Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

The effect of biochar on some biological properties and available phosphorus in cadmium-contaminated soils

Safoora Nahidan[*1], Solmaz Sepahvand[2]

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: s.nahidan@basu.ac.ir
2. M.Sc. Graduate of Soil Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: solmazsepahvand0111@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 05.05.2023
Revised: 08.21.2023
Accepted: 09.21.2023

Keywords:
Biochar,
Heavy metal,
Microbial activity,
Nutrient elements

ABSTRACT

Background and Objectives: Phosphorus (P) is one of the most important components and a limiting factor for the growth of plants due to its low mobility and availability in soil. The application of organic materials such as biochar is one of the main choices to increase the availability of P in soil. Biochar is a carbon-rich material derived from the pyrolysis of organic feedstocks under limited or no oxygen conditions. Biochar can influence the availability of P by improving the physicochemical, biological, and enzymatic conditions of soil, in addition to directly increasing the concentration of nutritional elements, particularly P. Soil pollution by heavy metals such as Cadmium (Cd) has been one of the environmental concerns in the last several decades. Cadmium alters the activity and diversity of soil microbial communities, and it also lessens soil function by decreasing the activity of enzymes related to nutrient cycling. Application of organic materials such as biochar in contaminated soil can reduce the availability of heavy metals in the soil, and as a result, increase the biological properties. It is hypothesized that the application of biochar in heavy metal-contaminated soil influences the availability of P not only directly but also indirectly by improving microbial and enzymatic activity. This issue depends on the type of biochar and soil. Therefore, this study was conducted to investigate the interaction effect of biochar (cow manure and wheat straw) and Cd on microbial respiration, acid and alkaline phosphatase activity, and available P in two soils with different physicochemical characteristics.

Materials and Methods: A factorial experiment was conducted using a completely randomized design with three replicates. The experimental factors included 4 levels of Cd contamination (0, 5, 10, and 20 mg kg^{-1}), 3 levels of biochar (control, wheat straw, and cattle manure biochar), and 2 types of soil (Corck sofla and research center). Two types of soil contaminated with different amounts of Cd from $CdCl_2$ were amended with 2.5% of the biochar and then were incubated for 14 and 90 days at laboratory temperature and 70% field capacity. At the end of each incubation time, available Cd and P, basal respiration, and acid and alkaline phosphatase activity were measured.

Results: The application of cattle manure and wheat straw biochar in soil reduced the available Cd by 70-86% and 61-85%, respectively. At all levels of Cd contamination, the amount of available Cd in the research center soil with sandy loam texture was higher than that of the Corck sofla soil with clay texture. Higher concentrations of Cd also reduced the

microbial respiration and the enzyme activities in the research center (31-46%) more than in the Corck sofla (21.5-35.5%) soil. The decrease in microbial respiration and enzyme activities due to Cd contamination in the soil without biochar (10-41.5%) was more than the soil amended with wheat straw (5-39.8%) and cow manure (0.8-37.9%) biochar. The results also showed that available P increased with biochar addition and decreased with increasing Cd concentration in the soil. So the highest amount of available P was observed in the soil amended with cow manure biochar and without Cd contamination. Positive and significant correlation between available P with microbial respiration (r=0.385-0.604), alkaline (r=0.764-0.879), and acid (r=0.761-0.883) phosphatase activity was obtained, indicating that microbial activity and the enzymes involved in P cycling, play a significant role in the availability of P in the soil.

Conclusion: These findings indicated that the application of biochar in Cd-contaminated soils can increase the bioavailability of P in the soil by decreasing the availability of Cd and increasing microbial activity and alkaline and acid phosphatase activity. This issue was affected by the biochar and soil type.

Cite this article: Nahidan, Safoora, Sepahvand, Solmaz. 2023. The effect of biochar on some biological properties and available phosphorus in cadmium-contaminated soils. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30 (3), 45-65.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2023.21323.3645
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۰۶۹-۲۳۲۲
شاپا آنلاین: ۲۷۹٤-۲۳۲۲

تأثیر بیوچار بر برخی ویژگی‌های زیستی و فسفر قابل‌دسترس در خاک‌های آلوده به کادمیم

صفورا ناهیدان*[۱]، سولماز سپهوند[۲]

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه خاک‌شناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران. رایانامه: s.nahidan@basu.ac.ir

۲. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد خاک‌شناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران. رایانامه: solmazsepahvand0111@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۲/۰۲/۱۵
تاریخ ویرایش: ۰۲/۰۵/۳۰
تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۶/۳۰

واژه‌های کلیدی:
زغال زیستی،
عناصر مغذی،
فعالیت زیستی،
فلز سنگین

چکیده

سابقه و هدف: فسفر به‌دلیل تحرک و قابلیت دسترسی کمی که در خاک دارد، عاملی محدودکننده برای رشد گیاهان محسوب می‌شود. یکی از راهکارهای افزایش قابلیت دسترسی فسفر در خاک، به‌کار بردن مواد آلی ازجمله بیوچار است. بیوچار یک محصول غنی از کربن است که در اثر پیرولیز بقایای آلی در شرایط بدون اکسیژن یا کم اکسیژن حاصل می‌شود. بیوچار علاوه بر افزایش مستقیم غلظت فسفر، می‌تواند با بهبود شرایط فیزیکوشیمیایی، زیستی و آنزیمی خاک بر قابلیت دسترسی فسفر خاک مؤثر باشد. یکی از مشکلات زیست‌محیطی چند دهه گذشته، آلودگی خاک به فلزات سنگین ازجمله کادمیم می‌باشد. کادمیم، فعالیت و تنوع جامعه میکروبی خاک را دگرگون ساخته و با کاهش فعالیت آنزیم‌های مؤثر در چرخه عناصر، عملکرد خاک را کاهش می‌دهد. مواد آلی ازجمله بیوچار در خاک‌آلوده می‌توانند قابلیت دسترسی فلزات سنگین را در خاک کاهش داده و ویژگی‌های زیستی خاک را بهبود بخشند. چنین فرض می‌شود که با کاربرد بیوچار در یک خاک‌آلوده به فلز سنگین، فراهمی فسفر در خاک نه‌تنها به‌صورت مستقیم بلکه به‌صورت غیرمستقیم از طریق بهبود فعالیت زیستی و آنزیمی خاک متأثر می‌شود و این موضوع به نوع بیوچار و خاک بستگی دارد؛ بنابراین پژوهش حاضر باهدف بررسی بر همکنش بیوچار (کود گاوی و کاه گندم) و کادمیم بر تنفس میکروبی، فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی و فسفر قابل‌دسترس در دو خاک با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوت انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل ٤ سطح آلودگی کادمیم (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، ۳ سطح بیوچار (شاهد، بیوچار کاه گندم و بیوچار کود گاوی) و ۲ نوع خاک بودند. بدین‌منظور، دو نمونه خاک با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوت (کرک سفلا و مرکز تحقیقات) با مقادیر

مختلف کادمیم از منبع کلرید کادمیم آلوده و سپس با مقدار ۲/۵ درصد از دو نوع بیوچار تیمار و در دو زمان ۱٤ و ۹۰ روز در دمای آزمایشگاه و رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی انکوباسیون شدند. در انتهای هر دوره انکوباسیون، کادمیم و فسفر قابل‌دسترس، تنفس میکروبی و فعالیت فسفاتاز اسیدی و قلیایی در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها: کاربرد بیوچار کود گاوی و کاه گندم در خاک، کادمیوم قابل‌دسترس را به‌ترتیب به‌میزان ۸۳/۷–۷۳ و ۷۸–٦٤ درصد نسبت به خاک شاهد بدون بیوچار کاهش دادند. در همه سطوح آلودگی کادمیم، مقدار کادمیم قابل‌دسترس در خاک مرکز تحقیقات با بافت لوم شنی بیش‌تر از خاک کرک سفلا با بافت رسی بود. هم‌چنین کادمیم در غلظت‌های بالاتر باعث کاهش بیش‌تر تنفس میکروبی و فعالیت آنزیم¬ها در خاک مرکز تحقیقات (٦٤–۳۱ درصد) نسبت به خاک کرک سفلا (۳۵/۵–۲۱/۵ درصد) شد. کاهش تنفس میکروبی و فعالیت آنزیم‌ها در اثر آلودگی کادمیوم در خاک بدون بیوچار (٤۱/۵–۱۰ درصد) بیش‌تر از خاک دارای بیوچار کاه گندم (۳۹/۸–۵ درصد) و کود گاوی (۳۷/۹–۰/۸ درصد) بود. نتایج هم‌چنین نشان داد که فسفر قابل‌دسترس با افزودن بیوچار به خاک افزایش و با افزایش غلظت کادمیوم کاهش یافت؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار فسفر قابل‌دسترس در خاک بدون آلودگی کادمیم و دارای بیوچار کود گاوی مشاهده شد. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین فسفر قابل‌دسترس با تنفس میکروبی (r=۰/۳۸۵–۰/٦۵۸)، فعالیت فسفاتاز قلیایی (r=۰/۷٦٤–۰/۸۷۹) و اسیدی (r=۰/۷٦۱–۰/۸۸۳) به‌دست آمد که بیانگر آن بود که فعالیت میکروبی و آنزیم‌های مؤثر بر چرخه فسفر نقش به‌سزایی در قابلیت دسترسی فسفر خاک داشته‌اند.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار در خاک‌های آلوده به کادمیم می‌تواند با کاهش قابلیت دسترسی کادمیم و افزایش فعالیت زیستی و فسفاتازهای قلیایی و اسیدی، زیست‌فراهمی فسفر را در خاک افزایش دهد. نوع بیوچار و خاک در این موضوع تأثیرگذار است.

