

(OPEN ACCESS)

## Effects of Modified Almond Shell Biochar with Acid on the Amount and Rate of Phosphorus Release in Calcareous Sandy Soils

Sanaz Bazivand<sup>1</sup>, Hamidreza Motaghian<sup>\*2</sup>, Alireza Hosseinpour<sup>3</sup>,  
Saheb Sodaee Mashae<sup>4</sup>

1. M.Sc. Graduate of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.  
E-mail: [realsan75@gmail.com](mailto:realsan75@gmail.com)
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: [motaghian.h@yahoo.com](mailto:motaghian.h@yahoo.com)
3. Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.  
E-mail: [hosseinpour-a@sku.ac.ir](mailto:hosseinpour-a@sku.ac.ir)
4. Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.  
E-mail: [soodaie@sku.ac.ir](mailto:soodaie@sku.ac.ir)

---

---

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

**Article history:**  
Received: 07.01.2025  
Revised: 09.12.2025  
Accepted: 10.03.2025

**Keywords:**  
Acid-modified biochar,  
Kinetics models,  
Kinetics rate of release,  
Soil texture

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Phosphorus (P) is a vital macronutrient for plant development and productivity, playing a crucial role in key physiological and biochemical processes, including photosynthesis, energy transfer via ATP, nucleic acid synthesis, root growth, and cell division. Despite its importance, the availability of phosphorus in soils-particularly in calcareous soils-is significantly limited due to its tendency to react with calcium and other soil minerals, leading to the formation of insoluble phosphate compounds. These reactions immobilize added phosphorus fertilizers, making them inaccessible to plants. In calcareous soils, where the pH is high and calcium carbonate is abundant, phosphorus readily precipitates as calcium phosphates. Consequently, only a small fraction of applied phosphorus remains in a form that plants can absorb. This inefficiency not only reduces crop yield potential but also increases the economic and environmental costs associated with excessive fertilizer use. To address this issue, researchers have increasingly focused on sustainable soil amendment strategies that can enhance phosphorus availability. Among these, biochar-produced through pyrolysis of organic materials under limited oxygen conditions-has emerged as a promising candidate. Biochar possesses a high specific surface area, stable carbon structures, significant cation exchange capacity, and the potential for surface functionalization. These properties make it suitable for modifying nutrient dynamics in soil. However, most biochars, especially those derived from woody feedstocks, tend to have alkaline pH values, which can further exacerbate phosphorus immobilization in alkaline soils. Therefore, modifying biochar through acid treatment has been proposed as an effective way to improve its properties for nutrient retention and release, particularly phosphorus. Acid treatment can lower the pH, introduce more functional groups, and remove base cations, potentially enhancing the biochar's capacity to retain and release phosphorus in a plant-available form.

---

**Materials and Methods:** This study was conducted to evaluate the effect of acid-modified almond shell biochar on the release and availability of phosphorus in two calcareous soils with contrasting textures-sandy and clay. A factorial experiment with a completely randomized design was carried out, incorporating three main factors: (1) biochar amendment (no amendment/control, 1% w/w unmodified almond shell biochar, and 1% w/w acid-modified almond shell biochar), (2) soil texture (sandy and clay), and (3) incubation period (30 and 60 days), each with three replications. Biochar was produced by pyrolyzing almond shell wood at a temperature of 400 °C. For acid modification, 200 grams of the produced biochar were saturated with distilled water, followed by the addition of 11.3 mL of concentrated phosphoric acid (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) and 34.9 mL of concentrated nitric acid (HNO<sub>3</sub>). The mixture was stirred thoroughly with a glass rod and then oven-dried at 60 °C. These treatments aimed to alter the surface characteristics of the biochar, particularly its pH and electrical conductivity (EC), as well as to introduce oxygen-containing functional groups that could facilitate phosphorus release. The treated soils were incubated with the respective biochar amendments at 70% field capacity to simulate realistic soil moisture conditions. Phosphorus release was monitored through sequential extraction using sodium bicarbonate solution (NaHCO<sub>3</sub>) at multiple time intervals: 2, 4, 8, 24, 48, 72, 96, 240, 336, 456, 600, and 768 hours. The extracted phosphorus was quantified to determine the release pattern over time. To model the kinetics of phosphorus release, four commonly used equations were fitted to the data: first-order kinetics, power function, simple Elovich, and parabolic diffusion. These models help in understanding the mechanisms and rates of phosphorus release under various treatments and conditions. The determination of the most suitable kinetic equation was generally based on the coefficient of determination (R<sup>2</sup>) and the standard error (SE) associated with each equation. Equations exhibiting higher R<sup>2</sup> values and lower SE were considered the most appropriate for describing the elemental release data.

**Results:** The results indicated that the acid-modified biochar significantly enhanced phosphorus release in both soil types compared to the control ( $P < 0.05$ ), while the unmodified almond shell biochar did not lead to a significant increase ( $P > 0.05$ ). The highest cumulative phosphorus release, 144.6 mg/kg, was recorded in the clay soil treated with acid-modified biochar after 30 days of incubation. In general, phosphorus release was greater in clay soil than in sandy soil, which may be attributed to the higher cation exchange capacity and greater organic matter content of the clay soil, both of which enhance phosphorus retention and release dynamics. The acid-modified biochar exhibited a markedly lower pH (3.0) compared to the unmodified biochar (7.1), and its electrical conductivity was also significantly reduced (0.0026 vs. 0.46 dS/m). This reduction in EC suggests the successful removal of soluble base cations during the acid washing process, a change that likely contributed to improved phosphorus desorption and availability in calcareous conditions. Among the kinetic models applied, the power function and simple Elovich equations provided the best fit for the experimental data, based on their high R<sup>2</sup> and low SE. These models indicated that diffusion was the dominant mechanism controlling phosphorus release from the soil-biochar system, especially under the influence of acid-modified biochar. The model parameters-particularly the intercepts and slopes-provided further insights into the dynamics of phosphorus availability. A higher intercept signifies a greater

---

---

initial release of phosphorus, while a lower slope is indicative of faster release rates. The intercepts of the best-fit models were highest for acid-modified biochar in both soil types, suggesting that these treatments facilitated the most rapid initial release of phosphorus. Conversely, the slopes were lowest in acid-biochar treatments, reaffirming the faster rate of release. Over time, as incubation progressed to 60 days, the intercepts generally decreased while the slopes increased, reflecting the natural decline in phosphorus release as the soil-biochar system approached equilibrium. Notably, the acid-modified biochar maintained a higher phosphorus release rate over time compared to the other treatments, underscoring its sustained effectiveness.

**Conclusion:** The findings of this study demonstrate that acid treatment of almond shell biochar using phosphoric and nitric acids can substantially enhance its capacity to release phosphorus in calcareous soils. Compared to unmodified biochar, the acid-modified variant showed superior performance in increasing phosphorus availability, particularly in clay soils with higher nutrient retention capacity. This suggests that acid-modified biochars can be effectively used as soil amendments in alkaline and calcareous agricultural systems to improve phosphorus use efficiency and reduce reliance on synthetic fertilizers. Furthermore, kinetic modeling provided valuable information on the temporal dynamics of phosphorus release, offering a scientific basis for designing more efficient phosphorus fertilization strategies.

---

Cite this article: Bazivand, Sanaz, Motaghian, Hamidreza, Hosseinpour, Alireza, Sodaee Mashae, Saheb. 2026. Effects of Modified Almond Shell Biochar with Acid on the Amount and Rate of Phosphorus Release in Calcareous Sandy Soils. *Journal of Water and Soil Conservation*, 33 (1), 223-243.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23821.3816

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## اثر بیوچار اسیدی پوست بادام بر آزادسازی فسفر در خاک‌های آهکی رسی و شنی

