Effects of modified biochars on some biological and chemical properties of calcareous soil

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received

Received in revised form

Accepted

Published online

Keywords:

Acid modified biochar

Available phosphorus

Metal salt-modified biochars

Microbial activity

Organic matter

ABSTRACT

In calcareous soils of arid and semi-arid regions, low organic matter, high calcium carbonate content, and high pH reduce microbial activity and decrease the availability of nutrients, especially phosphorus, which in turn limits plant growth. This research aimed to investigate the effects of biochar derived from green sugarcane residues and biochars modified with $FeCl_2$, $ZnCl_2$, citric acid, and oxalic acid on some chemical and biological properties of a calcareous soil. The experiment was conducted in a completely randomized design with six treatments, including: 1- Control (C) (without biochar), 2- Unmodified biochar (B), 3- Biochar modified with citric acid (CAB), 4- Biochar modified with oxalic acid (OXB), 5- Biochar modified with $ZnCl_2$ (ZnB), and 6- Biochar modified with $FeCl_2$ (FeB), with three replications. The biochar was prepared at 350°C and, after chemical modification, mixed with 300 grams of soil at a rate of 1%. The samples were maintained at a constant temperature (25±2°C) for three months. At the end of the experiment, some chemical and biological properties of the soil were measured. The results showed that the application of biochars led to a decrease in soil pH (0.03-0.66 units), an increase in electrical conductivity (0.13-0.57 units), cation exchange capacity (17.0-43.9%), total organic carbon (2.21-2.29-fold), available phosphorus concentration (52.1-96.2%), soil microbial respiration (42.9-69.3%), and soil microbial biomass carbon (54.2-93.7%). Among these, the biochar treatment modified with citric acid had the most positive impact on the examined properties. Overall, biochar derived from green sugarcane residues and modified with citric acid could be effective in the soil organic matter, phosphorus availability, and soil biological properties under the studied soil conditions.

Cite this article: (year). Effects of modified biochars on certain biological and chemical properties of calcareous soil. *Journal Title*, DOI: DOI: http//doi.org/00000000000000000000

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI:

بازنشانی نشده

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The limited availability of nutrients, particularly phosphorus, is a significant factor hindering plant growth in calcareous soils. Research indicates that the incorporation of organic amendments can influence phosphorus chemistry in the soil through various mechanisms, thereby enhancing phosphorus availability for plants. Biochar, a carbon-rich solid produced through the pyrolysis of biomass in low-oxygen conditions, has been proposed as a means to improve soil fertility and boost crop yields. The modification of biochar with organic acids can enhance its physical and chemical properties, including specific surface area, pore size, cation exchange capacity, and functional group composition. Additionally, the application of metal salts can further enhance these characteristics. Efficient management of agricultural waste, such as dried leaves and stalks from harvested green sugarcane, is essential. Converting these residues into biochar via pyrolysis presents a viable solution for their management. This research investigated the effect of green sugarcane residue biochars modified with $FeCl_2$, $ZnCl_2$, citric acid, and oxalic acid on improving the chemical and biological properties of soil.

Materials and Methods

Soil samples were collected from the surface layer (0-30 cm) of the Da'abal Khoza'i sugarcane industry. The incubation experiment utilized a completely randomized design with six treatments: 1) control (C) (no biochar), 2) unmodified biochar (B), 3) biochar modified with citric acid (CAB), 4) biochar modified with oxalic acid (OXB), 5) biochar modified with $ZnCl_2$ (ZnB), and 6) biochar modified with $FeCl_2$ (FeB), each replicated three times. The biochar samples were mixed with 300 grams of soil at a concentration of 1% w/w and maintained at a consistent temperature of 25±2 degrees Celsius for three months. Following the incubation period, the soil samples were air-dried, and various chemical and biological characteristics of the soil were assessed.

Results

The analysis of biochar demonstrated a decrease in pH of modified biochars compared to the unmodified ones. Specifically, biochar treated with citric and oxalic acids showed a reduction in pH by 2.78 and 2.26 units, respectively. Modifications using $ZnCl_2$ and $FeCl_2$ resulted in smaller pH decreases of 0.14 and 0.09 units, respectively, compared to the unmodified biochar. The most significant improvement in cation exchange capacity compared to the unmodified biochar was observed in biochar treated with citric acid (96.24 cmol kg^{-1}). Moreover, the phosphorus content in the modified biochars was higher than in the unmodified sample, with citric acid-modified biochar exhibiting the greatest increase, reaching 0.78. After chemical and organic acid treatments, the biochars showed reductions in ash content, carbon percentage, and C/N ratio, while hydrogen, oxygen, and the hydrogen-to-carbon (H/C) and oxygen-to-carbon (O/C) ratios increased. Incubation experiments revealed that biochar application reduced soil pH (by 0.03-0.66 units), enhanced electrical conductivity (by 0.13–0.57 units), increased cation exchange capacity (by 17.0–43.9%), total organic carbon (by 2.21-2.29-fold), raised available phosphorus concentration (by 52.1-96.2%), promoted soil microbial respiration (by 42.9-69.3%), and increased microbial biomass carbon (by 54.2-93.7%).

Conclusion

In summary, biochar produced from green sugarcane residue and modified with citric acid can significantly enhance soil organic matter, nutrient availability, and biological characteristics in calcareous soils of arid and semi-arid regions.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data is available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Research council of Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran for the financial support of this research (grant number: SCU.AS1402.449).

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

تأثیر بیوچارهای اصلاح شده بر برخی ویژگی‌های زیستی و شیمیایی یک خاک آهکی

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت:
تاریخ بازنگری:
تاریخ پذیرش:
تاریخ انتشار:

کلیدواژه‌ها:
بیوچار اصلاح شده با اسید
بیوچار اصلاح شده با نمک فلزات
فسفر قابل دسترس
فعالیت میکروبی
ماده آلی

چکیده

در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک ماده آلی کم، مقدار کربنات کلسیم زیاد و pH قلیایی سبب کاهش فعالیت میکروبی وکاهش فراهمی عناصر غذایی به‌ویژه فسفر و به‌دنبال آن محدودیت در رشد گیاهان می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر بیوچار حاصل از بقایای برداشت سبز نیشکر و بیوچارهای اصلاح شده با $FeCl_2$، $ZnCl_2$، اسید سیتریک و اسید اگزالیک بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و زیستی یک خاک آهکی انجام شد. آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با شش تیمار شامل ۱- شاهد (C) (بدون بیوچار) ۲- بیوچار اصلاح نشده (B) ۳- بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک (CAB)، ۴- بیوچار اصلاح شده با اسید اگزالیک (OXB)، ۵- بیوچار اصلاح شده با $ZnCl_2$ (ZnB) و ۶- بیوچار اصلاح شده با $FeCl_2$ (FeB) در ۳ تکرار اجرا شد. بیوچار در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس تهیه و پس از اصلاح شیمیایی، به‌مقدار یک درصد با ۳۰۰ گرم خاک مخلوط شده و نمونه‌ها به مدت سه ماه در دمای ثابت (۲±۲۵ درجه سلسیوس) نگه‌داری و در پایان آزمایش برخی ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد کاربرد بیوچارها سبب کاهش pH خاک (۰/۶۶-۰/۰۳ واحد)، افزایش پارامترهای هدایت الکتریکی (۰/۵۷-۰/۱۳ واحد)، ظرفیت تبادل کاتیونی (۴۳/۹-۱۷/۰ درصد)، کربن آلی کل (۲/۲۹-۲/۲۱ برابر)، غلظت فسفر قابل دسترس (۹۶/۲-۵۲/۱ درصد)، تنفس میکروبی خاک (۶۹/۳-۴۴/۹ درصد) و کربن زیست‌توده میکروبی خاک (۹۳/۷-۵۴/۲ درصد) شد که در این میان تیمار بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک بیشترین تأثیر معنی‌دار را بر ویژگی‌های بررسی شده داشت. به‌طور کلی بیوچار تهیه شده از بقایای برداشت سبز نیشکر و اصلاح شده با اسید سیتریک می‌تواند ماده آلی خاک، فراهمی عناصر غذایی و ویژگی‌های زیستی خاک در شرایط خاک مورد استفاده، مؤثر باشد.

استناد: *(سال).* تأثیر بیوچارهای اصلاح شده بر برخی ویژگی‌های زیستی و شیمیایی یک خاک آهکی. *عنوان مجله،.*

DOI: http//doi.org/0000000000000000000000

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI:

ویرایشناری نشده

مقدمه

یکی از محدودیت‌های مهم خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک کمبود مواد آلی است. این خاک‌ها عمدتاً آهکی بوده و pH قلیایی و کربنات کلسیم زیادی دارند (Wahba *et al*., 2019; Davey *et al*., 2021). فراهمی کم عناصر غذایی به‌ویژه فسفر یکی از فاکتورهای اصلی محدود کننده رشد گیاه در خاک‌های آهکی است (Saeed *et al*., 2021). در این خاک‌ها بخش زیادی از فسفر کودهای شیمیایی افزوده شده به خاک در سطح کانی‌های رسی و کربنات کلسیم جذب شده و به شکل‌های نامحلول فسفات کلسیم تبدیل می‌شود (Mihoub *et al*., 2022).