استناد: ناهیدان، صفورا، سپهوند، سولماز (۱۴۰۲). تأثیر بیوچار بر برخی ویژگی‌های زیستی و فسفر قابل‌دسترس در خاک‌های آلوده به کادمیم. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۰ (۳)، ۶۵-۴۵.

DOI: 10.22069/jwsc.2023.21323.3645

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

فسفر از عناصر ضروری و عاملی محدودکننده برای رشد گیاهان محسوب می‌شود. اگرچه غلظت کل فسفر معمولاً در خاک زیاد است، ولی در مقایسه با سایر عناصر غذایی در خاک تحرک و قابلیت دسترسی کم‌تری دارد (۱). یکی از راه‌های افزایش قابلیت دسترسی فسفر در خاک به‌کاربردن مواد آلی است (۱ و ۲). این ترکیبات می‌توانند قابلیت دسترسی فسفر را در خاک از طریق تأثیر بر مقدار کاتیون‌های آهن، آلومینیوم و کلسیم، pH، ظرفیت تبادل کاتیونی و فعالیت میکروبی افزایش دهند. علاوه‌بر این، این ترکیبات خود دارای مقدار زیادی فسفر بوده که می‌توانند آن را به محیط خاک انتشار دهند (۳ و ٤). یکی از انواع مواد آلی که اخیراً مورد توجه بسیاری از پژوهش‌گران قرار گرفته است بیوچار است. بیوچار یک محصول غنی از کربن است که در اثر پیرولیز بقایای آلی در شرایط بدون اکسیژن یا با اکسیژن کم در دمای معمولاً کم‌تر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد حاصل می‌شود (۵). ترکیب شیمیایی بیوچار بسته به مواد اولیه و شرایط پیرولیز آن متفاوت است. ماده اولیه بیوچار می‌تواند شامل زباله‌ها و پسماندها مانند تراشه‌های چوب، خاک‌اره، چمن بریده، برگ و شاخه درختان، بستر طیور، کودهای حیوانی، لجن فاضلاب، مواد زائد مقوایی، بقایای محصولات کشاورزی مانند گندم، ذرت، سبوس برنج و تفاله نیشکر و غیره باشد. بیوچار دارای ویژگی‌هایی همانند بار سطحی و سطح ویژه زیاد، پایداری بالا در برابر تجزیه و دارای قدرت زیاد در جذب یون‌های فلزی است (۵). نتایج مطالعات نشان داده که پیرولیز مواد آلی خام منجر به افزایش غلظت عناصر غذایی به‌ویژه فسفر در بیوچار می‌شود. هم‌چنین بیوچار می‌تواند با بهبود شرایط فیزیکوشیمیایی، زیستی و آنزیمی خاک بر قابلیت دسترسی فسفر خاک مؤثر باشد (۲ و ۵).

آلودگی خاک به فلزات سنگین به‌عنوان یکی از مشکلات زیست‌محیطی در چند دهه گذشته مورد توجه قرار گرفته است (٦). از بین فلزات سنگین، آلودگی کادمیم به دلیل فراهمی و سمیت بیش‌تر آن برای موجودات زنده دارای اهمیت ویژه‌ای است. این فلز از طریق کودهای شیمیایی و حیوانی، لجن فاضلاب و آفت‌کش‌ها، استخراج معادن، ذوب فلزات، مصرف سوخت‌های فسیلی و صنایع کارخانه‌ها و غیره می‌تواند وارد خاک شود (٦ و ۷). فلزات سنگین ازجمله کادمیم، فعالیت و تنوع جامعه زیستی خاک را دگرگون ساخته و هم‌چنین با کاهش فعالیت آنزیم‌های مؤثر در چرخه کربن، فسفر، نیتروژن و گوگرد، عملکرد خاک را کاهش می‌دهند (٦ و ۷). ازآن‌جایی‌که ویژگی‌های زیستی خاک سریعاً به تغییرات وضعیت خاک پاسخ می‌دهند؛ بنابراین به‌عنوان شاخص‌های بالقوه جهت بررسی کیفیت خاک استفاده می‌شوند. هم‌چنین بررسی فعالیت آنزیمی خاک به‌عنوان یکی از شاخص‌های زیستی، جهت سنجش درجه آلودگی خاک به فلزات سنگین پیشنهاد شده است (۸).

از روش‌های اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین می‌توان به افزودن مواد آلی به خاک ازجمله بیوچار اشاره کرد. بیوچار با تغییر pH و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، هم‌چنین افزودن برخی عناصر به خاک مانند فسفر، قابلیت دسترسی فلزات سنگین را در خاک کاهش می‌دهد (۹). از مکانیسم‌های جذب فلزات سنگین توسط بیوچار می‌توان به برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک، تبادل یونی، رسوب شیمیایی و کمپلکس با گروه‌های عاملی موجود در سطح بیوچار اشاره کرد (۱۰). قابلیت دسترسی فلزات سنگین در خاک تیمار شده با بیوچار می‌تواند بسته به نوع بیوچار و شرایط پیرولیز آن تغییر کند (۹ و ۱۱). از طرفی پاسخ فعالیت‌های زیستی و آنزیمی خاک به بیوچار در خاک‌های آلوده نیز بسته به بیوچار، اندازه آن، نوع و

میزان آلودگی خاک متفاوت بوده است. به‌عنوان مثال، آزادی و رئیسی (۲۰۲۱) گزارش کردند که کاربرد ۱ درصد باگاس نیشکر و بیوچار حاصل از آن (پیرولیز شده در دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) موجب کاهش قابلیت دسترسی کادمیم و سرب در یک خاک‌آلوده و شور شد. هم‌چنین اثر سمیت فلزات سنگین بر تنفس میکروبی، زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم‌های اوره آز، کاتالاز، آریل سولفاتاز و فسفاتاز قلیایی در اثر کاربرد اصلاح‌کننده‌ها (به‌ویژه بیوچار پیرولیز شده در دمای پایین‌تر) به دلیل تثبیت فلزات سنگین، افزودن ترکیبات کربناتی به‌ویژه کربن آلی محلول و عناصر غذایی موردنیاز ریز جانداران کاهش یافت (۱۱). حضرتی و همکاران (۲۰۲۱) اثر لجن فاضلاب (SS[1])، بیوچار لجن فاضلاب (SDB[2]) و بیوچار پیش‌تیمار شده با اولتراسونیک و اسید سیتریک (UFB[3]) را بر قابلیت دسترسی کادمیم، سرب و روی و فعالیت آنزیمی خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تیمار UFB با کاهش بیش‌تر فلزات سنگین نسبت به تیمارهای SS و SDB توانسته فعالیت آنزیمی خاک را افزایش بیش‌تری دهد (۱۲). نی و همکاران (۲۰۱۸) اثر کاربرد بیوچار باگاس نیشکر (در مقادیر ۰، ۱/۵، ۲/۲۵ و ۳ تن در هکتار) بر قابلیت دسترسی فلزات سنگین کادمیم، سرب و مس و فعالیت زیستی خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که غلظت کادمیم با افزایش میزان کاربرد بیوچار در خاک کاهش یافت. هم‌چنین کاربرد بیوچار موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، اینورتاز، کاتالاز و جمعیت باکتری‌ها و اکتینومیست‌های خاک شد؛ ولی جمعیت قارچ‌های خاک را کاهش داد (۱۳). جیا و همکاران (۲۰۱۷) دریافتند که پس از افزودن بیوچار کاه گندم و تورمالین به یک خاک اسیدی آلوده به مس و کادمیم، با کاهش دسترسی فلزات سنگین در خاک، فعالیت اینورتاز و اوره‌آز افزایش یافت و در این میان، تأثیر بیوچار بر بهبود فعالیت زیستی خاک‌آلوده بیش‌تر از تورمالین بود (۱۴). یانگ و همکاران (۲۰۱۶) اثر کاربرد مقادیر مختلف بیوچار (۰، ۱ و ۵ درصد) تهیه شده از بامبو و کاه برنج در دو اندازه (<۰/۲۵ و <۱ میلی‌متر) را بر قابلیت دسترسی فلزات کادمیم، مس، سرب و روی و فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، کاتالاز و فسفاتاز اسیدی مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که کاربرد ۵ درصد بیوچار کاه برنج منجر به بیش‌ترین کاهش فلزات سنگین در خاک شد. فعالیت اوره‌آز پس از افزودن ۵ درصد بیوچار کاه برنج در اندازه‌های درشت و ریز به ترتیب به میزان ۱۴۳ و ۱۰۷ درصد افزایش یافت. هر دو نوع بیوچار بامبو و کاه برنج به‌طور معنی‌داری باعث افزایش فعالیت کاتالاز شدند؛ ولی اثر معنی‌داری بر فعالیت فسفاتاز اسیدی نداشتند. این پژوهش‌گران بیان کردند که بیوچار کاه برنج در مقایسه با بیوچار بامبو، پتانسیل بیش‌تری در کاهش زیست‌فراهمی فلزات سنگین در خاک‌های آلوده دارد (۹).