ساناز بازیوند<sup>۱</sup>، حمیدرضا متقیان\*<sup>۲</sup>، علیرضا حسین پور<sup>۳</sup>، صاحب سودایی مشائی<sup>۴</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: [realsan75@gmail.com](mailto:realsan75@gmail.com)
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: [motaghian.h@yahoo.com](mailto:motaghian.h@yahoo.com)
۳. استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: [hosseinpur-a@sku.ac.ir](mailto:hosseinpur-a@sku.ac.ir)
۴. استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: [soodaie@sku.ac.ir](mailto:soodaie@sku.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>نوع مقاله:</b> مقاله کامل علمی- پژوهشی	<b>سابقه و هدف:</b> فسفر یکی از عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاهان است که نقش‌های حیاتی در فرآیندهای فیزیولوژیکی نظیر فتوسنتز، انتقال انرژی، تقسیم سلولی و رشد ریشه ایفا می‌کند. با این حال، به دلیل واکنش‌پذیری بالای فسفر با اجزای معدنی خاک به‌ویژه در خاک‌های آهکی، مقدار زیادی از فسفر افزوده شده به خاک به شکل ترکیب‌های نامحلول مانند فسفات‌های کلسیم رسوب کرده و از دسترس گیاه خارج می‌شود. این مسأله منجر به کاهش بهره‌وری مصرف کودهای فسفره و افزایش هزینه‌های تولید در کشاورزی شده است. در سال‌های اخیر، استفاده از مواد آلی و زیستی از جمله بیوچار به عنوان اصلاح‌کننده‌های خاک با هدف بهبود فراهمی عناصر غذایی مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. بیوچار به دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد، مواد آلی پایدار و امکان تغییر در ساختار شیمیایی آن از طریق فرآیندهای اصلاح، می‌تواند به‌عنوان منبعی مؤثر برای افزایش فسفر در دسترس در خاک مطرح باشد اما pH بالای بیوچار ممکن است سبب کاهش قابلیت استفاده فسفر در خاک‌های قلیایی شود. بنابراین، استفاده از بیوچار اسیدی می‌تواند برای بهبود قابلیت استفاده فسفر در نظر گرفته شود، زیرا اصلاح بیوچار با اسید می‌تواند ویژگی‌های شیمیایی سطح آن را به‌گونه‌ای تغییر دهد که آزادسازی عناصر غذایی را تسهیل کند.
<b>تاریخ دریافت:</b> ۰۴/۰۴/۱۰ <b>تاریخ ویرایش:</b> ۰۴/۰۶/۲۱ <b>تاریخ پذیرش:</b> ۰۴/۰۷/۱۱	
<b>واژه‌های کلیدی:</b> بافت خاک، بیوچار اصلاح شده با اسید، سرعت آزادشدن، مدل‌های سینتیکی	
	<b>مواد و روش‌ها:</b> برای بررسی اثر بیوچار بر آزادسازی فسفر، آزمایش فاکتوریل ۳×۲×۲ در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از دو نوع خاک آهکی در ۳ تکرار انجام شد. آزمایش شامل فاکتور اول بهساز (بدون کاربرد (شاهد)، ۱ درصد وزنی / وزنی بیوچار پوست بادام و ۱ درصد وزنی / وزنی بیوچار پوست بادام اسیدی) و فاکتور دوم نوع خاک (شنی و رسی) در طی زمان انکوباسیون (۳۰ و ۶۰ روز) بود. بیوچار با استفاده از پوسته چوبی بادام در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس تولید شد. مقدار ۲۰۰ گرم از بیوچار را در بشر ریخته و با آب مقطر اشباع شد. سپس

۱۱/۳ میلی‌لیتر اسید فسفریک غلیظ (درصد جرمی/جرمی ۸۵ درصد) و ۳۴/۹ میلی‌لیتر اسید نیتریک (درصد جرمی/جرمی ۶۸ درصد) غلیظ به آن اضافه و با هم‌زن شیشه‌ای بهم زده و در نهایت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شدند. نمونه‌های خاک با بیوچارها تیمار و در شرایط رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی انکوبه شدند. پس از پایان دوره انکوباسیون، مقدار فسفر آزاد شده به روش استخراج متوالی در زمان‌های ۲، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۲۴۰، ۳۳۶، ۴۵۶، ۶۰۰ و ۷۶۸ ساعت با محلول بی‌کربنات سدیم استخراج شد. مدل‌های سینتیکی شامل مرتبه اول، تابع توانی، الوویچ ساده و نفوذ پارابولیکی داده‌های حاصل برازش داده شد و ضرایب سرعت آزاد شدن فسفر از تیمارهای مختلف تعیین گردید. تعیین بهترین معادله سینتیکی معمولاً بر اساس ضرایب تبیین و خطای استاندارد مربوط به هر معادله صورت گرفت. معادله‌هایی که ضریب تبیین بالا و خطای استاندارد کم‌تری داشته باشند به‌عنوان برترین معادلات در توصیف داده‌های آزاد شدن عناصر انتخاب شدند.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که در هر دو خاک، تیمار بیوچار اسیدی منجر به افزایش معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) فسفر تجمعی آزاد شده نسبت به تیمار شاهد شد، درحالی‌که بیوچار پوسته بادام تأثیر معنی‌داری بر مقدار فسفر تجمعی آزاد شده نداشت ( $P > 0.05$ ). بیش‌ترین مقدار فسفر آزاد شده (۱۴۴/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار بیوچار اصلاح‌شده با اسید و خاک رسی پس از ۳۰ روز مشاهده شد. در همه تیمارها، مقدار فسفر آزاد شده در خاک رسی بیش از خاک شنی بود که می‌تواند به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی بیش‌تر خاک رسی نسبت داده شود. بیوچار اسیدی در مقایسه با بیوچار معمولی، دارای pH پایین‌تر (۳/۰ در برابر ۷/۱) و EC بسیار کم‌تر (۰/۰۰۲۶ در برابر ۰/۴۶ dS/m) بود. کاهش قابل توجه قابلیت هدایت الکتریکی در بیوچار اسیدی می‌تواند به دلیل حذف کاتیون‌های بازی طی فرآیند شستشو و اسیدی‌سازی باشد. در بررسی مدل‌های سینتیکی، مشخص شد در همه تیمارها معادله تابع توانی و الوویچ ساده با دارا بودن بیش‌ترین ضریب تبیین و کم‌ترین خطای استاندارد نسبت به معادلات دیگر برازش بهتری بر داده‌های آزاد شده داشتند. این امر بیانگر غالب بودن مکانیسم انتشار در فرآیند آزاد شدن فسفر از خاک تحت تأثیر تیمارهای مورد مطالعه است. مقادیر شیب معادلات شاخصی از سرعت آزادسازی فسفر و مقدار عرض از مبدأ بیان‌کننده سرعت آزادسازی فسفر در مرحله اول آزادسازی (مقدار اولیه فسفر آزاد شده) فسفر است. ضریب عرض از مبدأ به ترتیب در تابع توانی و الوویچ ساده در بیوچارهای اسیدی در خاک رسی و شنی بیش‌تر از شاهد و در ۳۰ و ۶۰ روز انکوباسیون، این ضرایب در هر دو خاک رسی و شنی بین تیمارهای بیوچار پوست بادام نزدیک به آن در خاک شاهد بود و در تیمار بیوچار اسیدی افزایش یافت. هم‌چنین این ضرایب در خاک رسی بیش‌تر از خاک شنی بود. کم‌ترین ضریب شیب در تیمارهای بیوچار اسیدی مشاهده شد که نشان‌دهنده سرعت بیش‌تر آزاد شدن فسفر از این تیمارهاست. عرض از مبدأ پس از ۶۰ روز انکوباسیون کاهش یافت و شیب افزایش یافت. ضرایب این مدل‌ها نشان داد که تیمار بیوچار اسیدی دارای بیش‌ترین سرعت آزادسازی فسفر در خاک بود. علاوه‌براین، با گذشت زمان انکوباسیون، مقدار پارامترهای مرتبط با سرعت آزادسازی کاهش یافت و در تیمار بیوچار اسیدی این کاهش کم‌تر از سایر تیمارها بود.

---

**نتیجه‌گیری:** نتایج این پژوهش نشان داد که اصلاح بیوچار با اسید فسفریک و اسید نیتریک موجب افزایش قابل‌توجه فسفر آزاد شده از خاک‌های آهکی می‌شود. در مقایسه با بیوچار، بیوچار اسیدی اثر بیش‌تری در بهبود قابلیت استفاده فسفر داشته و این اثر در خاک رسی بارزتر بود. این یافته‌ها بر اهمیت اصلاح شیمیایی بیوچار برای بهینه‌سازی کارایی آن در سیستم‌های خاک آهکی تأکید دارد. هم‌چنین، بررسی سرعت آزاد شدن فسفر اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار فسفر در طول زمان فراهم کرده و می‌تواند مبنایی برای مدیریت بهینه کوددهی فسفره در اراضی آهکی فراهم کند.

---

استناد: بازیوند، ساناز، متقیان، حمیدرضا، حسین‌پور، علیرضا، سودایی مشائی، صاحب (۱۴۰۵). اثر بیوچار اسیدی پوست بادام بر آزادسازی فسفر در خاک‌های آهکی رسی و شنی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۳ (۱)، ۲۴۳-۲۲۳.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23821.3816



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

---

## مقدمه

فسفر یکی از عناصر غذایی ضروری برای رشد و توسعه گیاهان به‌شمار می‌رود و در فرآیندهای فتوسنتز، انتقال انرژی، تقسیم سلولی و توسعه ریشه نقش دارد. با این حال، غلظت فسفر در دسترس در محلول خاک معمولاً بسیار پایین است، زیرا فسفر پس از ورود به خاک به سرعت در واکنش‌های شیمیایی شرکت کرده و به شکل‌های تثبیت‌شده تبدیل می‌شود (۱، ۲). جذب فسفر توسط گیاه نیز موجب کاهش بیش‌تر فسفر در دسترس خاک می‌گردد.

در بسیاری از خاک‌ها، به‌ویژه خاک‌های آهکی مقدار قابل توجهی از کودهای فسفوره به دلیل تشکیل ترکیب‌های نامحلول فسفر-کلسیم ( $\text{Ca}^{2+}\text{-P}$ ) برای گیاهان غیرقابل جذب می‌شود (۳، ۴، ۵). برای غلبه بر این محدودیت، استفاده از بهسازهای آلی به‌ویژه در خاک‌های آهکی به‌عنوان راه‌کاری برای بهبود فراهمی فسفر مورد توجه قرار گرفته است. مواد آلی افزوده شده به خاک می‌توانند با تشکیل کمپلکس‌هایی با یون‌های تثبیت‌کننده فسفر مانند کلسیم، آهن و آلومینیوم، سبب کاهش تثبیت فسفر و افزایش قابلیت جذب آن توسط گیاه شوند. همچنین، استفاده بلندمدت از مواد آلی با ایجاد پیوندهای ضعیف‌تر میان فسفر و کانی‌های خاک، پایداری فسفر در دسترس را افزایش می‌دهد (۱، ۶).

