



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



تغییرات شاخص پسماند فسفر در یک خاک لوم اسیدی تیمار شده با بیوجار

لاریسا قدسزاد^{۱*}، عادل ریحانی تبار^۲

^۱ گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز؛ *larissaghodsad@gmail.com

^۲ گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

چکیده

پدیده پسماند فسفر در خاک یا برگشت‌ناپذیری بخشی از فسفر جذب‌شده به محلول خاک، با ویژگی‌های خاک، فرایند جذب و زمان تعادل مرتبط است. این پژوهش با هدف بررسی اثر بیوجار بر شاخص پسماند فسفر انجام شد. بدین منظور، بیوجار تهیه‌شده در دو دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، در سطوح ۰،۳ و ۰،۶ درصد (وزنی/وزنی) به یک نمونه خاک لوم اسیدی افزوده شد. پس از گذشت سه ماه انکوباسیون مخلوط خاک و بیوجار، آزمایش‌های جذب و واجذب فسفر انجام و شاخص پسماند با استفاده از نسبت توان معادله فروندلیچ هم‌دمای نگهداشت به توان معادله فروندلیچ هم‌دمای جذب محاسبه گردید. نتایج نشان داد با افزایش دمای پیرولیز و سطح مصرف بیوجار، شاخص پسماند فسفر در مقایسه با خاک تیمار نشده افزایش یافت. بیش‌ترین مقدار شاخص (۴۷/۴۵ درصد) در خاک تیمار شده با بیوجار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در سطح ۰،۶ درصد مشاهده شد که نسبت به خاک تیمار نشده حدود ۷۱ درصد افزایش نشان داد. افزایش شاخص پسماند مورد استفاده در این مطالعه، نشان‌دهنده کاهش برگشت‌ناپذیری فسفر و در نتیجه افزایش فراهمی آن در محلول خاک است. براین اساس، استفاده از بیوجار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر در بهبود دسترسی گیاه به فسفر در خاک‌های اسیدی توصیه شود.

واژگان کلیدی: جذب، فروندلیچ، نگهداشت، واجذب، هم‌دمای

مقدمه

یکی از جنبه‌های کم‌تر شناخته‌شده در ارتباط با شیمی فسفر در خاک، عدم انطباق هم‌دمای جذب و نگهداشت فسفر است که به عنوان پدیده «پسماند^۱ فسفر» شناخته می‌شود. بررسی این ویژگی می‌تواند در بهینه‌سازی مصرف کودهای فسفوری و کاهش اثرات زیست‌محیطی این عنصر مؤثر واقع شود (Sharma and Kaur, 2025). پسماند فسفر در خاک برگشت‌ناپذیری و یا رهاسازی کم‌تر بخشی از فسفر جذب‌شده از سطوح فاز جامد خاک به محلول خاک توصیف می‌شود (Zheng et al., 2020). برای کمی‌سازی برگشت‌ناپذیری فسفر جذب‌شده، شاخص‌های متعددی معرفی شده‌اند که امکان مقایسه و ارزیابی میزان برگشت‌ناپذیری فسفر جذب‌شده از سطوح فاز جامد خاک به محلول خاک را فراهم می‌کنند. با توجه به اینکه بخش زیادی از فسفر مصرف‌شده در خاک تثبیت می‌شود و تنها بین ۵ تا ۳۰ درصد آن