علی‌رغم مطالعات زیاد، دانش کافی همچنان در ارتباط با نقش بیوچار در اصلاح خاک‌های آلوده و تأثیر آن بر کیفیت خاک اندک است و نیازمند به پژوهش‌های بیش‌تری است؛ بنابراین، پژوهش حاضر باهدف بررسی بر همکنش بیوچار (کود گاوی و کاه گندم) و کادمیم بر تنفس میکروبی، فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی و فسفر قابل‌دسترس در دو خاک با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوت انجام گرفت. فرضیه این پژوهش عبارت است از: بیوچار می‌تواند با کاهش قابلیت دسترسی کادمیم در یک خاک‌آلوده، سبب افزایش فعالیت زیستی و آنزیم‌های مؤثر بر چرخه فسفر شده و بدین‌ترتیب فسفر

1- Sewage sludge
2- Sewage sludge derived biochar
3- Ultrasound-treated Functionalized Biochar

قابل‌دسترس خاک را افزایش دهد. چنین تأثیری به نوع بیوچار و نوع خاک بستگی خواهد داشت.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، از دو نمونه خاک کشاورزی غیرآلوده به کادمیم با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوت نمونه‌برداری شد. خاک اول از اطراف مرکز تحقیقات آب و خاک استان همدان، با عرض جغرافیایی '۵۲ °۳٤ شمالی و طول جغرافیایی'۳۱ °٤۸ شرقی و خاک دوم از حوالی روستای کرک سفلا از توابع شهرستان نهاوند با عرض جغرافیایی '۹ °۳٤ شمالی و طول جغرافیایی'۱۷ °٤۸ شرقی انتخاب گردید. به‌منظور برداشت یک نمونه مرکب از خاک هر منطقه، نمونه‌برداری از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری ۱۰ نقطه مجزا و به‌صورت تصادفی انجام و سپس با یکدیگر مخلوط شدند. سپس خاک‌های برداشت شده به آزمایشگاه انتقال، هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری به‌منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های اولیه و هم‌چنین انجام تیمارهای آزمایشی گذرانده شدند.

برای ساخت بیوچار، کود گاوی و کاه گندم ابتدا هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متر گذرانده شدند. سپس مقدار مشخصی از کود گاوی و کاه گندم در کوره الکتریکی به‌دور از اکسیژن در دمای ٤۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ٤ ساعت پیرولیز گردید. آهنگ افزایش دما در کوره ۷ درجه سانتی‌گراد در دقیقه بود (۵).

برخی از ویژگی‌های عمومی خاک و بیوچار شامل بافت خاک به روش پیپت، pH خاک در عصاره ۱ به ۵ خاک به آب و pH بیوچار کود گاوی و کاه گندم در عصاره ۱ به ۲۰ بیوچار به آب توسط دستگاه pH متر دیجیتال (Neomet مدل 77p)، هدایت الکتریکی خاک در نسبت ۱ به ۵ خاک به آب و هدایت الکتریکی بیوچار در نسبت ۱ به ۲۰ بیوچار به آب توسط دستگاه EC متر (Jenway مدل ٤۵۱۰)، کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک و تیتراسیون برگشتی، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و بیوچار به روش استات آمونیوم اندازه‌گیری شدند (۱۵). فسفر کل خاک و بیوچار به روش رنگ‌سنجی پس از قراردادن خاک و بیوچار در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و هضم با اسید کلریدریک ۱ نرمال تعیین شدند (۱٦). کادمیم قابل‌دسترس در نمونه خاک و بیوچار پس از عصاره‌گیری با DTPA[1] (۱۷) و مقدار کل آن پس از هضم با اسید فلوئوریک و تیزاب سلطانی (۱۸) با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شدند. آنالیز عنصری بیوچار شامل اندازه‌گیری درصد کربن، نیتروژن، گوگرد و هیدروژن توسط دستگاه تجزیه عنصری CHNS[2] انجام شد. مقدار خاکستر بیوچار نیز با قرار دادن مقدار مشخصی از بیوچار کاه گندم و کود گاوی برای ۸ ساعت در کوره الکتریکی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد (۱۹). ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل ٤ سطح آلودگی کادمیم (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، ۳ سطح بیوچار (شاهد، بیوچار کاه گندم، بیوچار کود گاوی) و ۲ نوع خاک بودند. به‌منظور انجام آزمایش، دو خاک با استفاده از کلرید کادمیم و توسط افشانه به‌طور یکنواخت آلوده شدند. سپس مقدار ۱۵۰ گرم خاک‌آلوده شده با غلظت‌های مختلف کادمیم، با ۲/۵ درصد بیوچار کاه گندم و بیوچار کود گاوی مخلوط شدند. خاک‌های تیمار شده به رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (رطوبت بهینه

1- Diethylenetriaminepentaacetic acid
2- CHNS Elemental analyser

برای فعالیت اکثر ریزجانداران خاکزی) رسانده و به‌صورت کوتاه و بلندمدت (۱٤ و ۹۰ روز) در دمای آزمایشگاه (۲۵-۲۰ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت ثابت انکوباسیون شدند. در مدت انکوباسیون، هر دو روز یک‌بار، تیمارهای آزمایشی وزن شدند و کاهش وزن حاصل از تبخیر آب با افزودن آب مقطر جبران گردید. پس از هر دوره انکوباسیون، بخشی از نمونه‌های خاک، هوا خشک و در دمای آزمایشگاه و بخشی به‌صورت مرطوب در دمای ٤ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

در نهایت، در نمونه خاک‌های پس از انکوباسیون، کادمیم قابل‌دسترس، پس از عصاره‌گیری با DTPA و توسط دستگاه جذب اتمی (۱۷) و فسفر قابل‌دسترس پس از عصاره‌گیری با کربنات سدیم به روش رنگ‌سنجی (۲۰) اندازه‌گیری شدند. هم‌چنین، تنفس میکروبی پایه[1] براساس اندازه‌گیری میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده توسط خاک تعیین شد (۲۱). بدین‌منظور، مقداری از نمونه‌های خاک با رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی در ظروف درب‌دار شیشه‌ای ریخته و به همراه لوله آزمایش حاوی سود ۱ نرمال به مدت ۱ هفته انکوباسیون شدند. پس از پایان تیتراسیون مقدار سود باقی‌مانده توسط اسید کلریدریک ۰/۵ نرمال در حضور محلول کلرید باریم و معرف فنل فتالئین تیتر گردید و تنفس میکروبی برحسب $mg\ CO_2\text{-}C\ kg^{-1}\ soil\ h^{-1}$ گزارش شد.

فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی و اسیدی خاک نیز براساس تعیین مقدار تولید محصول واکنش آنزیمی به روش رنگ‌سنجی (۲۲) اندازه‌گیری شدند. به‌منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی، ابتدا نمونه‌های ۱ گرمی خاک با رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی با ۰/۲ میلی‌لیتر تولوئن تیمار شدند. سپس ٤ میلی‌لیتر بافر MUB[2] (محلول مادری آن از انحلال تریس هیدروکسی متیل آمینومتان، اسید مالیک، اسید سیتریک و اسید بوریک در سود یک نرمال ساخته می‌شود) با pH برابر ۱۱ و ۱ میلی‌لیتر محلول سوبسترای پارا- نیتروفنیل فسفات[3] ۰/۰۵ مولار به سوسپانسیون فوق افزوده و به‌مدت ۱ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد انکوباسیون شدند. پس از انکوباسیون، ۱ میلی‌لیتر کلرید کلسیم ۰/۵ مولار و ٤ میلی‌لیتر هیدروکسید سدیم ۰/۵ مولار به آن‌ها اضافه و غلظت پارا- نیتروفنل (PNp) در نمونه‌ها توسط اسپکتروفوتومتر در طول موج ٤۱۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. به موازات این اندازه‌گیری یک تیمار شاهد نیز در نظر گرفته شد. تیمار شاهد نمونه‌ای است که پس از پایان انکوباسیون، سوبسترا دریافت می‌کند. از کسر نمودن مقدار پارا- نیتروفنل تیمار شاهد از تیمار اصلی، فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی محاسبه شد و بر حسب $\mu g\ PNp\ g^{-1}\ soil\ h^{-1}$ گزارش گردید. برای اندازه‌گیری فسفاتاز اسیدی نیز از روش مشابهی استفاده شد با این تفاوت که pH بافر MUB بر روی ٦/۵ تنظیم گردید.

پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس با رویه GLM[4] و مقایسه میانگین‌ها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار[5] با استفاده از نرم‌افزار Statistix8 برای دو زمان انکوباسیون به‌صورت جداگانه انجام شد.

1- Basal microbial respiration

2- Modified Universal Buffer
3- Para-nitrophenylephosphate
4- Generalized Linear Model
5- Least Significant Difference (LSD) Test

جدول ۱- ویژگی‌های عمومی خاک و بیوچار.

Table 1. Physical and chemical properties of the studied soil and biochar.

بیوچار کود گاوی Cow manure biochar	بیوچار کاه گندم Wheat straw biochar	خاک مرکز تحقیقات Research center soil	خاک کرک سفلا Corck sofla soil	واحد Unit	ویژگی‌ها Characteristics
–	–	0.95	1.66	٪	کربن آلی Organic Carbon
10٫87	9.91	6.3	8.1	–	پی‌اچ pH
6.42	1.37	1.2	3.6	$dS\ m^{-1}$	هدایت الکتریکی Electrical conductivity
22.73	13.66	19.7	41.30	$meq\ 100g^{-1}$	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity
–	–	1.17	20.45	٪	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent
–	–	لوم شنی Sand loam	رسی Clay	–	بافت خاک Soil texture
–	–	55	17	٪	شن Sand
–	–	31	23	٪	سیلت Silt
–	–	14	60	٪	رس Clay
ناچیز negligible	ناچیز negligible	ناچیز negligible	ناچیز negligible	$mg\ kg^{-1}$	کادمیم قابل‌دسترس Available Cd
ناچیز negligible	ناچیز negligible	ناچیز negligible	ناچیز negligible	$mg\ kg^{-1}$	کادمیم کل Total Cd
9695	6033	920	1100	$mg\ kg^{-1}$	فسفر کل Total P
31.12	61.52	–	–	٪	کربن C
2.12	0.41	–	–	٪	نیتروژن N
0.33	–	–	–	٪	گوگرد S
1.78	3.07	–	–	٪	هیدروژن H
0.06	0.05			–	نسبت هیدروژن به کربن H/C
64	22.3	–	–	٪	محتوای خاکستر Ash

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌های کادمیم قابل‌دسترس نشان داد که اثرات اصلی غلظت کادمیم، بیوچار و نوع خاک و برهمکنش دوگانه غلظت کادمیم و بیوچار و غلظت کادمیم و نوع خاک در زمان ۱۴ و ۹۰ روز انکوباسیون بر کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA (کادمیم قابل‌دسترس) معنی‌دار شدند ($P<0/05$) (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین برهمکنش غلظت کادمیم و بیوچار بر کادمیم قابل‌دسترس نشان داد که افزودن بیوچار به خاک باعث کاهش معنی‌داری در مقدار کادمیم قابل‌دسترس شد؛ به‌طوری‌که کاهش کادمیم قابل‌دسترس در اثر کاربرد بیوچار کاه گندم به ترتیب برابر ۷۶/۵-۶۴ و ۷۸-۶۷ درصد در زمان ۱۴ و ۹۰ روز بود. این کاهش در اثر کاربرد بیوچار کود گاوی برابر ۸۱/۹-۷۸ و ۸۳/۸-۷۷/۷ درصد در زمان ۱۴ و ۹۰ روز بود (جدول ۳). بیزلی و همکاران (۲۰۱۰) مشاهده کردند که کمپوست زباله سبز و بیوچار تهیه شده از چوب می‌توانند با افزایش pH یک خاک اسیدی، قابلیت دسترسی فلزات سنگین مانند کادمیم و روی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهند (۲۳). کائو و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که فسفر زیاد موجود در بیوچار کود گاوی می‌تواند از تحرک سرب در خاک جلوگیری کند، بدین‌صورت که با کاربرد بیوچار در خاک، سرب از شکل کربنات سرب با پایداری کم‌تر به شکل باثبات‌تر هیدروکسی پیرومورفیت تبدیل می‌شود (۲۴). لو و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که با افزایش مقدار کاربرد بیوچار بامبو و کاه برنج در خاک، قابلیت دسترسی فلزات سنگین کاهش یافت. هم‌چنین تأثیر بیوچار کاه برنج نسبت به بیوچار بامبو محسوس‌تر بود، زیرا بیوچار کاه برنج، pH، غلظت سیلیس و فسفر بیش‌تری نسبت به بیوچار بامبو داشت. آن‌ها بیان کردند که سطح ویژه زیاد، ساختار متخلخل، pH بالا و وجود برخی نمک‌های محلول در بیوچار می‌توانند بر جذب و رسوب فلزات سنگین در خاک تأثیر بگذارد (۲۵). هی و همکاران (۲۰۱۹) و آزادی و رئیسی (۲۰۲۱) نیز عنوان کردند که ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد و گروه‌های عاملی سطحی بیوچار می‌تواند بر تحرک فلزات سنگین در خاک مؤثر باشند (۲۶ و ۱۱). در مطالعه حاضر نیز اثر بیوچار کود گاوی بر کاهش غلظت کادمیم قابل‌دسترس بیش‌تر از بیوچار کاه گندم بود. این مسأله ممکن است به pH، ظرفیت تبادل کاتیونی و فسفر بیش‌تر بیوچار کود گاوی در مقایسه با کاه گندم مرتبط باشد.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثرات غلظت کادمیم، بیوچار و نوع خاک بر ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده.

Table 2. Analysis of variance of the effects of Cd concentration, biochar and soil type on the measured characteristics.

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Mean squares				
		کادمیم قابل‌دسترس Available Cd	تنفس میکروبی Microbial respiration	فسفاتاز قلیایی Alkaline phosphatase	فسفاتاز اسیدی Acid phosphatase	فسفر قابل‌دسترس available P
		۱٤ روز 14 days				
غلظت کادمیم (C) Cd concentration	3	34.63***	4094***	50161***	8018***	2.85***
بیوچار (B) Biochar	2	34.58***	393***	4826***	720***	27.02***
نوع خاک (S) Soil type	1	1.01***	3414***	41827***	14249***	4.30***
C*B	6	6.99***	16.8***	205***	36.2***	0.28ns
C*S	3	0.185***	55.5***	679***	79.7***	0.77***
B*S	2	0.024ns	12.3*	150*	32.0**	0.05ns
C*B*S	6	0.013ns	3.76ns	46.0ns	7.8ns	0.26ns
خطا Error	48	0.009	3.01	36.9	6.2	0.09
ضریب تغییرات Coefficient of variation		6.48	2.38	2.38	2.63	2.16
		۹۰ روز 90 days				
غلظت کادمیم (C) Cd concentration	3	31.19***	838***	53981***	7579***	4.92***
بیوچار (B) Biochar	2	35.724***	96.3***	5970***	942***	29.04***
نوع خاک (S) Soil type	1	0.815***	887***	29376***	8046***	7.84***
C*B	6	7.81***	3.3*	364ns	24.9ns	0.38ns
C*S	3	0.156***	9.1***	502*	53.5**	0.85*
B*S	2	0.003ns	6.3**	517*	57.5*	0.35ns
C*B*S	6	0.012ns	1.46ns	354ns	7.7ns	0.34ns
خطا Error	48	0.008	1.65	273	12.0	0.28
ضریب تغییرات coefficient of variation		6.76	3.71	6.85	3.98	4.05

ns، ***، ** و * به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱، ۱ و ۵ درصد می‌باشد

ns, ***, ** and * is non-significant and significant at the 0.1, 1 and 5% probability level, respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر غلظت کادمیم و بیوچار بر کادمیم قابل‌دسترس ($mg\ kg^{-1}$)، تنفس میکروبی ($mg\ CO_2\text{-}C\ kg^{-1}\ soil\ h^{-1}$) و فعالیت فسفاتاز قلیایی و اسیدی ($\mu g\ PNp\ g^{-1}\ soil\ h^{-1}$).