بیوچار، ماده‌ای غنی از کربن است که از تجزیه حرارتی زیست‌توده در شرایط محدود از اکسیژن تولید می‌شود. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد بیوچار مانند سطح ویژه بالا، ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد، محتوای بالای کربن آلی و وجود عناصر غذایی، آن را به گزینه‌ای مناسب برای اصلاح خاک و افزایش بهره‌وری عناصر غذایی مانند فسفر تبدیل کرده است (۷، ۸، ۹). کاربرد بیوچار می‌تواند هم به‌طور مستقیم با افزایش فسفر محلول و هم

به‌طور غیرمستقیم از طریق بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، دسترسی گیاه به فسفر را افزایش دهد (۱۰). اثرات غیرمستقیم شامل بهبود ظرفیت نگهداری آب، افزایش فعالیت میکروبی و اصلاح pH خاک‌های اسیدی است (۷).

استفاده از بیوچارهای اصلاح‌شده با اسید برای بهبود قابلیت استفاده از فسفر می‌تواند مفید باشد، زیرا اصلاح بیوچار با اسید می‌تواند ویژگی‌های شیمیایی و سطح ویژه آن را به‌گونه‌ای تغییر دهد که آزادسازی عناصر غذایی را تسهیل کند (۸، ۱۱، ۱۲). ایدین و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی اثر بیوچار اصلاح‌شده با اسید سیتریک بر افزایش فسفر در دسترس و پایداری آن در خاک آهکی شنی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از بیوچار اصلاح‌شده به‌طور مؤثری غلظت فسفر در دسترس را افزایش داد. هم‌چنین نیمه‌عمر آن نسبت به بیوچار اصلاح‌نشده و تیمار شاهد به مقدار قابل توجهی طولانی‌تر بود. اصلاح بیوچار با اسید سیتریک موجب بهبود ویژگی‌های سطح بیوچار از جمله ظرفیت جذب و تبادل یونی شد که این امر به پایداری و افزایش قابلیت استفاده فسفر در خاک‌های آهکی کمک کرد (۱۲). با این وجود، برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که آزادسازی فسفر از بیوچار نسبت به منبع اولیه زیست‌توده کاهش یافته و در برخی دیگر، افزایش گزارش شده است (۸، ۱۳، ۱۴). بنابراین، بررسی بیش‌تر اثر نوع بیوچار، شرایط اصلاح و نوع خاک بر سینتیک فسفر ضروری به نظر می‌رسد.

از آن‌جا که فسفر در تعادل پویا بین فاز جامد و محلول خاک قرار دارد، سرعت آزادسازی فسفر از خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در قابلیت استفاده از آن برای گیاه دارد (۱۵). در همین راستا، بررسی رفتار سینتیکی آزادشدن فسفر از خاک و عوامل مؤثر بر آن از اهمیت بالایی در مدیریت کوددهی برخوردار است (۱، ۱۶). تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه رفتار

تهیه بیوچار، پوسته‌های بادام در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس درون لوله‌های استوانه‌ای فلزی پوشیده‌شده با فویل آلومینیومی در کوره به مدت ۲ ساعت قرار گرفتند (۲۷) و بیوچار تولید شده کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. عملکرد بیوچارها با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد (۲۸).

$$\text{عملکرد بیوچارها (\%)} = \frac{\text{وزن بیوچار}}{\text{وزن آون خشک ماده خام}} \times 100$$

برای تهیه بیوچار اسیدی، ۲۰۰ گرم بیوچار در بشر ریخته و با آب مقطر اشباع شد. سپس ۱۱/۳ میلی‌لیتر اسید فسفریک غلیظ (درصد جرمی/جرمی ۸۵ درصد) و ۳۴/۹ میلی‌لیتر اسید نیتریک (درصد جرمی/جرمی ۶۸ درصد) به آن اضافه و با هم‌زن شیشه‌ای بهم زده و در نهایت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شدند (۲۷، ۲۹). مقدار CEC، EC (نسبت ۱۰ به ۱ آب به بقایا) (۳۰)، فسفر کل بیوچارهای پوسته‌های بادام با روش‌های هضم با اسیدنیتریک + اسید پرکلریدریک (۲۵) تعیین شد.

**تیمار خاک‌ها و خوابانیدن:** برای مطالعه اثر بیوچار بر سرعت آزادشدن فسفر، آزمایش فاکتوریل ۳×۲×۲ در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از دو نوع خاک آهکی در ۳ تکرار انجام شد. آزمایش شامل فاکتور اول به‌ساز (بدون کاربرد (شاهد)، ۱ درصد وزنی/ وزنی بیوچار پوست بادام و ۱ درصد وزنی/ وزنی بیوچار پوست بادام اسیدی) و فاکتور دوم نوع خاک (شنی و رسی) در طی زمان خوابانیدن (۳۰ و ۶۰ روز) بود. در مجموع، ۶ تیمار بیان‌شده در ۳ تکرار به ۳۵۰ گرم از نمونه خاک مورد مطالعه اضافه شد. سپس، رطوبت خاک‌ها با استفاده از آب مقطر به ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه رسانده و به‌منظور خوابانیدن، دوره‌های ۳۰ و ۶۰ روز در نظر گرفته شد. در دوره خوابانیدن، با وزن کردن نمونه‌ها و جبران کاهش وزن

آزادسازی فسفر از خاک و بیوچارهای مختلف انجام شده است (۸، ۱۵، ۱۷، ۱۸)، با این حال، اطلاعات موجود درباره اثر بیوچارهای اصلاح‌شده با اسیدها بر سینتیک آزادشدن فسفر در خاک‌های آهکی به‌ویژه با بافت‌های مختلف، هنوز محدود است.

با توجه به اهمیت فسفر در تغذیه گیاه، کمبود آن در خاک‌های آهکی و قابلیت بیوچار در بهبود دسترسی گیاه به این عنصر، هدف این پژوهش بررسی تأثیر بیوچار تهیه‌شده از ضایعات پوست بادام و اصلاح‌شده آن با اسید، بر سرعت آزادسازی فسفر در دو خاک آهکی با بافت رسی و شنی بود.

## مواد و روش‌ها

**نمونه‌برداری خاک:** در این پژوهش دو نمونه خاک با کلاس بافت شنی و رسی از لایه سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) خاک‌های آهکی استان چهارمحال و بختیاری برداشته شد. سپس، نمونه‌های خاک هوا خشک، کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. نمونه‌های خاک به روش هیدرومتر تعیین شد (۱۹). در این خاک‌ها pH در سوسپانسیون ۱ به ۲ خاک به آب (۲۰)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره ۱ به ۲ خاک به آب (۲۱)، کربنات کلسیم معادل با روش خشتی‌کردن با اسید و تیتراسیون اسید اضافی با هیدروکسید سدیم، کربن آلی با روش اکسیداسیون تر (۲۲) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با روش استات سدیم (۲۲)، فسفر قابل‌استفاده و فسفر کل به‌ترتیب با استفاده از روش‌های اولسن (۲۳) و هضم با اسید نیتریک + اسید پرکلریدریک (۲۴) تعیین گردیدند (۲۵). سپس، غلظت فسفر در عصاره‌ها با استفاده از رنگ‌سنجی اندازه‌گیری گردید (۲۶).

**تهیه بیوچارها:** پوسته‌های سخت بادام از باغ‌های بادام در استان چهارمحال و بختیاری تهیه و با آب شسته و سپس خشک (در هوای آزاد) و خرد شدند. به‌منظور

فسفر عصاره‌گیری شد. در فاصله زمانی بین دو اندازه‌گیری، نمونه‌ها در انکوباتور در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ روز قرار داده شد (۹). سپس، غلظت فسفر در عصاره‌ها با استفاده از روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری شد (۲۶).

پس از جمع‌آوری داده‌ها، معادلات مرتبه اول، انتشار پارابولیکی، تابع توانی و الویج ساده (جدول ۱) بر داده‌های تجمعی آزادشدن فسفر برازش و براساس خطای استاندارد برآورد و ضریب تبیین برآورد بهترین مدل برای تعیین سرعت آزاد شدن فسفر استفاده گردید.

با آب مقطر، رطوبت خاک‌ها در ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه ثابت نگه‌داشته شد. پس از خوابانیدن، از خاک‌ها نمونه‌برداری و سرعت آزادشدن فسفر زمان به‌صورت زیر تعیین شد.

**سرعت آزادشدن فسفر:** پس از هر زمان خوابانیدن خاک‌ها، به‌منظور بررسی سرعت آزادشدن فسفر در دسترس از خاک‌ها، ۲ گرم نمونه خاک به همراه ۲۰ میلی‌لیتر بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار (pH=۸/۵) در لوله‌های سانتریفیوژ ریخته و با استفاده از روش عصاره‌گیری متوالی در زمان‌های ۲، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۲۴۰، ۳۳۶، ۴۵۶، ۶۰۰ و ۷۶۸ ساعت مقدار

جدول ۱- معادله‌های سینتیکی مورد استفاده در این پژوهش (۱).

