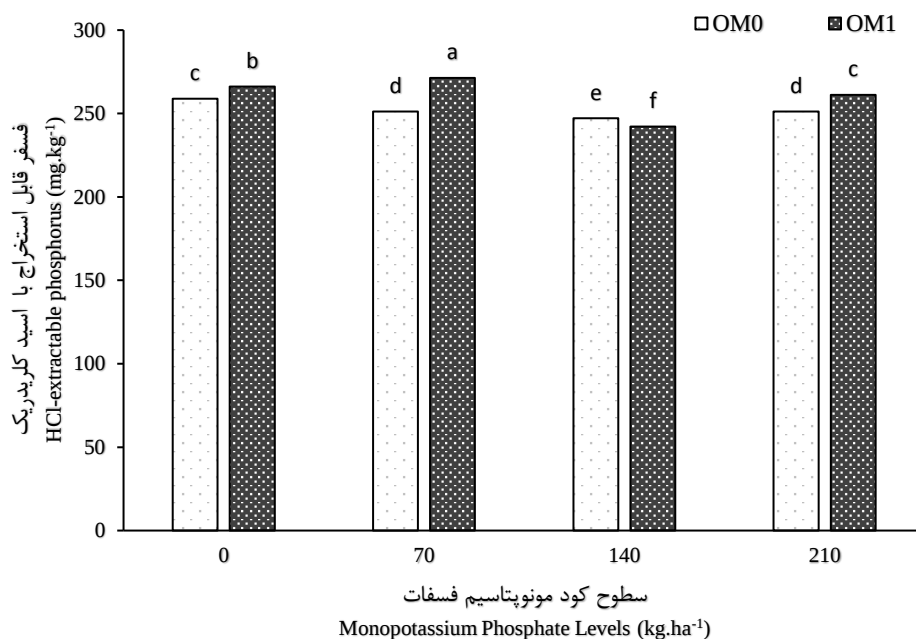
میزان فسفر قابل استخراج با سود با افزایش مقدار کود مونوپتاسیم فسفات در خاک افزایش داشته که این میزان در دو سطح ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار کود به ترتیب ۲۶/۶ و ۴۰ درصد در مقایسه با شاهد بدون کود بود. کاربرد کود دامی نیز تأثیر مثبتی بر غلظت فسفر قابل استخراج با سود داشته و سبب افزایش غلظت آن در تمامی سطوح کود مونوپتاسیم فسفات شد. در چهار سطح صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم



شکل ۵- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر قابل استخراج با سود

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 5- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on phosphorus extractable with NaOH



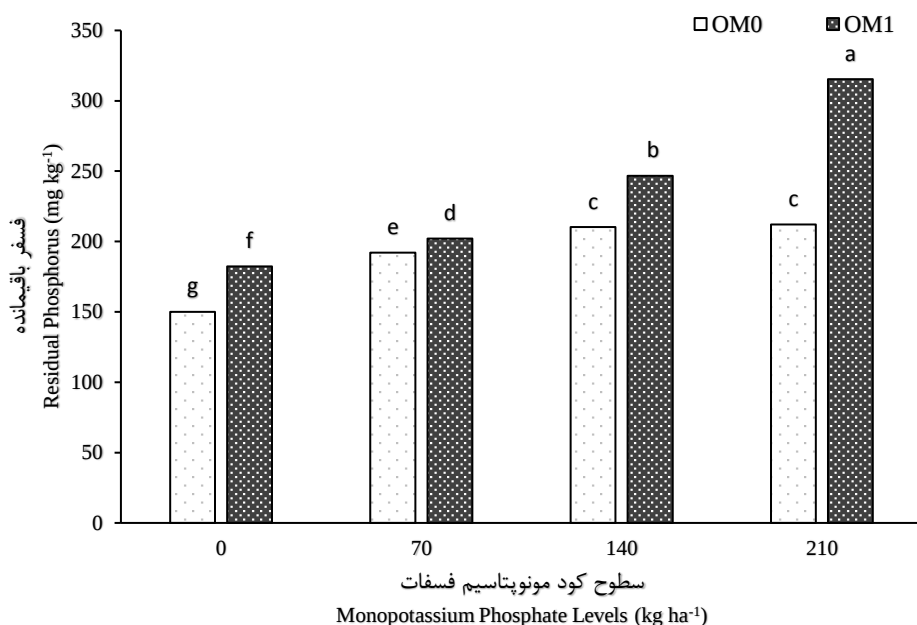
شکل ۶- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک (ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 6- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on phosphorus extractable with hydrochloric acid

