Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Modified biochar application effects on soil chemical properties and nutrients uptake in sugarcane cv. CP73-21

Safieh Sorkheh[1] | Abdolamir Moezzi [2]✉ | Neda Moradi[3] | Akbar Karimi[4]

1. Department of Soil Science, Faculty of agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: safiehsorkheh@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: moezzi151@scu.ac.ir
3. Department of Soil Science, Faculty of agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: n.moradi@scu.ac.ir
4. Department of Agronomy, Khuzestan Sugarcane Research and Training Institute, Ahvaz, Iran. E-mail: akbar.karimi84@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: March. 24, 2024

Revised: June. 25, 2024

Accepted: July. 2, 2024

Published online: Nov. 2024

Keywords:
Biochar,
Nutrients,
Pyrolysis,
Sugarcane Bagasse.

ABSTRACT

One of the major problems of soils in arid and semi-arid regions is the lack of organic matter. Chemical fortification of biochar is effective in increasing biochar's efficiency to improve the chemical properties and fertility of the soil and plant growth. The purpose of this research was to investigate the effect of biochar and modified sugarcane bagasse biochar on the nutrient status, soil chemical properties, nutritional status and sugarcane yield. Sugarcane bagasse biochar was prepared and modified and its properties were measured. This research was done in a completely randomized design with 4 treatments, including 1- control (without the use of biochar), 2- sugarcane bagasse biochar, 3- sulfuric acid modified biochar, 4- citric acid modified biochar and 4 replications in pots and greenhouse condition. The biochar treatments were applied before plantantion at 1% w/w level. At the end of the experiment period, plant biomass yield and soil chemical properties were measured. The results showed that the application of all treatments caused a decrease in soil pH (0.24-0.64 units), but increase cation exchange capacity (1.55 to 1.84-fold), organic carbon (2.2 to 2.6-fold) and available concentration of phosphorus (1.7 to 2.2-fold), potassium (1.29 to 1.85-fold), iron (1.65 to 1.78-fold) and zinc (1.41 to 1.69-fold) in the soil. The use of citric acid modified biochar had the greatest effect in increasing the height (19.4%) and the dry weight of the shoot (10.8%) and nutrient uptake in shoot compared to the control treatment. In general, biochar prepared from sugarcane bagasse and modified with citric acid could be effective in improving soil chemical properties, nutrient availability and sugarcane growth and nutrition under the studied soil conditions.

Cite this article: 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. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.374316.669683

© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.374316.669683

EXTENDED ABSTRACT

Background:

Biochar is a carbon-rich and porous material that is prepared from pyrolysis of various biomasses in oxygen-free or minimal oxygen conditions. Chemical modification of biochar can be effective in increasing its efficiency in improving the chemical characteristics and fertility of the soil and plant growth and performance. Chemical fortification of biochar is done using compounds such as citric acid ($C_6H_8O_7$), potassium hydroxide (KOH), potassium permanganate ($KMNO_4$) and zinc chloride ($ZnCl_2$). Sugarcane bagasse is the waste of sugarcane from the extraction of sugarcane syrup. Every year, a large amount of sugarcane bagasse is produced in the sugarcane industry of Khuzestan province. Processing a part of sugarcane bagasse and turning it into biochar can be one of the solutions for managing sugarcane residues.

Goals:

The purpose of this research is to investigate the effect of sugarcane bagasse biochar and modified biochar. with organic and mineral acids on soil chemical characteristics, nutritional status and sugarcane plant growth.

Materials and Methods:

Sugarcane bagasse biochar was prepared and modified and its properties were measured. This research was done in a completely randomized design with 4 treatments, including 1- control (without the use of biochar), 2- sugarcane bagasse biochar, 3- sulfuric acid modified biochar, 4- citric acid modified biochar and 4 replications in pots and greenhouse condition. The biochar treatments were applied before plantantion at 1% w/w level. At the end of the growth period, plant biomass yield and soil chemical properties were measured.

Results and Discussion:

The results showed that the application of all treatments caused a decrease in soil pH (0.24-0.64 units), increase cation exchange capacity (1.55 to 1.84-fold), organic carbon (2.2 to 2.6-fold) and available concentration of phosphorus (1.7 to 2.2-fold), potassium (1.29 to 1.85-fold), iron (1.65 to 1.78-fold) and zinc (1.41 to 1.69-fold) in the soil. The use of citric acid modified biochar had the greatest effect in increasing the height (19.4%) and the dry weight of the shoot (10.8%) nutrient uptake in shoot compared to the control treatment.

In general, the results showed that modified biochars, especially citric acid modified biochars, had a greater effect than raw biochars on sugarcane nitrogen uptake. The addition of biochar and modified biochar treatments caused a significant increase in shoot phosphorus uptake in sugarcane. Although the most uptake phosphorus in sugarcane shoots was observed in citric acid modified biochar, however, there were no significant difference in phosphorus uptake between the two treatments of citric acid modified biochar and sulfuric acid. Shoot potassium uptake significantly increased with the application of biochar and modified biochar. The highest shoot potassium uptake was observed in raw biochar treatment.

In general, biochar prepared from sugarcane bagasse and citric acid modified biochar can be effective in could be effective in improving soil chemical properties, nutrient availability and sugarcane growth and nutrition under the studied soil conditions.

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.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، شماره ۹ شاپا: ۲۴۲۳-۷۸۳۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

تأثیر کاربرد بیوچار اصلاح‌شده بر ویژگی‌های شیمیایی خاک و جذب عناصر غذایی در نیشکر واریته CP73-21

صفیه صرخه[۱] | عبدالامیر معزی[۲]✉ | ندا مرادی[۳] | اکبر کریمی[۴]

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: safiehsorkheh@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: moezzi151@scu.ac.ir
۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: n.moradi@scu.ac.ir
۴. گروه تحقیقات به‌زراعی، مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان، اهواز، ایران. رایانامه: akbar.karimi84@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۴/۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۱۲
تاریخ انتشار: آذر ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
مدل رفتاری،
خاک غیراشباع،
مدل‌سازی عددی،
پلاستیسیته.

چکیده

یکی از مشکلات اصلی خاکهای مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود مواد آلی است. اصلاح شیمیایی بیوچار در افزایش کارایی بیوچار در بهبود ویژگیهای شیمیایی و حاصلخیزی خاک و رشد گیاه مؤثر است. هدف از این پژوهش، مقایسه تأثیر بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده باگاس نیشکر بر وضعیت عناصر غذایی، ویژگیهای شیمیایی خاک، وضعیت تغذیهای و عملکرد نیشکر بود. این پژوهش در قالب طرح کاملا تصادفی با ۴ تیمار شامل ۱- شاهد (بدون کاربرد بیوچار)، ۲- بیوچار باگاس نیشکر، ۳- بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید ۴- بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید و در ۴ تکرار در شرایط گلدانی انجام شد. بیوچار تهیه‌شده از باگاس نیشکر و اصلاح شد و ویژگیهای آن اندازهگیری گردید. تیمارهای بیوچار در سطح ۱ درصد وزنی، قبل از کشت اعمال شدند. در انتهای این دوره، عملکرد زیستتوده و ویژگیهای شیمیایی خاک اندازهگیری شدند. نتایج نشان داد کاربرد تیمارها سبب کاهش pH خاک (۰/۶۴-۰/۲۴ واحد)، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (۱/۸۴-۱/۵۵ برابر)، کربن آلی کل (۲/۶- ۲/۲ برابر) و غلظت قابل‌دسترس فسفر (۲/۲-۱/۷ برابر)، پتاسیم (۱/۸۵-۱/۲۹ برابر)، آهن (۱/۷۸-۱/۶۵ برابر) و روی (۱/۶۹-۱/۴۱ برابر) در خاک شد. کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید بیش‌ترین تأثیر را در افزایش ارتفاع (۱۹/۴ درصد) و وزن خشک اندام هوایی (۱۰/۸ درصد) و جذب عناصر غذایی در گیاه، نسبت به تیمار شاهد داشت. به‌طور کلی بیوچار تهیه‌شده از باگاس نیشکر و اصلاح‌شده با سیتریک اسید توانست در بهبود ویژگیهای شیمیایی خاک، فراهمی عناصر غذایی و رشد و تغذیه نیشکر در شرایط خاک مورداستفاده، مؤثر باشد.