¹ Hysteresis

توسط گیاه قابل استفاده است، به کارگیری راهکارهایی برای کاهش برگشت‌ناپذیری فسفر جذب‌شده و افزایش واجذب و رهایش آن به محلول خاک، با هدف ارتقای کارایی کودهای فسفوری، به یکی از محورهای اصلی پژوهش در حوزه حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه تبدیل شده است. بیوچار از طریق برهم‌کنش با اجزای آلی و معدنی خاک می‌تواند موجب تغییر میزان برگشت‌ناپذیری فسفر و در نتیجه تغییر شاخص پسماند فسفر در خاک شود (Eduah et al., 2019). مطالعه Zheng و همکاران (2020) در دو خاک شنی و رسی تیمار شده با بیوچار در سطوح ۰، ۲، ۴ و ۸ درصد (وزنی/وزنی) نشان داد که هم‌دماهای جذب-نگهداشت^۲ فسفر بر هم منطبق نبودند و هر دو خاک درجات متفاوتی از پسماند را نشان دادند. اگرچه عواملی از جمله دمای پیرولیز، نوع زیست‌توده و ویژگی‌های خاک می‌توانند در اثر بیوچار بر شاخص پسماند فسفر تأثیرگذار باشند، با این حال، شواهد علمی موجود برای تبیین جامع این اثرات همچنان ناکافی است؛ از این رو، انجام مطالعات بیشتر به منظور درک بهتر این روابط ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس، با توجه به نقش کلیدی فسفر در تولیدات کشاورزی و گسترش کاربرد بیوچار به عنوان روشی نوین در اصلاح خاک‌های زراعی، مطالعه حاضر اساساً با هدف بررسی اثر بیوچار تهیه‌شده در دو دمای متفاوت (۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس)، بر شاخص پسماند فسفر در یک نمونه خاک اسیدی انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، یک نمونه خاک زراعی مرکب از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری از استان گیلان تهیه و پس از هواخشک کردن، کوبیدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری و آماده‌سازی، ویژگی‌های آن با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (Eduah et al., 2019). برای تهیه بیوچار نیز، زیست‌توده کاه و کلش گندم جمع‌آوری و بیوچار حاصل از آن در دو دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس تحت فرایند پیرولیز آهسته تولید و ویژگی‌های آن مطابق روش Reyhanitabar و همکاران (2020) تعیین شد. در این مطالعه، بیوچارهای تهیه‌شده در دو دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به‌اختصار و به ترتیب بیوچار ۳۰۰ و بیوچار ۶۰۰ نامیده شدند. در گام بعد، بیوچار ۳۰۰ و بیوچار ۶۰۰ در سطوح ۰، ۳ و ۶ درصد (وزنی/وزنی) به خاک افزوده شده و به‌طور کامل با خاک مخلوط شدند. نمونه‌ها به مدت سه ماه در دمای آزمایشگاه و رطوبت معادل ظرفیت مزرعه انکوبه شدند. پس از انکوباسیون، آزمایش‌های هم‌دماهای جذب فسفر در دامنه غلظتی ۵ تا ۲۰۰ میلی‌گرم فسفر در لیتر از منبع پتاسیم‌دی‌هیدروژن فسفات (KH_2PO_4) با استفاده از محلول زمینه کلسیم کلرید ($CaCl_2$) ۰/۰۱ مولار انجام گرفت. آزمون واجذب فسفر نیز از بالاترین غلظت فسفر در ۹ مرحله متوالی با استفاده از همان محلول زمینه انجام شد. محاسبه مقادیر فسفر جذب‌شده، فسفر نگه‌داشت‌شده، خطای معیار برآورد (SEE)، برآورد پارامترهای معادله فروندلیچ (معادله ۱) و ضریب تبیین (r^2) برای داده‌های جذب و نگهداشت، مطابق روش Ghodszad و همکاران (2022) انجام شد.

$$Q = K_f C_e^{1/n} \quad (1)$$

که در آن K_f تمایل جذب/نگهداشت فسفر بر حسب لیتر بر کیلوگرم، n شدت جذب/نگهداشت فسفر، Q مقدار فسفر جذب‌شده/نگهداشت‌شده در واحد جرم خاک بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و C_e غلظت تعادلی فسفر بر حسب میلی‌گرم در لیتر است. شاخص پسماند (HI^3) نیز با استفاده از معادله (۲) محاسبه گردید.