Table 3. The mean comparison of the effect of Cd concentration and biochar on available Cd ($mg\ kg^{-1}$), microbial respiration ($mg\ CO_2\text{-}C\ kg^{-1}\ soil\ h^{-1}$) and alkaline and acid phosphatase activity ($\mu g\ PNp\ g^{-1}\ soil\ h^{-1}$).

غلظت کادمیم Cd concentration ($mg\ kg^{-1}$)	بیوچار Biochar	کادمیم قابل‌دسترس Available Cd		تنفس میکروبی Microbial respiration		فسفاتاز قلیایی Alkaline phosphatase	فسفاتاز اسیدی Acid phosphatase
		۱۴ روز 14 Days	۹۰ روز 90 Days	۱۴ روز 14 Days	۹۰ روز 90 Days	۱۴ روز 14 Days	۱۴ روز 14 Days
0	شاهد Control	0^{i}	0^{h}	85.90^{c}	34.48^{c}	300.63^{c}	112.53^{b}
	کاه گندم Wheat straw	0^{i}	0^{h}	88.16^{ab}	36.47^{ab}	310.99^{ab}	116.58^{a}
	کود گاوی Cow manure	0^{i}	0^{h}	89.80^{a}	37.26^{a}	314.58^{a}	115.16^{ab}
5	شاهد Control	2.26^{c}	2.13^{c}	77.12^{e}	30.46^{d}	269.93^{e}	100.04^{d}
	کاه گندم Wheat straw	0.53^{g}	0.46^{g}	83.63^{d}	34.11^{c}	293.05^{d}	108.91^{c}
	کود گاوی Cow manure	0.41^{h}	0.38^{g}	87.52^{bc}	35.98^{b}	307.01^{bc}	114.16^{ab}
10	شاهد Control	2.73^{b}	2.60^{b}	59.13^{h}	22.66^{g}	206.94^{h}	74.95^{g}
	کاه گندم Wheat straw	0.983^{f}	0.86^{f}	66.44^{g}	24.62^{f}	231.86^{f}	84.92^{f}
	کود گاوی Cow manure	0.60^{g}	0.42^{g}	69.70^{f}	27.35^{e}	243.62^{e}	89.08^{e}
20	شاهد Control	6.35^{a}	6.32^{a}	52.68^{j}	20.18^{h}	184.02^{j}	66.41^{i}
	کاه گندم Wheat straw	1.91^{d}	1.72^{d}	55.81^{i}	21.95^{g}	194.98^{i}	70.02^{h}
	کود گاوی Cow manure	1.73^{e}	1.41^{e}	59.64^{h}	23.14^{g}	208.73^{h}	75.28^{g}

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد (P<۰/۰۵)

Means with different letters in each column are significantly different (P<0.05)

نتایج مقایسه میانگین برهمکنش غلظت کادمیم و نوع خاک بر کادمیم قابل‌دسترس نشان داد که در همه سطوح آلودگی کادمیم و هر دو زمان، مقدار کادمیم قابل‌دسترس در خاک مرکز تحقیقات بیش‌تر از خاک کرک سفلا می‌باشد (جدول ٤). ویژگی‌هایی از خاک مانند pH، ماده آلی، رس، کربنات‌ها، اکسیدها و هیدراکسیدهای فلزی می‌توانند بر قابلیت دسترسی کادمیم مؤثر باشند (۲۷ و ۲۸). در خاک کرک سفلا به‌دلیل وجود کربنات کلسیم و pH قلیایی، رسوب کادمیم به‌صورت کربنات کادمیم و هیدراکسید کادمیم امکان‌پذیر است (۲۷). هم‌چنین تراکم بار سطحی کلوئیدهای خاک تابعی از pH است (۲۹) و در نتیجه

خاک کرک سفلا با pH بالاتر تمایل بیش‌تری برای جذب کادمیم دارد. وجود رس و ماده آلی بیش‌تر در خاک کرک سفلا در مقایسه با مرکز تحقیقات نیز باعث شده که خاک کرک سفلا ظرفیت تبادل کاتیونی بیش‌تری داشته باشد و بدین‌ترتیب کادمیم بیش‌تری را نیز از فاز محلول خارج کرده و از قابلیت دسترسی آن بکاهد (۲۸). با کاهش قابلیت دسترسی کادمیم، از سمیت آن بر ویژگی‌های زیستی خاک کاسته می‌شود که در ادامه به آن پرداخته شده است.

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر غلظت کادمیم و نوع خاک بر کادمیم قابل‌دسترس ($mg\ kg^{-1}$)، تنفس میکروبی ($mg\ CO_2\text{-}C\ kg^{-1}\ soil\ h^{-1}$) فعالیت فسفاتاز قلیایی و اسیدی ($\mu g\ PNp\ g^{-1}\ soil\ h^{-1}$).

Table 4. The mean comparison of the effect of Cd concentration and soil type on available Cd ($mg\ kg^{-1}$), microbial respiration ($mg\ CO_2\text{-}C\ kg^{-1}\ soil\ h^{-1}$) and alkaline and acid phosphatase activity ($\mu g\ PNp\ g^{-1}\ soil\ h^{-1}$).

غلظت کادمیم Cd concentration ($mg\ kg^{-1}$)	خاک Soil	کادمیم قابل‌دسترس Available Cd		تنفس میکروبی Microbial respiration		فسفاتاز قلیایی Alkaline phosphatase		فسفاتاز اسیدی Acid phosphatase	
		۱٤ روز 14 Days	۹۰روز 90 Days	۱٤ روز 14 Days	۹۰ روز 90 Days	۱٤ روز 14 Days	۹۰ روز 90 Days	۱٤ روز 14 Days	۹۰ روز 90 Days
0	کرک سفلا Corck sofla	0^{g}	0^{g}	94.93^{a}	39.24^{a}	332.25^{a}	321.09^{a}	130.31^{a}	117.38^{a}
	مرکز تحقیقات Research Center	0^{g}	0^{g}	81.49^{c}	32.91^{c}	285.21^{c}	278.43^{b}	101.02^{c}	98.40^{c}
5	کرک سفلا Corck sofla	0.94^{f}	0.89^{f}	87.42^{b}	32.91^{c}	305.94^{b}	287.07^{b}	119.14^{b}	109.28^{b}
	مرکز تحقیقات Research Center	1.19^{e}	1.10^{e}	78.30^{d}	30.83^{d}	274.05^{d}	262.22^{c}	96.93^{d}	91.82^{d}
10	کرک سفلا Corck sofla	1.34^{d}	1.20^{d}	73.70^{e}	29.13^{e}	257.97^{e}	231.13^{d}	99.05^{cd}	86.71^{e}
	مرکز تحقیقات Research Center	1.55^{c}	1.39^{c}	56.27^{g}	20.63^{g}	196.97^{g}	183.95^{f}	66.92^{f}	62.24^{h}
20	کرک سفلا Corck sofla	3.08^{b}	2.92^{b}	63.53^{f}	25.70^{f}	222.36^{f}	207.07^{e}	85.03^{e}	76.78^{f}
	مرکز تحقیقات Research Center	3.58^{a}	3.38^{a}	48.42^{h}	17.82^{h}	169.47^{h}	160.16^{g}	56.11^{g}	53.11^{i}

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد (P<۰/۰۵)

Means with different letters in each column are significantly different (P<0.05)

نتایج تجزیه واریانس داده‌های تنفس میکروبی، فعالیت فسفاتاز قلیایی و اسیدی نشان داد که اثرات اصلی غلظت کادمیم، بیوچار و نوع خاک در هر دو زمان ۱٤ و ۹۰ روز انکوباسیون، بر تنفس میکروبی، فعالیت فسفاتاز قلیایی و اسیدی معنی‌دار شدند (P<۰/۰۵). برهمکنش غلظت کادمیم و بیوچار نیز در هر دو زمان بر تنفس میکروبی و در زمان ۱٤ روز بر فعالیت فسفاتاز قلیایی و اسیدی و برهمکنش غلظت کادمیم و نوع خاک و هم‌چنین برهمکنش بیوچار و نوع خاک بر تنفس میکروبی و فعالیت فسفاتاز قلیایی و اسیدی در هر دو زمان معنی‌دار شدند (P<۰/۰۵) (جدول ۲).

