



Phosphate sorption and leaching in a sandy loam soil amended with biochars: Evidence from batch and column experiments

Asoo Miraky¹ | Mohammad Ali Mahmoodi² | Masoud Davari³

1. Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail:

asoo.miraky@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: a.mahmoodi@uok.ac.ir

3. Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: m.davari@uok.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: Aug. 19, 2025

Revised: Dec. 5, 2025

Accepted: Dec. 15, 2025

Published online: Jan. 2026

Keywords:

**Biochar,
Leaching,
Phosphate,
Sorption.**

One of the modern approaches to improving soil properties is the use of biochar. However, previous studies have reported inconsistent findings regarding its influence on phosphorus (P) dynamics in soils. Given the critical role of P availability in plant nutrition, a deeper understanding of the phosphate sorption and release in the presence of biochar is essential. This study aimed to investigate the sorption and release behavior of phosphate in a sandy loam soil amended with different types of biochar. Two laboratory experiments were conducted: the batch sorption tests to evaluate the phosphate adsorption capacity of biochars, and the soil column experiments to assess their effects on phosphate movement and leaching. Biochars were produced from two regionally common biomass feedstocks, winter wheat straw (*Triticum aestivum*) (WS) and pruned apple tree branches (*Malus domestica*) (AW), each pyrolyzed at two temperatures (300 °C and 550 °C). Batch sorption tests revealed that raising pyrolysis temperature from 300 °C to 550 °C reduced phosphate sorption capacity (from 1.98% to 0.58% for AW biochar and from 5.57% to -1.12% for WS biochar), with wheat straw biochar produced at 550 °C even exhibiting phosphate release. The findings of the batch experiments were consistent with those from the soil column experiments, in which biochars with higher phosphate sorption capacity in batch tests also exhibited lower phosphate leaching in the soil columns. The findings of this study highlight that both the biomass feedstock type and the pyrolysis temperature are key factors in determining the biochar's ability to sorb or release phosphate in soil.

Cite this article Miraky, A., Mahmoodi, M.A., Davari, M., (2026) Phosphate sorption and leaching in a sandy loam soil amended with biochars: Evidence from batch and column experiments, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (11), 3047-3059. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.400939.669998>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.400939.669998>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

One of the modern approaches to improving soil properties is the use of biochar. However, previous studies have reported inconsistent findings regarding its influence on phosphorus (P) dynamics in soils. Given the critical role of P availability in plant nutrition, a deeper understanding of the phosphate sorption and release in the presence of biochar is essential. This study aimed to investigate the sorption and release behavior of phosphate in a sandy loam soil amended with different types of biochar.

Material and Methods

Biochars were produced from two regionally common biomass feedstocks, winter wheat straw (*Triticum aestivum*) (WS) and pruned apple tree branches (*Malus domestica*) (AW), pyrolyzed at two temperatures (300 °C and 550 °C). The residues were first air-dried at ambient temperature and then ground. Pyrolysis was conducted in a laboratory electric furnace at temperatures of 300 °C and 550 °C for 15 minutes under limited oxygen availability, with a heating rate of approximately 10 °C per minute. The resulting biochars were crushed and passed through a 2 mm sieve.

Two laboratory experiments were conducted: the batch sorption tests to evaluate the phosphate adsorption capacity of biochars, and the soil column experiments to assess their effects on phosphate movement and leaching. In the batch experiments, 1 g of each biochar was mixed with 50 mL of a phosphate solution at a concentration of 30.8 mg L⁻¹ in 68 mL containers. Control treatments included containers without biochar containing only the phosphate solution. The mixtures were shaken at 55 rpm for 24 hours, after which the remaining phosphate in the solution was measured using a spectrophotometer.

In the soil column experiments, four columns were filled with sandy loam soil amended with 2% (w/w) of each biochar, and a fifth column containing only soil served as the control. The columns were first saturated with deionized water for 24 hours, followed by sequential leaching with 15 pore volumes of deionized water, 15 pore volumes of phosphate solution, and finally 10 pore volumes of deionized water. Leachate samples were collected from the column outlets, filtered through 22 µm filter paper, and analyzed for phosphate concentration.

Results and Discussion:

Increasing the pyrolysis temperature led to a reduction in biochar yield for both biomass types (from 1.98% to 0.58% for AW biochar and from 5.57% to -1.12% for WS biochar), as higher temperatures drive off a greater proportion of volatile compounds from the feedstock, leaving less solid residue. Furthermore, apple wood produced a higher biochar yield than wheat straw, attributable to its more stable lignin-rich structure. The pyrolysis temperature also had a pronounced effect on the pH of both biochar types, with higher temperatures resulting in increased pH values. This can be explained by the degradation of acidic functional groups such as -COOH and -OH, along with the enrichment of alkaline compounds, including carbonates, oxides, and metal hydroxides, in the biochar.

Batch experiment results revealed that increasing the pyrolysis temperature from 300 to 550 °C reduced phosphate sorption capacity. Notably, biochar derived from wheat straw at 550 °C exhibited net phosphate release rather than sorption. Column experiments showed that phosphate sorption was lower in three treatments—apple wood biochar produced at 300 °C and 550 °C, and wheat straw biochar produced at 550 °C—compared with the control column, indicating phosphate desorption or release by the biochars. In contrast, the column containing wheat straw biochar produced at 300 °C demonstrated higher phosphate sorption relative to the control.

The decline in phosphate sorption capacity at higher pyrolysis temperatures can be attributed to the destruction of surface functional groups (-COOH and -OH) that play a key role in forming surface complexes with phosphate ions at lower temperatures. Additionally, the release of organic phosphorus compounds from the biochar matrix at elevated temperatures may increase soluble phosphorus in the aqueous phase. The batch experiment findings were consistent with the soil column results, which indicated that biochars showing greater phosphate sorption capacity in the batch tests also exhibiting reduced phosphate leaching in the column studies.

Conclusion:

This study investigated the effects of different biochars on phosphate sorption and release in soil. The results demonstrated that both the feedstock type and the pyrolysis temperature are critical factors determining the ability of biochar to sorb or release phosphate in soil. These findings highlight the importance of selecting appropriate feedstock materials and production conditions for biochar intended for agricultural and environmental applications.

Author Contributions

Conceptualization, M.A.M. and M.D.; methodology, M.A.M., A.M. and M.D.; software, M.A.M. and A.M.; validation, M.A.M., A.M., and M.D.; formal analysis, M.A.M., A.M., and M.D.; investigation, M.A.M. and M.D.; resources, M.A.M. and A.M.; data curation, A.M.; writing—original draft preparation, M.A.M.; writing—review and editing, M.A.M.; visualization, M.A.M. and A.M.; supervision, M.A.M. and M.D.; project administration, M.A.M. and A.M.; funding acquisition, M.A.M. and A.M., All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data are available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere appreciation to the University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, for providing laboratory facilities and supporting the implementation of this study.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest.