Table 1. Kinetics equations used in this study (1).

مدل Model	معادله equation
$\ln(P_0 - P_t) = a - P_1 \cdot t$	مرتبه اول First-order
$P_t = a + R t^{0.5}$	انتشار پارابولیکی Parabolic diffusion
$P_t = a t^b$	تابع توانی Power function
$P_t = a + 1/\beta \ln t$	الویج ساده Elovich Simplified

\*  $P_0$  مقدار فسفر آزاد شده (mg/kg) بعد از ۷۶۸ ساعت،  $P_t$  مقدار فسفر آزاد شده (mg/kg) در زمان  $t$  و  $a$ ،  $b$ ،  $R$ ،  $P_1$  و  $\beta$  ضرایب سرعت معادله‌ها می‌باشند.

$P_0$  is the amount of phosphorus released (mg/kg) after 768 hours,  $P_t$  is the amount of phosphorus released (mg/kg) at time  $t$ , and  $a$ ,  $b$ ,  $R$ ,  $P_1$ , and  $\beta$  are the rate coefficients of the equations

که در آن،  $P$  و  $P^*$  به ترتیب نشان‌دهنده غلظت تعیین شده و محاسبه شده فسفر در خاک در زمان  $t$  انتخاب شده هستند و  $n$  تعداد نقاط داده ارزیابی شده است (۱).

پس از بررسی فرضیات تجزیه واریانس شامل همگنی واریانس‌ها و نرمال بودن باقی‌مانده‌ها، اثر عوامل تغییرات بیوپچار و نوع بافت خاک بر سرعت آزادشدن فسفر در طی زمان انکوباسیون با استفاده از

جهت تعیین بهترین مدل توصیف‌کننده سرعت آزادشدن فسفر از  $R^2$  (رابطه ۱) و خطای استاندارد برآورد (SEE) (رابطه ۲) استفاده گردید.

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\text{residual sum of squares}}{\text{total of sum of squares}} \right) \quad (1)$$

$$SEE = \left[ \frac{\sum (P - P^*)^2}{(n - 2)} \right]^{0.5} \quad (2)$$

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک رسی (۱۸/۶ سانتی مول بار بر کیلوگرم) بیش‌تر از خاک شنی (۱/۲ سانتی مول بار بر کیلوگرم) بود. این اختلاف می‌تواند ناشی از مقدار بالاتر رس و ماده آلی در خاک رسی باشد، چراکه هر دو عامل نقش مهمی در افزایش CEC دارند. همچنین مقدار ماده آلی در خاک رسی ۲/۶۷ درصد و در خاک شنی تنها ۰/۱۳ درصد بود که نشان‌دهنده تفاوت قابل‌توجه در توان ذخیره و نگهداری عناصر غذایی بین این دو خاک است. فسفر قابل استفاده (روش اولسن) و فسفر کل در خاک رسی بیش‌تر از خاک شنی بود (به‌ترتیب ۱۶/۸ و ۷/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای فسفر قابل استفاده، و ۸۳۴ و ۲۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای فسفر کل). این تفاوت نشان می‌دهد که خاک رسی علاوه بر دارا بودن ظرفیت بالاتر برای ذخیره فسفر، احتمالاً دارای ترکیب‌های معدنی فسفر بیش‌تری است که می‌تواند با گذشت زمان و تحت شرایط مناسب آزاد شوند.

تجزیه واریانس تکرارشونده و مدل جامع خطی (Generalized Linear Model) بررسی شد. همچنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار Statistica انجام شد.

### نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های خاک‌ها و بیوجار: در این پژوهش از دو نوع خاک با بافت‌های متفاوت (شنی و رسی) استفاده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. مقدار pH هر دو خاک در محدوده قلیایی قرار داشت (به‌ترتیب ۷/۵ برای خاک شنی و ۷/۶ برای خاک رسی) که نشان‌دهنده شرایط آهکی و احتمال محدودیت در فراهمی فسفر است. قابلیت هدایت الکتریکی خاک شنی بیش‌تر از خاک رسی بود (۰/۳۲ در برابر ۰/۱۸ دسی‌زیمنس بر متر) که به دلیل مقدار نمک‌های محلول بیش‌تر در خاک شنی است.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه.

Table 2. Some Physical and chemical properties of studied soils.

فسفر کل Total P	فسفر- اولسن P-Olsen	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	قابلیت هدایت الکتریکی EC	pH	کربنات کلسیم معادل Equivalent CaCO <sub>3</sub>	ماده آلی Organic matter	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	بافت Texture
mg/kg	mg/kg	cmol kg <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>			%				
249	7.4	1.2	0.32	7.5	35	0.013	3	11	86	شنی Sandy
834	16.8	18.6	0.18	7.6	64	2.67	60	33	7	رسی Clay

بادام و بیوجار پوسته چوبی که با اسید اصلاح شده بود. ویژگی‌های شیمیایی این دو نوع بیوجار در جدول ۳ ارائه شده است. بیوجار اسیدی، در مقایسه با بیوجار معمولی، دارای pH پایین‌تر (۳/۰ در برابر ۷/۱) و EC بسیار

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوجار تحت‌تأثیر عوامل متعددی از جمله نوع ماده اولیه، شرایط و دمای گرم‌ماکافت، مدت‌زمان فرآیند، اندازه ذرات و روش تهیه قرار می‌گیرد (۳۱). در این پژوهش، دو نوع بیوجار مورد استفاده قرار گرفت: بیوجار پوسته چوبی

غذایی در آن است (۳۲). همچنین، مقدار فسفر کل در بیوچار اسیدی (۲۸/۲ گرم بر کیلوگرم) نسبت به بیوچار معمولی (۳/۲ گرم بر کیلوگرم) بیش تر بود که این افزایش ناشی از استفاده از اسید فسفریک در فرآیند اصلاح می باشد. این ویژگی موجب بهبود پتانسیل بیوچار اسیدی در آزادسازی فسفر در خاک می شود.

کم تر ۰/۰۰۲۶ در برابر ۰/۴۶ (dS/m) بود. کاهش قابل توجه قابلیت هدایت الکتریکی در بیوچار اسیدی می تواند به دلیل حذف کاتیون های بازی طی فرآیند اسیدی سازی از محلول، کاهش pH و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی این بیوچار باشد (۱۲). ظرفیت تبادل کاتیونی در بیوچار اسیدی بیش تر از بیوچار معمولی بود (۱۷/۶ در برابر ۱۳/۷ cmol/kg) که نشان دهنده افزایش پتانسیل تبادل یونی و قابلیت جذب عناصر

جدول ۳- برخی ویژگی های بیوچارهای مورد استفاده.

Table 3. Some properties of used biochars.

بیوچار اسیدی Acid-modified biochar	بیوچار Biochar	ویژگی های بیوچار Biochar Properties
3.0	7.1	pH
0.0026	0.46	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity (dS m <sup>-1</sup> )
17.6	13.7	گنجایش تبادل کاتیونی (سانتی مول بار بر کیلوگرم) Cation exchange capacity (cmol kg <sup>-1</sup> )
28.2	3.2	فسفر کل (گرم بر کیلوگرم) Total P (g kg <sup>-1</sup> )
7.4	3.7	سطح ویژه (متر مربع بر گرم) Surface Area (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )
88.8	85.4	مقدار خاکستر (%) Ash (%)
23.9	32.6	عملکرد (%) Yield (%)

مستقیماً منبعی برای افزایش فسفر محلول در خاک باشد.

همچنین، تأثیر متفاوت بیوچارها در دو نوع خاک نشان می دهد که پاسخ خاک به تیمارهای بیوچار وابسته به بافت، ماده آلی و ویژگی های شیمیایی خاک است. خاک رسی به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، ماده آلی بیش تر (از طریق جذب کاتیون هایی مانند کلسیم) و با pH مشابه، توانایی بیش تری در نگهداری فسفر به صورت قابل استفاده دارد (۳۳).