مقایسه میانگین برهمکنش غلظت کادمیم و بیوچار بر تنفس میکروبی نشان داد که تنفس میکروبی با کاربرد کادمیم در خاک کاهش می‌یابد. این کاهش تنفس میکروبی در اثر آلودگی کادمیم در خاک شاهد بدون بیوچار (۳۸/۷-۱۰/۲ درصد در زمان ۱٤ روز و ٤۱/۵-۱۱/۷ درصد در زمان ۹۰ روز) بیش‌تر از زمانی است که خاک با بیوچار کاه گندم (۳٦/۷-۵/۱ درصد در زمان ۱٤ روز و ۳۹/۸-٦/۵ درصد در زمان ۹۰ روز) و کود گاوی (۳۳/٦-۲/۵ درصد در زمان ۱٤ روز و ۳۷/۹-۳/٤ درصد در زمان ۹۰ روز) تیمار شده است (جدول ۳). هم‌چنین نتایج مقایسه میانگین این برهمکنش بر فعالیت فسفاتاز قلیایی و اسیدی در زمان ۱٤ روز نشان داد که کاهش فعالیت این آنزیم‌ها در اثر آلودگی کادمیم در خاک شاهد بدون بیوچار (٤۰-۱۰ درصد) بیش‌تر از زمانی است که خاک با بیوچار کاه گندم (۳۹-۵ درصد) و کود گاوی (۳٤-۰/۸ درصد) تیمار شده است (جدول ۳). این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بیوچار می‌تواند اثر سمیت کادمیم بر فعالیت زیستی و آنزیمی خاک را کاهش دهد که با نتایج دیگر پژوهش‌گران نیز همخوانی دارد (۹، ۱۱ و ۱۳). این موضوع می‌تواند به‌دلیل تأثیر بیوچار بر کاهش قابلیت دسترسی کادمیم خاک باشد که در پژوهش حاضر هم مشاهده شد (جدول ۳). هم‌چنین بیوچار یک ماده غنی از کربن و عناصر غذایی است که می‌تواند انرژی موردنیاز برای فعالیت و مقاومت ریزجانداران به تنش ناشی از فلزات سنگین خاک را تأمین کند (۳۱). آزادی و رئیسی (۲۰۲۱) نیز بیان کردند که ورود ترکیبات کربنه به‌ویژه کربن آلی محلول توسط بیوچار، نقش مؤثری بر تحریک فعالیت زیستی خاک‌آلوده به کادمیم و سرب دارد (۱۱). هم‌چنین ون و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که بیوچار می‌تواند با بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک، ریزجانداران مقاوم به سرب را افزایش دهد و بدین‌ترتیب از سمیت سرب بکاهد (۳۱). با تغییر در فراوانی، تنوع و فعالیت ریزجانداران خاکزی توسط بیوچار، فعالیت آنزیم‌های خاک نیز تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد (۳۲).

نتایج مقایسه میانگین برهمکنش غلظت کادمیم و نوع خاک بر تنفس میکروبی و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی و اسیدی در دو زمان انکوباسیون نشان داد که در هر دو خاک، با افزایش غلظت کادمیم، این ویژگی‌ها کاهش یافتند. هم‌چنین نتایج نشان‌دهنده آن است که کاهش تنفس میکروبی و فعالیت فسفاتازها در اثر آلودگی کادمیم به ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، در خاک مرکز تحقیقات (٤٦-۳۱ درصد) بیش‌تر از خاک کرک سفلا (۳۵/۵-۲۱/۵ درصد) می‌باشد. این موضوع می‌تواند وابسته به مقدار کادمیم قابل‌دسترس بیش‌تر در خاک مرکز تحقیقات در مقایسه با خاک کرک سفلا باشد (جدول ٤). کاهش فعالیت زیستی و آنزیمی خاک در اثر آلودگی به کادمیم در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است (٦ و ۳۳). در این پژوهش‌ها اشاره شده است که کاهش فعالیت آنزیمی در اثر آلودگی کادمیم، می‌تواند به‌دلیل کاهش فعالیت یا تغییر جامعه زیستی و در نتیجه تولید آنزیم کم‌تر باشد. هم‌چنین، فلزات سنگین و از جمله کادمیم، فعالیت‌های آنزیمی را از طریق واکنش با کمپلکس آنزیم- سوبسترا، دناتوره کردن پروتئین آنزیم و واکنش با مراکز فعال آن‌ها مهار می‌کنند (٦ و ۳٤) و این موضوع به ویژگی‌های خاک مثل بافت، ماده آلی، pH و غیره نیز بستگی دارد (۳٤). در این باره، لیو و همکاران (۲۰۲۱) مشاهده کردند که همبستگی منفی و معنی‌داری بین مقدار رس و بازدارندگی فعالیت آنزیمی خاک توسط کادمیم وجود دارد (۸). حسن و همکاران (۲۰۱۳) نیز گزارش کردند که افزودن کادمیم به سه نوع خاک با بافت متفاوت باعث کاهش فعالیت فسفاتاز شد و این اثر در خاک

لوم شنی بیش‌تر از خاک لوم رسی و لوم بود (۳۵). در واقع، با اتصال بیش‌تر کادمیم به سطوح تبادلی رس‌ها، قابلیت دسترسی آن برای موجودات زنده و فعالیت آنزیمی کاهش می‌یابد. هم‌چنین مقدار ماده آلی خاک که ارتباط مستقیمی با مقدار رس خاک نیز دارد می‌تواند با افزایش زیست‌توده میکروبی و تولید آنزیم بیش‌تر، از شدت تأثیر فلزات سنگین بر فعالیت آنزیمی خاک بکاهد (۳٤).

مقایسه میانگین برهمکنش بیوچار و نوع خاک بر تنفس میکروبی نشان داد که افزودن بیوچار به هر دو خاک، تنفس میکروبی را افزایش داد و در این میان تأثیر بیوچار کود گاوی (۱۲/۹–۱۰/۸ درصد در زمان ۱٤ روز و ۱٦/۸–۱۲/۳ در زمان ۹۰ روز) بیش‌تر از بیوچار کاه گندم (۷/۵–٦/٦ درصد در زمان ۱٤ روز و ۹/٤–۷/۷ درصد در زمان ۹۰ روز) بود (جدول ۵). نتایج هم‌چنین نشان داد که کاربرد بیوچار باعث افزایش فعالیت فسفاتازهای خاک شد و این افزایش در خاک‌های تیمار شده با بیوچار کود گاوی (۱۷/٤–۱۰/٦ درصد) بیش‌تر از بیوچار کاه گندم (۱۳/۱–٦/۷ درصد) بود (جدول ۵). افزایش تنفس میکروبی و فعالیت فسفاتازها در خاک‌های تیمار شده با منابع مختلف بیوچار نیز پیش از این گزارش شده است (۳ و ۳٦). دلایل افزایش فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک در اثر کاربرد بیوچار را می‌توان به ۱- جذب سطحی میکروب‌ها توسط بیوچار و حفاظت آن‌ها در مقابل شکار توسط سایر ریزجانداران خاکزی، ۲- تأمین بخشی از نیاز غذایی میکروب‌ها در تولید آنزیم و ۳- بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک به‌عنوان زیستگاه ریزجانداران نسبت داد (۳۰).

در مطالعه حاضر افزایش تنفس میکروبی و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی و اسیدی در اثر کاربرد بیوچار در خاک کرک سفلا (۱۷/٤–۷ درصد) تا حدودی بیش‌تر از خاک مرکز تحقیقات (۱۳/۱–٦/۷ درصد) بود (جدول ۵). خاک دارای ذرات رس بیش‌تر، توانایی بیش‌تری در نگهداری ماده آلی داشته و می‌تواند با تأمین بیش‌تر عناصر غذایی برای ریزجانداران خاک، فعالیت آن‌ها را تحریک کرده و در پی آن آنزیم بیش‌تری توسط آن‌ها تولید شود. هم‌چنین، آنزیم‌های برون سلولی بر روی سطوح کلوئیدهای رس و مواد آلی، جذب شده و از دسترس پروتئازها در امان می‌مانند (۳۷). در این باره، سینگ و همکاران (۲۰۲۲) مشاهده کردند که بیوچار باعث افزایش بیش‌تر ماده آلی و تنوع قارچی در خاک ریزبافت نسبت به خاک متوسط و درشت‌بافت شد (۳۸). هم‌چنین وانگ و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که بیوچار در حضور رس تأثیر بیش‌تری بر تشکیل خاکدانه‌های پایدار دارد که این مسأله می‌تواند بر جامعه زیستی خاک تأثیر بگذارد (۳۹). به‌علاوه بیوچار می‌تواند با افزایش حجم منافذ درشت در خاک‌های ریزبافت، وضعیت فیزیکی زیستگاه ریزجاندارن را بهبود بخشیده و فعالیت آن‌ها را افزایش دهد (٤۰)؛ بنابراین، با توجه به مسائل گفته شده این احتمال وجود دارد که در پژوهش حاضر نیز با کاربرد بیوچار، ماده آلی و شرایط فیزیکی خاک کرک سفلا با بافت رسی نسبت به مرکز تحقیقات با بافت لوم شنی، بهبود بیش‌تری یافته و بدین‌ترتیب بر فعالیت زیستی و آنزیمی آن نیز تأثیر بیش‌تری گذاشته باشد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر بیوچار و نوع خاک بر تنفس میکروبی ($mg\ CO_2\text{-}C\ kg^{-1}soil\ h^{-1}$) و فعالیت فسفاتاز قلیایی و اسیدی ($\mu g\ PNp\ g^{-1}soil\ h^{-1}$).