جذب و آبشویی فسفات در خاک لومی شنی اصلاح شده با بیوجار: شواهد حاصل از آزمایش‌های دسته‌ای و ستونی

ناسو میرکی^۱ | محمد علی محمودی^۲ | مسعود داوری^۳^۱. گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: asoo.miraky@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: a.mahmoodi@uok.ac.ir^۳. گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: m.davari@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۲۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۱۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۲۴	
تاریخ انتشار: بهمن ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی: بیوجار، آبشویی، فسفات، جذب	یکی از رویکردهای نوین برای بهبود ویژگی‌های خاک، استفاده از بیوجار است. با این حال، مطالعات پیشین نتایج متفاوت و گاه متناقضی درخصوص تأثیر آن بر رفتار فسفر در خاک گزارش کرده‌اند. با توجه به اهمیت فراهمی فسفر در تغذیه گیاهی درک دقیق‌تر از جذب و رهاسازی فسفر در حضور بیوجار ضروری به نظر می‌رسد. لذا هدف از انجام این پژوهش بررسی رفتار جذب و رهاسازی فسفات در خاک لومی شنی اصلاح‌شده با انواع مختلف بیوجار بود. بدین منظور، دو آزمایش در شرایط آزمایشگاهی انجام شد: یکی آزمایش‌های دسته‌ای برای ارزیابی رفتار بیوجارها در جذب فسفات و دیگری آزمایش‌های ستونی خاک برای بررسی تأثیر این بیوجارها بر حرکت و آبشویی فسفات در خاک. بیوجارها از دو منبع رایج زیست‌توده در منطقه، شامل کاه گندم زمستانه (<i>Triticum aestivum</i>) (WS) و شاخه‌های هرس شده درخت سیب (<i>Malus domestica</i>) (AW) هر کدام در دو دمای ۳۰۰ و ۵۵۰ درجه سانتیگراد تولید شدند. بر مبنای نتایج آزمایش‌های دسته‌ای، با افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ به ۵۵۰ درجه سانتیگراد، میزان جذب فسفات کاهش یافت؛ بطوریکه در بیوجار AW از ۱/۹۸ به ۰/۵۸ و در بیوجار WS از ۵/۵۷ به ۱/۱۲- (رهاسازی) درصد تغییر یافت. نتایج آزمایش‌های دسته‌ای با یافته‌های ستونی خاک همخوانی داشت؛ به‌طوری‌که بیوجارهایی که ظرفیت جذب فسفات بالاتری در آزمایش‌های دسته‌ای داشتند، در ستون خاک نیز آبشویی فسفات کمتری را نشان دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که نوع ماده گیاهی مورد استفاده در تهیه بیوجار و دمای پیرولیز از عوامل کلیدی در تعیین توانایی بیوجار در جذب یا رهاسازی فسفات در خاک هستند.
استناد: میرکی؛ ناسو، محمودی؛ محمدعلی، داوری؛ مسعود، (۱۴۰۴) جذب و آبشویی فسفات در خاک لومی شنی اصلاح شده با بیوجار: شواهد حاصل از آزمایش‌های دسته‌ای و ستونی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۱)، ۳۰۵۹-۳۰۴۷. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.400939.669998	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.400939.669998	



مقدمه

فسفر یکی از عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاهان است که نقش کلیدی در فرآیندهایی نظیر انتقال انرژی، فتوسنتز، سنتز اسیدهای نوکلئیک و غیره ایفا می‌کند (Malhotra et al., 2018). با این حال، دسترسی به فسفر در خاک‌های زراعی اغلب محدود است، چرا که این عنصر به سرعت با کاتیون‌های موجود در خاک واکنش داده و به اشکال نامحلول تبدیل می‌شود؛ که در نتیجه قابلیت جذب آن توسط گیاهان کاهش می‌یابد (Shen et al., 2011).

یکی از رویکردهای نوین و پایدار برای بهبود ویژگی‌های خاک، استفاده از بیوپچار است (Yadav et al., 2023). بیوپچار، ماده‌ای کربنی است که از پیرولیز (گرماکافت) مواد زیستی در شرایط کم‌اکسیژن تولید می‌شود. اخیراً استفاده از بیوپچار به عنوان یک جاذب برای کاهش شستشوی نیترات و همچنین انواع مختلفی از آلاینده‌های زیست‌محیطی مانند فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و سایر آلاینده‌های آلی مورد توجه زیادی قرار گرفته است (Laird et al., 2010; Lehmann et al., 2003). افزون بر این، بیوپچار این پتانسیل را دارد که با تثبیت کربن در خاک، از گرم شدن زمین جلوگیری کند؛ همچنین می‌تواند با بهبود ساختار خاک، فرسایش خاک را کاهش داده و با کاهش شستشوی عناصر غذایی و حتی آزادسازی آن‌ها در خاک، حاصل‌خیزی خاک و عملکرد محصول را افزایش دهد (Inyang et al., 2010; Major et al., 2010; Van Zwieten et al., 2009).

مطالعات انجام شده نتایج متناقضی در خصوص تأثیر بیوپچار بر رفتار فسفر در خاک ارائه داده‌اند. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی بیوپچار مانند سطح ویژه بالا، تخلخل زیاد و حضور گروه‌های عاملی سطحی آن، امکان جذب ترکیبات معدنی از جمله یون‌های فسفات را فراهم می‌کند (Lehmann & Joseph, 2024). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که افزودن بیوپچار به خاک علاوه بر بهبود فسفر قابل استفاده خاک، در کاهش میزان شستشوی فسفات نیز مؤثر بوده است (Gunal, 2025; Gupta et al., 2024; He et al., 2025). با اینحال، اثربخشی بیوپچار در جذب یا رهاسازی فسفات به عوامل متعددی مانند نوع ماده اولیه، دمای پیرولیز و ویژگی‌های خاک وابسته است (Yao et al., 2012). برای مثال، (Yao et al., 2012) گزارش کردند که بیوپچارهای تولید شده در دمای پایین‌تر (۳۰۰ درجه سانتیگراد) به دلیل حفظ بیشتر گروه‌های عاملی سطحی مانند COOH- و OH- ظرفیت جذب بالاتری برای فسفات دارند. در مقابل، (Xu et al., 2013) نشان دادند که افزایش دمای پیرولیز باعث تخریب گروه‌های عاملی سطحی و کاهش ظرفیت تبادل یونی بیوپچار شده و در نتیجه توانایی آن در جذب آنیون‌هایی مانند فسفات کاهش می‌یابد. همچنین، برخی مطالعات نیز به رهاسازی فسفر از بیوپچارهایی که از مواد گیاهی سرشار از فسفر تولید شده‌اند، اشاره کرده‌اند (Borchard et al., 2014). بنابراین، رفتار بیوپچار در سیستم خاک-فسفر می‌تواند بسته به شرایط متفاوت باشد.