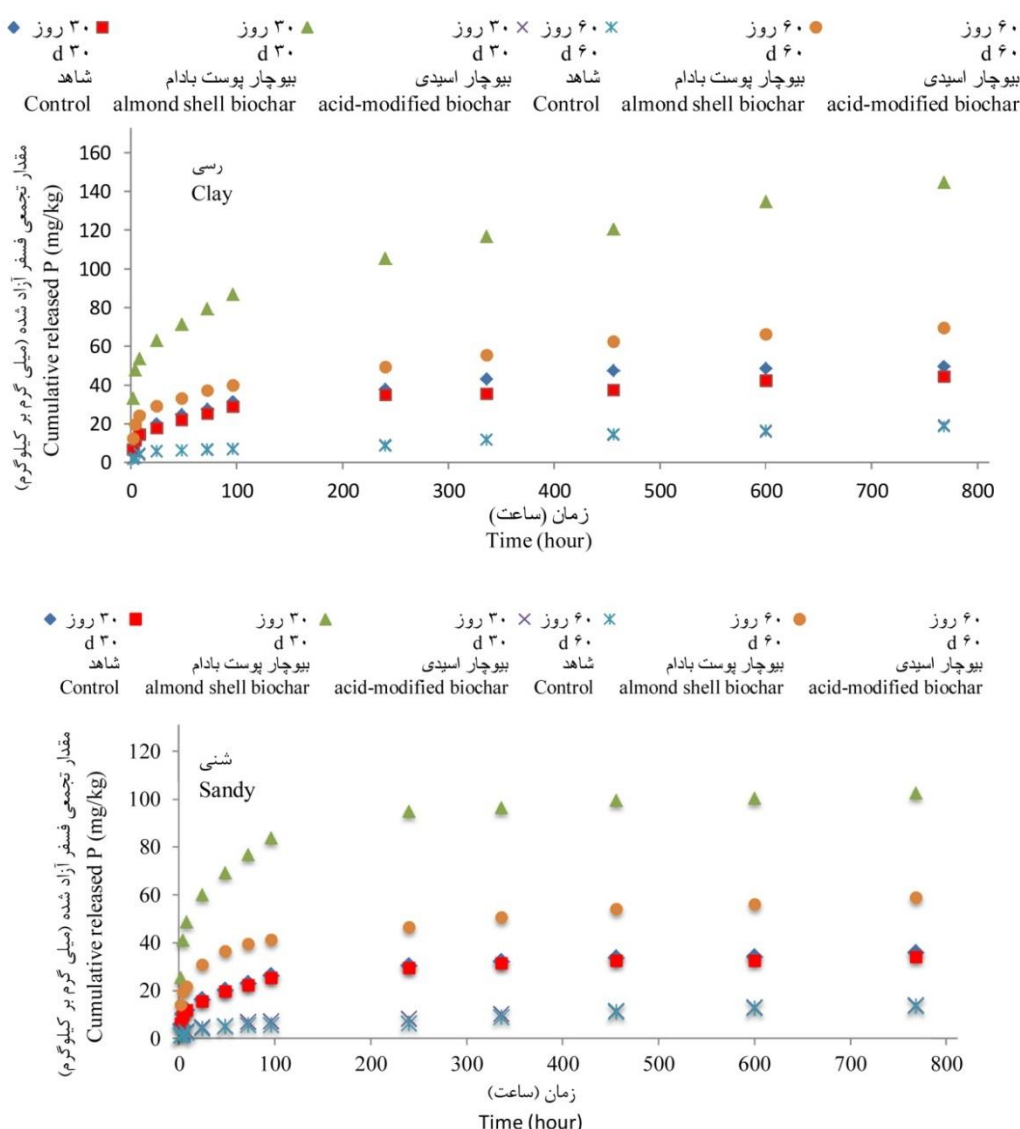
با توجه به ویژگی های شیمیایی بیوچارها، انتظار می رود بیوچار اسیدی عملکرد بهتری در افزایش فراهمی فسفر داشته باشد. pH پایین بیوچار ناشی از افزودن اسید می تواند موجب حل شدن ترکیب های فسفر کلسیمی نامحلول در خاک های آهکی شده و به آزادسازی فسفر کمک کند. همچنین، افزایش CEC این بیوچار به معنای ظرفیت بالاتر در تبادل یونی و نگهداری عناصر غذایی است. از سوی دیگر، افزایش فسفر کل موجود در بیوچار اسیدی می تواند

**فسفر آزادشده در خاک‌ها:** افزودن بیوچارهای مورد استفاده در این مطالعه موجب افزایش فسفر تجمعی آزادشده از هر دو خاک شد (شکل ۱). روند آزادسازی فسفر در همه تیمارها نشان داد که در ساعات اولیه، سرعت آزادشدن فسفر نسبتاً بالا بود و با گذشت زمان کاهش یافت و در نهایت به تعادل نسبی رسید. این الگو که در بسیاری از پژوهش‌های آزادسازی عناصر غذایی نیز گزارش شده است، می‌تواند ناشی از آزادسازی فسفر از مکان‌های با انرژی نگهداری پایین‌تر در ابتدای واکنش و کاهش تدریجی مکان‌های فعال دارای پتانسیل آزادسازی باشد (۲۵). علاوه بر این، تغییر در بار سطحی ذرات خاک، افزایش مکان‌های تبادل یونی، و تغییرات pH و قدرت یونی محلول خاک می‌تواند از عوامل مؤثر بر کاهش تدریجی سرعت آزادسازی فسفر باشد (۳۳).

در تیمار شاهد خاک شنی، مقدار فسفر تجمعی آزادشده در پایان واکنش طی دوره‌های ۳۰ و ۶۰ روزه به ترتیب ۳۵/۸ و ۶۷/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. نتایج نشان داد که بخش قابل توجهی از فسفر در ۲۴ ساعت اول آزاد شده است. در خاک رسی با تیمار شاهد نیز فسفر آزادشده در پایان واکنش در دوره‌های مذکور به ترتیب ۳۱/۱۹ و ۸/۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود و بیشترین مقدار تجمعی آزادسازی در ۹۶ ساعت ابتدایی رخ داده است.

مقایسه بین تیمارهای مختلف نشان داد که در همه تیمارها، استفاده از بیوچار اسیدی به‌طور معنی‌داری ( $P < 0/05$ ) مقدار فسفر آزادشده را افزایش داد (شکل ۲). در خاک شنی، مقدار فسفر تجمعی آزادشده پس از ۳۰ روز انکوباسیون در تیمارهای شاهد، بیوچار معمولی و بیوچار اسیدی به ترتیب برابر با ۲۵/۳۶-۱۰۲/۴۱ و ۶/۱۸-۳۴/۱۵، ۵/۸۴-۳۵/۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. همین روند در دوره ۶۰ روزه نیز مشاهده شد به طوری که تیمار بیوچار اسیدی

در هر دو زمان، به مراتب آزادسازی بیش‌تری نسبت به سایر تیمارها نشان داد. نتایج مشابهی در خاک رسی نیز ثبت شد، به‌ویژه در تیمار بیوچار اسیدی طی دوره ۳۰ روزه که بیش‌ترین مقدار فسفر تجمعی آزادشده (۱۴۴/۶۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را به خود اختصاص داد. بیوچار از طریق برهم‌کنش با اجزای آلی و معدنی خاک، بهبود ظرفیت جذب و واجذب فسفر و هم‌چنین افزایش CEC خاک می‌تواند تأثیر مثبتی بر افزایش فسفر قابل استفاده داشته باشد (۳۴، ۳۵، ۳۶). از سوی دیگر، بیوچار می‌تواند به‌عنوان منبع فسفر، غلظت فسفر محلول در آب را افزایش دهد (۳۷). نقش بیوچار در تشکیل کمپلکس‌های محلول با عناصر مزاحمی مانند کلسیم نیز در افزایش دسترسی فسفر قابل توجه است (۵، ۷). این نتایج با پژوهش گردلدانی و حسینی (۲۰۱۷) هم‌خوانی دارد که گزارش کردند، کاربرد بیوچار باگاس در خاک آهکی موجب افزایش غلظت فسفر قابل استفاده طی ۱۲۰ روز شد (۷). آن‌ها این پدیده را به افزایش فشار  $CO_2$  ناشی از تجزیه مواد آلی و تشکیل کمپلکس‌های محلول فسفر نسبت دادند. صرخه و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که کاربرد تیمارهای بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده با اسید سبب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر در دسترس خاک شد (۳۸). افزایش فسفر قابل دسترس خاک در اثر کاربرد بیوچارها می‌تواند به دلیل کاهش مکان‌های جذب فسفر در خاک باشد؛ چرا که بیوچارها می‌توانند با کاتیون‌های خاک از جمله کلسیم که با فسفر واکنش می‌دهند، پیوند برقرار کرده و با کاهش مکان‌های جذب فسفر در خاک، غلظت قابل دسترس آن در خاک را افزایش دهد (۳۹). هم‌چنین در سایر مطالعات، افزایش فسفر قابل استفاده به تجزیه مواد آلی و تشکیل ترکیب‌های آلی- معدنی جدید حاوی فسفر نسبت داده شده است که می‌تواند سرعت و مقدار آزادسازی فسفر در خاک را تحت تأثیر قرار دهد (۹، ۱۴، ۴۰).



شکل ۱- مقدار تجمعی فسفر آزاد شده (میلی گرم بر کیلوگرم) در طی زمان از خاک‌های رسی و شنی تیمار شده با بیوچار در طول ۳۰ و ۶۰ روز انکوباسیون.

Figure 1. Cumulative released P (mg/kg) from sandy and clay soils treated with biochar during 30 and 60 d incubation.