استناد: صرخه، صفیه؛ معزی، عبدالامیر؛ مرادی، ندا؛ کریمی؛ اکبر (۱۴۰۳). تأثیر کاربرد بیوچار اصلاح‌شده بر ویژگی‌های شیمیایی خاک و جذب عناصر غذایی در نیشکر واریته CP73-21. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۹)، ۱۵۳۶-۱۵۲۱. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.374316.669683

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.374316.669683

مقدمه

کمبود مواد آلی یکی از مشکلات اصلی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، است (El-Naggar *et al*., 2019). در اغلب اراضی کشاورزی استان خوزستان، مقدار ماده آلی خاک کم‌تر از یک درصد است. کمبود مواد آلی پیامدهای نامطلوبی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاهان دارد. بنابراین برای بهبود حاصلخیزی خاک و وضعیت تغذیه‌ای گیاهان، افزودن مواد آلی به خاک‌های زراعی مناطق خشک و نیمه‌خشک که مقدار ماده آلی کمی دارند، ضروری است (El-Naggar *et al*., 2019). یکی از راهکارهایی که در سال‌های اخیر جهت بهبود ماده آلی خاک مورد توجه قرار گرفته است، کاربرد بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده آلی در خاک است (Zhang *et al*., 2021;).

بیوچار یک ماده غنی از کربن و متخلخل است که از گرماکافت (تجزیه حرارتی) زیست‌توده‌های مختلف در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن حداقل تهیه می‌شود (Yu *et al*., 2019). نتایج مطالعات مختلف نشان داده است که کاربرد بیوچار به خاک به‌عنوان یک اصلاح‌کننده آلی در خاک‌های کشاورزی می‌تواند در بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاهان مؤثر باشد (Yu *et al*., 2019; Karimi *et al*., 2020; Frene *et al*., 2021; Siedt *et al*., 2021) و آبشویی عناصر غذایی و کودها را کاهش می‌دهد (Laird *et al*., 2010). با توجه به پایداری بالای کربن بیوچار و زمان ماندگاری آن در خـاک، کاربرد بیوچار سبب افزایش مقدار مواد آلی خاک به مدت طولانی و در نتیجـه بهبود ویژگی‌های خاک، می‌گردد(El-Naggar *et al*., 2019). افزودن بیوچار به خاک به‌دلیل ویژگی‌های مختلف آن از جمله ساختار با منافذ ریز، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، سطح ویژه بالا و کربن آن، سبب اصلاح ویژگی‌های گوناگون خاک می‌شود (Mukherjee and Lal, 2013; Khajavi-Shojaei *et al*., 2020).

بیوچار به‌دلیل داشتن گروه‌های عاملی سطحی اکسیژن‌دار و داشتن بار منفی، ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی دارد. بنابراین کاربرد بیوچار در خاک می‌تواند CEC خاک و نگه داشت عناصر غذایی در خاک را افزایش دهد و در جذب آن‌ها توسط گیاهان مؤثر باشد. همچنین عناصر غذایی موجود در بیوچار می‌توانند به‌عنوان یک منبع عناصر غذایی به خاک اضافه شوند (Gul *et al*., 2015). کاربرد بیوچار در خاک می‌تواند با جذب نیترات و آمونیوم در خاک و کاهش آبشویی آن‌ها و بهبود تغذیه نیتروژن در گیاهان مؤثر باشد (El-Naggar *et al*., 2019). افزون بر این کاربرد بیوچار می‌تواند با کاهش مکان‌های جذب فسفر در خاک، غلظت فسفر قابل‌دسترس خاک را افزایش دهد (Gao *et al*., 2018). نتایج مطالعات مختلف نشان داده که در اثر افزودن بیوچار به‌ویژه بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای پایین به خاک‌های آهکی، فراهمی عناصر غذایی مختلف از جمله فسفر و عناصر غذایی کم‌مصرف برای گیاه، می‌تواند افزایش یابد (Karimi *et al*., 2020). Yang *et al*., (2015) با انجام پژوهشی تأثیر کاربرد سطوح مختلف بیوچار بر ویژگی‌های خاک، رشد ریشه و اندام هوایی نیشکر (واریته ROC 22) را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد کاربرد سطوح مختلف بیوچار سبب افزایش معنی‌دار طول ریشه و عملکرد زیست‌توده ریشه و اندام هوایی، ماده آلی و غلظت فسفر و پتاسیم قابل‌دسترس خاک شد. Alvarez-Campos *et al*. (2018) با انجام پژوهشی تأثیر کاربرد بیوچارهای تهیه‌شده از زیست‌توده‌های مختلف (در دماهای ۳۵۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس) بر رشد، عملکرد و تغذیه نیشکر (واریته CP00-1446) را در فلوریدا بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که جذب عناصر غذایی پتاسیم و سیلیسیم در اندام هوایی، تعداد ساقه، عملکرد زیست‌توده نیشکر و عملکرد شکر، در اثر کاربرد تیمارهای مختلف بیوچار به‌طور معنی‌داری افزایش یافت.

اصلاح شیمیایی بیوچار می‌تواند در افزایش کارایی آن در بهبود ویژگی‌های شیمیایی و حاصلخیزی خاک و رشد و عملکرد گیاه مؤثر باشد. اصلاح شیمیایی بیوچار با استفاده از ترکیباتی مانند سیتریک اسید ($C_6H_8O_7$)، هیدروکسید پتاسیم (KOH)، پرمنگنات پتاسیم ($KMnO_4$)و کلرید روی ($ZnCl_2$) انجام می‌شود (Mihoub *et al*., 2022).

اصلاح بیوچار با اسیدهای آلی و معدنی یکی دیگر از راهکارهای بهبود ویژگی‌های بیوچار و افزایش کارایی آن در اصلاح ویژگی‌های خاک است. اصلاح با اسیدهای آلی و معدنی سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار مانند سطح ویژه، اندازه منافذ، ظرفیت تبادل کاتیونی، نوع گروه‌های عاملی می‌شود (Nazari *et al*., 2019). کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با اسیدهای آلی و معدنی می‌تواند سبب افزایش فعالیت میکروبی خاک و همچنین افزایش فراهمی فسفر و عناصر غذایی کم‌مصرف در خاک گردد (Yu *et al*., 2019). کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با اسید در خاک‌های آهکی می‌تواند با کاهش pH خاک در بهبود جذب عناصر غذایی توسط گیاهان مؤثر باشد. همچنین اصلاح بیوچار با اسید احتمالاً سبب افزایش انحلال عناصر غذایی ساختار بیوچار شده و بدین ترتیب در بهبود جذب آن‌ها توسط گیاهان مؤثر باشد (Sahin *et al*., 2017). Qayyum *et al*. (2021) با انجام پژوهشی دریافتند اصلاح بیوچار با کلریدریک اسید می‌تواند سبب افزایش کارایی آن در افزایش CEC خاک می‌شود. آن‌ها همچنین گزارش کردند کاربرد بیوچار اصلاح‌شده در یک خاک قلیایی سبب کاهش

معنی‌دار pH یک خاک قلیایی شد. Yin *et al*. (2017) گزارش کردند اصلاح بیوچار با نمک آهن می‌تواند از طریق آزادسازی H^+ در اثر هیدرولیز یون‌های آهن (Fe^{3+})، pH خاک را کاهش دهد. Liu *et al*. (2018) با انجام پژوهشی گزارش کردند اصلاح بیوچار پوسته برنج با اسیدهای معدنی مختلف (فسفریک اسید، کلریدریک اسید و سولفوریک اسید) سبب اکسیداسیون گروه‌های عامل سطحی بیوچار شده و کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با اسیدهای معدنی سبب افزایش معنی‌دار ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) خاک شد. در پژوهشی Mihoub *et al*. (2022) تأثیر بیوچار تهیه‌شده از کاه گندم و اصلاح‌شده با سیتریک اسید بر فراهمی فسفر در یک خاک آهکی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد غلظت فسفر قابل‌دسترس برای گیاه در خاک اصلاح‌شده با بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید به‌طور معنی‌داری بیش‌تر بود.