با توجه به اهمیت فراهمی فسفر در تغذیه گیاهی و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از شستشوی فسفر، به ویژه در خاک‌های سبک که پتانسیل بالایی برای شستشوی عناصر غذایی دارند، درک دقیق‌تر از مکانیسم‌های جذب و رهاسازی فسفر در حضور بیوپچار ضروری به نظر می‌رسد. بررسی منابع نشان می‌دهد که بسیاری از مطالعات پیشین صرفاً به آزمایش‌های تعادلی جذب فسفات در حضور بیوپچار پرداخته‌اند؛ و مطالعاتی که بطور همزمان رفتار فسفات را هم در شرایط ایستا (آزمایش‌های دسته‌ای) و هم در شرایط دینامیک (آزمایش‌های ستون‌های خاک) بررسی کرده باشد، بسیار محدود است. بویژه اینکه در منابع فارسی نیز تاکنون پژوهشی با چنین رویکرد تلفیقی گزارش نشده است. لذا هدف از انجام این پژوهش بررسی رفتار جذب و رهاسازی فسفات در خاک لومی شنی اصلاح‌شده با انواع مختلف بیوپچار بود. بدین منظور، ابتدا با انجام آزمایش‌های دسته‌ای رفتار بیوپچارها در جذب فسفات ارزیابی شده و سپس با استفاده از آزمایش‌های ستون‌های خاک، تأثیر این بیوپچارها بر حرکت و آبشویی فسفات در خاک بررسی شده است. در این مطالعه، دو نوع ماده اولیه برای تولید بیوپچار شامل کاه گندم و چوب سیب در دو دمای مختلف پیرولیز (۳۰۰ و ۵۵۰ درجه سانتیگراد) مورد استفاده قرار گرفته است. این پژوهش می‌تواند به بهبود مدیریت کاربرد بیوپچار در نظام‌های کشاورزی و افزایش کارایی مصرف فسفر در خاک کمک کند.

مواد و روش‌ها

تهیه بیوپچارها

بیوپچارها از مواد زیست‌توده‌ای شامل کاه و کلش گندم زمستانه (*Triticum aestivum*) (WS) و شاخه‌های هرس‌شده درخت سیب (*Malus domestica*) (AW) تهیه شد. فرآیند تولید بیوپچار بر اساس دستورالعمل‌های ارائه‌شده انجام گرفت (Chaves Fernandes et al., 2014).



(al., 2020). به این صورت که بقایای گیاهی ابتدا در دمای محیط خشک شده و سپس به ذرات ریز تبدیل شدند. در مرحله بعد، مواد گیاهی در یک کوره الکتریکی آزمایشگاهی مجهز به کنترل کننده دما، با شیب دمایی حدود ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه، تا دماهای ۳۰۰ و ۵۵۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شدند و پس از رسیدن به دمای هدف، به مدت ۱۵ دقیقه در همان دماها تحت شرایط پیرولیز (گرماکافت) و با دسترسی محدود به هوا نگه داشته شدند. پس از انجام پیرولیز، بیوپارها آسیاب و از الک با قطر منافذ ۲ میلی متر (الک شماره ۱۰) عبور داده شدند. چهار نمونه بیوپار تولیدی در این پژوهش به ترتیب با نام‌های WS300، WS550، AW300 و AW550 شناخته می‌شوند. ویژگی‌های شیمیایی پایه‌ای بیوپارها در جدول (۱) ارائه شده‌اند. بازده تولید عبارتست از نسبت جرمی بیوپار تولید شده به ماده گیاهی خشک استفاده شده، که معمولاً برحسب درصد بیان می‌شود (Altıkat et al., 2024). pH و هدایت الکتریکی (EC) بیوپارها در سوسپانسیونی با نسبت جرمی ۱:۱۰ بیوپار به آب مقطر اندازه‌گیری شدند. پس از تهیه سوسپانسیون، مخلوط‌ها تکان داده شده و به مدت یک ساعت در حالت سکون قرار گرفتند. سپس اندازه‌گیری‌ها به صورت سه تکرار با استفاده از pH متر (مدل 744 pH Meter, Metrohm) و EC متر (مدل Cond 7310, Xylem Analytics) انجام شد. مقدار کل عناصر کربن (C)، هیدروژن (H)، نیتروژن (N) و گوگرد (S) با استفاده از دستگاه آنالیز CHNS آنالایزر (مدل NA-1500, Carlo-Erba) و در دو تکرار اندازه‌گیری شد. همچنین مقدار کل عناصر معدنی دیگر پس از هضم اسیدی نمونه‌ها بر اساس روش (Gondek et al., 2016) و با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل SpectrAA 220, Varian) تعیین گردید.

جدول ۱. ترکیب عنصری و سایر ویژگی‌های بیوپارهای استفاده شده

بیوجار	بازده تولید	pH	EC	ترکیب عنصری										
				Fe	Cu	Zn	Mg	Ca	K	P	N	S	H	C
				%										
				ds m ⁻¹										
AW300	۷۶/۱	۸/۵۶	۰/۱۹	۶۴/۸۸	۴/۸۰	۰/۲۹	۲/۱۵	۰/۲۹۲	۰/۱۶۴	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۲۲	۰/۰۷	۰/۰۵۷
AW550	۶۸/۲	۸/۷۴	۰/۲۷	۸۰/۴۳	۲/۶۷	۰/۳۱	۱/۳۹	۰/۲۹۷	۰/۱۸۵	۰/۵۵	۰/۴۲	۰/۲۵	۰/۰۸	۰/۰۸۷
WS300	۳۷/۴	۹/۲۳	۰/۱۱	۵۹/۳۱	۲/۵۶	۰/۵۶	۱/۴۲	۰/۴۶۷	۰/۲۶۱	۰/۲۳	۰/۰۹	۰/۰۶۸	۰/۰۰۱	۰/۰۱۵
WS550	۲۹/۸	۹/۹۷	۰/۱۵	۶۹/۴۳	۲/۷۰	۰/۲۵	۱/۴۰	۰/۶۳۷	۰/۲۸۹	۰/۳۹	۰/۲۰	۰/۰۷۲	۰/۰۰۱	۰/۰۲۵

تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاکها

خاکی با بافت لومی شنی از یک مزرعه کشاورزی نمونه‌برداری شد. خاک نمونه‌برداری شده پس از خشک شدن در دمای محیط، از الک با قطر ۲ میلی متر (الک شماره ۱۰) عبور داده شد. رده‌بندی تاکسونومیک خاک تعیین شده بر اساس استاندارد (Soil Survey Staff, 2014)، توزیع اندازه ذرات خاک اندازه‌گیری شده با استفاده از روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1986)، هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) اندازه‌گیری شده به روش بار ثابت (Klute & Dirksen, 1986) و سایر ویژگی‌های انتخاب شده خاک در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های خاک استفاده شده در آزمایش‌های ستون‌های خاک

رده‌بندی تاکسونومیک	شن	سیلت	رس	بافت	K _s	pH	EC	ماده آلی
%								
cm day ⁻¹								
Typic Calcixerepts	۷۳	۱۲	۱۵	لوم شنی	۴۳	۷/۷۱	۰/۶۹	۰/۸۵