$$HI = [(1/n_{ret}) / (1/n_{sorp})] * 100 \quad (2)$$

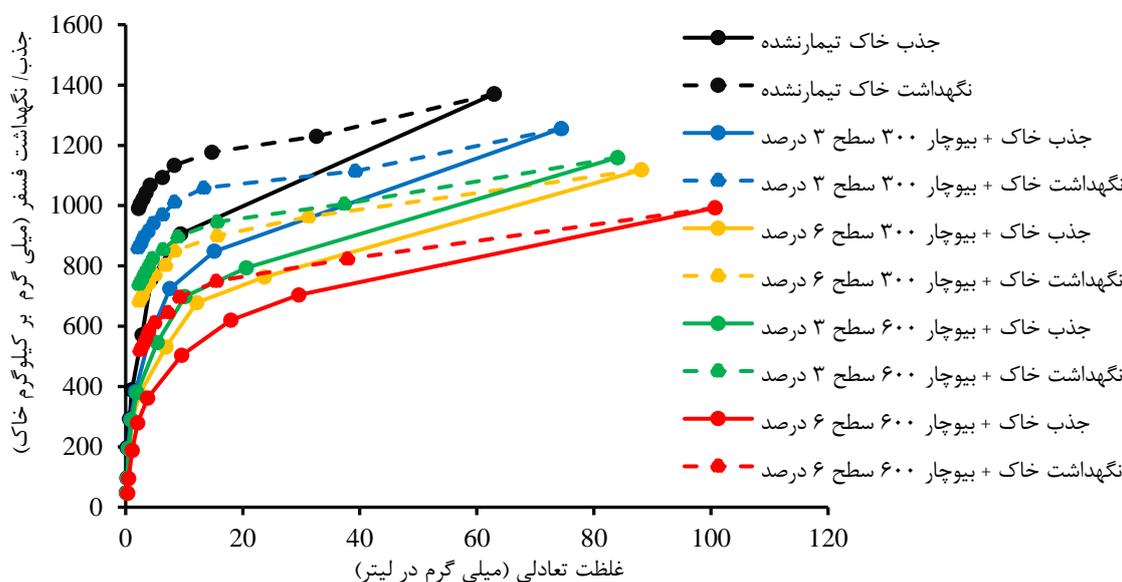
که در آن $1/n_{sorp}$ و $1/n_{ret}$ توان معادله فروندلیچ به ترتیب برای هم‌دماهای نگهداشت و جذب می‌باشد.

² Sorption-retention isotherm

³ Hysteresis index

نتایج و بحث

نمونه خاک تهیه شده دارای بافت لوم، pH اسیدی (4/6 = pH) و قابلیت هدایت الکتریکی برابر 0/16 دسی‌زیمنس بر متر بود. pH و قابلیت هدایت الکتریکی خاک هر دو در نسبت ۱ به ۱ خاک به آب مقطر اندازه‌گیری شدند. هم‌چنین، میزان کربن آلی در این خاک معادل ۲/۷ درصد و فسفر قابل‌استفاده براساس عصاره‌گیر مهلیخ I برابر با ۹/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود. با افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ به ۶۰۰ درجه سلسیوس، pH بیوچار از ۶/۶ به ۹/۷ (اندازه‌گیری شده در نسبت ۱ به ۱۰ بیوچار به آب مقطر) و مقدار خاکستر از ۲۲/۶ به ۳۵/۶ درصد افزایش یافت. مقدار فسفر کل بیوچار نیز با افزایش دمای پیرولیز از ۱/۱ به ۲/۱ و فسفر قابل‌استفاده از ۰/۴ به ۰/۷ گرم بر کیلوگرم افزایش یافت. در این مطالعه براساس T^2 و SEE معادله فروندلیچ به‌خوبی به داده‌های جذب و نگهداشت فسفر برازش یافت. میانگین T^2 و SEE برای داده‌های جذب فسفر به‌ترتیب معادل ۰/۹۶ و ۸۱/۳۴ و برای داده‌های نگهداشت فسفر به‌ترتیب معادل ۰/۹۸ و ۱۶/۶۲ بود.