دقیق و یکنواختی برای بیوچار بر فراهمی عناصر غذایی به‌طور کامل مشخص نشده است (۳۵). از مهم‌ترین عوامل مؤثر، نوع ماده اولیه بیوچار است که ترکیب شیمیایی و مقدار عناصر غذایی موجود در آن را تعیین می‌کند.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل نوع خاک و بیوچار بر مقدار فسفر تجمعی آزاد شده طی

اگرچه در رابطه با نقش بیوچار در فراهمی عناصر غذایی نتایج متناقضی نیز گزارش شده است. در برخی پژوهش‌ها، افزودن بیوچار به خاک موجب افزایش و در برخی دیگر کاهش فراهمی عناصر غذایی و جذب آن‌ها توسط گیاهان شده است. این تفاوت‌ها اغلب به ویژگی‌های بیوچار، نوع خاک، شرایط محیطی و تعاملات شیمیایی در خاک بستگی دارد، و هنوز اثر

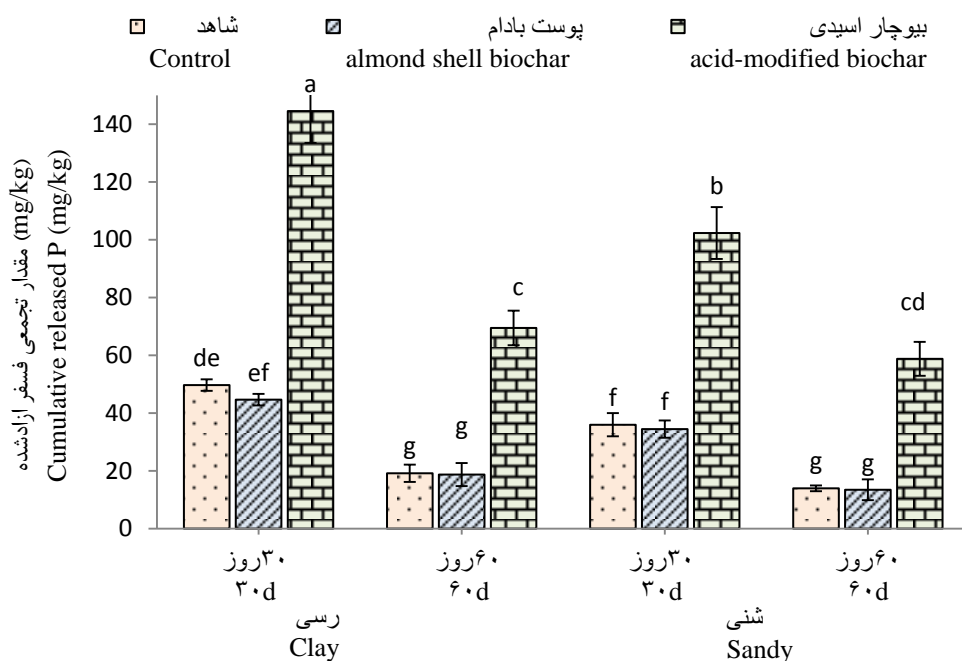
محدود می‌کند. در پژوهشی، سویین و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که با کاربرد بیوپچار در سه خاک با بافت متفاوت (رسی، شنی و لوم سیلتی رسی)، تنها در خاک لوم سیلتی رسی، فسفر محلول در آب در مقایسه با شاهد افزایش یافت. آن‌ها علت این امر را بالا بودن pH، درصد رس و کربنات کلسیم، و پایین بودن کربن آلی در این خاک دانستند که شرایط را برای تثبیت فسفر مساعدتر کرده بود (۴۳).

متقیان و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که استفاده از بیوپچار بقایای نیشکر تولیدشده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در یک خاک آهکی تیمار شده با فسفر (۰ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) پس از ۷ و ۱۲۰ روز انکوباسیون سبب افزایش اولیه آزاد شدن فسفر گردید. همچنین کمترین و بیشترین سرعت انتشار فسفر و مقدار آزادسازی اولیه به ترتیب در خاک شاهد و خاک تیمار شده با بیوپچار و کود فسفره مشاهده شد. بنابراین، افزودن ضایعات نیشکر به صورت بیوپچار در خاک می‌تواند مقدار فسفر در خاک‌های مشابه آهکی را افزایش دهد (۱). فارل و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی اثر کاربرد بیوپچار بر جزء بندی فسفر در یک خاک آهکی طی دو سال متوالی مشاهده کردند که در سال اول بالاترین سطح کاربرد بیوپچار (۵ تن در هکتار) سبب افزایش معنی‌دار فسفات آلومینیم و آهن ولی در سال دوم آزمایش این شکل در مقایسه با شاهد به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرد و این نشان می‌دهد کاربرد بیوپچار می‌تواند مقدار روند کاهش فسفر پیوند شده با آهن و آلومینیم را تا حداقل یکسال کاهش دهد (۴۴).

زمان در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (داده‌ها نمایش داده نشده است). مقایسه میانگین اثر متقابل بیوپچار و خاک در طی زمان (شکل ۲) نشان داد که در هر دو خاک، با گذشت زمان مقدار فسفر آزاد شده کاهش یافت. بیوپچار پوست بادام تأثیر معنی‌داری ( $P < 0/05$ ) بر افزایش آزادسازی فسفر در هیچ‌یک از خاک‌ها نداشت ( $P > 0/05$ )، درحالی‌که بیوپچار اصلاح شده منجر به افزایش قابل توجه فسفر آزاد شده شد؛ به طوری‌که در خاک رسی مقدار فسفر آزاد شده نسبت به شاهد در ۳۰ و ۶۰ روز به ترتیب ۲۲۰ و ۲۵۰ درصد و در خاک شنی ۲۳۰ و ۳۰۰ درصد افزایش یافت.

مواد آلی، از جمله بیوپچار، به شیوه‌های مختلفی باعث افزایش فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی می‌شوند. این مواد می‌توانند سطح ذرات آهک را پوشش داده و از تشکیل ترکیب‌های نامحلول فسفات کلسیم جلوگیری کنند (۴۱). همچنین استفاده بلند مدت از مواد آلی موجب می‌شود فسفر در مکان‌هایی با پیوند ضعیف‌تر نگهداری شود و قابلیت فراهمی آن در پروفیل خاک افزایش یابد. مکانیسم‌هایی مانند ایجاد پوشش محافظ اطراف ذرات کود، جذب فسفر به مکان‌های تبادل آنیونی، یا تشکیل ترکیب‌های فسفات آلی نیز سبب رهاسازی تدریجی فسفر در محلول خاک شده و در دسترس گیاه قرار می‌گیرند (۴۲، ۵).

کاهش بیش‌تر فسفر آزاد شده در خاک رسی در مقایسه با خاک شنی احتمالاً به علت بالاتر بودن مقدار کربنات کلسیم در این خاک است. وجود کربنات کلسیم بالا موجب تشکیل سریع ترکیب‌های فسفات کلسیم نامحلول می‌شود و آزادسازی مجدد فسفر را



شکل ۲- اثر متقابل بیوچار و خاک در طی زمان بر مقدار فسفر تجمعی آزاد شده (میلی گرم بر کیلوگرم).

(میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه می‌باشند، بر اساس آزمون چنددامنه دانکن باهم اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند).

**Figure 2. Interaction between biochar and soil during time on cumulative released P (mg/kg).**  
(Averages with the same letters do not have a significant difference at the 5% level based on Duncan's multiple range test).

پوسته بادام از ۳/۴۶ - ۸/۴۳ (میانگین ۵/۶۸) و در بیوچار اسیدی از ۱۱/۹۲ - ۲۷/۴۱ (میانگین ۱۹/۱۷)، در معادله الویچ ساده در خاک شاهد از ۰/۸۶ - ۰/۳۱ (میانگین ۰/۵۶)، در پوسته بادام از ۰/۷۲ - ۰/۳۲ (میانگین ۰/۵۴) و در بیوچار اسیدی از ۲/۷۴ - ۰/۹۳ (میانگین ۱/۸۷)، در تابع توانی در خاک شاهد از ۰/۲۳ - ۰/۷۹ (میانگین ۰/۴۹)، در پوسته بادام از ۰/۷۵ - ۲/۲۱ (میانگین ۱/۷۶) و در بیوچار اسیدی از ۰/۵۴ - ۲/۲۴ (میانگین ۱/۴۲) و در معادله پارابولیکی در خاک شاهد از ۲/۰۶ - ۳/۸۹ (میانگین ۳)، در پوسته بادام از ۱/۴۴ - ۲/۷۹ (میانگین ۱/۸۴) و در بیوچار اسیدی از ۳/۰۴ - ۸/۴۹ (میانگین ۶/۰۹) متغیر بودند. همانگونه که مشاهده می‌شود در همه تیمارها معادله تابع توانی با دارا بودن بیش‌ترین ضریب تبیین و کم‌ترین خطای استاندارد نسبت به معادلات دیگر

سرعت آزاد شدن فسفر در خاک‌ها: سرعت آزاد شدن از مهم‌ترین جنبه‌های مطالعات آزاد شدن عناصر در خاک می‌باشد زیرا مسیر واکنش و مکانیسم‌های درگیر در فرآیند جذب را آشکار می‌کند. در مطالعات مختلف از معادلات متفاوتی جهت برازش داده‌های آزاد شدن استفاده شده و ممکن است نتایج برازش در هر مطالعه متفاوت باشد (۲۳). جهت توصیف سرعت آزادسازی فسفر در خاک‌های تیمار شده، بر داده‌های مراحل آزادسازی فسفر با معادله‌های الویچ ساده، مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیکی و تابع توانی برازش شد. مقادیر ضرایب تبیین و خطای استاندارد معادلات ستیکی برازش داده شده بر داده‌های آزادسازی فسفر از خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۴ آورده شده است. خطای استاندارد برآورد در معادله مرتبه اول در خاک شاهد از ۳/۳۲ - ۱۰/۰۹ (میانگین ۶/۶۲) در

است و سرعت آن وابسته به ویژگی‌های خاک مانند اندازه ذرات، تخلخل، سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی است (۴۶، ۴۷). در خاک‌های رسی با منافذ ریز و سطح ویژه بالا، انتشار کندتر و آزادسازی فسفر تدریجی است، درحالی‌که در خاک‌های شنی با منافذ درشت، انتشار سریع‌تر اما در زمان کوتاه می‌باشد. در این پژوهش مدل‌های الویج ساده و تابع توانی بر داده‌های سینتیک آزادشدن فسفر بهتر برازش شدند که نشان می‌دهد فرآیند آزادشدن توسط انتشار است، زیرا سرعت آزادسازی با گذر زمان کاهش می‌یابد. حتی تحت‌تأثیر تیمارهای اسیدی یا بیوچار که موجب افزایش سطح ویژه و گروه‌های عاملی فعال می‌شوند، مکانیسم غالب آزادسازی فسفر هم‌چنان انتشار است.