آزمایش‌های دسته‌ای

به منظور بررسی رفتار بیوپارها در جذب فسفات آزمایش‌های دسته‌ای در دمای ثابت (در حدود ۲۲ درجه سانتیگراد) انجام گرفت. برای انجام این آزمایش‌ها از روش توصیف شده توسط (Yao et al., 2012) استفاده شد. بدین منظور در حدود ۰/۱ گرم از هر بیوپار به درون ظروف ۶۸ میلی‌لیتری ریخته شدند و به هر کدام ۵۰ میلی لیتر محلول ۳۰/۸ میلی گرم بر لیتر فسفات اضافه گردید. ظرف‌هایی نیز بدون افزودن بیوپار و فسفات به عنوان شاهد در نظر گرفته شدند. محتوی ظرف‌ها با استفاده از شیکر با سرعت ۵۵ دور در دقیقه به مدت ۲۴ ساعت بهم زده شدند. پس از سانتریفیوژ کردن غلظت فسفات در محلول به روش اسپکتروفوتومتری (مدل Shimadzu UV-1800) اندازه‌گیری شد. درصد فسفات جذب/رها سازی شده از/به فاز محلول توسط فاز جامد (P) از اختلاف غلظت فسفات در محلول اولیه (C_i) و نهایی (C_f) محاسبه گردید:

$$P = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

آزمایش‌های ستون‌های خاک

به منظور بررسی تأثیر بیوچارها بر میزان جذب و حرکت فسفات در خاک آزمایش آبشویی فسفات با استفاده از ستون‌های خاک انجام گرفت. در این مطالعه از روش آبشویی ستونی توصیف شده توسط (Mahmoodi et al., 2010; Selim et al., 1989) استفاده گردید. بدین منظور ابتدا ستون‌هایی از جنس پلکسی‌گلاس توسط خاک‌های تیمار شده با بیوچار (به میزان ۲ درصد وزنی) تا رسیدن به جرم مخصوص ظاهری ۱/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب به طور یکنواخت پر گردید. همچنین یک ستون خاک بدون بیوچار نیز به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. طول ستون‌های خاک ۱۶/۵ سانتی‌متر و قطر آن ۴ سانتی‌متر بود. به منظور جلوگیری از هدر رفت خاک‌ها انتهای ستونها توسط توری با قطر منافذ ۵۳ میکرومتر بسته شد. ستون‌های خاک قبل از استفاده به مدت ۲۴ ساعت توسط آب یون زدوده اشباع شدند. سپس به وسیله ۱۵ حجم منفذ آب یون زدوده ستون‌های خاک شستشو داده شدند. این کار به منظور آبشویی کامل فسفات‌های موجود در خاک صورت گرفت. در ادامه حدود ۱۲ حجم منفذ از محلول فسفات (با غلظت ۳۰/۸ میلی‌گرم بر لیتر) به ستون‌های خاک اضافه شد. در پایان ستون خاک با استفاده از ۱۰ حجم منفذ آب یون زدوده مجدداً شستشو داده شد. محلول خروجی به صورت جزء به جزء از انتهای ستون‌های خاک جمع‌آوری شده و بلافاصله توسط کاغذ صافی ۰/۲۲ میکرومتر صاف شد. غلظت فسفر در محلول خروجی به روش اسپکتروفوتومتری اندازه‌گیری شد. پس از انجام هر آزمایش، منحنی رخنه با ترسیم غلظت نسبی (یعنی نسبت غلظت در محلول خروجی به غلظت در ورودی ستون) در برابر حجم منفذ به دست آمد. مقدار فسفات جذب شده در هر زمان با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$S = AL\theta_v C_0 \int_0^{\infty} [1 - c_e(T)] dT \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، A ، L و θ_v به ترتیب بیانگر مساحت سطح مقطع، طول و رطوبت حجمی ستون خاک هستند؛ C_0 غلظت محلول ورودی، C_e غلظت نسبی در محلول خروجی و T حجم محلول خروجی بعنوان مضربی از حجم منفذ است. معادله (۲) بصورت عددی به روش نوزنقه با استفاده از نرم‌افزار متلب (MathWorks Inc., 2019) محاسبه شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های بیوچارها

مطابق داده‌های جدول (۱)، بیوچار حاصل از چوب سیب دارای بازده تولید (ضریب تبدیل بیوماس به بیوچار) در بازه ۷۶ درصد در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد تا ۶۸ درصد در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد بوده است. این در حالی است که ضریب تبدیل بیوچار برای کاه و کلش گندم در همین دماها به ترتیب ۳۷ و ۲۹ درصد گزارش می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای گرماکافت، بازده تولید بیوچار در هر دو نوع ماده گیاهی کاهش می‌یابد، اگرچه مقدار مطلق بازده در چوب سیب به مراتب بالاتر از کاه و کلش گندم است. دلیل علمی این پدیده در فرآیندهای حرارتی زیست‌توده نهفته است؛ با افزایش دمای پیرولیز، مواد آلی فرار بیشتری از زیست‌توده آزاد می‌شوند که عمدتاً به شکل گاز و مایع از سیستم خارج می‌شوند و در نتیجه، نسبت باقی‌مانده جامد یا بیوچار کاهش می‌یابد. این امر به ویژه در زیست‌توده‌هایی با ساختار شیمیایی سبک‌تر یا دارای مقادیر بیشتر از ترکیبات فرار مانند کاه و کلش، نمود بیشتری دارد. در مقابل، چوب که دارای ساختار لیگنینی بالاتر و پایداری است، در برابر تخریب حرارتی مقاومت بیشتری نشان می‌دهد و مقدار بیشتری از آن به شکل بیوچار باقی می‌ماند. مطالعات متعددی این روند را تأیید کرده‌اند. برای مثال، (Lehmann & Joseph, 2012) گزارش کردند که افزایش دمای گرماکافت منجر به کاهش بازده تولید بیوچار از منابع مختلف زیست‌توده می‌شود، به‌ویژه در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتیگراد که تجزیه شدید ترکیبات سلولزی و همی‌سلولزی رخ می‌دهد. همچنین، (Zhao et al., 2013) در بررسی پیرولیز شلتوک برنج نشان دادند که بازده تولید بیوچار به‌طور چشمگیری با افزایش دما کاهش می‌یابد، که این امر به آزادسازی گازها و تبخیر ترکیبات آلی نسبت داده شده است. (Manya, 2012) نیز در پژوهش خود بر روی چوب درخت کاج، کاهش بازده تولید بیوچار با افزایش دمای پیرولیز را گزارش کرده و آن را ناشی از تشدید فرآیندهای تخریب حرارتی در دماهای بالاتر دانسته است.

بر اساس داده‌های جدول (۱) pH بیوچار چوب سیب بین ۸/۵۶ تا ۸/۷۴ و بیوچار کاه گندم بین ۹/۲۳ تا ۹/۹۷ می‌باشد. هر چهار نوع بیوچار دارای pH قلیایی بوده‌اند، اما در هر دو دمای آزمایش، بیوچار چوب سیب pH کمتری نسبت به بیوچار کاه گندم داشته است. همچنین، افزایش دمای پیرولیز باعث افزایش pH در هر دو نوع بیوچار شد که نشان‌دهنده رابطه مستقیم میان دمای پیرولیز و خاصیت قلیایی بیوچار است. افزایش pH با دما به دلیل کاهش گروه‌های عاملی اسیدی مانند COOH و OH- و افزایش غلظت ترکیبات قلیایی مانند کربنات‌ها

و اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزی (نظیر کلسیم، پتاسیم، سدیم و منیزیم) در بیوپار است. در دماهای بالاتر، بسیاری از گروه‌های عاملی اسیدی نظیر کربوکسیل (COOH -) و فنول (OH -) طی فرآیند گرماکافت از بین می‌روند که موجب کاهش ظرفیت اسیدی و در نتیجه افزایش pH می‌گردد. این الگوی تغییرات با نتایج گزارش شده در مطالعات دیگر مطابقت دارد. برای مثال، (Yuan et al., 2011) و (Novak et al., 2009) نیز به افزایش pH بیوپار با افزایش دمای پیرولیز اشاره کرده‌اند و علت آن را تجمع بالاتر خاکستر قلیایی در دماهای بالاتر دانسته‌اند. همچنین، (Cantrell et al., 2012) نشان دادند که نوع ماده خام تأثیر بسزایی در سطح قلیایی نهایی بیوپار دارد؛ به‌طوری که مواد گیاهی غنی از سیلیس یا الیاف سلولزی مانند کاه، معمولاً به تولید بیوپار با pH بالاتر منجر می‌شوند، که می‌تواند دلیل بالاتر بودن pH بیوپار کاه گندم نسبت به چوب سیب باشد.