شکل ۱. هم‌دمای جذب_نگهداشت فسفر در خاک مورد مطالعه

در این پژوهش، به‌علت پدیده پسماند هم‌دهای جذب و نگهداشت بر هم منطبق نشدند (شکل ۱). تشکیل رسوب در غلظت‌های بالای فسفر و حل‌پذیری کم برخی از ترکیبات رسوبی، احتمال رسوب فسفر افزوده شده به‌صورت ترکیباتی با حل‌پذیری جزئی از قبیل ترکیبات غیرکریستالی $(Al(OH)H_2PO_4)$ و حتی گاهاً رسوب به‌شکل واریسیت $(AlPO_4 \cdot 2H_2O)$ در فرایند جذب، عدم برقراری تعادل در فرایند واجذب و برگشت‌ناپذیر بودن واکنش‌های جذب فسفر به‌علت ایجاد پیوندهای قوی فسفر با سطوح اجزای خاک از دلایل پدیده پسماند فسفر عنوان شده است (Zheng et al., 2020).

جدول ۱. پارامترهای معادله فروندلیچ برازش‌یافته به داده‌های جذب و نگهداشت فسفر برای خاک مورد مطالعه

شاخص پسماند (درصد)	پارامترهای معادله فروندلیچ برازش یافته به داده‌های نگهداشت فسفر		پارامترهای معادله فروندلیچ برازش یافته به داده‌های جذب فسفر		پارامترهای برآورد شده خاک
	<i>n</i>	<i>K_f</i> (لیتر بر کیلوگرم)	<i>n</i>	<i>K_f</i> (لیتر بر کیلوگرم)	
	۲۷/۷۶	۱۱/۱۸	۹۲۸	۳/۱۰	
۲۹/۸۹	۱۰/۰۱	۸۰۳	۲/۹۹	۳۱۴	خاک + بیوچار ۳۰۰ سطح ۳ درصد
۳۸/۹۰	۷/۶۰	۶۲۱	۲/۹۶	۲۵۶	خاک + بیوچار ۳۰۰ سطح ۶ درصد
۳۵/۴۵	۸/۵۲	۶۸۰	۳/۰۲	۲۸۰	خاک + بیوچار ۶۰۰ سطح ۳ درصد
۴۷/۴۵	۶/۰۵	۴۶۳	۲/۸۷	۲۰۸	خاک + بیوچار ۶۰۰ سطح ۶ درصد

کم‌ترین شاخص پسماند مربوط به خاک تیمار نشده و معادل با ۲۷/۷۶ درصد بود. به‌طور کلی، هرچقدر درصد این شاخص پسماند کم‌تر باشد بیانگر مشکل بودن و جذب فسفر جذب‌شده از فاز جامد خاک به سمت فاز محلول است که این امر می‌تواند دسترسی گیاه به فسفر را محدود نماید. در خاک‌های تیمار شده با بیوچار با افزایش دمای پیرولیز و سطوح مصرفی بیوچار شاخص پسماند افزایش یافت (جدول ۱). بیش‌ترین شاخص پسماند فسفر (۴۷/۴۵ درصد) مربوط به خاک تیمار شده با بیوچار ۶۰۰ در سطح ۶ درصد بود که در مقایسه با خاک تیمار نشده نزدیک به ۷۱ درصد افزایش یافت. کاهش پارامترهای تمایل جذب/نگهداشت فسفر (K_f) و شدت جذب/نگهداشت فسفر (n) در خاک‌های تیمار شده با بیوچار مؤید کاهش برگشت‌ناپذیری فسفر است. این موضوع بیانگر افزایش احتمال آزادسازی فسفر به فاز محلول در خاک‌های تیمار شده با بیوچار و در نتیجه، بهبود احتمالی دسترسی گیاه به فسفر است. کاهش جذب و نگهداشت فسفر و وارد شدن بیش‌تر آن به فاز محلول در سطوح بالای بیوچار را می‌توان به بلوکه شدن و کاهش مکان‌های جذب فسفر در اثر افزودن بیوچار نسبت داد. هم‌چنین، افزایش pH خاک، کاهش فعالیت یون‌های آهن (Fe^{2+3+}) و یون‌های آلومینیوم (Al^{3+}) در محلول خاک و آزادسازی فسفر از بیوچار از عوامل مؤثر در این روند هستند. در این مطالعه، افزودن بیوچار ۶۰۰ در سطح ۶ درصد، موجب افزایش pH خاک تا ۵/۴۴ و افزایش فسفر قابل‌استفاده تا ۳۹/۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک شد که بیانگر اثر مثبت بیوچار بر افزایش فراهمی فسفر خاک است (Eduah et al., 2019).