سطوح کود مونوپتاسیم فسفات شد. در چهار سطح صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار مونوپتاسیم فسفات، میزان افزایش اندازه‌گیری شده در حضور کود دامی در مقایسه با شاهد (بدون کود) به ترتیب ۲۱/۳، ۵/۲، ۱۷/۱ و ۴۸/۵ درصد بود. (شکل ۷). لازم به ذکر است که میزان فسفر باقیمانده با افزایش مقدار کود در خاک نیز افزایش معنی‌داری در مقایسه با شاهد داشته که این میزان در سه سطح ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار کود به ترتیب ۲۸، ۴۰ و ۴۱/۳ درصد در مقایسه با شاهد بدون کود بود.

فسفر باقیمانده تنها بخشی از این عنصر بوده که به صورت مستقیم تحت تأثیر افزودن مقادیر مختلف کود مونوپتاسیم فسفات به خاک شد. حضور ماده آلی نیز در سطح ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار کودی در مقایسه با سایر سطوح قابل ملاحظه بود. تأثیر مثبت افزایش سطح کود مونوپتاسیم فسفات و همچنین کود دامی بر فسفر باقیمانده مشاهده شد. صمدی و گیلکز (Samadi & Gilkes, 1999) افزایش غلظت فسفر کل در یک خاک آهکی را پس از اضافه کردن منبع شیمیایی آن گزارش کردند. این افزایش در مقدار فسفر کل و باقیمانده پس از تیمار کردن خاک با منابع فسفره در مطالعه پاویناتو و همکاران (Pavinato, Merlin, & Rosolem, 2009) نیز مشاهده شده که با نتایج به دست آمده در این مطالعه همخوانی داشت. افزایش میزان فسفر کل در مطالعه انجام شده توسط مائو و همکاران (Mao et al., 2023) در پی افزودن ماده آلی نیز گزارش شد.

فسفر قابل استخراج با اسید بخشی از فسفر معدنی است که توسط کانی‌های کربناته کلسیم جذب و توسط آن‌ها تثبیت شده است و لذا تغییر در حلالیت کربنات کلسیم می‌تواند مقدار این بخش از فسفر را تحت تأثیر قرار دهد (Waldrip et al., 2011). این بخش از فسفر همچنین عنوان نشان دهنده گردش پایدار یا آهسته فسفر در نظر گرفته می‌شود و به طور کلی فقط حاوی مقادیر کمی فسفر آلی است (Negassa & Leinweber, 2009). بررسی تأثیر مواد آلی بر غلظت فسفر نتایج متفاوتی را نشان داده که این نتایج به زمان استفاده از این ترکیبات نیز بستگی دارد. به عنوان مثال ساتو و همکاران (Sato, Solomon, Hyland, Ketterings, & Lehmann, 2005) گزارش کردند که در زمان کوتاه استفاده از ترکیبات آلی باعث تشکیل فسفات کلسیم آمورف شده که حلالیت زیادی داشته؛ ولی به مرور زمان اشکال پایدارتر فسفر تشکیل شده که این موضوع سبب کاهش قابلیت جذب فسفر شود. تغییر در pH خاک تأثیر مستقیمی بر این شکل از فسفر داشته و در این مطالعه تیمارهای مورد مطالعه نتوانستند تأثیر به سزایی بر میزان pH خاک داشته باشند و احتمالاً دلیل تأثیرگذاری کم در این بخش نیز همین مورد می‌باشد. کاهش میزان فسفر قابل استخراج با اسید در سطوح بالای کود مونوپتاسیم فسفات و کود دامی نیز احتمالاً به دلیل کاهش میزان کربن آلی خاک در این تیمارها بوده که در بخش کربن آلی به آن اشاره شد. حضور کود دامی سبب افزایش غلظت فسفر کل باقیمانده در تمامی