قلیائیت بالای بیوپارهای تولید شده در این پژوهش یک ویژگی مطلوب برای کاربرد آن‌ها در خاک‌های اسیدی به شمار می‌آید. بیوپار با افزایش pH خاک، حلالیت یون‌های آلومینیوم سمی را که در شرایط اسیدی فراوانند کاهش می‌دهد. سمیت آلومینیوم می‌تواند رشد گیاه را با آسیب به ریشه و اختلال در جذب عناصر غذایی به شدت محدود کند. علاوه بر این، تنظیم pH خاک توسط بیوپار، قابلیت دسترسی عناصر غذایی ضروری مانند فسفر را که معمولاً در شرایط اسیدی کمتر در دسترس هستند، بهبود می‌بخشد.

داده‌های ارائه شده در جدول (۱) نشان می‌دهند که بیوپارهای تولید شده از بقایای گیاهی حاوی مقادیر قابل توجهی از عناصر مغذی مانند پتاسیم، فسفر، کلسیم و منیزیم هستند که نقش مؤثری در تأمین نیازهای تغذیه‌ای گیاه و بهبود حاصلخیزی خاک ایفا می‌کنند. فرآیند گرماکافت یا پیرولیز موجب افزایش غلظت این عناصر در محصول نهایی شده است. این افزایش غلظت را می‌توان به کاهش ترکیبات آلی فرار نسبت داد که منجر به تجمع بیشتر مواد معدنی در ساختار نهایی بیوپار می‌شود. عبارت دیگر، با تجزیه ترکیباتی مانند سلولز، همی سلولز و لیگنین در اثر حرارت، بخشی از ماده آلی بصورت ترکیبات گازی خارج شده و در نتیجه مواد معدنی مقاوم‌تر در برابر حرارت، مانند عناصر غذایی یادشده، در ماتریس جامد باقی می‌مانند و درصد آن‌ها افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی توسط محققانی نظیر (Zhao et al., 2013) گزارش شده است که نشان دادند افزایش دمای پیرولیز باعث کاهش بازده تولید بیوپار و در عین حال افزایش غلظت عناصری نظیر پتاسیم، فسفر و کلسیم می‌شود. همچنین (Yuan et al., 2011) نیز در پژوهشی دریافتند که بیوپار حاصل از بقایای گیاهی در دماهای بالاتر به دلیل تمرکز بیشتر مواد معدنی، به‌ویژه آلکالی‌ها، تأثیر مثبتی بر تغذیه گیاه و بهبود خصوصیات شیمیایی خاک دارد. این یافته‌ها با نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر همراستا بوده و بر نقش کلیدی فرآیند گرماکافت در تغلیظ عناصر معدنی در بیوپار تأکید دارند.

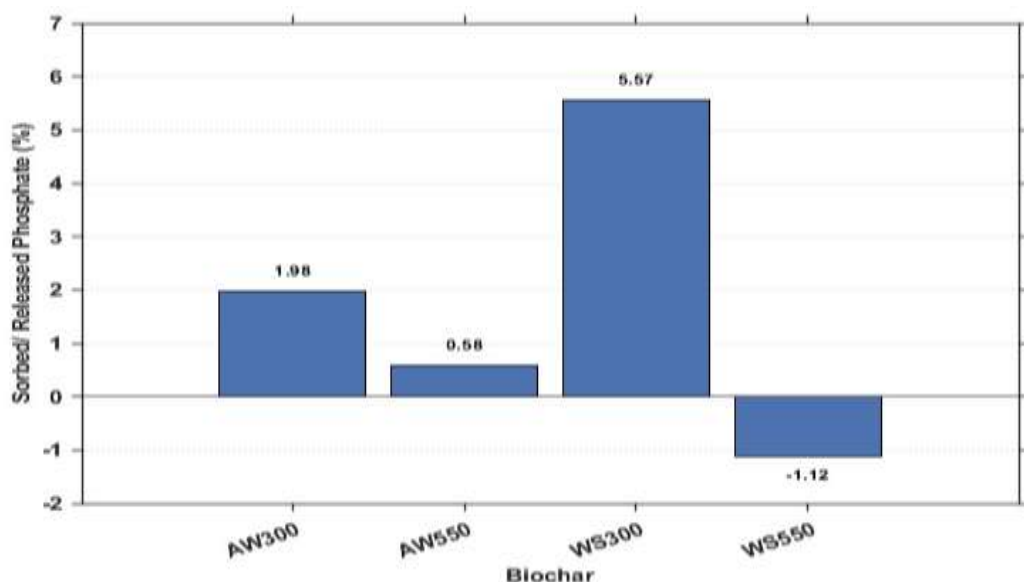
با این حال، باید توجه داشت که استفاده از بیوپار با غلظت بالای نمک در مناطق خشک و نیمه‌خشک که محدودیت شست‌وشوی املاح در خاک وجود دارد، ممکن است مشکل ساز باشد. به کارگیری بیوپار با مقادیر بالای هدایت الکتریکی (EC) می‌تواند جوانه‌زنی بذر و عملکرد محصول را کاهش دهد. بیوپار با شوری بالا می‌تواند منجر به تنش اسمزی و سمیت یونی شود، به‌ویژه در مراحل اولیه رشد که گیاهان بیشترین حساسیت را دارند. برای کاهش این خطرات، توصیه می‌شود پیش از استفاده، بیوپار شسته شود تا میزان نمک آن کاهش یابد. بنابراین، راهکارهای عملی مدیریت بیوپار شور باید متناسب با نیازهای خاص محصول و شرایط محلی خاک طراحی شوند تا از آسیب‌های احتمالی آن جلوگیری شود.