باگاس نیشکر پسماند نیشکر پس از استخراج شربت نیشکر است. سالانه حجم زیادی باگاس نیشکر در کشت و صنعت‌های نیشکر استان خوزستان تولید می‌شود. فرآوری بخشی از باگاس نیشکر و تبدیل آن به بیوچار می‌تواند یکی از راهکارهای مدیریت بقایای نیشکر باشد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۹). با توجه به این‌که تاکنون مطالعات چندانی در زمینه تأثیر کاربرد بیوچار اصلاح‌شده باگاس نیشکر بر ویژگی‌های شیمیایی و وضعیت عناصر غذایی خاک و تغذیه نیشکر انجام نشده است، بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر بیوچار باگاس نیشکر و بیوچار اصلاح‌شده با اسیدهای آلی و معدنی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک، وضعیت تغذیه‌ای و رشد گیاه نیشکر واریته CP73-21 بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن

جهت اجرای این پژوهش نمونه‌برداری خاک از خاک لایه سطحی (۰–۳۰ سانتی‌متری) مزارع کشت و صنعت نیشکر دهخدا واقع در ۲۰ کیلومتری شمال شهر اهواز، در استان خوزستان، انجام شد. نمونه خاک جمع‌آوری‌شده، هواخشک شده و پس از هواخشک نمودن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها اندازه‌گیری شد. pH و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک، کربن آلی به‌روش اکسیداسیون تر، غلظت نیتروژن کل به‌روش کجلدال، فسفر قابل‌دسترس به‌روش اولسن و غلظت پتاسیم قابل‌دسترس خاک به‌روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم اندازه‌گیری شد (Carter and Gregorich, 2008). خاک موردمطالعه دارای بافت لومی سیلتی، pH قلیایی، آهکی، غیر شور و دارای ماده آلی پایین است.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک موردمطالعه

ویژگی	EC	pH	CEC	نیتروژن کل	فسفر قابل‌دسترس	پتاسیم قابل‌دسترس	کربن آلی	بافت خاک
واحد	$dS\ m^{-1}$	–	$cmol_c\ kg^{-1}$	٪	$mg\ kg^{-1}$	$mg\ kg^{-1}$	٪	–
مقدار	۱/۳۷	۸/۰۰	۹/۲۴	۰/۰۷	۸/۳۵	۱۶۲	۰/۵۷	سیلتی لومی

EC: هدایت الکتریکی، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی

تهیه بیوچار و بیوچارهای اصلاح‌شده با سولفوریک اسید و سیتریک اسید اندازه‌گیری ویژگی‌های آن‌ها

در این پژوهش جهت تهیه بیوچار از زیست‌توده باگاس نیشکر استفاده شد. باگاس نیشکر از کشت و صنعت نیشکر دهخدا تهیه شد و پس از هواخشک نمودن در آون و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شد (Singh *et al*., 2017). سپس بیوچار در کوره الکتریکی در دمای گرماکافت ۳۵۰ درجه سلسیوس و با نرخ افزایش دمای ۵ درجه سلسیوس در دقیقه تهیه شد. جهت ایجاد شرایط حداقل اکسیژن در کوره از جریان گاز نیتروژن استفاده شد (مرادی و کریمی، ۲۰۲۱). جهت اصلاح بیوچار از سولفوریک اسید و سیتریک اسید استفاده شد. جهت اصلاح بیوچار با سیتریک اسید و سولفوریک اسید، بیوچار تهیه‌شده با محلول تهیه‌شده از هر یک از اسیدها (۰/۰۱ مولار) با نسبت ۱ به ۵۰ وزنی–حجمی، به‌مدت ۲ ساعت در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) مخلوط شد. بیوچار اصلاح‌شده به منظور دهیدراته شدن ابتدا به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس خشک شد. به‌منظور حذف املاح اضافی بیوچارهای اصلاح‌شده چندین بار با آب مقطر شسته شده و در نهایت به‌مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس خشک شدند. (Liu *et al*., 2021).

پس از آماده نمودن بیوچار و بیوچارهای اصلاح‌شده ویژگی‌های آن‌ها شامل عملکرد، خاکستر، مواد فرار، pH، EC، CEC، سطح

ویژه، گروه‌های عاملی، آنالیز عنصری (کربن، هیدروژن و نیتروژن)، محتوای خاکستر، مواد فرار و غلظت فسفر و پتاسیم کل اندازه‌گیری شد (Singh *et al*., 2017). همچنین درصد کربن تثبیت‌شده، نسبت مولی کربن به نیتروژن (C/N)، هیدروژن به کربن (H/C) و اکسیژن به کربن (O/C) محاسبه شد.

طرح آزمایشی، اعمال تیمارها و کشت گلدانی

این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار سطح شامل ۱- شاهد (بدون کاربرد بیوچار)، ۲- کاربرد بیوچار باگاس نیشکر، ۳- کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید، ۴- کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید و در چهار تکرار (در مجموع ۱۶ گلدان) در ایستگاه تحقیقاتی شماره یک مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان، واقع در ۳۰ کیلومتری جاده اهواز-آبادان انجام شد. خاک نمونه‌برداری شده جهت کشت گلدانی ابتدا هوا خشک شده، سپس از الک ۵ میلی‌متری عبور داده شد. تیمارهای بیوچار در سطح ۱ درصد وزنی قبل از کشت اعمال شدند. سپس جهت کشت گلدانی نیشکر، مقدار ۱۸ کیلوگرم خاک تیمار شده با بیوچار، در هر گلدان ریخته شد. در هر گلدان سه قلمه دارای تک جوانه نیشکر واریته CP73-21 در عمق حدود ۳ سانتی‌متری خاک کشت شد. کوددهی و تأمین عناصر غذایی گلدان‌ها بر اساس نتایج آزمون خاک انجام شد. پس از اطمینان از سبز شدن جوانه‌ها در مرحله دو برگی، یکی از گیاهان حذف شد. گلدان‌ها در شرایط گلخانه و در محدوده دمایی ۲۴ تا ۳۴ درجه سلسیوس به‌مدت ۴ ماه نگهداری شدند. در طول دوره آزمایش رطوبت گلدان‌ها در محدوده ۷۰ درصد ظرفیت زراعی با تعیین رطوبت در گلدان‌های تخریبی، به‌روش وزنی حفظ شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی خاک، ویژگی‌های رشدی و عناصر غذایی گیاه

در انتهای دوره آزمایش که به‌مدت چهار ماه بود، ارتفاع گیاه اندازه‌گیری شد. همچنین محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b و کاروتنوئید) برگ تازه، به‌روش عصاره‌گیری با استون ۸۰ درصد اندازه‌گیری شد (Wellburn and Lichtenthaler, 1984). سپس بخش هوایی گیاه نیشکر از سطح خاک بریده شد و پس از تمیز کردن گیاه از ذرات خاک به منظور تعیین وزن خشک، نمونه‌ها در آون در درجه حرارت ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. و وزن خشک اندام هوایی گیاه اندازه‌گیری شد. همچنین جهت ارزیابی اثر تیمارها بر وضعیت تغذیه‌ای گیاه، غلظت عناصر غذایی پرمصرف (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) و کم‌مصرف (آهن، منگنز، روی و مس) در اندام هوایی گیاه اندازه‌گیری شد (Motsara, 2015) سپس جذب عناصر غذایی (حاصلضرب غلظت در ماده خشک) در اندام هوایی نیشکر در هر یک از نمونه‌ها محاسبه شد. در انتهای آزمایش، نمونه‌برداری خاک از هر یک از گلدان‌ها نیز انجام شده و هدایت الکتریکی (EC)، pH خاک، کربن آلی کل و محلول، ظرفیت تبادل کاتیونی، غلظت نیتروژن کل و غلظت قابل‌دسترس فسفر، پتاسیم و عناصر غذایی کم‌مصرف (آهن، منگنز، روی و مس) در خاک، اندازه‌گیری شد (Carter and Gregorich, 2008).

آنالیز آماری داده‌ها

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با استفاده از آزمون دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار

نتایج نشان داد اصلاح شیمیایی بیوچار سبب تغییر درصد خاکستر، مواد فرار و کربن ثبیت شده بیوچار شد (جدول ۲). به‌طوریکه در اثر اصلاح شیمیایی بیوچار، محتوای خاکستر، مواد فرار و درصد کربن تثبیت‌شده بیوچار کاهش یافت. نتایج نشان داد pH بیوچارهای اصلاح‌شده نسبت به بیوچار اصلاح‌نشده کم‌تر بود. به‌طوری‌که pH بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید و سولفوریک اسید به‌ترتیب ۳/۰ و ۴/۷ واحد کم‌تر از بیوچار اصلاح‌نشده بود. مقایسه EC بیوچارها نشان داد که بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید نسبت به بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید EC کم‌تری داشتند. بیوچار اصلاح‌شده CEC بیش‌تری نسبت به بیوچار داشتند. بیش‌ترین مقدار CEC و سطح ویژه مربوط به بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید بود. همچنین درصد اکسیژن بیوچارهای اصلاح‌شده در مقایسه با بیوچار اصلاح‌نشده باگاس نیشکر، به‌طور چشم‌گیری افزایش یافت (جدول ۲). نتایج آنالیز بیوچارها نشان داد، درصد فسفر در تیمار بیوچارهای اصلاح‌شده نسبت به بیوچار اصلاح‌نشده افزایش داشت که بیش‌ترین مقدار مربوط به تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید بود. همچنین درصد کربن، پتاسیم و نسبت C/N بیوچار اصلاح‌نشده بیش‌تر از بیوچارهای اصلاح‌شده بود. این نتایج می‌تواند به‌دلیل شسته شدن پتاسیم محلول از ساختار

بیوچار و در نتیجه کاهش مقدار آن در بیوچارها باشد. کاهش درصد کربن نیز می‌تواند به‌دلیل تغییر ساختار شیمیایی و سطحی بیوچار و اضافه شدن سایر یون‌ها به ساختار آن در اثر اصلاح شیمیایی باشد (خواجوی شجاعی و همکاران، ۱۴۰۰). در حالی‌که بیوچارهای اصلاح‌شده مقدار هیدروژن و نیتروژن و اکسیژن بیش‌تری نسبت به بیوچار اصلاح‌نشده داشتند.