برازش بهتری بر داده‌های آزادشده داشت. معادله الویج ساده در خاک‌های تیمار شده بعد از تابع توانی به‌عنوان بهترین معادله برای خاک‌های تیمار شده شناخته شد. این امر بیانگر غالب‌بودن مکانیسم انتشار در فرآیند آزادشدن فسفر از خاک تحت‌تأثیر تیمارهای مورد مطالعه است. در مطالعات قبل تشریح موفقیت‌آمیز سرعت آزادسازی فسفر توسط تابع توانی (۱، ۴۵) و معادله الویج ساده (۱۶) گزارش شده است. در اکثر خاک‌ها، فسفر به‌صورت جذب‌شده یا رسوب‌شده روی فازهای معدنی مانند  $Ca-P$ ،  $Fe-P$  یا  $Al-P$  وجود دارد و به‌طور مستقیم در محلول خاک در دسترس نیست. حرکت یون‌های فسفات از فازهای جامد به محلول خاک عمدتاً از طریق فرآیند انتشار

جدول ۴- ضرایب تبیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد برآورد (SEE) معادلات سرعت در توصیف آزادشدن فسفر در تیمارهای مختلف.

**Table 4. Coefficients of determination ( $R^2$ ) and standard error of estimation (SEE) of equations describing the release of phosphorus in different treatments.**

پارابولیکی Parabolic		تابع توانی Power function				الویج ساده Simplified Elovich				مرتبه اول First-order				تیمارها treatments	نوع خاک soils		
60		30		60		30		60		30		60				30	
SEE	$R^2$	SEE	$R^2$	SEE	$R^2$	SEE	$R^2$	SEE	$R^2$	SEE	$R^2$	SEE	$R^2$			SEE	$R^2$
2.06	0.95	3.89	0.95	0.23	0.97	0.79	0.96	0.35	0.94	0.31	0.99	3.22	0.74	7.94	0.79	شاهد Control	
1.90	0.94	2.79	0.90	2.21	0.98	0.75	0.97	0.50	0.94	0.32	0.99	3.26	0.79	7.14	0.94	بیوچار پوست بادام almond shell biochar	شنی Sandy
3.04	0.89	8.49	0.77	1.67	0.98	2.34	0.93	2.43	0.99	0.93	0.99	11.29	0.98	23.99	0.95	بیوچار اسیدی acid-modified biochar	
2.16	0.96	3.89	0.95	0.40	0.97	0.53	0.99	0.73	0.90	0.86	0.97	5.13	0.62	10.09	0.98	شاهد Control	
2.21	0.96	1.44	0.94	1.95	0.97	2.16	0.97	0.72	0.94	0.63	0.98	3.72	0.88	8.43	0.97	بیوچار پوست بادام almond shell biochar	رسی Clay
6.23	0.96	6.59	0.92	0.54	0.98	1.12	0.99	1.41	0.95	2.74	0.95	13.25	0.95	27.41	0.90	بیوچار اسیدی acid-modified biochar	

SEE بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم،  $R^2$  بزرگ‌تر از ۰/۸۰ در سطح ۵ درصد معنی‌دار است

SEE in terms of mg/kg,  $R^2$  greater than 0.80 is significant at the 5% level

شده با بیوچار اسیدی کم‌تر از بیوچار پوست بادام بود. به‌طور کلی، آزاد شدن فسفر از خاک را می‌توان نتیجه فرآیندهای انتشار و انحلال دانست. بدین‌صورت که ابتدا بخش ناپایدار فسفر موجود روی ذرات خاک درون منافذ سطحی پخشیده شده و در پی آن ترکیب‌های بلوری منیزیم- فسفات و آهن- فسفات حل شده و فسفر آزاد می‌شود (۸). مقدار ضریب تعیین بالای معادله توانی و الوویچ ساده نیز تصدیق می‌کند که این معادله آزاد شدن فسفر را به درستی تشریح می‌کنند. لیانگ و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که رهاسازی فسفر از بیوچار کود گاوی در ابتدا توسط فرآیند انتشار و سپس توسط انحلال آهسته و مداوم فسفر از کانی‌هایی که در طی تولید بیوچار شکل گرفته است، کنترل می‌شود (۸). به‌طور خلاصه، این یافته‌ها بیانگر آن است که استفاده از بیوچار، به‌ویژه بیوچار اصلاح‌شده با اسید، در خاک‌های آهکی می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش فراهمی فسفر و بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاهان باشد. همچنین نوع خاک و زمان خواباندن نیز نقش مؤثری در دینامیک آزادسازی فسفر ایفا می‌کنند و باید در مدیریت تغذیه فسفر مورد توجه قرار گیرند.

ضرایب مدل‌های سینتیکی برآزش شده بر مقادیر فسفر آزاد شده توسط بی‌کربنات سدیم یا همان مقادیر شیب (b) و عرض از مبدأ (a) نمونه‌های خاک برای معادله‌های تابع توانی و الوویچ ساده در جدول ۵ نشان داده شده است. مقادیر b شاخصی از سرعت آزادسازی فسفر است. مقدار پارامتر a (عرض از مبدأ معادله) بیان‌کننده سرعت آزادسازی فسفر در مرحله اول آزادسازی (مقدار اولیه فسفر آزاد شده) فسفر است.

در ۳۰ و ۶۰ روز انکوباسیون، ضریب a و  $\alpha$  در تیمار بیوچار اسیدی در هر دو خاک بیش‌تر از تیمار شاهد بودند. مقدار ضرایب a و  $\alpha$  در هر دو خاک در تیمار بیوچار پوست بادام نزدیک به مقدار این ضرایب در خاک شاهد بود. مقدار این ضرایب در تیمار بیوچار اسیدی افزایش یافت. همچنین این ضرایب در خاک رسی بیشتر از خاک شنی بودند. کم‌ترین ضریب b و  $1/\beta$  در تیمارهای بیوچار اسیدی مشاهده شد که نشان‌دهنده سرعت بیش‌تر آزاد شدن فسفر از این تیمارها است. ضریب a پس از ۶۰ روز انکوباسیون کاهش یافت و ثابت b و  $1/\beta$  افزایش یافت. بنابراین با گذشت زمان سرعت آزاد شدن فسفر کاهش یافت، اما این کاهش ضریب a و افزایش b در خاک تیمار

جدول ۵- ضرایب سرعت در معادلات توصیف‌کننده آزاد شدن فسفر در تیمارهای مختلف.

Table 5. Rate coefficients in the equations describing P release in different treatments.

الووویچ ساده				تابع توانی				تیمارها treatments	خاک Soil
Simplified Elovich		Power function							
60 d	30 d	60 d	30 d	b	a	b	a		
$1/\beta$	$\alpha$	$1/\beta$	$\alpha$	b	a	b	a	شاهد Control	
2.05	-1.44	5.13	1.66	0.38	0.104	0.28	1.84	بیوچار پوست بادام almond shell biochar	شنی Sandy
1.93	-1.79	4.91	1.9	0.39	-0.09	0.27	1.84	بیوچار اسیدی acid-modified biochar	
7.43	7.82	12.87	20.69	0.23	2.63	0.21	3.36	شاهد Control	
2.48	-1.18	7.14	0.51	0.35	0.48	0.27	2.08	بیوچار پوست بادام almond shell biochar	رسی Clay
2.49	-1.75	6.11	1.14	0.36	0.45	0.28	1.97	بیوچار اسیدی acid-modified biochar	
9.16	3.00	17.41	14.77	0.26	2.52	0.22	3.45		

a بر حسب (mg kg<sup>-1</sup>) و (b و  $1/\beta$ ) (mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) است

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که اصلاح بیوچار پوست بادام با اسید فسفریک و اسید نیتریک موجب افزایش قابل توجه مقدار فسفر آزاد شده و همچنین سرعت آزاد شدن فسفر از دو نوع خاک‌های آهکی شد. در مقایسه با بیوچار پوست بادام، بیوچار اصلاح شده با این اسیدها تأثیر بیشتری بر بهبود قابلیت دسترسی فسفر داشت و این اثر در خاک‌های رسی و در ۳۰ روز انکوباسیون برجسته‌تر بود. این یافته‌ها اهمیت اصلاح شیمیایی بیوچار را برای بهینه‌سازی عملکرد آن در سیستم‌های خاک آهکی مشخص می‌کند. با توجه به این‌که این تغییرات ناشی از اصلاح بیوچار با اسید بوده است و نمی‌توان نقش اسید فسفریک را نادیده گرفت؛ پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده اثر اسید فسفریک بر رفتار فسفر، هم در حضور و هم در غیاب بیوچار نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

### تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد خانم ساناز بازبوند در دانشگاه شهرکرد می‌باشد و مراتب تشکر و قدردانی از حمایت مادی و معنوی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهرکرد به جا آورده می‌شود.