کاربرد مواد آلی در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک، یکی از راهکارهای کاهش تثبیت فسفر در خاک و افزایش فراهمی آن برای گیاهان می‌باشد (Du *et al*., 2013). نتایج مطالعات مختلف نشان داده است که افزودن اصلاحگرهای آلی به خاک، می‌تواند از طریق مکانیسم‌های مختلف رفتار فسفر در خاک را تحت تأثیر قرار داده و فراهمی آن را برای گیاهان افزایش دهد (Lemming *et al*., 2019; Bonilla *et al*., 2021). کاربرد اصلاحگرهای آلی در خاک می‌تواند با تحریک فعالیت میکروبی خاک و افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز، که نقش مهمی در تبدیل فسفر آلی به فسفر معدنی دارد، فراهمی فسفر را در خاک افزایش دهد (Chen *et al*., 2019; Safian *et al*., 2020; Mengmeng *et al*., 2020; Nabil *et al*., 2020).

در مطالعات اخیر استفاده از بیوچار به عنوان یک راهکار برای بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش عملکرد گیاهان پیشنهاد شده است (Karimi *et al*., 2020; Frene *et al*., 2021). بیوچار یک ماده جامد غنی از کربن است که طی فرآیند گرماکافت (پیرولیز) زیست‌توده‌های مختلف در شرایط بدون اکسیژن یا با اکسیژن محدود تولید می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند کاربرد بیوچار به‌طور قابل توجهی محتوای عناصر غذایی موجود در خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی و تولید محصول را افزایش می‌دهد (Li *et al*., 2018; Wu *et al*., 2021; Azimzadeh *et al*., 2021). مطالعات نشان داده است که فسفر کل بیوچار به طور قابل توجهی نسبت به زیست‌توده اولیه آن بیش‌تر است (عظیم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸) و فسفر قابل دسترس در بیوچار بخش بزرگی از فسفر کل را تشکیل می‌دهد (Gaskin *et al*., 2008). بسیاری از مطالعات نشان داده است که کاربرد بیوچار می‌تواند فسفر قابل دسترس خاک را به‌صورت مستقیم با تأمین فسفر معدنی خاک بهبود بخشد (Zhang *et al*., 2016; Azimzadeh *et al*., 2021). در عین حال، کاربرد بیوچار می‌تواند به‌طور غیر مستقیم با تأثیر بر pH خاک، فعالیت فسفاتازها و فعالیت‌های میکروبی مرتبط با چرخه فسفر، فراهمی فسفر خاک را تحت تأثیر قرار دهد عوامل مختلفی از جمله دمای گرماکافت، نوع زیست‌توده به‌کار رفته و مقدار کاربرد بیوچار می‌توانند بر فرآیند رهاسازی عناصر غذایی از بیوچار مؤثر باشند (Liu *et al*., 2017; Omara *et al*., 2023). اصلاح بیوچار با اسیدهای آلی یکی از راهکارهای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار و افزایش کارایی آن در بهبود ویژگی‌های ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک به‌ویژه در خاک‌های آهکی دارای محدودیت فراهمی عناصر غذایی شود. اصلاح با اسیدهای آلی موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار مانند سطح ویژه، اندازه منافذ، ظرفیت تبادل کاتیونی و نوع گروه‌های عاملی می‌شود (Nazari *et al*., 2019). بیوچار اصلاح شده با اسید می‌تواند با افزایش فراهمی عناصر غذایی در خاک و بهبود جذب عناصر غذایی منجر به افزایش رشد گیاه شود. اصلاح اسیدی بیوچار با کاهش pH از طریق ایجاد گروهای عاملی اسیدی در سطح بیوچار، می‌تواند انحلال و تحرک ترکیبات قلیایی بیوچار را افزایش دهد (Wang *et al*., 2020). بیوچار اصلاح شده با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی بهبود یافته به عنوان یک اصلاحگر کارآمد برای بهبود کیفیت خاک‌های دارای عناصر غذایی کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از اصلاح اسیدی بیوچار تخلیه منافذ بیوچار و ایجاد سایت‌های اسیدی مانند گروه‌های عاملی فنولیک، لاکتونیک و کربونیلیک می‌باشد (Li *et al*., 2014).

تاکنون در مورد تأثیر بیوچار اصلاح‌شده با اسیدهای آلی بر فسفر قابل دسترس و ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک‌های آهکی اطلاعات محدودی موجود است. بدین منظور Mihoub *et al* (2022) پژوهشی با هدف بررسی تأثیر بیوچار کاه گندم اصلاح شده با اسید سیتریک بر دسترسی گیاه به کود معدنی فسفر در یک خاک آهکی انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد مقدار فسفر قابل دسترس برای گیاه در خاک غنی شده با بیوچار اصلاح شده توسط اسید سیتریک به‌طور قابل توجهی بیشتر بود. نتایج

پژوهش صرخه و همکاران (۱۴۰۳) نشان داد که تأثیر بیوچارهای اصلاح شده با اسید آلی و معدنی در افزایش فراهمی فسفر قابل دسترس خاک به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از بیوچار اصلاح نشده مؤثرند.

استفاده از نمک‌های فلزات نیز از دیگر راهکارهای اصلاح ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار می‌باشند. این روش‌ها کارایی زیاد و هزینه کمی داشته و به‌فراوانی در بیوسفر یافت می‌شوند (Arbelaez *et al.*, 2021; Khajavi-shojaei *et al.*, 2023). به عنوان مثال، اکسیدهای آهن به‌دلیل تمایل شدید به پیوند با فسفات شناخته می‌شوند که این ویژگی آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای اصلاح بیوچار تبدیل می‌کند (Ahmed *et al.*, 2024). حضور آهن جذب فسفات را از طریق مکانیسم‌هایی مانند جذب الکترواستاتیکی و تبادل لیگاندی افزایش می‌دهد. استفاده از بیوچار کاه برنج اصلاح شده با $FeCl_2$ و $FeCl_3$ به‌ترتیب باعث افزایش فسفر قابل دسترس خاک به‌مقدار ۷۸/۶ درصد و ۹۰/۳ درصد در یک خاک شور قلیایی شد (Wu *et al.* 2020). افزایش کربن آلی وکاهش pH خاک با کاربرد بیوچار نی اصلاح شده با $FeCl_2$ و $FeCl_3$ گزارش شده شد (Zhang *et al.*, 2020).

نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که اصلاح خاک با بیوچار موجب بهبود فعالیت میکروبی خاک می‌شود و می‌تواند بر جوامع میکروبی خاک به‌دلیل داشتن ترکیبات آلی سهل‌الوصول و حفظ عناصر غذایی تأثیرگذار باشد. معمولاً بیوچارهای با تخلخل و سطح ویژه زیاد می‌توانند به عنوان زیستگاهی برای میکروارگانیسم‌های خاک باشند. بیوچارها می‌توانند به‌صورت مستقیم یا در اختیار گذاشتن منبع غذایی و غیرمستقیم با ایجاد سطح داخلی زیاد به‌دلیل وجود منافذ در ساختار خود، جمعیت میکروبی را افزایش دهند؛ درنتیجه توانایی جذب مواد آلی افزایش می‌یابد که زیستگاه متنوع‌تری را برای میکروب‌ها فراهم می‌کند (Ghodszad *et al.*, 2021). استفاده از بیوچار در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک که به‌دلیل کمبود رطوبت، مواد آلی و pH زیاد فعالیت زیستی کمی دارند می‌تواند تنوع، جمعیت و فعالیت میکروبی و همچنین فعالیت آنزیمی این خاک‌ها را بهبود بخشد (Zhang *et al.*, 2020). مطالعات نشان داده‌اند در مقایسه با بیوچار اصلاح نشده، استفاده از بیوچار اصلاح شده به طور قابل توجهی حاصلخیزی خاک را افزایش می‌دهد. (Kizito *et al.*, 2019; Ravindiran *et al.*, 2024). کاربرد بیوچار اصلاح شده با اکسید Fe-Zn در یک خاک قلیایی موجب افزایش جمعیت میکروبی و CEC خاک و کاهش pH خاک نسبت به شاهد شده است (Yang *et al.*, 2021).

بقایای برداشت سبز نیشکر (سرنی و برگ‌های خشک) از پسماندهای مهم کشاورزی در استان خوزستان می‌باشد. در برداشت سبز نیشکر به ازای برداشت هر ۱۰۰ تن ساقه نیشکر حدود ۲۰ تا ۲۵ تن بقایا در سطح خاک باقی می‌ماند (Moradi *et al.*, 2019) و سالانه حدود ۱/۲ تا ۱/۵ میلیون تن بقایای نیشکر در استان خوزستان تولید می شود، یکی از راهکارهای مدیریت این بقایا تبدیل آن‌ها به بیوچار طی فرآیند پیرولیز می‌باشد. فرآوری و تبدیل این بقایا به بیوچار علاوه بر اینکه می‌تواند در مدیریت بقایای گیاهی بسیار مؤثر باشد، می‌تواند به‌عنوان یک اصلاح‌گر در راستای بهبود ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گیرد. از این رو این زیست توده جهت تولید بیوچار استفاده شد. با توجه به این‌که تاکنون مطالعات چندانی در زمینه تأثیر بیوچارهای حاصل از بقایای سبز نیشکر اصلاح شده بر فراهمی فسفر در خاک و ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک‌های آهکی با ماده آلی کم انجام نشده است، بنابراین هدف از این پژوهش بررسی استفاده از بیوچارهای تولید شده از بقایای سبز نیشکر اصلاح شده با اسید سیتریک، اسید اگزالیک، $FeCl_2$ و $ZnCl_2$ در بهبود ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک انجام شد.