با افزایش دمای پیرولیز، میزان کربن موجود در بیوپارهای تولید شده از هر دو نوع ماده گیاهی افزایش یافت. همچنین، در هر دو دمای آزمایش شده، بیوپار حاصل از چوب سیب دارای محتوای کربن بالاتری نسبت به بیوپار تهیه شده از کاه و کلش گندم بود. در خصوص عنصر هیدروژن، تغییرات مشاهده شده در بیوپارها در پاسخ به افزایش دما متغیر بود. به‌طوری که در بیوپارهای حاصل از چوب سیب، مقدار هیدروژن با افزایش دما به صورت قابل توجهی کاهش یافت، در حالی که این کاهش در بیوپارهای تولید شده از کاه و کلش گندم محسوس نبود. علت این پدیده را می‌توان در ساختار شیمیایی متفاوت مواد اولیه و میزان مواد فرار آن‌ها جست‌وجو کرد، به‌طوری که حرارت بالاتر موجب تجزیه ترکیبات غنی از هیدروژن مانند سلولز و همی سلولز و خروج گازهایی نظیر H_2 و CH_4 می‌شود. یافته‌های این مطالعه در خصوص افزایش محتوای کربن با افزایش دمای پیرولیز با نتایج گزارش شده در پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد. برای مثال (Chen et al., 2011) و (Laird et al., 2010) نیز گزارش کردند که افزایش دمای گرماکافت منجر به افزایش درصد کربن در بیوپار و در عین حال کاهش مواد فرار و هیدروژن می‌شود؛ که نشان‌دهنده غلبه تشکیل ترکیبات آروماتیک در دماهای بالاتر است. همچنین، نتایج مربوط به تفاوت محتوای کربن بین بیوپار چوبی و بیوپار کاه و کلش با نتایج (Lehmann & Joseph, 2024) همخوان است، مبنی بر اینکه منابع لیگنینی نظیر چوب به دلیل ساختار پایدارتر و میزان لیگنین بالاتر، در دماهای بالا محصولاتی با درصد کربن بالاتری تولید می‌کنند. الگوی تغییرات عنصر گوگرد نیز در فرآیند تولید بیوپار بین دو منبع گیاهی مورد استفاده متفاوت بود. به‌طوری که در بیوپارهای

حاصل از چوب سیب، افزایش دمای گرماکافت منجر به افزایش محتوای گوگرد شد، در حالی که در بیوچارهای تولید شده از کاه گندم، افزایش دما موجب کاهش مقدار گوگرد گردید. این تفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت در ترکیب اولیه گوگرد در مواد خام، پایداری ترکیبات گوگردی در برابر حرارت، و میزان فرار بودن آن‌ها طی فرآیند پیرولیز باشد. در این خصوص پژوهش‌هایی نظیر (Song & Guo, 2012) و (Keiluweit et al., 2010) نشان داده‌اند که رفتار عناصر کم مقدار نظیر S در فرآیند پیرولیز بسیار وابسته به نوع ماده خام، پیوندهای شیمیایی اولیه و دمای پیرولیز است. به‌طور خاص، آنها مشاهده کردند که ترکیبات گوگردی در مواد لیگنینی در دماهای بالا پایداری بیشتری دارند، در حالی که در بقایای گیاهی سبک‌تر مانند کاه و کلش، به‌دلیل وجود ترکیبات فرارتر گوگردی، کاهش محتوای گوگرد در دماهای بالاتر محتمل‌تر است. بنابراین، تفاوت در رفتار گوگرد میان بیوچار چوب سیب و بیوچار کاه گندم را می‌توان در چارچوب همین یافته‌ها تحلیل نمود.

تأثیر بیوچارها بر جذب و رهاسازی فسفات

نتایج آزمایش‌های دسته‌ای ارائه‌شده در شکل (۱) نشان می‌دهد که افزایش دمای پیرولیز تأثیر منفی بر توانایی بیوچار تولید شده در جذب فسفات داشته است. بطوریکه با افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ به ۵۵۰ درجه سانتیگراد، میزان جذب فسفات کاهش یافته و حتی در مورد بیوچار تولیدشده از کاه گندم در دمای ۵۵۰ درجه، پدیده رهاسازی فسفات مشاهده شده است. این کاهش ظرفیت جذب در دماهای بالا را می‌توان به تخریب گروه‌های عاملی سطحی مانند COOH- و OH- نسبت داد که در دماهای پایین‌تر نقش مهمی در تشکیل پیوندهای سطحی با یون‌های فسفات ایفا می‌کنند. همچنین، آزاد شدن ترکیبات فسفر آلی از ساختار بیوچار در دماهای بالا نیز می‌تواند باعث افزایش فسفر محلول در فاز آبی گردد (Xu et al., 2013). مطالعات پیشین نیز نتایجی مشابه گزارش کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، (Yao et al., 2012) نشان دادند که بیوچارهای تولیدشده در دمای پایین‌تر، به‌دلیل حفظ بیشتر گروه‌های عاملی سطحی، ظرفیت بالاتری در جذب فسفات دارند. همچنین (Xu et al., 2013) گزارش کردند که افزایش دمای پیرولیز منجر به کاهش گروه‌های عاملی سطحی و ظرفیت تبادل یونی بیوچار شده و توانایی آن را برای جذب آنیون‌ها مانند فسفات کاهش می‌دهد.