### داده‌ها و اطلاعات

در این پژوهش از داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده در دانشگاه شهرکرد استفاده شده است.

### تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است. مشارکت نویسندگان نویسنده اول: اجرای آزمایش، جمع‌آوری داده‌ها. نویسنده دوم: تجزیه و تحلیل داده‌ها و نگارش پیش‌نویس مقاله و بازبینی مقاله. نویسنده سوم: نظارت بر آنالیز و تحلیل داده‌ها، نگارش مقاله. نویسنده چهارم: نگارش مقاله.

### اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

### حمایت مالی

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه شهرکرد انجام شده است.

### منابع

1. Motaghian, H., Hosseinpour, A., & Safian, M. (2020). The effects of sugarcane-derived biochar on phosphorus release characteristics in a calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(1), 66-74.
2. Moghimi, N., Hosseinpour, A., & Motaghian, H. (2018). The effect of vermicompost on transformation rate of available P applied as chemical fertilizer in a calcareous clay soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(17), 2131-2142.
3. Jalali, M. (2006). Soil phosphorous buffer coefficient as influenced by time and rate of P addition: (Einfluss von Zeit und Phosphor-Applikationsrate auf den Bodenphosphor-Pufferkoeffizienten). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 52(3), 269-279.
4. Alvarez, R., Evans, L. A., Milham, P. J., & Wilson, M. A. (2004). Effects of humic material on the precipitation of calcium phosphate. *Geoderma*, 118(3-4), 245-260.
5. Schneider, F., & Haderlein, S. B. (2016). Potential effects of biochar on the

- availability of phosphorus-mechanistic insights. *Geoderma*, 277, 83-90.
6. Audette, Y., O'Halloran, I. P., & Voroney, R. P. (2016). Kinetics of phosphorus forms applied as inorganic and organic amendments to a calcareous soil. *Geoderma*, 262, 119-124.
  7. Gerdelidani, A. F., & Hosseini, H. M. (2017). Effects of sugar cane bagasse biochar and spent mushroom compost on phosphorus fractionation in calcareous soils. *Soil Research*, 56(2), 136-144.
  8. Liang, X., Jin, Y., He, M., Niyungeko, C., Zhang, J., Liu, C., Tian, G., & Arai, Y. (2018). Phosphorus speciation and release kinetics of swine manure biochar under various pyrolysis temperatures. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 25780-25788.
  9. Safian, M., Motaghian, H., & Hosseinpour, A. (2020). Effects of sugarcane residue biochar and P fertilizer on P availability and its fractions in a calcareous clay loam soil. *Biochar*, 2, 357-367.
  10. Mukherjee, A., & Zimmerman, A. R. (2013). Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures. *Geoderma*, 193, 122-130.
  11. Amin, A. E. E. A. Z., & Eissa, M. A. (2017). Biochar effects on nitrogen and phosphorus use efficiencies of zucchini plants grown in a calcareous sandy soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4), 912-921.
  12. Mihoub, A., Amin, A. E. E. A. Z., Motaghian, H. R., Saeed, M. F., & Naeem, A. (2022). Citric acid (CA)-modified biochar improved available phosphorus concentration and its half-life in a P-fertilized calcareous sandy soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-10.
  13. Qi, S., Yang, S., Lin, X., Hu, J., Jiang, Z., & Xu, Y. (2023). The long-term effectiveness of biochar in increasing phosphorus availability and reducing its release risk to the environment in water-saving irrigated paddy fields. *Agricultural Water Management*, 282, 108295.
  14. Zhang, L., Chang, L., Liu, H., de Jesus Puy Alquiza, M., & Li, Y. (2025). Biochar application to soils can regulate soil phosphorus availability: A review. *Biochar*, 7(1), 13.
  15. Toor, G., & Bahl, G. (1999). Kinetics of phosphate desorption from different soils as influenced by application of poultry manure and fertilizer phosphorus and its uptake by soybean. *Bioresource Technology*, 69(2), 117-121.
  16. Shariatmadari, H., Shirvani, M., & Jafari, A. (2006). Phosphorus release kinetics and availability in calcareous soils of selected arid and semiarid toposequences. *Geoderma*, 132(3-4), 261-272.
  17. McDowell, R., & Sharpley, A. (2003). Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration. *Geoderma*, 112(1-2), 143-154.
  18. Wang, Y., Lin, Y., Chiu, P. C., Imhoff, P. T., & Guo, M. (2015). Phosphorus release behaviors of poultry litter biochar as a soil amendment. *Science of the Total Environment*, 512, 454-463.
  19. Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411.
  20. Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods*, 5, 475-490.
  21. Rhoades, J. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods*, 5, 417-435.
  22. Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods*, 5, 1201-1229.
  23. Havlin, J., Westfall, D., & Olsen, S. (1985). Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 49(2), 371-376.
  24. Sommers, L., & Nelson, D. (1972). Determination of total phosphorus in soils: a rapid perchloric acid digestion

- procedure. *Soil Science Society of America Journal*, 36(6), 902-904.
25. Sparks, D. L. (2013). *Kinetics of soil chemical processes*. Academic press.
  26. 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.
  27. Gunes, A., Inal, A., Taskin, M., Sahin, O., Kaya, E., & Atakol, A. (2014). Effect of phosphorus-enriched biochar and poultry manure on growth and mineral composition of lettuce (*L. actuca sativa L. cv.*) grown in alkaline soil. *Soil use and management*, 30(2), 182-188.
  28. Song, W., & Guo, M. (2012). Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 94, 138-145.
  29. Sahin, O., Taskin, M., Kaya, E., Atakol, O., Emir, E., Inal, A., & Gunes, A. (2017). Effect of acid modification of biochar on nutrient availability and maize growth in a calcareous soil. *Soil use and management*, 33(3), 447-456.
  30. Singh, B., Camps-Arbestain, M., & Lehmann, J. (2017). *Biochar: a guide to analytical methods*. Csiro Publishing.
  31. Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), 436-442.
  32. Hasanpour, I., Shirvani, M., Hajabbasi, M., & Majidi, M. (2022). Effect of acidic biochars on some chemical properties and nutrient availabilities of calcareous soils. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 26(2), 39-59.
  33. Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and soil*, 237(2), 173-195.
  34. Xu, G., Sun, J., Shao, H., & Chang, S. X. (2014). Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecological engineering*, 62, 54-60.
  35. Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—a review. *Soil biology and biochemistry*, 43(9), 1812-1836.
  36. Bornø, M. L., Müller-Stöver, D. S., & Liu, F. (2018). Contrasting effects of biochar on phosphorus dynamics and bioavailability in different soil types. *Science of the Total Environment*, 627, 963-974.
  37. Parvage, M. M., Ulén, B., Eriksson, J., Strock, J., & Kirchmann, H. (2013). Phosphorus availability in soils amended with wheat residue char. *Biology and fertility of soils*, 49, 245-250.
  38. Sorkheh, S., Moezzi, A., Moradi, N., & Karimi, A. (2024). Modified biochar application effects on soil chemical properties and nutrients uptake in sugarcane cv. CP73-21. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(9), 1521-1536.
  39. Gao, S., DeLuca, T. H., & Cleveland, C. C. (2019). Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 654, 463-472.
  40. Zhang, N., Zhang, X., Matelele, L. A., Zhu, P., Liu, H., Zhang, X., Gao, H., Feng, G., Peng, C., & Zhang, S. (2024). Mineral-associated organic carbon promoted phosphorus accumulation in long-term fertilized black soil. *Pedosphere*.
  41. Delgado, A., & Torrent, J. (2000). Phosphorus forms and desorption patterns in heavily fertilized calcareous and limed acid soils. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2031-2037.
  42. Zolfi-Bavariani, M., R., A., Ghasemi-Fasaei, R., & Yasrebi, J. (2016). Influence of poultry manure-derived biochars on nutrients bioavailability and chemical properties of a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(11), 1578-1591.
  43. Soinne, H., Hovi, J., Tammeorg, P., & Turtola, E. (2014). Effect of biochar

- on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability. *Geoderma*, 219, 162-167.
44. Farrell, M., Macdonald, L. M., Butler, G., Chirino-Valle, I., & Condrón, L. M. (2014). Biochar and fertiliser applications influence phosphorus fractionation and wheat yield. *Biology and fertility of soils*, 50, 169-178.
45. Jalali, M., & Ahmadi Mohammad Zinli, N. (2011). Kinetics of phosphorus release from calcareous soils under different land use in Iran. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(1), 38-46.
46. Arai, Y., & Sparks, D. (2007). Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: A multiscale approach. *Advances in agronomy*, 94, 135-179.
47. Sparks, D. L., Singh, B., & Siebecker, M. G. (2022). *Environmental soil chemistry*. Elsevier.