ویرایش اندازی نشده

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی آن

جهت اجرای این پژوهش ۲۰ نمونه از خاک لایه سطحی (۰ تا۳۰ سانتی‌متری) مزارع کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی با عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۸ دقیقه شمالی وطول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی واقع در ۲۵ کیلومتری جنوب‌غرب شهر اهواز، در استان خوزستان نمونه‌برداری شد و نمونه مرکب تهیه شد. خاک منطقه مورد مطالعه دارای رژیم رطوبتی اریدیک و رژیم حرارتی هایپرترمیک بوده و در رده خاک‌های انتی‌سول است. نمونه خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا–خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده و سپس به دو بخش تقسیم شد که یک بخش آن برای اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی در دمای اتاق خشک گردید و بخش دوم برای اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی در یخچال و در دمای ۴ درجه سلسیوس نگه‌داری شد. pH و هدایت الکتریکی

(EC) در عصاره اشباع خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به‌روش استات سدیم نرمال، کربن آلی به‌روش اکسیداسیون تر، غلظت نیتروژن کل به‌روش کجلدال و فسفر قابل دسترس به‌روش اولسن اندازه‌گیری شد (Carter and Gregorich., 2008). خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم رسی، pH قلیایی، غیر شور، آهکی و دارای ماده آلی پایین است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

ویژگی	EC	pH	CEC	CCE	فسفر قابل دسترس	کربن آلی	بافت خاک
واحد	$dS\ m^{-1}$	-	$cmolc\ kg^{-1}$	%	$mg\ kg^{-1}$	%	-
مقدار	۱/۹۸	۷/۸۹	۹/۱۵	۴۴/۶	۴/۵۳	۰/۴۲	لومی رسی

EC: هدایت الکتریکی؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی؛ CCE: کربنات کلسیم معادل

تهیه بیوچار و بیوچارهای اصلاح شده با اسیدهای آلی و نمک‌های فلزات

در این پژوهش برای تهیه بیوچار از زیست‌توده بقایای سبز نیشکر از محل کشت و صنعت دعبل خزاعی برداشت و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شد (Singh *et al*., 2017). بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین (Karimi *et al*., 2020; Khajavi-Shojaei *et al*., 2020) و با در نظر گرفتن اهداف پژوهش حاضر و ویژگی‌های خاک مورد مطالعه، بیوچار در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس تهیه شد. بیوچار در کوره الکتریکی در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس با نرخ افزایش ۵ درجه سلسیوس در دقیقه به‌مدت ۳ ساعت در شرایط حداقل اکسیژن تهیه شد (Arbelaez *et al*., 2021). برای اصلاح بیوچار با اسیدهای آلی، با در نظر گرفتن با در نظر گرفتن اینکه اصلاح اسیدی سبب تخریب ساختار بیوچار نشود، از غلظت ۰/۰۱ مولار آن‌ها استفاده شد (Regmi *et al*., 2012). بدین ترتیب که مقدار ۲ گرم از بیوچار تهیه شده به‌ترتیب با ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول اسید سیتریک و اسید اگزالیک (0.01 M, pH = 2.74) به‌مدت ۲ ساعت در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) مخلوط شد (Regmi *et al*., 2012). برای اصلاح بیوچار با $FeCl_2$ و $ZnCl_2$، مقدار ۲۰ گرم از زیست‌توده‌های خشک شده در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به‌ترتیب با ۱۰۰ میلی لیتر محلول $ZnCl_2$ (۲۰ گرم در لیتر) و $FeCl_2$ (۲۰ گرم در لیتر) به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق آغشته شد. پس از صاف کردن، زیست‌توده‌ها به‌مدت ۱۲ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شدند (Liu *et al*., 2021).

اندازه‌گیری ویژگی‌های بیوچار و بیوچارهای اصلاح شده

ویژگی‌های بیوچارها و بیوچارهای اصلاح شده شامل عملکرد، خاکستر، pH، EC، CEC و آنالیز عنصری (کربن، هیدروژن و نیتروژن) کل اندازه‌گیری شد (Singh *et al*., 2017). غلظت فسفر قابل قابل دسترس بیوچارها به‌روش استخراج با اسید فرمیک ۲ درصد اندازه‌گیری شد (Singh *et al*., 2017). ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به‌روش اصلاح شده جانشینی با استات آمونیوم اندازه‌گیری شد (Domingues *et al*., 2017).

آزمایش انکوباسیون

آزمایش انکوباسیون در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با شش تیمار شامل تیمارهای ۱- شاهد (C) (بدون بیوچار) ۲- بیوچار اصلاح نشده (B) ۳- بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک (CAB)، ۴- بیوچار اصلاح شده با اسید اگزالیک (OXB)، ۵- بیوچار اصلاح شده با $ZnCl_2$ (ZnB) و ۶- بیوچار اصلاح شده با $FeCl_2$ (FeB) و در سه تکرار انجام شد. نمونه‌های بیوچارهای تهیه شده به‌طور یکنواخت و در سطح ۱ درصد وزنی (w/w)، با ۳۰۰ گرم خاک با ویژگی‌های ذکر شده در جدول ۱، مخلوط و به‌مدت ۳ ماه در دمای ثابت (۲±۲۵ درجه سلسیوس) نگه‌داری شدند. در طول دوره انکوباسیون رطوبت نمونه‌ها به‌روش وزنی کنترل شده و مقدار آب تبخیر شده از طریق افزودن آب دیونیزه جبران شد، تا رطوبت نمونه‌ها ثابت باقی بماند. پس از پایان آزمایش نمونه‌های خاک هوا خشک شده و برخی از ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک شامل pH و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به‌روش استات سدیم نرمال، کربن آلی به‌روش اکسیداسیون تر، غلظت نیتروژن کل به‌روش کجلدال (Carter and Gregorich, 2008) و فسفر قابل دسترس به‌روش اولسن (Olsen *et al*., 1954)، تنفس میکروبی خاک با روش گردآوری

ویرایشی نشده

CO_2 آزاد شده در هیدروکسید سدیم و تیتراسیون مقدار باقی‌مانده آن با اسیدکلریدریک (Anderson., 1982) و کربن زیست‌توده میکروبی خاک به‌روش تدخین (گازدهی) با کلروفرم و استخراج با محلول سولفات پتاسیم (Jenkinson and ladd., 1981) اندازه-گیری شد.

تحلیل آماری داده‌ها

تحلیل آماری داده‌های این پژوهش با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نمودارها در محیط نرم‌افزار Excel 2013 رسم شدند. میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ($P\leq ۰/۰۵$) ندارند.

نتایج و بحث

ویژگی‌های بیوچار

نتایج نشان‌دهنده کاهش pH بیوچارهای اصلاح شده نسبت به بیوچار اصلاح نشده بود. به‌طوری‌که pH بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک و اسید اگزالیک به‌ترتیب ۲/۷۸ و ۲/۲۶ واحد و بیوچارهای اصلاح شده با $ZnCl_2$ و $FeCl_2$ ۰/۱۴ و ۰/۰۹ واحد نسبت به بیوچار اصلاح نشده کاهش داشتندکه می‌تواند به دلیل کاهش درصد خاکستر در این بیوچارها باشد (Azimzadeh *et al.*, 2020). تحقیقات انجام شده توسط Song and Co (2012) نشان داد میان درصد خاکستر و pH بیوچار یک همبستگی قوی وجود دارد، بطوریکه بیوچارهای با خاکستر زیاد دارای pH بیشتری بودند. پس از اصلاح شیمیایی، هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی نسبت به بیوچار اصلاح نشده افزایش یافت. بیشترین هدایت الکتریکی مربوط به بیوچار اصلاح شده با اسید اگزالیک بود که نسبت به بیوچار اصلاح نشده افزایش داشت. بیشترین افزایش در ظرفیت تبادل کاتیونی نسبت به بیوچار اصلاح نشده نیز مربوط به بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک ($۹۶/۲۴ \ cmol\ kg^{-1}$) بود (جدول ۲).

جدول ۲- برخی ویژگی‌های بیوچارهای مورد مطالعه در این پژوهش

ویژگی	واحد	BC	CAB	OXB	FeB	ZnB
عملکرد	٪	۴۵/۶۲	–	–	–	–
خاکستر	٪	۴۲/۲۸	۲۵/۱۶	۲۷/۵۹	۲۸/۹۵	۳۱/۳۲
EC	$dS\ m^{-1}$	۴/۱۲	۶/۹۰	۷/۲۰	۵/۷۰	۵/۴۷
pH	-	۷/۹۵	۵/۱۷	۵/۶۹	۷/۸۶	۷/۸۱
CEC	$cmol\ kg^{-1}$	۱۹/۸۱	۹۶/۲۴	۸۹/۴۴	۷۳/۳۸	۸۱/۱۲
فسفر	$g\ kg^{-1}$	۰/۳۲	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۶۲	۰/۶۵
C	٪	۴۶/۱۶	۴۰/۶۹	۳۹/۴۵	۴۱/۳۴	۳۹/۲۹
H	٪	۱/۰۷	۳/۱۳	۲/۸۵	۳/۱۷	۲/۹۷
N	٪	۲/۱۳	۳/۹۷	۳/۷۶	۳/۷۴	۳/۵۲
O	٪	۸/۳۶	۲۷/۰۵	۲۶/۳۵	۲۲/۸۰	۲۲/۹۰
C/N	-	۲۵/۲۸	۱۱/۹۶	۱۲/۲۴	۱۲/۹۰	۱۳/۰۲
O/C	–	۰/۱۶	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۴۸	۰/۵۱
H/C	–	۰/۲۸	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۹۲	۰/۹۱

BC : بیوچار، CAB: بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک، OXB: بیوچار اصلاح شده با اسید اگزالیک، ZnB: بیوچار اصلاح شده با $ZnCl_2$ و FeB: بیوچار اصلاح شده با $FeCl_2$

افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در اثر اصلاح بیوچار با نمک فلزات می‌تواند به دلیل افزایش گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن از جمله گروه‌های فنول، کربوکسیل و هیدروکسیل باشد (خواجوی شجاعی و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج بسیاری از پژوهش‌ها نیز نشان می‌دهد با اصلاح بیوچار، مقدار کربن کاهش و اکسیژن افزایش می‌یابد که به دنبال آن گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار موجود در سطح

ویرایش نشده

نیز بیشتر می‌شود (خواجوی شجاعی و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج آنالیز بیوچارها نشان داد، مقدار فسفر در بیوچارهای اصلاح شده نسبت به بیوچار اصلاح نشده افزایش داشت که بیش‌ترین مقدار مربوط به بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک بود. پس از اصلاح شیمیایی و اصلاح با سیدهای آلی محتوای خاکستر، درصد کربن و نسبت C/N بیوچارها کاهش یافت در حالی‌که هیدروژن، اکسیژن، نسبت هیدروژن به کربن (H/C) و اکسیژن به کربن (O/C) آن‌ها افزایش یافت (جدول ۲). کاهش درصد کربن می‌تواند به‌دلیل تغییر ساختار شیمیایی و سطحی بیوچار و اضافه شدن سایر یون‌ها به ساختار آن در اثر اصلاح شیمیایی باشد (Khajavi-Shojaei *et al.*, 2020). همچنین نتایج مطالعات نشان داده اصلاح بیوچار با اسید می‌تواند باعث تجزیه مواد لیگنوسلولزی، آلیفاتیک و آروماتیک آن‌ها شود. بنابراین، با تجزیه این مواد، بخش باقی‌مانده کربن پایدار در ساختار بیوچارهای اصلاح شده با اسید نسبت به بیوچار اولیه کاهش می‌یابد (خواجوی شجاعی و همکاران، ۱۴۰۰). افزایش نسبت هیدروژن به کربن (H/C) و اکسیژن به کربن (O/C) بیوچارهای اصلاح شده، نشان دهنده حذف ترکیبات آلیفاتیک و کاهش درصد آروماتیک بودن کربن آن‌ها و بیش‌تر بودن قطبیت و بار منفی آن‌ها می‌باشد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۸).

تأثیر بیوچار و بیوچارهای اصلاح شده بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر تیمارها بر تمامی ویژگی‌های بررسی شده شامل pH، هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، فسفر قابل دسترس ویژگی‌های زیستی خاک معنی‌دار بود (جدول ۲).

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		pH	هدایت الکتریکی (EC)	ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC)	کربن آلی خاک (OC)	فسفر قابل دسترس خاک	تنفس میکروبی خاک	کربن زیست‌توده میکروبی خاک (MBC)
تیمار	۵	۰/۲۷**	۰/۱۲۶***	۷/۶۸**	۰/۰۱**	۲/۶۳***	۱۹۷۰/۵***	۸۸۹۵/۹***
خطا	۱۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۱/۲۸	۰/۰۰۲	۰/۰۳۱	۱۹/۴	۲۵۱/۰
ضریب تغییرات (٪)		۰/۵۲	۲/۳۹	۹/۱۲	۸/۴۳	۲/۴	۲/۹۲	۶/۰۹

** و *** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۰/۱ درصد

تأثیر بیوچارها بر pH و EC خاک

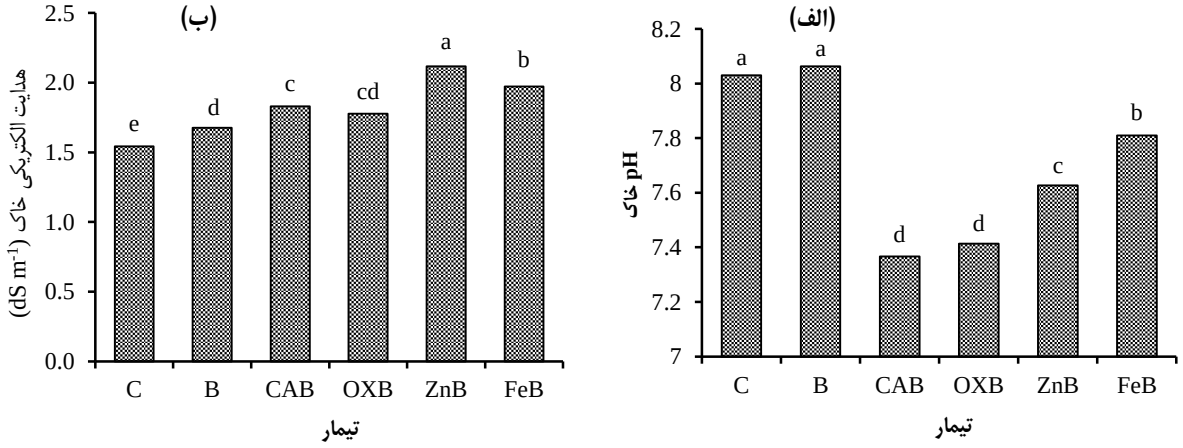
مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد افزودن تمامی بیوچارهای اصلاح شده موجب کاهش معنی‌دار pH خاک در سطح احتمال ۵ درصد نسبت به شاهد شد (شکل ۱). بیشترین کاهش pH خاک به‌ترتیب مربوط به تیمارهای بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک و اسید اگزالیک بود که به‌ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۶۲ واحدی نسبت به شاهد و ۰/۷۰ و ۰/۶۵ واحد نسبت به بیوچار اصلاح نشده کاهش داشتند که این دو تیمار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (شکل ۱). بیوچارهای اصلاح شده با فلزات (FeB و ZnB) نیز باعث کاهش جزئی pH شده‌اند، اما این کاهش به اندازه کاهش ایجاد شده توسط بیوچارهای اصلاح شده با اسیدها نبوده است. کمترین کاهش pH در بیوچارهای اصلاح شده مربوط به تیمار بیوچار اصلاح شده با $FeCl_2$ بود که pH آن ۰/۲۲ واحد نسبت به شاهد و ۰/۲۵ واحد نسبت به بیوچار اصلاح نشده کاهش داشت. کاهش pH خاک ممکن است به دلیل اکسیداسیون شیمیایی و تجزیه میکروبی بیوچار در خاک و تولید ترکیبات اسیدی باشد (Alotaibi and Schoenau; 2019).

در مطالعه حاضر کاهش pH خاک در اثر استفاده از بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک و اسید اگزالیک می‌تواند به‌دلیل قدرت اسیدی اسیدهای آلی با وزن مولکولی پایین باشد که منجر به اسیدی شدن محیط ریزوسفر می‌شوند (Mihoub *et al.*, 2022). در پژوهشی که توسط Mihoub *et al.* (2022) انجام شد نتایج نشان داد کاربرد ۴ و ۸ درصد (وزنی/ وزنی) بیوچار کاه برنج اصلاح شده با سیتریک اسید pH خاک را از ۸/۰۳ در شاهد به‌ترتیب به ۷/۷۴ و ۷/۶۳ تغییر داد. همچنین در پژوهشی Alotaibi and Schoenau (2019) نشان دادند بیوچار کاه گندم تهیه شده در دمای ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس با انحلال کربنات‌ها و محدود شدن هیدرولیز آن‌ها موجب کاهش pH خاک شد (Karimi *et al.*, 2019a). کاهش pH خاک به‌ترتیب به‌مقدار ۰/۱۷ و ۰/۱۳ واحد

در اثر استفاده از بیوچار شاخه‌های درخت چنار (*Platanus orientalis*) اصلاح شده با $FeCl_3$ گزارش شده است (Wen *et al.*, 2021). دلیل کاهش pH خاک می‌تواند مقادیر زیاد H^+ آزاد شده در طول هیدرولیز Fe در بیوچار اصلاح شده باشد.

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد افزودن تمامی بیوچارهای اصلاح شده موجب افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی خاک نسبت به شاهد شد (شکل ۱). به طور کلی، اعمال تمام انواع بیوچارها منجر به افزایش هدایت الکتریکی خاک شده است. این افزایش احتمالاً به دلیل آزاد شدن یون‌های معدنی از بیوچار و افزایش غلظت یون‌های محلول در خاک است. همچنین بیوچارهای اصلاح شده با اسیدهای آلی و فلزات هر دو باعث افزایش هدایت الکتریکی شده‌اند، اما مقدار افزایش در آن‌ها متفاوت بوده است. این تفاوت ممکن است به دلیل نوع و مقدار یون‌های آزاد شده از هر نوع بیوچار باشد.

بیشترین افزایش EC نسبت به نمونه شاهد مربوط به تیمار بیوچار اصلاح شده با $ZnCl_2$ بود که ۰/۵۷ واحد نسبت به شاهد افزایش داشت. کمترین افزایشEC نسبت به نمونه شاهد به‌ترتیب در نمونه مربوط به بیوچار بدون اصلاح و بیوچار اصلاح شده با اسید اگزالیک بود که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشتند (شکل ۱). افزایش هدایت الکتریکی خاک می‌تواند مربوط به نمک‌های محلول بیوچار باشد که در نتیجه یونیزه شدن عناصر غذایی در زمان پیرولیز آزاد می‌شوند (Chandra and Bhattacharya., 2019; Mihoub *et al.*, 2022) که با نتایج Mihoub *et al* (2022) مطابقت داشت. آن‌ها گزارش کردند کاربرد بیوچار کاه گندم اصلاح شده با اسید سیتریک در سطح ۴ درصد و ۸ درصد به‌ترتیب سبب افزایش هدایت الکتریکی خاک از ۵/۵ دسی‌زیمنس در تیمار شاهد به ۷/۲ و ۹/۵۵ دسی‌زیمنس بر متر شد. همچنین افزایش هدایت الکتریکی محلول خاک در حضور بیوچار به رهاسازی آنیون‌ها و کاتیون‌ها به محلول خاک بر اثر فرآیندهای حل شدن و معدنی شدن بیوچار مربوط است. بیوچار ممکن است با تشدید فعالیت میکروبی باعث افزایش رهاسازی یون‌ها به محلول خاک و افزایش هدایت الکتریکی محلول خاک شود. بیوچار همچنین به‌عنوان یک ماده آلی قابلیت جذب و تبادل عناصر را داشته که می‌تواند با این روش بر غلظت یون‌های محلول خاک مؤثر باشد (Azimzadeh *et al.*, 2020).



شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر انواع بیوچار بر pH خاک (الف) و هدایت الکتریکی خاک (ب).

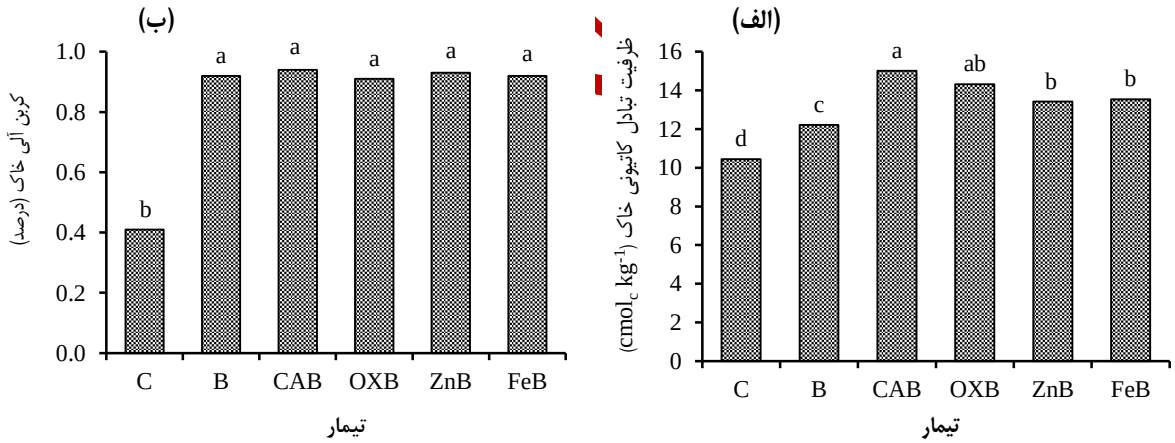
C : بدون کاربرد بیوچار(شاهد)، B : بیوچار، CAB: بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک، OXB: بیوچار اصلاح شده با اسید اگزالیک، ZnB: بیوچار اصلاح شده با $ZnCl_2$ و FeB: بیوچار اصلاح شده با $FeCl_2$

تأثیر بیوچارها بر ظرفیت تبادل کاتیونی و کربن آلی خاک

نتایج نشان داد کاربرد همه بیوچارها سبب افزایش معنی‌دار ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک در مقایسه با تیمار شاهد گردید (شکل ۲). اگرچه همه تیمارها باعث افزایش CEC شده‌اند، اما مقدار افزایش در آن‌ها متفاوت است. به نظر می‌رسد بیوچارهای اصلاح شده با اسیدهای آلی (CAB و OXB) بیشترین تأثیر را در افزایش CEC داشته‌اند. این به‌دلیل افزایش گروه‌های عاملی اسیدی در سطح بیوچار پس از اصلاح با اسیدها است که باعث افزایش توانایی بیوچار در جذب کاتیون‌ها می‌شود. همچنین مقدار CEC در تیمار بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک افزایش معنی‌داری (۲۲/۹ درصد) در مقایسه با تیمار بیوچار اصلاح نشده داشت. CEC یکی از

ویژگی‌های مهم در ارتباط با حاصلخیزی خاک محسوب می‌شود. حضور بیوچار مستقیماً سبب افزایش CEC خاک می‌شود (Singh *et al.*, 2023). بیوچار معمولاً بسته به نوع زیست‌توده اولیه و شرایط فرآیند گرماکافت می‌تواند دارای تخلخل، سطح ویژه و گروه‌های عاملی سطحی زیادی باشد(Ali *et al.*, 2017) . از عوامل مؤثر در افزایش CEC در خاک‌های اصلاح شده با بیوچار می‌توان به اکسیداسیون کربن آروماتیک و تشکیل گروه‌های کربوکسیل در بیوچار، افزایش بارهای منفی سطحی گروه‌های عاملی بیوچار، و همچنین افزایش سطح ویژه بیوچار اشاره کرد (Singh *et al.*, 2023; Omara *et al.*, 2023). به‌طور مشابه کاربرد بیوچار تهیه شده از کاج ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را ۱۰/۳ درصد افزایش داد (Omara *et al.*, 2023). همچنین Singh *et al.* (2023) گزارش کردند افزایش در CEC خاک به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر مقدار کاربرد بیوچار در خاک می‌باشد.

در پژوهش حاضر مقدار کربن آلی خاک در تمامی تیمارهای بیوچار نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۲). نتایج نشان داد تفاوت معنی‌داری میان تیمارهای مختلف بیوچار مشاهده نشد. تأثیر بیش‌تر بیوچارها در افزایش کربن آلی خاک را می‌توان به محتوای کربن آلی بیش‌تر در بیوچار و بیوچارهای اصلاح‌شده (جدول ۲) نسبت داد (کریمی و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین، نتایج بررسی مکانیسم‌هایی که بیوچار سبب کاهش تجزیه و تخریب کربن آلی خاک و درنتیجه منجر به افزایش آن می‌شود، نشان می‌دهد مواد آلی خاک می‌توانند توسط سطوح متخلخل و گسترده بیوچار جذب و از تجزیه و تخریب توسط اکسیدکننده‌های غیر زیستی و آنزیم‌های تولید شده توسط میکروب‌ها محافظت شوند و درنتیجه کربن آلی خاک افزایش یابد (Zimmerman *et al.*, 2011). افزایش کربن آلی کل خاک در خاک‌های آهکی با ماده آلی کم، در اثر کاربرد بیوچارهای مختلف به خاک، توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است (Karimi *et al.*, 2019; Moradi and Karimi, 2021).



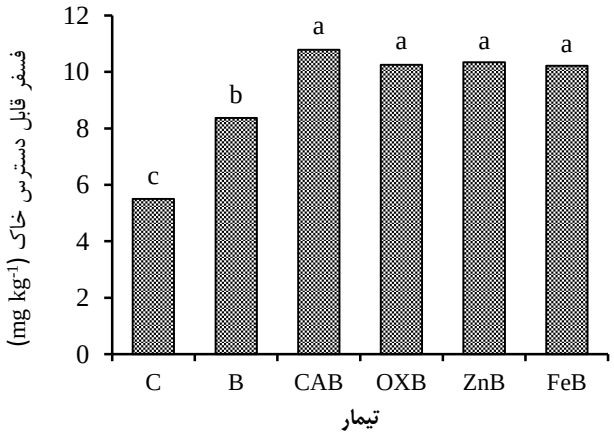
شکل ۲– مقایسه میانگین تأثیر انواع بیوچار بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (الف) و کربن آلی خاک (ب).

C : بدون کاربرد بیوچار(شاهد)، B : بیوچار، CAB: بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک، OXB: بیوچار اصلاح شده با اسید اگزالیک، ZnB: بیوچار اصلاح شده با $ZnCl_2$ و FeB: بیوچار اصلاح شده با $FeCl_2$

نتایج این پژوهش نشان داد با این‌که تفاوت معنی‌داری در مقدار کربن آلی خاک در تیمارهای مختلف بیوچار مشاهده نشد (شکل ۲) و کربن آلی بیوچارهای اصلاح شده مقداری جزئی کم‌تر از بیوچارهای اولیه آن‌ها بود (جدول ۲)؛ اما کربن آلی خاک در تیمارهای بیوچارهای اصلاح شده بیش‌تر از بیوچار اصلاح نشده بود که از نظر آماری با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند. این نتایج می‌تواند به‌دلیل پایداری زیاد کربن آلی بیوچار اولیه و همچنین نسبت کم H/C و O/C در بیوچار اصلاح نشده نسبت به بیوچاهای اصلاح شده باشد که نشان می‌دهد اصلاح شدن بیوچارها سبب افزایش فراهمی کربن آن‌ها شده است و بیوچارهای اصلاح شده می‌توانند اثر مثبت بیش‌تری بر کربن آلی خاک داشته باشند (Karimi *et al.*, 2020). نتایج مطالعه Ahmed *et al.* (2021) نشان داد استفاده از بیوچار اصلاح نشده و بیوچار اصلاح شده با اسید باعث افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک شد. Pan *et al* (2021) گزارش کردند کاربرد بیوچار اصلاح شده با آهن باعث افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک می‌شود. Zhang *et al.* (2020) نیزگزارش کردند کاربرد بیوچار اصلاح شده با اکسید آهن (Fe_3O_4) محتوای کربن آلی خاک را افزایش می‌دهد.