Table 5. The mean comparison of the effect of biochar and soil type on microbial respiration ($mg\ CO_2\text{-}C\ kg^{-1}\ soil\ h^{-1}$) and alkaline and acid phosphatase activity ($\mu g\ PNp\ g^{-1}soil\ h^{-1}$).

بیوچار Biochar	خاک Soil	تنفس میکروبی Microbial respiration		فسفاتاز قلیایی Alkaline phosphatase		فسفاتاز اسیدی Acid phosphatase	
		۱۴ روز 14 Days	۹۰ روز 90 Days	۱۴ روز 14 Days	۹۰ روز 90 Days	۱۴ روز 14 Days	۹۰ روز 90 Days
شاهد Control	کرک سفلا Corck sofla	74.56 c	29. 95 c	262.35 c	238.63 b	101.63 c	89.36 c
	مرکز تحقیقات Research Center	62.40 f	23.95f	218.40 f	208. 83 d	75.34 f	71.34 f
کاه گندم Wheat straw	کرک سفلا Corck sofla	80.14 b	32.78 b	281.19 b	269.93 a	108.80 b	98.34 b
	مرکز تحقیقات Research Center	66.53e	25.79 e	234.25 e	222.79 c	81.42 e	77.14 e
کودگاوی Cow manure	کرک سفلا Corck sofla	84.18a	34.97 a	295.34 a	276.21 a	114.72 a	104.91 a
	مرکز تحقیقات Research Center	69.13d	26.90d	241.62 d	231.96 bc	83.99 d	80.70 d

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد (P<۰/۰۵)

Means with different letters in each column are significantly different (P<0.05)

نتایج تجزیه واریانس داده‌های فسفر قابل‌دسترس نشان داد که اثرات اصلی بیوچار، غلظت کادمیم و نوع خاک و برهمکنش غلظت کادمیم و نوع خاک در هر دو زمان بر فسفر قابل‌دسترس معنی‌دار شدند (P<۰/۰۵) (جدول ۲).

مقایسه میانگین تأثیر بیوچار بر فسفر قابل‌دسترس خاک نشان داد که با کاربرد بیوچار در خاک، فسفر قابل‌دسترس در هر دو زمان انکوباسیون افزایش یافت و چنین تأثیری در اثر کاربرد کود گاوی (۱۸/۳-۱۶/٤ درصد) بیش‌تر از بیوچار کاه گندم (۹/۲-۷ درصد) بود (جدول ٦). افزایش فسفر قابل‌دسترس در خاک در اثر کاربرد بیوچار در پژوهش‌های پیشین هم گزارش شده است (٤١ و ٢). افزایش در فسفر قابل‌دسترس خاک توسط بیوچار می‌تواند به‌دلیل افزودن فسفر از منبع بیوچار، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و تأثیر بر فعالیت کاتیون‌های در تعامل با فسفر مانند کلسیم، آهن و آلومینیوم باشد. تغییرات فعالیت میکروبی و آنزیم‌های مرتبط با چرخه فسفر نیز می‌تواند بر فسفر قابل‌دسترس تأثیر بگذارد (۲).

جدول ٦- مقایسه میانگین اثر بیوچار بر فسفر قابل‌دسترس ($mg\ kg^{-1}$).

Table 6. The mean comparison of the effect of biochar on available P.

۹۰ روز 90 Days	١٤ روز 14 Days	بیوچار Biochar
12.0[c]	12.8 [c]	شاهد Control
13.1[b]	13.7[b]	کاه گندم Wheat straw
14.2[a]	14.9[a]	کود گاوی Cow manure

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد (P<۰/۰۵)

Means with different letters in each column are significantly different (P<0.05)

نتایج برهمکنش خاک و غلظت کادمیم بر فسفر قابل‌دسترس نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم خاک، فسفر قابل‌دسترس کاهش یافت (جدول ۷). از دلایل کاهش فسفر قابل‌دسترس در اثر آلودگی کادمیم می‌توان به کاهش فعالیت میکروبی و آنزیم‌های فسفاتازی اشاره کرد. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین فسفر قابل‌دسترس با تنفس میکروبی و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی و اسیدی نیز گواه این مسأله می‌باشد (جدول ۸). پیش از این نیز وجود همبستگی مثبت و معنی‌داری بین فعالیت فسفاتازها در خاک با فسفر کل، فسفر آلی و فسفر قابل‌دسترس گزارش شده است (٤٢).

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر خاک و غلظت کادمیم بر قابل‌دسترس ($mg\ kg^{-1}$).

Table 7. The mean comparison of the effect of soil type and Cd concentration on available P ($mg\ kg^{-1}$).

۹۰ روز 90 Days	١٤ روز 14 Days	خاک Soil	غلظت کادمیم Cd concentration ($mg\ kg^{-1}$)
14.51[a]	14.90[a]	کرک سفلا Corck sofla	0
13.21[bc]	13.80[bc]	مرکز تحقیقات Research Center	
13.40[b]	14.00[b]	کرک سفلا Corck sofla	5
12.83[cd]	13.70[c]	مرکز تحقیقات Research Center	
13.03[bcd]	13.76[bc]	کرک سفلا Corck sofla	10
12.60[d]	13.51[cd]	مرکز تحقیقات Research Center	
12.88[cd]	13.60[c]	کرک سفلا Corck sofla	20
12.53[d]	13.30[d]	مرکز تحقیقات Research Center	

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد (P<۰/۰۵)

Means with different letters in each column are significantly different (P<0.05)

جدول ۸- ضرایب همبستگی بین فسفر قابل‌دسترس و تنفس میکروبی، فسفاتاز قلیایی و اسیدی.

Table 8. Correlation between available P and microbial respiration, alkaline and acid phosphatase activity.

زمان انکوباسیون Incubation time	خاک Soil	تنفس میکروبی Microbial respiration	فسفاتاز قلیایی Alkaline phosphatase	فسفاتاز اسیدی Acid phosphatase
14 روز 14 Days	کرک سفلا Corck sofla	0.604***	0.861***	0.871***
	مرکز تحقیقات Research Center	0.385*	0.878***	0.883***
90 روز 90 Days	کرک سفلا Corck sofla	0.658***	0.879***	0.826***
	مرکز تحقیقات Research Center	0.436**	0.764***	0.761***

*** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱ درصد می‌باشد

*** is significant at 0.1% probability level

نتیجه‌گیری کلی

استفاده از بیوچار، باعث کاهش غلظت کادمیم قابل‌دسترس شد و در این میان اثرات بیوچار کود گاوی بیش‌تر از بیوچار کاه گندم بود. هم‌چنین اثر کاهشی بیوچار بر غلظت کادمیم در خاک با بافت رسی بیش‌تر از خاک با بافت لوم شنی بود. کادمیم باعث کاهش تنفس میکروبی و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی شد و بدین‌ترتیب مقدار فسفر قابل‌دسترس را نیز کاهش داد، با این‌حال، در خاک‌های دارای بیوچار به‌ویژه بیوچار کود گاوی، تأثیر سمیت کادمیم بر فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک کم‌تر بود. هم‌چنین تأثیر بیوچار بر کاهش سمیت کادمیم بر فعالیت میکروبی و آنزیم‌های فسفاتازی در خاک با بافت رسی بیش‌تر از خاک با بافت لوم شنی مشاهده شد. به‌طورکلی نتایج گویای آن است که استفاده از بیوچار در خاک‌های آلوده به کادمیم می‌تواند با کاهش قابلیت دسترسی کادمیم، در جهت بهبود کیفیت زیستی خاک و قابلیت دسترسی فسفر مفید باشد. اما جهت نیل به نتایج کاربردی‌تر، پژوهش‌های تکمیلی بر روی کاربرد بیوچار در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مختلف و مقایسه آن با سایر اصلاح‌کننده‌های آلی پیشنهاد می‌شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان، از دانشگاه بوعلی‌سینای همدان جهت حمایت مالی تشکر می‌نمایند.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این پژوهش مربوط به پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده دوم است که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل‌دسترس می‌باشند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است: نویسنده اول: استاد راهنما، طرح موضوع پژوهش، نظارت و راهنمایی بر روند انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج و نوشتن مقاله، نویسنده دوم، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، انجام پژوهش و جمع‌آوری داده‌ها، انجام محاسبات آماری و تحلیل نتایج، مشارکت در تهیه مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان، اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه بوعلی‌سینای همدان در قالب گرنت دانشجو و استاد راهنما انجام گردیده است.