شکل ۷- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر باقیمانده (ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 7- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on residual phosphorus

جدول ۴- نتایج همبستگی بین کربن آلی و pH خاک با اشکال مختلف فسفر

Table 4- Correlation results between organic carbon and soil pH with different forms of phosphorus

	Residual-P	HCl-P	NaOH-P	NaHCO ₃ -P	H ₂ O-P	Olsen-P
کربن آلی Organic matter	0.04 ^{ns}	0.60 ^{**}	0.44 [*]	0.44 [*]	0.57 ^{**}	0.36 ^{ns}
پ هاش خاک Soil pH	0.12 ^{ns}	0.29 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.53 ^{**}	0.38 ^{ns}	0.47 [*]

ns, * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد می‌باشند.

ns, * and ** indicate non-significant, significant at the 5% level, and significant at the 1% level, respectively

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که کاربرد تلفیقی کود مونوپتاسیم فسفات و کود دامی تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک و افزایش فراهمی فسفر داشت. کود مونوپتاسیم فسفات موجب افزایش هدایت الکتریکی و کود دامی باعث ارتقاء محتوای کربن آلی خاک شد. با این حال، برهم‌کنش این دو در سطوح بالای فسفر منجر به کاهش نسبی کربن آلی گردید که احتمالاً ناشی از تحریک فعالیت میکروبی و تسریع تجزیه ماده آلی بود. افزایش غلظت فسفر در اشکال قابل جذب مانند فسفر قابل استخراج با آب و بی‌کربنات در حضور کود دامی به‌وضوح مشاهده شد که بیانگر نقش مهم ماده آلی در افزایش قابلیت دسترسی فسفر است. به‌طور خاص، حضور کود دامی توانست در برخی سطوح فسفر، غلظت فسفر محلول را تا بیش از ۶۰ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد. در مقابل، اشکال کم‌تحرک‌تر فسفر نظیر فسفر

در مورد علت این امر بیان شده که افزودن ماده آلی فعالیت میکروبی را افزایش داده و چرخه عناصر غذایی را که توسط میکروب‌های خاک کنترل می‌شود را تحریک کرده (Lin et al., 2019) و فعالیت فسفومونواستراز خاک (PME) را افزایش می‌دهد که فعالیت این آنزیم باعث افزایش میزان معدنی شدن فسفر آلی می‌شود (Nakayama, Wade, & Margenot, 2021).

نتایج بررسی همبستگی پیرسون بین کربن آلی و pH خاک با اشکال مختلف فسفر در جدول ۴ نشان داد که بیشترین همبستگی کربن آلی با دو فرم قابل استخراج با آب و اسید کلریدریک به‌ترتیب با مقادیر ۰/۵۷ و ۰/۶۰ بود. همبستگی بین فسفر اولسن و قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم با pH خاک معنی‌دار بوده و سایر اشکال این عنصر همبستگی معنی‌داری نداشتند. مشابه با نتایج به دست آمده در این مطالعه، پژوهشگران نیز گزارش کرد که بین اشکال مختلف فسفر با کربن آلی و pH خاک مثبت و معنی‌دار بود.

در مدیریت تغذیه فسفری گیاهان و بهبود پایداری سیستم‌های زراعی، به‌ویژه در خاک‌های کم‌بازده، بسیار مؤثر واقع شود. توصیه می‌شود در برنامه‌های حاصلخیزی خاک، استفاده تلفیقی از کودهای آلی و شیمیایی به‌عنوان راهبردی علمی و زیست‌سازگار مدنظر قرار گیرد.