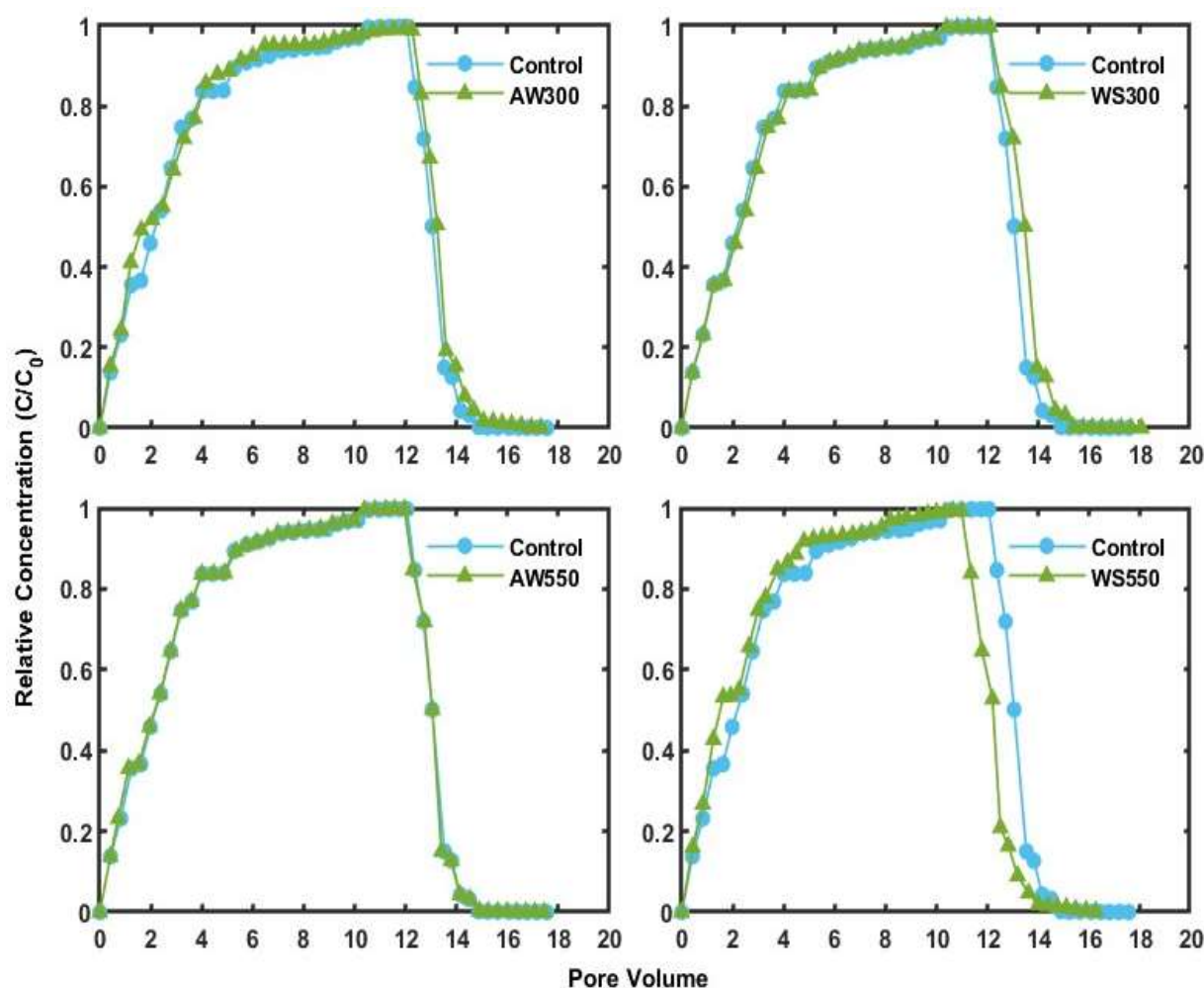


شکل ۱. میزان جذب/رهاسازی فسفات توسط بیوچارهای مختلف در آزمایش‌های دسته‌ای

تأثیر بیوچارها بر حرکت فسفات در خاک

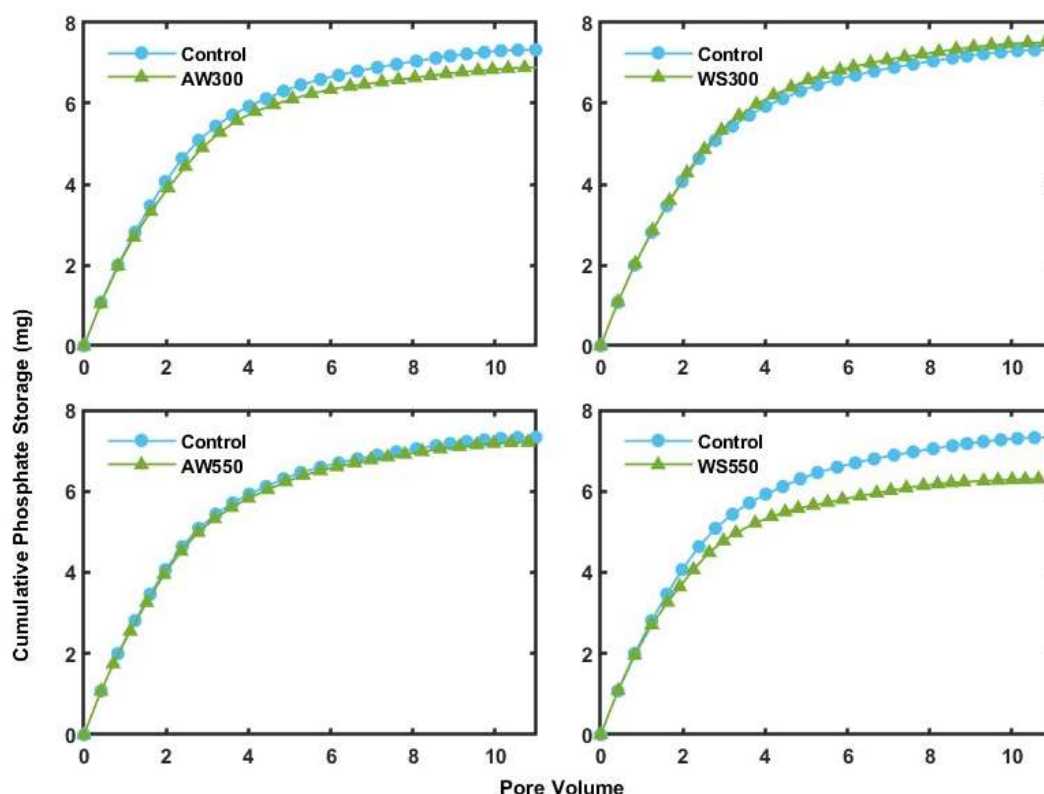
در شکل (۲) منحنی‌های رخنه فسفات در ستون‌های خاک مخلوط شده با بیوچارهای مختلف به همراه منحنی رخنه خاک بدون بیوچار (شاهد) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد میزان جذب فسفات در هر ستون را می‌توان از روی منحنی‌های رخنه (معادله ۲) برآورد کرد. مقدار فسفات جذب شده در هر ستون و در هر زمان که با این روش برآورد شده است در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در همه ستون‌ها مقدار فسفات جذب شده در زمان‌های اولیه اختلاف زیادی با ستون شاهد ندارد؛ اما پس از عبور حدود ۲ حجم منفذ از محلول ورودی مقدار جذب در ۳ مورد از ستون‌ها (ستون‌های خاک تیمار شده با بیوچارهای تولید شده از چوب سیب در دماهای ۳۰۰ و ۵۵۰ درجه سانتیگراد و بیوچار تولید شده از کاه گندم در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد) نسبت به ستون شاهد

کاهش پیدا کرده است. این موضوع بویژه در ستون خاک تیمار شده با کاه گندم در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد محسوس‌تر است؛ که از دفع یا رهاسازی فسفات توسط بیوچارها حکایت دارد. در مقابل، تنها در ستون حاوی خاک تیمار شده با بیوچار تولید شده از کاه گندم در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد جذب فسفات نسبت به ستون شاهد افزایش یافته است. از آنجا که در بیشتر خاک‌ها فسفات در اثر جذب توسط کلوئیدهای خاک یا رسوب آن به صورت ترکیبات نامحلول از دسترس گیاه خارج می‌شود، لذا از منظر تغذیه گیاهی جذب کمتر فسفات در خاک‌های تیمار شده با بیوچار را می‌توان عامل موثری در افزایش قابلیت استفاده آن برای گیاه در این خاک‌ها قلمداد کرد.



شکل ۲. منحنی‌های رخنه فسفات در ستون‌های خاک تیمار شده با بیوچارهای مختلف و ستون خاک شاهد

بطور کلی نتایج بدست آمده از آزمایش‌های دسته‌ای با یافته‌های حاصل از آزمایش ستون‌های خاک مطابقت خوبی دارند. در هر دو آزمایش مشاهده شد که بیوچار تهیه‌شده از کاه گندم در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد نه تنها توانایی جذب فسفات را ندارد، بلکه موجب رهاسازی آن نیز می‌شود. بطوریکه ستون خاک تیمار شده با این نوع بیوچار، میزان جذب فسفات کمتری نسبت به خاک شاهد نشان داد. در مقابل، بیشترین جذب فسفات در هر دو نوع آزمایش مربوط به بیوچار تهیه‌شده از کاه گندم در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. ستون خاک تیمار شده با این بیوچار نیز تنها ستونی است که میزان جذب فسفات بیشتری را نسبت به سایر تیمارها و شاهد نشان داد. نتایج بدست آمده از این پژوهش شباهت‌هایی با نتایج مطالعات اخیر دارند؛ برای نمونه (Gunal, 2025) نشان داد که افزودن بیوچار تهیه شده از پوسته فندق به خاک لوم شنی منجر به کاهش قابل توجه شستشوی فسفر شده است. همچنین، (Wu et al., 2022) گزارش کرده‌اند که کاربرد بیوچار در خاک‌های اسیدی قرمز تأثیر قابل توجهی بر افزایش فسفر قابل دسترس خاک و کاهش ظرفیت جذب فسفات داشته است؛ این یافته‌ها مشابه نتایج بدست آمده با بیوچار تهیه‌شده از کاه گندم در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد در این پژوهش است که موجب رهاسازی فسفات به خاک شده است.