منابع

1. Halajnia, A., Haghnia, G. H., Fotovat, A., & Khorasani, R. (2009). Phosphorus fractions in calcareous soils amended with P fertilizer and cattle manure. *Geoderma*. 150, 209-213.
2. Nahidan, S., & Ghasmzadeh, M. (2022). Biochemical phosphorus transformations in a calcareous soil as affected by earthworm, cow manure and its biochar additions. *Applied Soil Ecology*. 170, 104310.
3. Jin, Y., Liang, X., He, M., Liu, Y., Tian, G., & Shi, J. (2016). Manure biochar influence upon soil properties, phosphorus distribution and phosphatase activities: a microcosm incubation study. *Chemosphere*. 142, 128-135.
4. Siddiqui, A. R., Nazeer, S., Piracha, M. A., Saleem, M. M., Siddiqi, I., Shahzad, S. M., & Sarwar, G. (2016). The production of biochar and its possible effects on soil properties and phosphate solubilizing bacteria. *Journal of Applied Agriculture Biotechnology*. 1, 27-40.
5. Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management- an introduction. In: Lehmann, J., and Joseph, S. (eds.), Biochar for environmental management: Science and Technology, London, Earth scan. pp. 1-11.
6. Moreno, J. L., Garcia, C., & Hernandez, T. (2003). Toxic effect of cadmium and nickel on soil enzymes and the influence of adding sewage sludge. *European Journal of Soil Science*. 54 (2), 377-386.
7. Megharaj, M., Sethunathan, N., & Naidu, R. (2003). Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review. *Advances in Environmental Research*. 8 (1), 121-135.
8. Liu, P., Chen, S., Cui, Y., & Tan, W. (2021). Insights into the inhibition effects of Cd on soil enzyme activities: From spatial microscale to macroscale. *Journal of Hazardous Materials*. 418, 126274.
9. Yang, X., Liu, J., McGrouther, K., Huang, H., Lu, K., Guo, X., & Wang, H. (2016). Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 23 (2), 974-984.
10. Hayyat, A., Javed, M., Rasheed, I., Ali, S., Shahid, M. J., Rizwan, M., & Ali, Q. (2016). Role of biochar in remediating heavy metals in soil. In: Phytoremediation, Springer, Cham. pp. 421-437.
11. Azadi, N., & Raiesi, F. (2021). Sugarcane bagasse biochar modulates metal and salinity stresses on microbial functions and enzyme activities in saline co-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*. 167, 104043.
12. Hazrati, S., Farahbakhsh, M., Cerdà, A., & Heydarpoor, G. (2021). Functionalization of ultrasound enhanced sewage sludge-derived biochar: Physicochemical improvement and its effects on soil enzyme activities and heavy metals availability. *Chemosphere*. 269, 128767.
13. Nie, C., Yang, X., Niazi, N.K., Xu, X., Wen, Y., Rinklebe, J., & Wang, H. (2018). Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: A field study. *Chemosphere*. 200, 274-282.
14. Jia, W., Wang, B., Wang, C., & Sun, H. (2017). Tourmaline and biochar for the remediation of acid soil polluted with heavy metals. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 5 (3), 2107-2114.
15. Burt, R. (2004). Soil survey laboratory methods manual: Soil survey investigations. Version 4.0. Natural Resources Conservation Service, Nebraska, United States. 700p.

16. Andersen, J. M. (1976). An ignition method for determination of total phosphorus in lake sediments. *Water Research.* 10, 329-331.
17. Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of American Journal*. 42, 421-428.
18. Hossner, L. R. (1996). Dissolution for total elemental analysis. In: Sparks, D.L. (ed.), Methods of soil analysis, ASA and SSSA. Madison, WI. pp. 49-64.
19. 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.
20. Olsen, S. L., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. In: Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. (eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2: SSSA, Madison. pp. 403-427.
21. Alef, K. (1995). Soil respiration. In: Alef, K., and Nannipieri, P. (eds.), Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. London, Harcourt Brace and Company Pub. pp. 214-216.
22. Tabatabai, M. (1994). Soil enzymes. In: R.W. Weaver et al. (eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2: SSSA, Madison, WI. pp. 775-833.
23. Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., & Gomez-Eyles, J. L. (2010). Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental pollution*. 158 (6), 2282-2287.
24. Cao, X., Ma, L., Liang, Y., Gao, B., & Harris, W. (2011). Simultaneous immobilization of lead and atrazine in contaminated soils using dairy-manure biochar. *Environmental Science and Technology.* 45 (1), 4884-4889.
25. Lu, K., Yang, X., Shen, J., Robinson, B., Huang, H., Liu, D., & Wang, H. (2014). Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn to Sedum plumbizincicola. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 191, 124-132.
26. He, L., Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P. C., & Xu, J. (2019). Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. *Environmental Pollution*. 252, 846-855.
27. Liu, H., Zhang, T., Zhu, Q., Huang, D., & Zeng, X. (2022). Effect of humic and calcareous substance amendments on the availability of cadmium in paddy soil and its accumulation in rice. Ecotoxicology and Environmental Safety. 231, 113186.
28. Pan, S. F., Ji, X. H., Xie, Y. H., Liu, S. H., Tian, F. X., & Liu, X. L. (2022). Influence of soil properties on cadmium accumulation in vegetables: thresholds, prediction and pathway models based on big data. *Environmental Pollution*. 304, 119225.
29. Strawn, D. G., Bohn, H. L., & O'Connor, G. A. (2020). Soil chemistry. John Wiley and Sons. 376p.
30. Paz-Ferreiro, J., Fu, S., Méndez, A., & Gascó, G. (2014). Interactive effects of biochar and the earthworm Pontoscolex corethrurus on plant productivity and soil enzyme activities. *Journal of Soils and Sediments.* 14 (3), 483-494.
31. Wan, Y., Devereux, R., George, S. E., Chen, J., Gao, B., Noerpel, M., & Scheckel, K. (2022). Interactive effects of biochar amendment and lead toxicity on soil microbial community. *Journal of Hazardous Materials*. 425, 127921.
32. Nash, J., Miesel, J., Bonito, G., Sakalidis, M., Ren, H., Warnock, D., & Tiemann, L. (2021). Biochar alters soil properties, microbial community diversity, and enzyme activities, while decreasing conifer performance. bioRxiv, 2021-2025.
33. Sardar, K. H. A. N., Qing, C. A. O., Hesham, A. E. L., Yue, X., & He, J. Z. (2007). Soil enzymatic activities and microbial community structure with different application rates of Cd and Pb. *Journal of Environmental Sciences*. 19 (7), 834-840.
34. Aponte, H., Meli, P., Butler, B., Paolini, J., Matus, F., Merino, C., Cornejo, P., & Kuzyakov, Y. (2020). Meta-analysis of

heavy metal effects on soil enzyme activities. Science of the Total Environment. 737, 139744.

35. Hassan, W., Akmal, M., Muhammad, I., Younas, M., Zahaid, K. R., & Ali, F. (2013). Response of soil microbial biomass and enzymes activity to cadmium (Cd) toxicity under different soil textures and incubation times. *Australian Journal of Crop Science*. 7 (5), 674-680.
36. Jing, Y., Zhang, Y., Han, I., Wang, P., Mei, Q., & Huang, Y. (2020). Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil. *Scientific Reports*. 10 (1), 1-12.
37. Burns, R. (1982). Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology. *Soil Biology and Biochemistry*. 14, 423-427.
38. Singh, H., Northup, B. K., Rice, C. W., & Prasad, P. V. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. *Biochar*. 4 (1), 2-17.
39. Wang, D., Li, C., Parikh, S. J., & Scow, K. M. (2019). Impact of biochar on water retention of two agricultural soils-A multi-scale analysis. *Geoderma*. 340, 185-191.
40. Sun, F., & Lu, S. (2014). Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 177 (1), 26-33.
41. Chintala, R., Schumacher, T.E., McDonald, L. M., Clay, D. E., Malo, D. D., Papiernik, S. K., Clay, S. A., & Julson, J. L. (2014). Phosphorus Sorption and Availability from Biochars and Soil/B iochar Mixtures. *CLEAN-Soil, Air, Water*. 42 (5), 626-634.
42. Kizilkaya, R., Bayrakli, F., & Surucu, A. (2007). Relationship between phosphatase activity and phosphorus fractions in agricultural soils. *International Journal of Soil Science.* 2, 107-118.