جدول ۲. ترکیب عنصری و نسبت‌های اتمی تیمارهای مختلف بیوچار

ویژگی	واحد	BC	CA-BC	SA-BC
عملکرد	٪	۴۷/۵	–	–
خاکستر	٪	۲۲/۴	۱۴/۹	۱۴/۴
مواد فرار	٪	۳۷/۱	۳۴/۲	۳۳/۳
کربن تثبیت‌شده	٪	۴۰/۵	۳۰/۹	۳۲/۳
EC	$dS\ m^{-1}$	۱/۴۷	۱/۹۵	۲/۵۳
pH	-	۷/۲۰	۴/۲۰	۲/۵۰
CEC	$cmolc\ kg^{-1}$	۲۸/۹۶	۴۸/۷۰	۵۴/۷۸
سطح ویژه	$m^2\ g^{-1}$	۳۶/۸	۶۸/۶	۶۱/۵
فسفر	٪	۰/۶۲	۰/۷۲	۰/۷۰
پتاسیم	٪	۰/۸۸	۰/۷۶	۰/۴۸
کربن	٪	۶۲/۴۵	۵۱/۱۶	۵۲/۸۶
هیدروژن	٪	۲/۶۰	۳/۱۰	۳/۲۵
نیتروژن	٪	۱/۸۳	۲/۴۹	۲/۲۸
اکسیژن	٪	۱۰/۷۰	۲۷/۲	۲۷/۷
C/N	–	۳۹/۸	۲۳/۹	۲۷/۱
O/C	–	۰/۱۵	۰/۴۵	۰/۴۷
H/C	–	۰/۵۰	۰/۷۳	۰/۷۴

نتایج نشان داد در اثر اصلاح شیمیایی بیوچار محتوای خاکستر بیوچار کاهش یافت. اصلاح با اسید با انحلال و شستشوی عناصر معدنی همراه است که سبب کاهش محتوای خاکستر بیوچارهای اصلاح‌شده می‌گردد. همچنین اصلاح بیوچارها با اسید می‌تواند مواد لیگنوسلولزی، آلیفاتیک و آروماتیک را تجزیه کند (Fierro *et al.*, 2010)، در نتیجه با تجزیه این مواد، بخش باقی‌مانده کربنِ پایدار در ساختار بیوچارهای اصلاح‌شده با اسید نسبت به بیوچار اولیه کاهش می‌یابد. درصد اکسیژن در بیوچارهای اصلاح‌شده در مقایسه با بیوچار به‌طور چشم‌گیری افزایش یافت (جدول ۲). بنابراین افزایش چشم‌گیر درصد اکسیژن بیوچارها و به‌دنبال آن افزایش گروه‌های عاملی سطحی آن‌ها می‌تواند سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی شود.

تأثیر بیوچار و بیوچارهای اصلاح شده بر ویژگی‌های شیمیایی خاک پس از برداشت گیاه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر تیمارهای بیوچار بر ویژگی‌های شیمیایی خاک تحت کشت نیشکر، شامل pH، EC، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی کل و کربن آلی محلول (DOC) معنی‌دار بود (جدول ۳).

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

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		pH	هدایت الکتریکی (EC)	ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC)	کربن آلی کل خاک (OC)	کربن آلی محلول خاک (DOC)
تیمار	۳	۰/۲۷**	۱/۰۹**	۳۲/۶**	۰/۵۲**	۸۴۴/۷**
خطا	۸	۰/۰۰۳	۰/۰۶	۰/۱۵	۰/۰۰۴	۱۳/۶
ضریب تغییرات (٪)		۰/۷۵	۱۱/۱۷	۲/۷	۴/۳	۴/۹

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد pH خاک در تیمارهای کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۴). pH خاک تیمار شده با بیوچارهای اصلاح‌شده نسبت به خاک تیمار شده با بیوچارهای اولیه کم‌تر بود. در تیمارهای کاربرد بیوچار

اصلاح‌نشده، اصلاح‌شده با سیتریک اسید و اصلاح‌شده با سولفوریک اسید، pH خاک به‌ترتیب ۰/۲۴، ۰/۵۸ و ۰/۶۴ واحد کم‌تر از تیمار شاهد (بدون کاربرد بیوچار) بود. کاهش pH خاک در تیمارهای بیوچار می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله اکسیداسیون بیوچارها در خاک و تجزیه مولکول‌های آلی کوچک آن‌ها، افزایش کربن آلی محلول خاک (جدول ۴) و به‌دنبال آن افزایش فعالیت میکروبی و تولید اسیدهای آلی باشد. انحلال کربنات‌ها و محدود شدن هیدرولیز آن‌ها، نیز یکی از دلایل کاهش pH در خاک‌های آهکی تیمار شده با بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای پایین گزارش شده است (Liu and Zhang, 2012; El-Naggar *et al*., 2019). به‌طور مشابه خادم و همکاران (۱۳۹۷) گزارش کردند کاربرد سطوح ۰/۵ و ۱ درصد وزنی بیوچار ذرت در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس سبب کاهش معنی‌دار pH یک خاک رسی آهکی شد.

کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده سبب افزایش معنی‌دار EC خاک تحت کشت نیشکر نسبت به تیمار شاهد شد(جدول ۴). همچنین EC خاک تیمار شده با بیوچارهای اصلاح‌شده به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از خاک تیمار شده با بیوچار اصلاح‌نشده بود. بیش‌ترین مقدار افزایش EC مربوط به تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید بود، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌دار با تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید نداشت. افزایش EC خاک در اثر کاربرد بیوچارها به‌ویژه بیوچارهای اصلاح‌شده می‌تواند به‌دلیل آزاد شدن ترکیبات محلول (آلی و معدنی) موجود در ساختار بیوچار در محلول خاک می‌باشد (Mia *et al*., 2014). افزایش EC خاک در اثر کاربرد بیوچارها می‌تواند به‌دلیل آزاد شدن کاتیون‌های قلیایی موجود در ساختار بیوچار در محلول خاک باشد. Cimo *et al*. (2014) گزارش کردند در اثر کاربرد بیوچار در خاک، آزادشدن کاتیون‌های قلیایی که پیوند ضعیفی با ساختار بیوچار دارند می‌تواند EC خاک را افزایش دهد.

کاربرد بیوچار و بیوچارهای اصلاح‌شده سبب افزایش کربن آلی خاک شده است (جدول ۴). بیش‌ترین مقدار کربن آلی خاک مربوط به تیمار بیوچار اصلاح‌نشده بود که در مقایسه با تیمار شاهد ۲/۱ برابر افزایش یافت. افزایش کربن آلی کل خاک در اثر افزودن بیوچار به خاک به‌دلیل کربن بیوچارها می‌باشد، که توسط بسیاری از پژوهش‌گران نیز گزارش شده است (Ippolito *et al*., 2016; Karimi *et al*., 2020; Moradi and Karimi, 2021). تأثیر بیش‌تر بیوچار اصلاح‌نشده در افزایش کربن آلی خاک را می‌توان به محتوای کربن آلی بیش‌تر در این بیوچار نسبت داد. به‌طور مشابه با این پژوهش، کریمی و همکاران (۱۴۰۰) با بررسی تأثیر کاربرد سطح ۲ درصد وزنی بیوچار تهیه‌شده از بقایای ذرت، به یک خاک آهکی تحت کشت ذرت دریافتند کاربرد بیوچار سبب افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک شد.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده تیمارهای بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در مقایسه با تیمار شاهد شدند. میان تیمارهای بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده، تیمار اصلاح‌شده با سیتریک اسید تأثیر بیش‌تری بر افزایش CEC خاک داشت. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد کاربرد همه تیمارهای بیوچار سبب افزایش معنی‌دار کربن آلی محلول خاک شد (جدول ۴). بیشترین CEC خاک در تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید مشاهده شد که این می‌تواند به‌دلیل CEC بیش‌تر آن‌ها در مقایسه با بیوچار اصلاح‌نشده باشد دلیل افزایش CEC خاک در اثر کاربرد بیوچارها، بار سطحی بیوچار و وجود گروه‌های عاملی بر روی سطح آن است (Laird *et al*., 2010). Qayyum *et al*. (2021) نیز با انجام پژوهشی گزارش کردند اصلاح بیوچار با اسید کلریدریک سبب افزایش کارایی آن در افزایش CEC خاک شد.