قابل استخراج با اسید در سطوح بالای کود شیمیایی کاهش یافتند که می‌تواند ناشی از پدیده‌های تثبیت و رسوب فسفر در خاک باشد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از منابع آلی و معدنی، نه تنها بهره‌وری جذب فسفر را افزایش می‌دهد، بلکه از اتلاف آن در قالب اشکال تثبیت‌شده و کم‌دسترس جلوگیری می‌کند. این رویکرد می‌تواند

References

- Abolfazli, F., Forghani, A., & Norouzi, M. (2012). Effects of phosphorus and organic fertilizers on phosphorus fractions in submerged soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(2), 349–362. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012000200014>
- Akhtar, M., McCallister, D.L., & Eskridge, K.M. (2002). Availability and fractionation of phosphorus in sewage sludge-amended soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(13–14), 2057–2068. <https://doi.org/10.1081/CSS-120005748>
- Azeez, J.O., & Van Averebeke, W. (2012). Dynamics of soil pH and electrical conductivity with the application of three animal manures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(6), 865–874. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.653022>
- Battisti, M., Moretti, B., Sacco, D., Grignani, C., & Zavattaro, L. (2022). Soil Olsen P response to different phosphorus fertilization strategies in long-term experiments in NW Italy. *Soil Use and Management*, 38(1), 549–563. <https://doi.org/10.1111/sum.12701>
- Chen, C., & Xiao, W. (2023). The global positive effect of phosphorus addition on soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 176, 108882. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108882>
- Chen, G.-L., Xiao, L., Xia, Q.-L., Wang, Y., Yuan, J.-H., Chen, H., Wang, S.-Q., & Zhu, Y.-Y. (2021). Characterization of different phosphorus forms in flooded and upland paddy soils incubated with various manures. *ACS Omega*, 6(4), 3259–3266. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05748>
- Chiu, K.K., Ye, Z.H., & Wong, M.H. (2006). Growth of *Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis* on Pb/Zn and Cu mine tailings amended with manure compost and sewage sludge: a greenhouse study. *Bioresource Technology*, 97(1), 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.038>
- Cordell, D., Drangert, J.-O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Fan, X., Zhou, X., Chen, H., Tang, M., & Xie, X. (2021). Cross-talks between macro-and micronutrient uptake and signaling in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 663477. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.663477>
- Gangwar, K.S., Singh, K.K., Sharma, S.K., & Tomar, O.K. (2006). Alternative tillage and crop residue management in wheat after rice in sandy loam soils of Indo-Gangetic plains. *Soil and Tillage Research*, 88(1–2), 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.06.015>
- Gatiboni, L.C., Schmitt, D.E., Cassol, P.C., Comin, J.J., Heidemann, J.C., Brunetto, G., & Nicoloso, R. da S. (2019). Samples disturbance overestimates phosphorus adsorption capacity in soils under long-term application of pig slurry. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(9), 1262–1272. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1562274>
- González Medeiros, J.J., Pérez Cid, B., & Fernández Gómez, E. (2005). Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 381, 873–878. <https://doi.org/10.1007/s00216-004-2989-z>
- Hammad, H.M., Khaliq, A., Abbas, F., Farhad, W., Fahad, S., Aslam, M., Shah, G.M., Nasim, W., Mubeen, M., & Bakhat, H.F. (2020). Comparative effects of organic and inorganic fertilizers on soil organic carbon and wheat productivity under arid region. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(10), 1406–1422. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1763385>
- Hao, X., Godlinski, F., & Chang, C. (2008). Distribution of phosphorus forms in soil following long-term continuous and discontinuous cattle manure applications. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1), 90–97. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0344>
- Hedley, M.J., Stewart, J.W.B., & Chauhan, B. (1982). Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 970–976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>
- Helfenstein, J., Tamburini, F., von Sperber, C., Massey, M.S., Pistocchi, C., Chadwick, O.A., Vitousek, P.M., Kretschmar, R., & Frossard, E. (2018). Combining spectroscopic and isotopic techniques gives a dynamic view of phosphorus cycling in soil. *Nature Communications*, 9(1), 3226. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05731-2>
- Jalali, M., & Ranjbar, F. (2010). Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. *Geoderma*, 155(1–2), 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.030>
- Jiang, B., Jianlin, S., Minghong, S.U.N., Yajun, H.U., Jiang, W., Juan, W., Yong, L.I., & Jinshui, W.U. (2021). Soil