تأثیر بیوچارها بر فسفر قابل دسترس خاک

نتایج این تحقیق نشان داد فسفر قابل دسترس خاک تحت تأثیر تیمارهای بیوچار قرار گرفت و همه تیمارها نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد داشت (شکل ۳). این افزایش نشان می‌دهد که بیوچارها توانایی خاک در تأمین فسفر مورد نیاز گیاهان را افزایش داده‌اند که ممکن است به‌دلیل افزایش سطح ویژه بیوچار و توانایی آن در جذب و نگهداری فسفر باشد. بیشترین افزایش فسفر قابل دسترس خاک به‌ترتیب مربوط به تیمار بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک بود و تفاوت معنی‌داری میان تیمارهای بیوچارهای اصلاح شده مشاهده نشد. در این پژوهش اسید اگزالیک و اسید سیتریک استفاده شده به عنوان اصلاح کننده موجب تولید بیوچار با pH پایین‌تر شد که به‌دنبال آن غلظت فسفر قابل دسترس خاک افزایش یافت. افزایش فسفر قابل دسترس خاک ممکن است به دلیل تأثیر اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم در آزادسازی فسفر از بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک و اگزالیک در خاک باشد، چرا که ترکیبات آلی یون H^+ را آزاد کرده و موجب تبدیل فسفر نامحلول به فرم محلول می‌گردند (Mihoub *et al*., 2022). استفاده از بیوچار اصلاح شده با $FeCl_2$ و $ZnCl_2$ نیز باعث افزایش فسفر قابل دسترس خاک شد. اصلاح شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی (مانند سطح ویژه و ساختار منافذ) و ویژگی‌های شیمیایی (گروه‌های عاملی اصلی) بیوچار را بهبود می‌بخشد (Wang *et al*., 2020). همچنین تحقیقات قبلی نشان داده‌است که استفاده از بیوچار می‌تواند موجب افزایش عناصر غذایی گیاه در خاک شود (Karimi *et al*., 2020). استفاده از بیوچار می‌تواند با آزادسازی مستقیم فسفر و همچنین تأثیر بر ویژگی‌های شیمیایی خاک مانند pH، سبب افزایش فراهمی عناصر غذایی از جمله فسفر در خاک شود (Karimi *et al*., 2020). این نتایج با تحقیقات انجام شده توسط Mihoub *et al*. (2022) مطابقت دارد. آن‌ها گزارش کردند کاربرد بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک به خاک به مقدار ۴ درصد و ۸ درصد (وزنی/وزنی) فسفر قابل دسترس خاک را به‌ترتیب ۶۲ درصد و ۷۱/۵ درصد در یک خاک آهکی افزایش می‌دهد. Purnawan *et al* (2021) نیز افزایش فسفر قابل دسترس خاک به بیش از ۲۰۰ درصد در اثر استفاده بیوچار پوسته نارگیل اصلاح شده با $ZnCl_2$ با غلظت ۲/۵ مولار را گزارش کردند. همچنین Wu *et al* (2020) گزارش کردند استفاده از بیوچار کاه ذرت اصلاح شده با آهن موجب افزایش فسفر قابل دسترس، فسفر کل و فسفر قابل استخراج از خاک می‌شود. نتایج آن‌ها نشان داد اصلاح شیمیایی بیوچار با آهن ($FeCl_2$) به عنوان یک جاذب بر پایه کربن برای کاهش تثبیت فسفر در خاک می باشد. Gupta *et al*. (2024) نیز گزارش کردند استفاده از بیوچار کاه برنج و چوب آکاسیا به‌ترتیب فسفر قابل دسترس خاک را ۶۰ روز پس از انکوباسیون در یک خاک لوم رسی به‌ترتیب ۶۸/۵ و ۶۳/۵ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند که دلیل آن را پتانسیل بیشتر بیوچار در رهاسازی فسفر در خاک عنوان کردند.

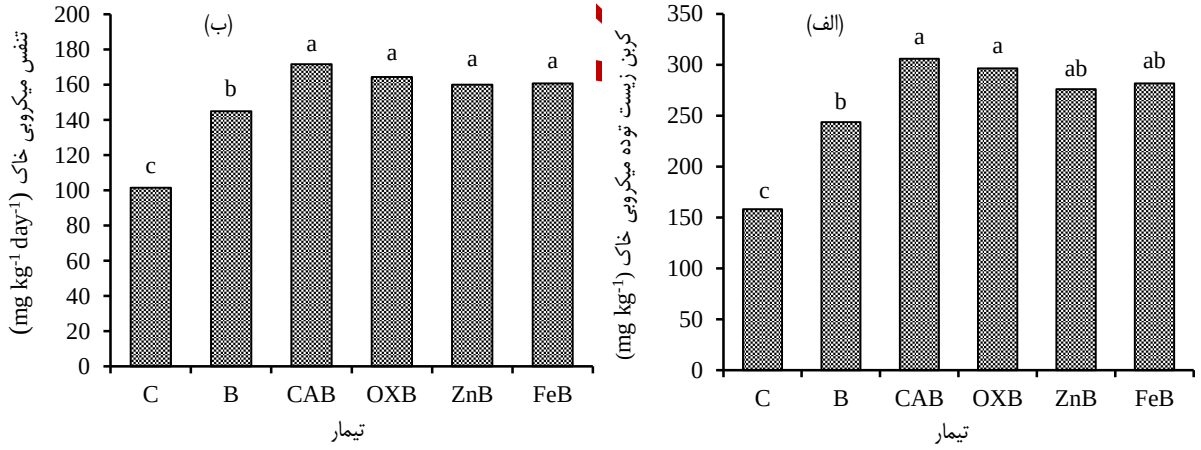


شکل ۳– مقایسه میانگین تأثیر انواع بیوچار بر فسفر قابل دسترس خاک

C : بدون کاربرد بیوچار (شاهد)، B : بیوچار، CAB: بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک، OXB: بیوچار اصلاح شده با اسید اگزالیک، ZnB: بیوچار اصلاح شده با $ZnCl_2$ و FeB: بیوچار اصلاح شده با $FeCl_2$ هستند.

تأثیر بیوچار بر ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از بیوچارهای اصلاح شده در تمامی تیمارها باعث افزایش معنی‌دار کربن زیست توده میکروبی و تنفس میکروبی خاک نسبت به شاهد شد (شکل ۴). بیشترین افزایش در کربن زیست توده میکروبی ۹۳/۷۰ درصد و همچنین بیشترین افزایش تنفس میکروبی ۶۹/۳۰ درصد نسبت به شاهد، مربوط به تیمار بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک بود. کربن زیست‌توده میکروبی در تمامی تیمارهای کاربرد بیوچار (اصلاح شده و اصلاح نشده) افزایش یافت که این نتیجه می‌تواند به‌دلیل افزایش کربن آلی خاک (شکل ۲) و افزایش عناصر غذایی قابل دسترس برای ریزجانداران خاک، در اثر کاربرد بیوچارها باشد. همچنین افزایش کربن زیست‌توده میکروبی خاک در اثر کاربرد بیوچار می‌تواند به این دلیل باشد که بیوچار با داشتن ساختار متخلخل و سطح ویژه زیاد می‌تواند میکروزیستگاه مناسبی برای ریزجانداران خاک فراهم کند (Frene *et al*., 2021). کم‌تر بودن کربن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های تیمار شده با بیوچار اصلاح نشده، در مقایسه با خاک‌های تیمار شده با بیوچارهای اصلاح شده می‌تواند به‌دلیل کم‌تر بودن نسبت‌های مولی O/C و H/C آن‌ها باشد (جدول ۲)، چرا که مقادیر کم‌تر نسبت‌های مولی O/C و H/C بیوچار نشان‌دهنده بیش‌تر بودن ساختار آروماتیک آن و پایداری بیش‌تر کربن آن در مقابل تجزیه میکروبی می‌باشد (Karimi *et al*., 2019b; Khajavi-Shojaei *et al*., 2020). علاوه بر این، احتمالاً تأثیر بیش‌تر بیوچارهای اصلاح شده بر تغییرات pH و حلالیت عناصر غذایی در خاک سبب افزایش اثر مثبت آن‌ها بر کربن زیست‌توده میکروبی خاک شده است. به‌طور مشابه با این پژوهش Shokuhifar *et al*. (2021) افزایش کربن زیست‌توده میکروبی را در اثر استفاده از بیوچار کاه گندم ۸۸۵/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در مقایسه با شاهد ۳۲۱/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش داده اند.



شکل ۴– مقایسه میانگین تأثیر انواع بیوچار بر کربن زیست‌توده میکروبی خاک (الف) و تنفس میکروبی خاک (ب).

C : بدون کاربرد بیوچار(شاهد)، B : بیوچار، CAB: بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک، OXB: بیوچار اصلاح شده با اسید اگزالیک، ZnB: بیوچار اصلاح شده با $ZnCl_2$ و FeB: بیوچار اصلاح شده با $FeCl_2$ هستند.

افزایش تنفس میکروبی خاک در اثر کاربرد بیوچار می‌تواند به‌دلیل مواد فرار و ترکیبات جذب سطحی شده بر روی سطح بیوچار باشد، به‌دلیل این‌که این ترکیبات می‌توانند به‌عنوان سوبسترای قابل دسترس برای ریزجانداران خاک عمل نموده و سبب افزایش رشد و فعالیت میکروبی در خاک‌های تیمار شده با بیوچار شوند (Rutigliano *et al*., 2014; Karimi *et al*., 2020). بیوچار به عنوان منبع کربن می‌تواند فعالیت‌های میکروبی خاک را تحریک کند و بر تنفس خاک (افزایش تولید CO_2) و همچنین تجزیه زیستی ترکیبات آلی خاک تأثیر گذارد (Shokuhifar *et al*., 2021). بیوچار از کربن پایدار و کربن به راحتی قابل تجزیه تشکیل شده است. بخش قابل تجزیه بیوچار در خاک حل شده و منجر به افزایش زیست‌توده خاک، فعالیت میکروارگانیسم‌ها و فعالیت آنزیم‌های خاک می‌شود (Ravindiran *et al*., 2024). به دلیل منافذ و سطح ویژه زیاد و توانایی بیوچار در جذب مواد آلی محلول و عناصر معدنی، بیوچار می‌تواند یک زیستگاه مناسب برای میکروارگانیسم‌های خاک ایجاد کند (Thies *et al*., 2019; Singh *et al*., 2023). نتایج

بررسی‌های مختلف نیز نشان می‌دهد فعالیت ریزجانداران هوازی خاک که فعالیت آن‌ها نیازمند کربن آلی، رطوبت و تهویه مناسب در خاک است، در خاک‌های تیمار شده با بیوچار افزایش یافته است، که دلیل آن نقش بیوچار در افزایش کربن آلی خاک و بهبود نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک می‌باشد (Zimmerman *et al*., 2011). همچنین بیوچار اصلاح شده می‌تواند به طور موثری pH، EC، ماده آلی، نسبت C/N، منافذ و دانه بندی خاک را بهبود بخشد که در نتیجه میکروزیستگاه مناسبی برای جمعیت میکروبی خاک ایجاد می‌کند (Hafeez *et al*., 2022).