کاربرد بیوچارهای اصلاح‌شده با سیتریک اسید و سولفوریک اسید نسبت به بیوچار اصلاح‌نشده تأثیر بیش‌تری در افزایش کربن آلی محلول خاک داشتند (جدول ۴). در اثر کاربرد بیوچارهای اصلاح‌نشده، اصلاح‌شده با سیتریک اسید و اصلاح‌شده با سولفوریک اسید، کربن آلی محلول خاک را به‌ترتیب ۵۳/۳، ۷۳/۱ و ۶۶/۱ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد بیوچار) افزایش یافت. نتایج مطالعه کریمی و همکاران (۱۴۰۰) نیز نشان داد کاربرد بیوچارهای اسیدی شده بقایای ذرت و باگاس نیشکر در مقایسه با بیوچارهای اصلاح‌نشده آن‌ها، به‌دلیل کربن تثبیت‌شده کم‌تر و نسبت مولی بالاتر H/C و O/C کربن آلی محلول بیش‌تری داشته و به همین دلیل اثر مثبت بیش‌تری در افزایش کربن آلی محلول خاک داشتند. افزایش کربن آلی محلول خاک در اثر کاربرد بیوچارها نشان می‌دهد که این بیوچارها دارای کربن قابل‌دسترس بوده که می‌تواند در خاک آزاد شود و منبع انرژی و تغذیه مناسبی برای ریزجانداران خاک است (Song *et al*., 2018).

تأثیر بیوچارهای اصلاح‌شده بر فراهمی عناصر غذایی خاک

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد تأثیر کاربرد تیمارهای بیوچار و بیوچارهای اصلاح‌شده بر فسفر قابل‌دسترس و پتاسیم قابل‌دسترس خاک معنی‌دار بود ولی اثر آن‌ها بر نیتروژن کل خاک معنی‌دار نبود (جدول ۵). همچنین اثر کاربرد تیمارهای بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده بر غلظت

آهن، منگنز و روی قابل‌دسترس خاک معنی‌دار بود در حالی‌که اثر آن‌ها بر غلظت مس قابل‌دسترس خاک معنی‌دار نبود (جدول ۵).

جدول ٤- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر ویژگی‌های شیمیایی خاک تحت کشت نیشکر

تیمارها	pH	EC ($dS\ m^{-1}$)	CEC ($cmolc\ kg^{-1}$)	OC (%)	کربن آلی محلول خاک ($mg\ kg^{-1}$)
C	۷/۹۳a	۱/۴۰c	۹/۳۸c	۰/۵۸c	۵۰/۶۸c
BC	۷/۶۹b	۲/۲۳b	۱۴/۵۲b	۱/۵۳a	۷۷/۶۸b
CA-BC	۷/۳۵c	۲/۷۶a	۱۷/۲۱a	۱/۲۸b	۸۷/۷۳a
SA-BC	۷/۲۹c	۲/۶۰ab	۱۴/۸۰b	۱/۳۳b	۸۴/۱۷ab

C: شاهد؛ BC: بیوچار باگاس نیشکر؛ CA-BC: بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید؛ SA-BC: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید.
EC: هدایت الکتریکی خاک؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی خاک؛ OC: کربن آلی خاک.
میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ($P\leq ۰/۰۵$) ندارند.

جدول ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای مختلف بر فراهمی عناصر غذایی پرمصرف خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		نیتروژن کل	فسفر قابل‌دسترس	پتاسیم قابل‌دسترس	آهن قابل‌دسترس	منگنز قابل‌دسترس	روی قابل‌دسترس	مس قابل‌دسترس
تیمار	۳	۰/۰^{ns}	۶۶/۳***	۸۲۸۸***	۵/۲***	۲/۱***	۰/۰۵۹***	۰/۰۰۳^{ns}
خطا	۸	۰/۰	۰/۴	۱۷۵	۰/۱۶	۰/۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات (٪)		۱۳/۲	۴/۴	۶/۵	۷/۳	۶/۱	۵/۴	۴/۹

^{ns} و *** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱ درصد

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد تیمارهای بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده سبب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر قابل‌دسترس خاک شد(جدول ۶). به‌طوری‌که بیش‌ترین غلظت فسفر قابل‌دسترس خاک در کاربرد تیمارهای بیوچارهای اسیدی و کم‌ترین مقدار آن در تیمار شاهد مشاهده شد. همچنین همه تیمارهای بیوچار سبب افزایش معنی‌دار پتاسیم قابل‌دسترس در خاک نسبت به تیمار شاهد شدند (جدول ۶). بیش‌ترین مقدار افزایش غلظت پتاسیم قابل‌دسترس خاک مربوط به تیمار بیوچار اصلاح‌نشده بود که مقدار آن ۱/۸۵ برابر تیمار شاهد (بدون کاربرد بیوچار) بود. افزایش فسفر قابل‌دسترس خاک در اثر کاربرد بیوچارها می‌تواند به‌دلیل کاهش مکان‌های جذب فسفر در خاک باشد؛ چرا که بیوچارها می‌توانند با کاتیون‌های خاک ازجمله کلسیم که فسفر را جذب می‌کنند، پیوند برقرار کرده و با کاهش مکان‌های جذب فسفر در خاک، غلظت قابل‌دسترس آن در خاک را افزایش دهد (Gao *et al*., 2018). Manolikaki and Diamadopoulos (2019) با بررسی تأثیر کاربرد بیوچار تهیه‌شده از سبوس برنج، در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، به یک خاک آهکی تحت کشت ذرت دریافتند کاربرد بیوچار غلظت فسفر و پتاسیم قابل‌دسترس خاک را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. افزایش پتاسیم قابل‌دسترس خاک می‌تواند به‌دلیل افزوده شدن پتاسیم موجود در ساختار بیوچارها به خاک باشد. همچنین افزایش فعالیت میکروبی خاک نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل افزایش غلظت این عناصر در اثر کاربرد تیمارهای مختلف بیوچار باشد. دلیل تأثیر بیش‌تر بیوچار اصلاح‌نشده نسبت به بیوچارهای اصلاح‌شده در افزایش غلظت پتاسیم قابل‌دسترس خاک می‌تواند غلظت بیش‌تر پتاسیم آن (جدول ۲) و آزاد شدن پتاسیم در خاک باشد. نتایج پژوهش Song *et al*. (2018) نیز نشان داد کاربرد بیوچار ذرت، در یک خاک آهکی تحت کشت ذرت، سبب افزایش معنی‌دار پتاسیم قابل‌دسترس خاک شد.

مقایسه میانگین داده‌های مربوط به غلظت آهن قابل‌دسترس خاک، نشان داد که کاربرد همه تیمارهای بیوچار و اصلاح‌شده سبب افزایش معنی‌دار غلظت آهن قابل‌دسترس خاک شد (جدول ۶). به‌طوری‌که کم‌ترین غلظت آهن قابل‌دسترس خاک مربوط به تیمار شاهد بود. نتایج همچنین نشان داد اگرچه غلظت آهن قابل‌دسترس خاک در تیمارهای بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید و سولفوریک اسید بیش‌تر از تیمار بیوچار اصلاح‌نشده بود، اما تفاوت آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود.

نتایج نشان داد در حالی‌که کاربرد تیمار بیوچار اصلاح‌نشده اثر معنی‌داری بر غلظت منگنز قابل‌دسترس خاک نداشت، اما کاربرد بیوچارهای اصلاح‌شده سبب افزایش معنی‌دار غلظت منگنز قابل‌دسترس خاک تحت کشت نیشکر، نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۶). بیش‌ترین مقدار افزایش غلظت منگنز قابل‌دسترس خاک تحت کشت نیشکر مربوط به تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید بود. بدین

ترتیب که غلظت منگنز قابل‌دسترس خاک در این تیمار، در مقایسه با تیمار شاهد، ۴۶/۷ درصد افزایش یافت. مقایسه میانگین اثر تیمارهای بیوچار بر غلظت روی قابل‌دسترس خاک نشان داد کاربرد همه تیمارهای بیوچار سبب افزایش معنی‌دار غلظت روی قابل‌دسترس خاک شد (جدول ۶). بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت روی قابل‌دسترس خاک به‌ترتیب مربوط به تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید و تیمار شاهد بود (جدول ۶).