نتیجه‌گیری

براساس نتایج این مطالعه افزودن بیوچار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به خاک اسیدی سبب افزایش شاخص پسماند فسفر و کاهش برگشت‌ناپذیری فسفر به‌ویژه در سطح ۶ درصد (وزنی/وزنی) شد. استفاده از این نوع بیوچار می‌تواند با کاهش تثبیت فسفر در خاک، روشی کارآمد برای افزایش فراهمی فسفر افزوده شده به خاک و بهبود دسترسی گیاه به فسفر معرفی شود. پیش‌نهاد می‌گردد مطالعات گلخانه‌ای و مزرعه‌ای برای ارزیابی تأثیر بیوچارهای تهیه‌شده بر تغذیه فسفوری گیاهان متفاوت انجام شود.

- Eduah, J. O., Nartey, E. K., Abekoe, M. K., Breuning-Madsen, H., Andersen, M. N. (2019). Phosphorus retention and availability in three contrasting soils amended with rice husk and corn cob biochar at varying pyrolysis temperatures. *Geoderma*, 341: 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.016>
- Ghodsad, L., Reyhanitabar, A., Oustan, S., Alidokht, L. (2022). Phosphorus sorption and desorption characteristics of soils as affected by biochar. *Soil and Tillage Research*, 216, 105251. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105251>
- Reyhanitabar, A., Farhadi, E., Ramezanzadeh, H., Oustan, S. (2020). Effect of pyrolysis temperature and feedstock sources on physicochemical characteristics of biochar. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22 (2): 547–561.
- Sharma, S., Kaur, P. (2025). Rice straw management options impact soil phosphorus adsorption-desorption, kinetics and thermodynamics in rice-wheat system of north-western India. *Soil and Tillage Research*, 248, 106403. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106403>
- Zheng, X., Wu, J., Yan, X., Qin, G., Zhou, R., Wei, Z. (2020). Biochar-induced soil phosphate sorption and availability depend on soil properties: a microcosm study. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 3846-3856. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02713-0>

Abstract

Changes in phosphorus hysteresis index in an acidic loam soil treated with biochar

Larissa Ghodszad^{1*}, Adel Reyhanitabar²

^{1*2} Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

Abstract

The phenomenon of phosphorus (P) hysteresis in soil, or the irreversibility of a portion of sorbed P into the soil solution, is linked to soil properties, the sorption process, and equilibrium time. This study aimed to investigate the effect of biochar on P hysteresis. For this purpose, biochar produced at two temperatures of 300 and 600 °C was added to an acidic loam soil sample at application rates of 0, 3, and 6% (w/w). Following a three-month incubation period of the soil-biochar mixture, P sorption and desorption experiments were carried out, and the hysteresis index was calculated using the ratio of the exponent of the Freundlich equation of the retention isotherm to the exponent of the Freundlich equation of the sorption isotherm. Results showed that with increasing pyrolysis temperature and biochar application rate, the P hysteresis index increased compared to untreated soil. The highest hysteresis index value (47.45%) was observed in soil treated with biochar produced at 600 °C at the rate of 6%, representing about a 71% increase compared to untreated soil. The increase in the hysteresis index used in this study indicates reduced P irreversibility and, thus, greater availability of P in the soil solution. Therefore, biochar produced at 600 °C can be recommended as an effective strategy to improve P availability in acidic soils.

Keywords: Desorption, Freundlich, Isotherm, Retention, Sorption