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که کاربرد بیوچارهای اصلاح‌شده با اسیدهای آلی و نمک‌های فلزات می‌تواند تأثیرات مثبتی بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک مورد مطالعه داشته باشد. نتایج نشان داد که استفاده از بیوچارهای اصلاح‌شده موجب کاهش pH خاک، افزایش هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی، و بهبود فراهمی فسفر قابل دسترس در خاک شد. بیوچارهای اصلاح‌شده با اسید سیتریک و اسید اگزالیک بیشترین تأثیر را در کاهش pH و افزایش فسفر قابل دسترس داشتند. همچنین، تیمارهای بیوچار اصلاح‌شده موجب افزایش قابل توجه کربن زیست‌توده میکروبی و تنفس میکروبی خاک شدند که نشان‌دهنده بهبود فعالیت زیستی خاک است. به‌طور کلی، این تحقیق نشان داد که بیوچار، به‌ویژه بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک، می‌تواند به‌عنوان یک اصلاحگر مؤثر در افزایش فراهمی فسفر و بهبود ویژگی‌های زیستی خاک‌های آهکی با مواد آلی کم مورد توجه قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی اثرات بلندمدت بیوچارهای اصلاح شده بر ویژگی‌های خاک و عملکرد گیاهان در شرایط مزرعه‌ای بررسی شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهید چمران اهواز به جهت حمایت مالی و مساعدت در مراحل مختلف انجام این پژوهش تقدیر و تشکر می‌نمایند.

" هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد ".

منابع

خواجوی شجاعی، شیلا؛ معزی، عبدالامیر؛ نوروزی مصیر، مجتبی و تقوی، مهدی (۱۴۰۰). بررسی تأثیر روش‌های مختلف اصلاح شیمیایی و سطحی بر ویژگی‌های زغال‌های زیستی تهیه شده از نی و بقایای ذرت. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۹(۲) ۸۶-۷۳.

صرخه، صفیه؛ معزی، عبدالامیر؛ مرادی، ندا و کریمی، اکبر (۱۴۰۳). تأثیر کاربرد بیوچار اصلاح‌شده بر ویژگی‌های شیمیایی خاک و جذب عناصر غذایی در نیشکر واریته CP73-21. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵(۹)، ۱۵۳۶-۱۵۲۱.

عظیم‌زاده، یاسر؛ نجفی، نصرت‌اله، عبدالملکی، الناز و امیرلو، بهناز (۱۳۹۸). تغییرات برخی ویژگی‌های شیمیایی مواد آلی مختلف پس از تبدیل به بیوچار و هیدروچار. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۷(۴): ۱۷-۱.

کریمی، اکبر؛ معزی، عبدالامیر؛ چرم، مصطفی و عنایتی ضمیر، نعیمه (۱۳۹۹). تأثیر بیوچار باگاس نیشکر بر فراهمی عناصر غذایی و ویژگی های زیستی یک خاک آهکی. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۸(۱)، ۱۷-۱.

کریمی، اکبر؛ معزی، عبدالامیر؛ چرم، مصطفی و عنایتی ضمیر، نعیمه (۱۴۰۰). پیامد کاربرد بیوچار اصلاح شده با گوگرد بر برخی ویژگی های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۲(۹)، ۲۳۴۴-۲۳۳۳.

مرادی، رضا؛ سیادت، سید عطاالله؛ سیاهپوش، عبدالرضا؛ بخشنده، عبدالمهدی و مرادی تلاوت، محمدرضا (۱۳۹۹). ارزیابی شاخص‌های کیفی شربت در برداشت سبز و سوخته نیشکر. تولیدات گیاهی، ۴۲(۳)، ۴۱۵-۴۰۲.

References

Ahmed, N., Basit, A., Bashir, S., Bashir, S., Bibi, I., Haider, Z., Li, Y. (2021). Effect of acidified biochar on soil phosphorus availability and fertilizer use efficiency of maize (*Zea mays* L.). *Journal of King Saud University-Science*, *33*(8), 101635.

Ahmed, N., Deng, L., Wang, C., Shah, Z.-u.-H., Deng, L., Li, Y., Li, J., Chachar, S., Chachar, Z., Hayat, F., Bozdar, B., Ansari, F., Ali, R., Gong, L., & Tu, P. (2024). Advancements in biochar modification for enhanced phosphorus utilization in agriculture. *Land*, *13*(5), 644.

Ali, S., Rizwan, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Ibrahim, M., Riaz, M., & Shahzad, A. N. (2017). Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*(14), 12700–12712.

Alotaibi, K. D., & Schoenau, J. J. (2019). Addition of biochar to a sandy desert soil: Effect on crop growth, water retention, and selected properties. *Agronomy*, 9, 327.

Anderson, J.P.E. 1982. Soil respiration. In: A.L. and R.H. Mille (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy. Madison, WI, pp. 831-871.

Arbelaez, L., Breton, Z., Mahdi, C., Pratt, C., & El Hanandeh, A. (2021). Modification of hardwood derived biochar to improve phosphorus adsorption. Environments, 8(5), 41.

Azimzadeh, Y., Najafi, N., Reyhanitabar, A., Oustan, S., & Khataee, A. (2021). Effects of phosphate-loaded LDH-biochar/hydrochar on maize dry matter and P uptake in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *67*(12), 1649–1664.

Azimzadeh, Y., Najafi, N., Abdolmaleki, E., & Amirloo, B. (2020). Changes in some chemical properties of various organic materials after converting in biochar and hydrochar. *Applied Soil Research*, *7*(4), 1-17. (In Persian)

Bonilla, G. A. E., Durrer, A., & Cardoso, E. J. B. N. (2021). Use of compost and phosphate-solubilizing bacteria affect sugarcane mineral nutrition, phosphorus availability, and the soil bacterial community. *Applied Soil Ecology*, 157, 1-9.

Chandra, S., & Bhattacharya, J. (2019). Influence of temperature and duration of pyrolysis on the property heterogeneity of rice straw biochar and optimization of pyrolysis conditions for its application in soils. *Journal of Cleaner Production*, 215, 1123–1139.

Chen, M., Zhang, S., Liu, L., Wu, L., & Ding, X. (2021). Combined organic amendments and mineral fertilizer application increase rice yield by improving soil structure, P availability and root growth in saline-alkaline soil. *Soil and Tillage Research*, 212, 105060.

Chen, Q., Chen, J., Wang, J., Guo, J., Jin, Z., Yu, P., & Ma, Z. (2019). In situ, high-resolution evidence of phosphorus release from sediments controlled by the reductive dissolution of iron-bound phosphorus in a deep reservoir, southwestern China. *Science of the Total Environment*, 666, 39-45.

Dai, L., Li, H., Tan, F., Zhu, N., Mingxiong, H., & Hu, G. (2016). Biochar: A potential route for recycling of phosphorus in agricultural residues. *GCB Bioenergy*, 8(5), 852–858.

Davey, R. S., McNeill, A., Barnett, S., & Gupta, V. (2021). Potential for suppression of Rhizoctonia root rot is influenced by nutrient (N and P) and carbon inputs in a highly calcareous coarse-textured topsoil. *Soil Research*, 59(4), 329–345.

Domingues R.R., Trugilho P.F., Silva C.A., de Melo I.C.N., Melo L.C., Magriotis Z.M., and Sánchez-Monedero M.A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PloS one*, 12: 0176884.

Du, Z. Y., Wang, Q. H., Liu, F. C., Ma, H. L., Ma, B. Y., & Malhi, S. S. (2013). Movement of phosphorus in a calcareous soil as affected by humic acid. *Pedosphere*, 23(2), 229–235.

Frene, J. P., Frazier, M., Liu, S., Clark, B., Parker, M., & Gardner, T. (2021). Early effect of pine biochar on peach-tree planting on microbial community composition and enzymatic activity. *Applied Sciences*, 11(4), 1473.

Gaskin, J., Steiner, C., Harris, K., Das, K. C., & Bibens, B. (2008). Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2061–2069.

Ghodszad, L., Reyhanitabar, A., Maghsoodi, M. R., Lajayer, B. A., & Chang, S. X. (2021). Biochar affects the fate of phosphorus in soil and water: A critical review. *Chemosphere*, 283, 131176.

Gupta, R. K., Vashisht, M., Naresh, R. K., Dhingra, N., Sidhu, M. S., Singh, P. K., Rani, N., Al-Ansari, N., Alataway, A., Dewidar, A. Z., & Mattar, M. A. (2024). Biochar influences nitrogen and phosphorus dynamics in two texturally different soils. *Scientific Reports*, *14*(1), 6533.

Hafeez, A., Pan, T., Tian, J., & Cai, K. (2022). Modified biochars and their effects on soil quality: a review. *Environments*, *9*(5), 60.