آزاد شدن احتمالی آهن، منگنز و روی از بیوچارها، کاهش معنی‌دار pH خاک، افزایش CEC و کربن آلی محلول خاک (جدول ۴) می‌توانند ازجمله دلایل افزایش غلظت قابل‌دسترس آهن، روی و منگنز در خاک، در اثر کاربرد تیمارهای بیوچار (به‌ویژه بیوچارهای اسیدی شده) باشند. یکی دیگر از دلایل احتمالی بیش‌تر بودن آهن، منگنز و روی قابل‌دسترس خاک در تیمارهای بیوچار، می‌تواند بهبود فعالیت میکروبی و افزایش فعالیت ریزجانداران خاک و احتمالاً تولید اسیدهای آلی توسط آن‌ها و همچنین ترشح اسیدهای آلی توسط ریشه گیاه و در نتیجه افزایش حلالیت این عناصر، در خاک تحت کشت باشد. به‌طور مشابه نتایج مطالعه کریمی و همکاران (۱۴۰۰) نشان داد کاربرد بیوچارهای اسیدی شده سبب افزایش معنی‌دار فراهمی عناصر غذایی کم‌مصرف (آهن و روی) در یک خاک آهکی و افزایش جذب آن‌ها توسط گیاه ذرت شد (کریمی و همکاران، ۱۴۰۰). افزایش غلظت قابل‌دسترس عناصر غذایی کم‌مصرف در خاک آهکی تیمار شده با بیوچارهای تهیه‌شده از زیست‌توده‌های مختلف توسط Ippolito *et al.* (2016) نیز گزارش شده است.

جدول ٦- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر عناصر غذایی خاک تحت کشت نیشکر

تیمارها	فسفر قابل‌دسترس	پتاسیم قابل‌دسترس	آهن قابل‌دسترس	منگنز قابل‌دسترس	روی قابل‌دسترس
	(mg kg^{-1})				
C	۸/۲c	۱۴۸/۷c	۳/۵۸b	۳/۵۱c	۰/۴۹c
BC	۱۴/۱b	۲۷۴/۷a	۵/۹۲a	۳/۴۳c	۰/۷۰b
CA-BC	۱۸/۲a	۱۹۲/۰b	۶/۳۸a	۵/۱۵a	۰/۸۳a
SA-BC	۱۸/۱a	۱۹۴/۰b	۶/۳۱a	۴/۵۶b	۰/۶۹b

C: شاهد؛ BC: بیوچار باگاس نیشکر؛ CA-BC: بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید؛ SA-BC: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید.

تأثیر بیوچار و بیوچارهای اصلاح‌شده بر رشد و کلروفیل گیاه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده بر ارتفاع و وزن خشک اندام هوایی نیشکر معنی‌دار بود ولی اثر آن‌ها بر کلروفیل a، b و کاروتنوئید معنی‌دار نبود (جدول ۷).

جدول ۷- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای مختلف بر رشد و کلروفیل گیاه

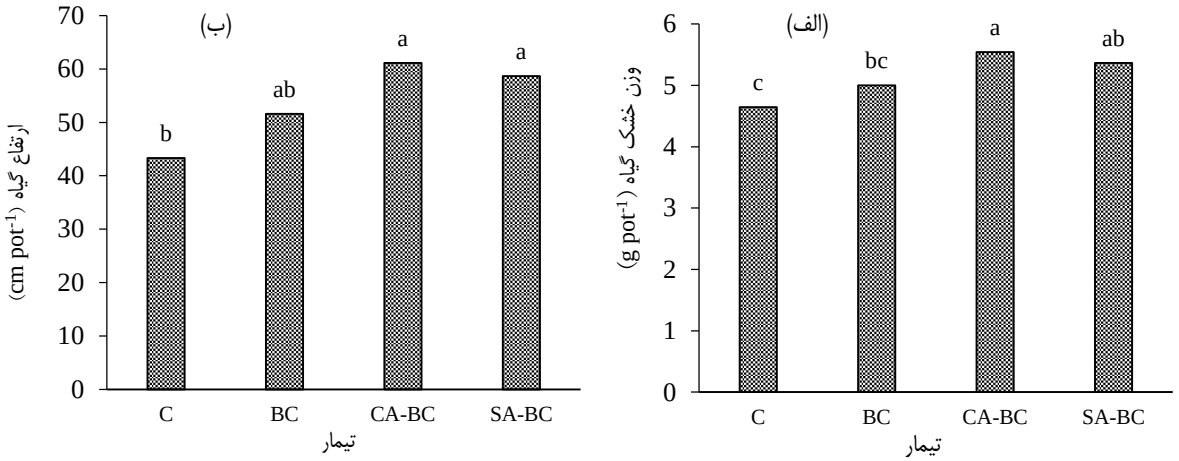
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		ارتفاع	وزن خشک	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئید
تیمار	۳	۱۹۱/۸*	۰/۴۷*	۰/۰ns	۰/۰ns	۰/۰ns
خطا	۸	۲۸/۵	۰/۰۶	۰/۰	۰/۰	۰۰/
ضریب تغییرات (٪)		۹/۸	۴/۹	۳/۳	۱۵/۴	۶/۹

ns و * به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد تیمارهای بیوچارهای اصلاح‌شده سبب افزایش معنی‌دار ارتفاع و وزن خشک اندام هوایی گیاه شد (شکل ۱). کاربرد تیمار بیوچار اصلاح‌نشده اگرچه سبب افزایش وزن ارتفاع و وزن خشک اندام هوایی گیاه شد، اما این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نبود. بیوچارهای اصلاح‌شده اثر بیش‌تری بر افزایش ارتفاع گیاه و وزن خشک گیاه داشتند. به‌طور کلی بیش‌ترین ارتفاع و وزن خشک اندام هوایی گیاه در تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید و سولفوریک اسید مشاهده شد که در این تیمارها ارتفاع گیاه به‌ترتیب ۱۹/۴ و ۱۵/۶ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد بود. همچنین در تیمارهای کاربرد بیوچارهای اصلاح‌شده با سیتریک اسید و سولفوریک اسید وزن خشک اندام هوایی گیاه به‌ترتیب ۱۰/۸ و ۷/۲ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد بود.

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد بیوچارها سبب افزایش کربن آلی کل و محلول خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (جدول ۴) و افزایش فراهمی عناصر غذایی در خاک مورد مطالعه شد. بنابراین افزایش ارتفاع و وزن خشک گیاه را می‌توان به بهبود ویژگی‌های

خاک و افزایش فراهمی عناصر غذایی در خاک و افزایش جذب آن‌ها توسط گیاه نسبت داد. Yang *et al*. (2015) با انجام پژوهشی در چین تأثیر کاربرد سطوح مختلف بیوچار بر ویژگی‌های خاک، رشد اندام هوایی نیشکر (واریته ROC22) را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد کاربرد سطوح مختلف بیوچار سبب افزایش معنی‌دار ماده آلی و غلظت فسفر و پتاسیم قابل‌دسترس خاک و عملکرد زیست‌توده اندام هوایی، گیاه شد. همچنین Taskin *et al*. (2019) گزارش کردند کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با اسید در مقایسه با بیوچار اصلاح‌نشده در یک خاک آهکی اثر معنی‌داری در افزایش وزن خشک گیاهان لوبیا و سویا داشت.



شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر وزن خشک (الف) و ارتفاع (الف) نیشکر

C: شاهد؛ BC: بیوچار باگاس نیشکر؛ CA-BC: بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید؛ SA-BC: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری (P≤۰/۰۵) ندارند.

تأثیر بیوچارهای اصلاح‌شده بر جذب عناصر غذایی گیاه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده بر جذب عناصر غذایی پرمصرف (نیتروژن، فسفر، پتاسیم) و کم‌مصرف (آهن، روی، منگنز و مس) در اندام هوایی نیشکر معنی‌دار بود (جدول ۸).