- phosphorus availability and rice phosphorus uptake in paddy fields under various agronomic practices. *Pedosphere*, 31(1), 103–115. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60053-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60053-4)
19. Jindo, K., Audette, Y., Olivares, F.L., Canellas, L.P., Smith, D.S., & Paul Voroney, R. (2023). Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: A review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00401-y>
20. Lemming, C., Simmelsgaard Nielsen, M. T., Jensen, L. S., Scheutz, C., & Magid, J. (2020). Phosphorus availability of sewage sludges and ashes in soils of contrasting pH. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(6), 682–694. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900323>
21. Li, M., Zhao, Z., Zhang, Z., Zhang, W., Zhou, J., Xu, F., & Liu, X. (2017). Effect of boron deficiency on anatomical structure and chemical composition of petioles and photosynthesis of leaves in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Scientific Reports*, 7(1), 4420. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04655-z>
22. Lin, Y., Ye, G., Kuzyakov, Y., Liu, D., Fan, J., & Ding, W. (2019). Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation, and alters microbial community structure and keystone taxa. *Soil Biology and Biochemistry*, 134, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.030>
23. Mahmood, F., Khan, I., Ashraf, U., Shahzad, T., Hussain, S., Shahid, M., Abid, M., & Ullah, S. (2017). Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), 22–32. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000002>
24. Malik, M.A., Marschner, P., & Khan, K.S. (2012). Addition of organic and inorganic P sources to soil—Effects on P pools and microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 49, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.013>
25. Mao, X., Xu, X., Lu, K., Gielen, G., Luo, J., He, L., Donnison, A., Xu, Z., Xu, J., & Yang, W. (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, 1889–1899. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1137-z>
26. 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. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1138207. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1138207>
27. Martins, M.A., Santos, C., Almeida, M.M., & Costa, M.E.V. (2008). Hydroxyapatite micro-and nanoparticles: nucleation and growth mechanisms in the presence of citrate species. *Journal of Colloid and Interface Science*, 318(2), 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.10.008>
28. Meng, D., Xu, P., Dong, Q., Wang, S., & Wang, Z. (2017). Comparison of foliar and root application of potassium dihydrogen phosphate in regulating cadmium translocation and accumulation in tall fescue (*Festuca arundinacea*). *Water, Air, & Soil Pollution*, 228, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3304-x>
29. Metson, G.S., MacDonald, G.K., Haberman, D., Nesme, T., & Bennett, E.M. (2016). Feeding the corn belt: opportunities for phosphorus recycling in US agriculture. *Science of the Total Environment*, 542, 1117–1126. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.047>
30. Montalvo, D., Degryse, F., Da Silva, R.C., Baird, R., & McLaughlin, M.J. (2016). Agronomic effectiveness of zinc sources as micronutrient fertilizer. *Advances in Agronomy*, 139, 215–267. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.05.004>
31. Murphy, J., & Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
32. Naeem, I., Masood, N., Turan, V., & Iqbal, M. (2021). Prospective usage of magnesium potassium phosphate cement combined with *Bougainvillea alba* derived biochar to reduce Pb bioavailability in soil and its uptake by *Spinacia oleracea* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111723. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111723>
33. Nakayama, Y., Wade, J., & Margenot, A.J. (2021). Does soil phosphomonoesterase activity reflect phosphorus pools estimated by Hedley phosphorus fractionation? *Geoderma*, 401, 115279. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115279>
34. Negassa, W., & 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>
35. Nziguheba, G., Palm, C.A., Buresh, R.J., & Smithson, P.C. (1998). Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. *Plant and Soil*, 198, 159–168. <https://doi.org/10.1023/A:1004389704235>
36. Olsen, S.R. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate* (Issue 939). US Department of Agriculture.
37. Pavinato, P.S., Merlin, A., & Rosolem, C.A. (2009). Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. *Soil and Tillage Research*, 105(1), 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.07.001>
38. Penn, C.J., & Camberato, J.J. (2019). A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*, 9(6), 120. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>
39. Pote, D.H., Lory, J.A., & Zhang, H. (2003). Does initial soil P level affect water-extractable soil P response to