شکل ۳. تغییرات مقادیر تجمعی فسفات جذب شده در ستون‌های خاک پس از عبور مقادیر مختلف محلول ورودی در ستون‌های خاک تیمار شده با بیوچارهای مختلف و ستون خاک شاهد

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، اثر افزودن بیوچارهای مختلف به خاک بر میزان جذب و رهاسازی فسفات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سه نوع از چهار بیوچار مورد استفاده (بیوچارهای تولیدشده از کاه گندم در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد و چوب سیب در دماهای ۳۰۰ و ۵۵۰ درجه سانتیگراد) موجب کاهش جذب (رهاسازی) فسفات در خاک نسبت به خاک فاقد بیوچار (شاهد) شدند. در این میان، بیشترین میزان رهاسازی فسفات مربوط به بیوچار تهیه‌شده از کاه گندم در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد بود.

با توجه به اینکه فسفات در بیشتر خاک‌ها از طریق جذب توسط کلوئیدهای خاک یا تشکیل ترکیبات نامحلول از دسترس گیاه خارج می‌شود، کاهش جذب فسفات توسط این نوع بیوچارها می‌تواند نقش مؤثری در افزایش قابلیت دسترسی فسفر برای گیاهان داشته باشد. از این‌رو، استفاده از این بیوچارها می‌تواند بعنوان یک راهکار اصلاحی در مدیریت حاصلخیزی خاک مورد توجه قرار گیرد. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که نوع ماده گیاهی مورد استفاده در تهیه بیوچار و دمای پیرولیز از عوامل کلیدی در تعیین توانایی بیوچار در جذب یا رهاسازی فسفات در خاک هستند. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب صحیح ماده اولیه و شرایط تولید بیوچار در کاربردهای زراعی و زیست‌محیطی تأکید دارند.

REFERENCES

- Altıkat, A., Alma, M. H., Altıkat, A., Bilgili, M. E., & Altıkat, S. (2024). A comprehensive study of biochar yield and quality concerning pyrolysis conditions: A multifaceted approach. *Sustainability*, 16(2), 937.
- Borchard, N., Siemens, J., Ladd, B., Möller, A., & Amelung, W. (2014). Application of biochars to sandy and silty soil failed to increase maize yield under common agricultural practice. *Soil and Tillage Research*, 144, 184–194.
- Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M., & Ro, K. S. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresour Technol*, 107, 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.084>
- Chaves Fernandes, B. C., Ferreira Mendes, K., Dias Junior, A. F., da Silva Caldeira, V. P., da Silva Teofilo, T. M., Severo Silva, T., Mendonca, V., de Freitas Souza, M., & Valadao Silva, D. (2020). Impact of Pyrolysis Temperature on the Properties of Eucalyptus Wood-Derived Biochar. *Materials (Basel)*,



13(24). <https://doi.org/10.3390/ma13245841>

- Chen, B., Chen, Z., & Lv, S. (2011). A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresour Technol*, 102(2), 716–723. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.067>
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 383–411.
- Gondek, K., Baran, A., Gondek, K., Kopeć, M., & Głab, T. (2016). Effect of processing temperature applied to mixtures of sewage sludge and plant waste on the content of macro- and microelements in the product and on the luminescence of *Vibrio fischeri*. *Journal of Elementology*, 21(4/2016), 1289–1303. <https://doi.org/10.5601/jelem.2015.20.4.1008>
- Gunal, E. (2025). Biochar-mediated changes in nutrient distribution and leaching patterns: insights from a soil column study. *PeerJ*, 13, e18823.
- Gupta, R. K., Vashisht, M., Naresh, R., Dhingra, N., Sidhu, M. S., Singh, P., Rani, N., Al-Ansari, N., Alataway, A., & Dewidar, A. Z. (2024). Biochar influences nitrogen and phosphorus dynamics in two texturally different soils. *Scientific Reports*, 14(1), 6533.
- He, W., Zhang, J., Gao, W., Chen, Y., & Wei, Z. (2025). Enhancing phosphorus availability and dynamics in acidic soils through Rice straw biochar application: a sustainable alternative to chemical fertilizers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1506609.
- Inyang, M., Gao, B., Pullammanappallil, P., Ding, W., & Zimmerman, A. R. (2010). Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresour Technol*, 101(22), 8868–8872. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.088>
- Keiluweit, M., Nico, P. S., Johnson, M. G., & Kleber, M. (2010). Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environ Sci Technol*, 44(4), 1247–1253. <https://doi.org/10.1021/es9031419>
- Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 687–734.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.012>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2012). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Taylor & Francis.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2024). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Taylor & Francis.
- Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & Glaser, B. (2003). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249(2), 343–357. <https://doi.org/10.1023/a:1022833116184>
- Mahmoodi, M. A., Shorafa, M., & Savaghebi, G. (2010). Simulation of Cadmium Transport in Soil Using Convection-Dispersion Equation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 39(1), 129–137.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 333(1-2), 117–128. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0327-0>
- Mallhotra, H., Vandana, Sharma, S., & Pandey, R. (2018). Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. In *Plant nutrients and abiotic stress tolerance* (pp. 171–190). Springer.
- Manya, J. J. (2012). Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environ Sci Technol*, 46(15), 7939–7954. <https://doi.org/10.1021/es301029g>
- MathWorks Inc. (2019). *MATLAB*. In (Version R2019a) [Professional License]. <https://www.mathworks.com/>
- Novak, J. M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., Das, K., Ahmedna, M., Rehrich, D., Watts, D. W., & Busscher, W. J. (2009). Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of environmental science*.
- Selim, H. M., Amacher, M. C., & Iskandar, I. K. (1989). Modeling the Transport of Chromium (VI) in Soil Columns. *Soil Science Society of America Journal*, 53(4), 996–1004. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300040002x>
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., Zhang, W., & Zhang, F. (2011). Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant physiology*, 156(3), 997–1005.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (12 ed.). USDA, Natural Resources Conservation Service.
- 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.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., & Cowie, A. (2009). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327(1-2), 235–246. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x>
- Wu, Y., Zou, Z., Huang, C., & Jin, J. (2022). Effect of biochar addition on phosphorus adsorption characteristics of red soil. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 893212.
- Xu, X., Cao, X., & Zhao, L. (2013). Comparison of rice husk-and dairy manure-derived biochars for simultaneously removing heavy metals from aqueous solutions: role of mineral components in biochars. *Chemosphere*, 92(8), 955–961.
- Yadav, S. P. S., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, P., Paudel, P., & Shrestha, J. (2023). Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100498.
- Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M., & Zimmerman, A. R. (2012). Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, 89(11), 1467–1471. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.002>
- Yuan, J. H., Xu, R. K., & Zhang, H. (2011). The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresour Technol*, 102(3), 3488–3497. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.018>
- Zhao, L., Cao, X., Masek, O., & Zimmerman, A. (2013). Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. *J Hazard Mater*, 256-257, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.015>