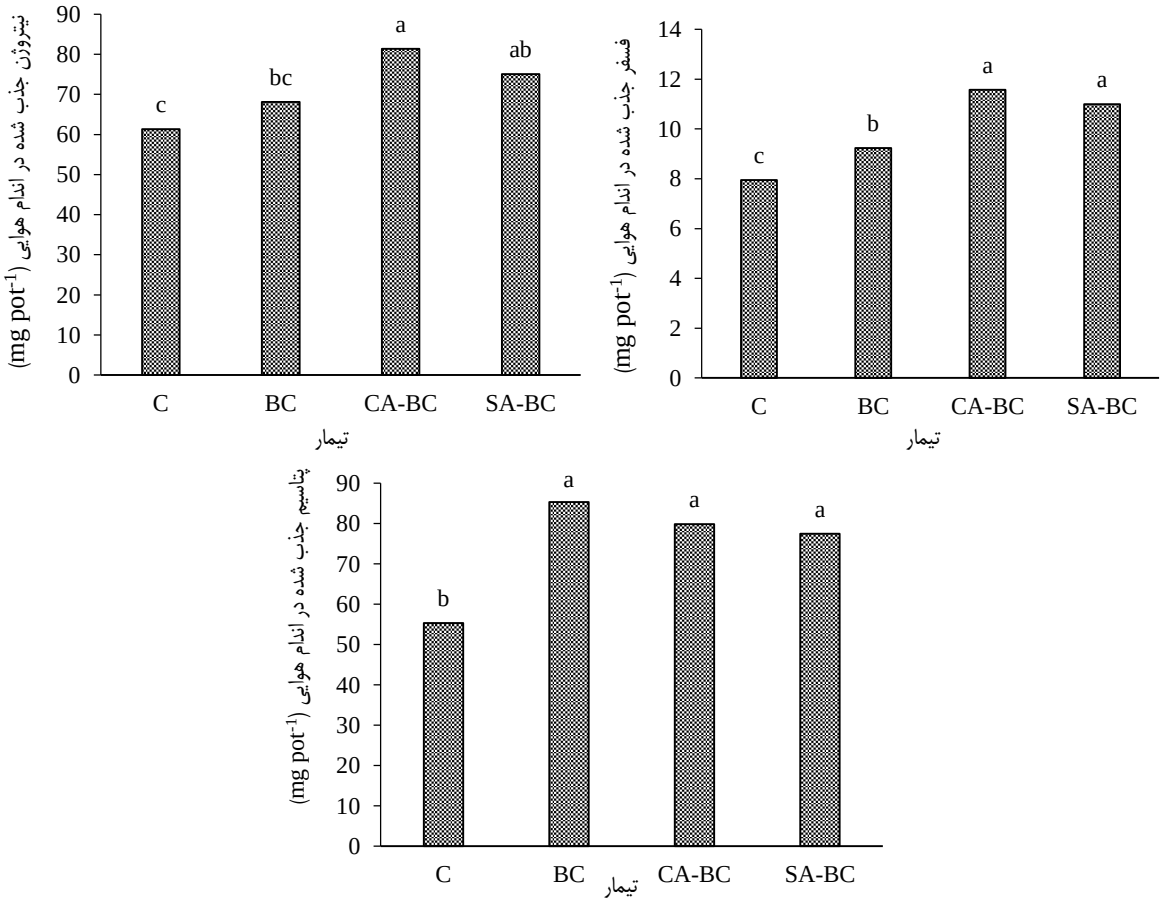
جدول ۸- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای مختلف بر عناصر غذایی جذب‌شده در نیشکر

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		نیتروژن جذب‌شده	فسفر جذب‌شده	پتاسیم جذب‌شده	آهن جذب‌شده	منگنز جذب‌شده	روی جذب‌شده	مس جذب‌شده
تیمار	۳	۲۲۵*	۸/۳***	۵۲۲***	۳۵۳۹۴***	۱۰۳۷***	۴۱۵***	۲۵۰**
خطا	۸	۳۰/۶	۰/۳	۲۱/۵	۱۸۷۶	۷۸/۵	۶/۷	۲۶/۵
ضریب تغییرات (٪)		۷/۷	۵/۷	۶/۲	۷/۸	۶/۲	۳/۲	۵/۹

*، **و *** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵، ۱ و ۰/۱ درصد

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد نیتروژن جذب‌شده در اندام هوایی نیشکر در اثر کاربرد تیمارهای بیوچارهای اصلاح‌شده با سیتریک اسید و سولفوریک اسید به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۲ الف). بیش‌ترین مقدار نیتروژن جذب‌شده در اندام هوایی گیاه مربوط به تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید بود. به‌طور کلی نتایج نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر بیوچارهای اصلاح‌شده به‌ویژه بیوچار اصلاح‌شده سیتریک اسید نسبت به بیوچار اصلاح‌نشده بر جذب نیتروژن اندام هوایی نیشکر بود. نتایج نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر بیوچارهای اصلاح‌شده به‌ویژه بیوچارهای اصلاح‌شده سیتریک اسید و آهن نسبت به بیوچار اصلاح‌نشده در جذب نیتروژن اندام هوایی نیشکر بود. این نتیجه احتمالاً به‌دلیل بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک، غلظت بیش‌تر نیتروژن و همچنین نسبت C/N کم‌تر بیوچارهای اصلاح‌شده (جدول ۲)، بهبود معدنی‌شدن نیتروژن خاک و به دنبال آن افزایش جذب نیتروژن در اندام هوایی، در اثر کاربرد تیمارهای بیوچار اصلاح‌شده به‌ویژه بیوچارهای اصلاح‌شده با سیتریک اسید بود. نتایج مطالعه پیشین Quirk *et al*. (2012) نیز نشان داد کاربرد بیوچار بقایای نیشکر، غلظت نیتروژن پهنک برگ و عملکرد نیشکر را افزایش داد.

کاربرد تیمارهای بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده سبب افزایش معنی‌دار فسفر جذب‌شده در اندام هوایی نیشکر شدند (شکل ۲ ب). اگرچه بیش‌ترین فسفر جذب‌شده در اندام هوایی نیشکر، در بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید مشاهده شد با این حال تفاوت فسفر جذب‌شده میان دو تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید و سولفوریک اسید از نظر آماری معنی‌دار نبود. نتایج همچنین نشان داد بیوچارهای اصلاح‌شده در مقایسه با بیوچار اصلاح‌نشده در بهبود جذب فسفر در اندام هوایی نیشکر مؤثرتر بودند. افزایش جذب فسفر در اندام هوایی گیاه، در اثر کاربرد بیوچار و بیوچارهای اصلاح‌شده به‌ویژه بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید را می‌توان به افزایش فسفر قابل‌دسترس خاک در تیمار کاربرد آن نسبت داد (جدول ۶). افزایش معنی‌دار غلظت فسفر در اندام هوایی کاهو در اثر کاربرد بیوچار نیز گزارش شده است (Werner *et al.*, 2018). همچنین مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد پتاسیم جذب‌شده در اندام هوایی نیشکر در اثر کاربرد تیمارهای بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۲ ج). بیش‌ترین پتاسیم جذب‌شده در اندام هوایی در تیمار بیوچار اصلاح‌نشده مشاهده گردید که از لحاظ آماری با تیمارهای بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید و سولفوریک اسید اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.