- applied P? *Advances in Environmental Research*, 7(2), 503–509. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00020-5)
40. Qiu, S.-L., Wang, L.-M., Huang, D.-F., & Lin, X.-J. (2014). Effects of fertilization regimes on tea yields, soil fertility, and soil microbial diversity. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 74(3), 333–339.
41. Reddy, D.D., Rao, S.A., & Singh, M. (2005). Changes in P fractions and sorption in an Alfisol following crop residues application. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(2), 241–247. <https://doi.org/10.1002/jpln.200421444>
42. Rhoades, J.D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5, 417–435. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
43. Samadi, A., & Gilkes, R.J. (1999). Phosphorus transformations and their relationships with calcareous soil properties of southern Western Australia. *Soil Science Society of America Journal*, 63(4), 809–815. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.634809x>
44. Sato, S., Solomon, D., Hyland, C., Ketterings, Q.M., & Lehmann, J. (2005). Phosphorus speciation in manure and manure-amended soils using XANES spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, 39(19), 7485–7491. <https://doi.org/10.1021/es0503130>
45. Singh, J.S., Pandey, V.C., & Singh, D.P. (2011). Efficient soil microorganisms: a new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(3–4), 339–353. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.017>
46. Sun, R., Zhang, X.-X., Guo, X., Wang, D., & Chu, H. (2015). Bacterial diversity in soils subjected to long-term chemical fertilization can be more stably maintained with the addition of livestock manure than wheat straw. *Soil Biology and Biochemistry*, 88, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.05.007>
47. Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5, 475–490. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
48. Tian, F., Gong, J., Zhang, J., Zhang, M., Wang, G., Li, A., & Wang, W. (2013). Enhanced stability of thylakoid membrane proteins and antioxidant competence contribute to drought stress resistance in the *tasg1* wheat stay-green mutant. *Journal of Experimental Botany*, 64(6), 1509–1520. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert004>
49. Uygur, V., & Karabatak, I. (2009). The effect of organic amendments on mineral phosphate fractions in calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(3), 336–345. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700326>
50. Wahid, F., Fahad, S., Danish, S., Adnan, M., Yue, Z., Saud, S., Siddiqui, M. H., Brtnicky, M., Hammerschmidt, T., & Datta, R. (2020). Sustainable management with mycorrhizae and phosphate solubilizing bacteria for enhanced phosphorus uptake in calcareous soils. *Agriculture*, 10(8), 334. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080334>
51. Wakley, A., & Black, C.A. (1934). Determination of organic matter in the soil by chromic acid digestion. *Soil Science*, 63, 251–264.
52. Waldrup, H.M., He, Z., & Erich, M.S. (2011). Effects of poultry manure amendment on phosphorus uptake by ryegrass, soil phosphorus fractions and phosphatase activity. *Biology and Fertility of Soils*, 47, 407–418. <https://doi.org/10.1007/s00374-011-0546-4>
53. Wang, J., Song, Y., Ma, T., Raza, W., Li, J., Howland, J.G., Huang, Q., & Shen, Q. (2017). Impacts of inorganic and organic fertilization treatments on bacterial and fungal communities in a paddy soil. *Applied Soil Ecology*, 112, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.005>
54. Xiong, W., Jousset, A., Guo, S., Karlsson, I., Zhao, Q., Wu, H., Kowalchuk, G. A., Shen, Q., Li, R., & Geisen, S. (2018). Soil protist communities form a dynamic hub in the soil microbiome. *The ISME Journal*, 12(2), 634–638. <https://doi.org/10.1038/ismej.2017.171>
55. Yu, W., Li, G., Hartmann, T.E., Xu, M., Yang, X., Li, H., Zhang, J., & Shen, J. (2021). Development of a novel model of soil legacy P assessment for calcareous and acidic soils. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 621833. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.621833>
56. Zhang, W., Li, H., & Li, Y. (2019). Spatio-temporal dynamics of nitrogen and phosphorus input budgets in a global hotspot of anthropogenic inputs. *Science of the Total Environment*, 656, 1108–1120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.450>
57. Zhao, D., & Tao, J. (2015). Recent advances on the development and regulation of flower color in ornamental plants. *Frontiers in Plant Science*, 6, 125534. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00261>