Hussain, A. J., Al-Taey, D. K., & Kadhum, H. J. (2023). Biochar application increases the amount of nitrogen, phosphorus, and potassium in the soil: A review. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* (Vol. 1213, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.

Jenkinson, D. S. and Ladd J. N. (1981). Microbial biomass in soil measurement and turnover. P415-471, In: Paul E.A., Ladd, J.N. (Ed.). *Soil Biochemistry*, Marcel Dekker, Inc., NY, pp. 415-471.

Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2019a). Chemical fractions and availability of Zn in a calcareous soil in response to biochar amendments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19, 851–864.

Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2019b). Investigation of physicochemical characteristics of biochars derived from corn residue and sugarcane bagasse in different pyrolysis temperatures. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(3), 725–739. (In Persian)

Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2020). Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 450-459.

Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2021). Impact of application of sulfur-modified biochar on some biochemical and microbiological attributes of soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(9), 2333–2344. (In Persian)

Khajavi-Shojaei, S., Moezzi, A., Norouzi Masir, M., & Taghavi, M. (2020). Characteristics of conocarpus wastes and common reed biochars as a predictor of potential environmental and agronomic applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1–18.

Khajavi-Shojaei, S., Moezzi, A., Norouzi Masir, M., & Taghavi, M. (2021). Investigating the effect of various surface and chemical modification approaches on corn residue and common reed-derived biochar traits. *Applied Soil Research*, 9(2), 73–86. (In Persian)

Khajavi-Shojaei, S., Moezzi, A., Norouzi Masir, M., & Taghavi, M. (2023). Synthesis modified biochar-based slow-release nitrogen fertilizer increases nitrogen use efficiency and corn (*Zea mays* L.) growth. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *13*(2), 593-601.

Kizito, S., Luo, H., Lu, J., et al. (2019). Role of nutrient-enriched biochar as a soil amendment during maize growth: Exploring practical alternatives to recycle agricultural residuals and reduce chemical fertilizer demand. *Sustainability*, *11*, 3211.

Lemming, C., Oberson, A., Magid, J., Bruun, S., Scheutz, C., Frossard, E., & Jensen, L. S. (2019). Residual phosphorus availability after long-term soil application of organic waste. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 270–271, 65–75. https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.10.019

Li, S., Zhang, Y., Yan, W., & Shangguan, Z. (2018). Effect of biochar application method on nitrogen leaching and hydraulic conductivity in a silty clay soil. *Soil and Tillage Research*, 183, 100–108.

Liu, Q., Jiang, S., Su, X., Zhang, X., Cao, W., & Xu, Y. (2021). Role of biochar modified with $ZnCl_2$ and $FeCl_3$ on the electrochemical degradation of nitrobenzene. *Chemosphere*, 275, 129966.

Liu, S., Meng, J., Jiang, L., Yang, X., Lan, Y., Cheng, X., & Chen, W. (2017). Rice husk biochar impacts soil phosphorus availability, phosphatase activities, and bacterial community characteristics in three different soil types. *Applied Soil Ecology*, 116, 12–22.

Mihoub, A., Amin, A. E. E. A. Z., Motaghian, H. R., Saeed, M. F., & Naeem, A. (2022). Citric acid (CA)–modified biochar improved available phosphorus concentration and its half-life in a P-fertilized calcareous sandy soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-10.

Moradi, N., & Karimi, A. (2021). Effect of modified corn residue biochar on chemical fractions and bioavailability of cadmium in contaminated soil. *Chemistry and Ecology*, 37(3), 252-267.

Moradi, R., Siadat, S., Siahpoosh, A., Bakhshandeh, A., & Moradi Telavat, M. R. (2019). Evaluating quality indices of extracts in green and burnt sugarcane harvesting. *Plant Productions*, *42*(3), 402-415. (In Persian)

Nazari, S., Rahimi, G., & Nezhad, A. K. J. (2019). Effectiveness of native and citric acid-enriched biochar of Chickpea straw in Cd and Pb sorption in an acidic soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103064.

Olsen, S.R. and Sommers, L.E. (1982) Phosphorus. In: Page, A.L., *et al*., Eds., *Methods of Soil Analysis*: Part 2: *Chemical and Microbiological Properties*, Agronomy Monographs 9, 2nd Edition, ASA and SSSA, Madison, 403-430.

Omara, P., Singh, H., Singh, K., Sharma, L., Otim, F., & Obia, A. (2023). Short-term effect of field application of biochar on cation exchange capacity, pH, and electrical conductivity of sandy and clay loam temperate soils. *Technology in Agronomy*, 3(1).

Pan, H., Yang, X., Chen, H., Sarkar, B., Bolan, N., Shaheen, S. M., Wu, F., Che, L., Ma, Y., Rinklebe, J., & Wang, H. (2021). Pristine and iron-engineered animal- and plant-derived biochars enhanced bacterial abundance and immobilized arsenic and lead in contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 763, 144218.

Purnawan, C., Dewi, C. C., Ramadan, B. S., Budihardjo, M. A., Effendi, A. J., & Hidayat, S. (2021). The influence of $ZnCl_2$ activation on macronutrient NPK adsorption simultaneously using coconut shell biochar for soil fertility improvement. *Molekul*, 16(1), 75–81.

Ravindiran, G., Rajamanickam, S., Janardhan, G., Hayder, G., Alagumalai, A., Mahian, O., Lam, S. S., & Sonne, C. (2024). Production and modifications of biochar to engineered materials and its application for environmental sustainability: A review. *Biochar*, *6*(1), 62.

Regmi, P. Moscoso, J. L. G., Kumar, S., Cao, X., Mao, J., and Schafran, G. (2012). Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process. *Journal of Environmental Management*, 109, 61-69.

Rutigliano, F. A., Romano, M., Marzaioli, R., Baglivo, I., Baronti, S., Miglietta, F. and Castaldi, S. (2014). Effect of biochar addition on soil microbial community in a wheat crop. *European Journal of Soil Biology*, 60, 9-15.

Saeed, M. F., Jamal, A., Muhammad, D., Shah, G. M., Bakhat, H. F., Ahmad, I., Ali, S., Ihsan, F., & Wang, J. (2021). Optimizing phosphorus levels in wheat grown in a calcareous soil with the use of adsorption isotherm models. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 81–94.

Sorkheh, S., Moezzi, A., Moradi, N., & Karimi, A. (2024). Modified biochar application effects on soil chemical properties and nutrients uptake in sugarcane cv. CP73-21. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *55*(9), 1521-1536.

Safian, M., Motaghian, H., & Hosseinpur, A. (2020). Effects of sugarcane residue biochar and P fertilizer on P availability and its fractions in a calcareous clay loam soil. *Biochar*, 2(3), 357–367.

Shokuhifar, Y., Ghahsareh, A. M., Shahbazi, K., Tehrani, M. M., & Besharati, H. (2023). Biochar and wheat straw affecting soil chemistry and microbial biomass carbon countrywide. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(6), 5407-5417.

Singh, B., Camps-Arbestain, M., & Lehmann, J. (Eds.). (2017). Biochar: A guide to analytical methods. CSIRO Publishing.

Singh, S., Swami, S., Gogoi, J., Dwivedi, D. K., Turkar, G. P., Tamang, B., & Borah, S. K. (2023). Effect of biochar-mediated treatments on the improvement of soil acidity, crop performance, and soil properties. Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America, 54, 13575–13603.

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.

Thies, J. E., Rillig, M. C., & Graber, E. R. (2019). Biochar effects on the abundance, activity, and diversity of the soil biota. In *Biochar for Environmental Management* (2nd ed., pp. 359–422). Routledge.

Wahba, M., Fawkia, L. A. B. İ. B., & Zaghloul, A. (2019). Management of calcareous soils in arid region. *International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling*, 2(5), 248-258.

Wang, L., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., Alessi, D. S., Rinklebe, J., Wang, H., Mašek, O., Hou, R., O'Connor, D., & Hou, D. (2020). New trends in biochar pyrolysis and modification strategies: Feedstock, pyrolysis conditions, sustainability concerns, and implications for soil amendment. *Soil Use and Management*, 36, 358–386.

Wen, E., Yang, X., Chen, H., Shaheen, S. M., Sarkar, B., Xu, S., & Wang, H. (2021). Iron-modified biochar and water management regime-induced changes in plant growth, enzyme activities, and phytoavailability of arsenic, cadmium and lead in a paddy soil. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124344.

Wu, L., Zhang, S., Wang, J., & Ding, X. (2020). Phosphorus retention using iron (II/III) modified biochar in saline-alkaline soils: Adsorption, column, and field tests. *Environmental Pollution*, 261, 114223.

Wu, L., Zheng, H., & Wang, X. (2021). Effects of soil amendments on fractions and stability of soil organic matter in saline-alkaline paddy. *Journal of Environmental Management*, 294, 112993.

Yang, D. I. N. G., Yunguo, L. I. U., Shaobo, L. I. U., Huang, X., Zhongwu, L. I., Xiaofei, T. A. N., & Lu, Z. H. O. U. (2017). Potential benefits of biochar in agricultural soils: a review. *Pedosphere*, 27(4), 645-661.

Zhang, L., Xu, M., Liu, Y., Zhang, F., Hodge, A., & Feng, G. (2016). Carbon and phosphorus exchange may enable cooperation between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate-solubilizing bacterium. *New Phytologist*, 210(3), 1022–1032.

Zhang, Y., Zhao, C., Chen, G., Zhou, J., Chen, Z., Li, Z., & Chen, Y. (2020). Response of soil microbial communities to additions of straw biochar, iron oxide, and iron oxide–modified straw biochar in an arsenic-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 23761-23768.

Zimmerman, A. R., Gao, B., & Ahn, M.-Y. (2011). Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, *43*(6), 1169–1179.