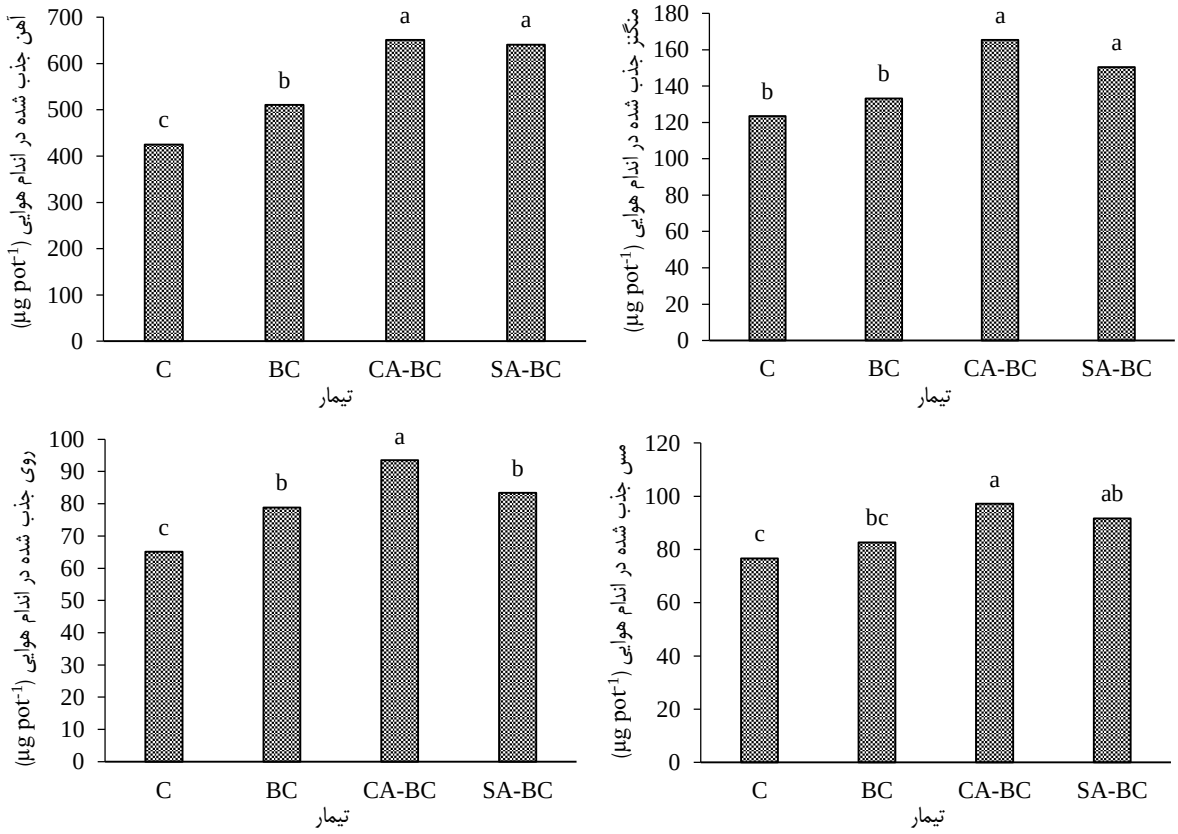
شکل ۲- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر نیتروژن جذب‌شده (الف)، فسفر جذب‌شده (ب) و پتاسیم جذب‌شده (ج) در اندام هوایی نیشکر

C: شاهد؛ BC: بیوچار باگاس نیشکر؛ CA-BC: بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید؛ SA-BC: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید
میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ($P\leq ۰/۰۵$) ندارند.

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد کاربرد بیوچارهای اصلاح‌شده سبب افزایش معنی‌دار آهن، منگنز، روی و مس جذب‌شده در اندام هوایی نیشکر شد (شکل ۳). بیش‌ترین آهن جذب‌شده در اندام هوایی در تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید مشاهده شد اما از لحاظ آماری اختلاف معنی‌دار با تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید نداشت (شکل ۳). تفاوت معنی‌داری بین منگنز جذب‌شده در اندام هوایی در دو تیمار شاهد و بیوچار اصلاح‌نشده، مشاهده نشد. بیش‌ترین روی و مس جذب‌شده در اندام هوایی در اثر کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید مشاهده شد.

افزایش جذب عناصر غذایی کم‌مصرف در اندام هوایی در اثر تیمار بیوچار اصلاح‌شده به‌ویژه در تیمار بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک

اسید احتمالاً به‌دلیل افزایش فراهمی آن‌ها در خاک، در اثر کاربرد این تیمارها بوده است (جدول ۶). به‌طور مشابه با این پژوهش، Sahin *et al.* (2017) گزارش کردند کاربرد بیوچارهای اسیدی شده با تیمارهای مختلف در یک خاک آهکی جذب روی در ذرت را به‌طور معنی‌داری افزایش دادند. افزایش جذب مس در تیمارهای کاربرد بیوچار مربوط به افزایش وزن خشک گیاه بود، چرا که تأثیر کاربرد بیوچارها بر مس قابل‌دسترس خاک معنی‌دار نبود (جدول ۵).



شکل ۳- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر عناصر غذایی کم‌مصرف جذب‌شده در اندام هوایی نیشکر

C: شاهد؛ BC: بیوچار باگاس نیشکر؛ CA-BC: بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید؛ SA-BC: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری (P≤۰/۰۵) ندارند

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد بیوچار و هر دو نوع بیوچار اصلاح‌شده سبب بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک شد. اثر بیوچارهای اصلاح‌شده بر ویژگی‌های شیمیایی و فراهمی فسفر و عناصر غذایی کم‌مصرف آهن، منگنز و روی در خاک بیش‌تر از بیوچار اصلاح‌نشده بود. کارایی بیوچارهای اصلاح‌شده در بهبود ماده خشک گیاه، جذب فسفر و عناصر غذایی کم‌مصرف، بیش‌تر از بیوچار اصلاح‌نشده بود. همچنین تأثیر بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید در بهبود رشد گیاه و جذب عناصر غذایی بیش‌تر از بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید بود. به‌طور کلی نتایج نشان داد بیوچار تهیه‌شده از باگاس نیشکر و بیوچار اصلاح‌شده (به‌ویژه بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید) آن می‌توانند اصلاح‌کننده‌های آلی مناسبی برای بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک به‌ویژه ماده آلی خاک، فراهمی عناصر غذایی و رشد نیشکر در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک باشند و اسیدی کردن بیوچار می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش کارآیی آن در بهبود ویژگی‌های خاک‌های آهکی و رشد و تغذیه گیاه باشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی تأثیر بیوچارهای اصلاح‌شده بر همچنین ویژگی‌های شیمیایی خاک و عملکرد نیشکر در دراز مدت و در شرایط مزرعه‌ای بررسی شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد".

منابع

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

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

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

REFERENCES

Alvarez-Campos, O., Lang, T. A., Bhadha, J. H., McCray, J. M., Glaz, B. & Daroub, S. H. (2018). Biochar and mill ash improve yields of sugarcane on a sand soil in Florida. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 253: 122-130.

Carter M. R. & Gregorich, E. G. 2008. Soil Sampling and Methods of Analysis (2nd Ed.). CRC Press. Boca Raton, Florida, 1204p.

El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., Zimmerman, A. R., Ahmad, M., Shaheen, S. M. & Ok, Y. S. (2019). Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337: 536-554.

Fierro, V., Muñiz, G., Basta, A. H., El-Saied, H., & Celzard, A. (2010). Rice straw as precursor of activated carbons: Activation with ortho-phosphoric acid. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 27-34.

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.

Gao, S., DeLuca, T. H. & Cleveland, C. C. (2018). Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*. 645: 463-472.

Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V. & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. *Agriculture. Ecosystems and Environment*, 206: 46-59.

Motsara, M. R. (2015). Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis. Scientific Publishers.

Ippolito, J. A., Ducey, T. F., Cantrell, K. B., Novak, J. M. & Lentz, R. D. (2016). Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics. *Chemosphere*, 142: 184–191.

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

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)

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, 450-459.

Khadem, A. & Raiesi, F. 2017. Responses of microbial performance and community to corn biochar in calcareous sandy and clayey soils. *Applied Soil Ecology*, 114: 16-27.

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)

Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R. and Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4): 436-442.

Liu X. H. and Zhang X. C. (2012). Effect of biochar on pH of alkaline soils in the Loess Plateau: results from

incubation experiments. *International Journal of Agriculture and Biology*, 4: 745–750.
Liu, C., Sun, B., Zhang, X., Liu, X., Drosos, M., Li, L. & Pan, G. (2021). The water-soluble pool in biochar dominates maize plant growth promotion under biochar amendment. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, pp.1466-1476.
Liu, S., Meng, J., Jiang, L., Yang, X., Lan, Y., Cheng, X., & Chen, W. (2018). Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types. *Applied Soil Ecology*, 116: 12-22.
Manolikaki, I., & Diamadopoulos, E. (2019). Positive effects of biochar and biochar-compost on maize growth and nutrient availability in two agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *50*(5), 512-526.
Mia, S., van Groenigen, J. W., van de Voorde, T. F. J., Oram, N. J., Bezemer, T. M., & Mommer, L. (2014). Biochar application rate affects biological nitrogen fixation in red clover conditional on potassium availability. *Agricultur Ecosystems & Environ*ment, 191, 83–91.
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*, 22(1): 465-474.
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.
Mukherjee, A. and Lal, R. 2013. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3: 313–339.
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.
Qayyum, M.F., Haider, G., Iqbal, M., Hameed, S., Ahmad, N., Rehman, M.Z., Majeed, A., Rizwan, M. & Ali, S. (2021). Effect of alkaline and chemically engineered biochar on soil properties and phosphorus bioavailability in maize. *Chemosphere*, 266, p.128980.
Quirk, R. G., Van Zwieten, L., Kimber, S., Downie, A., Morris, S. & Rust, J. 2012. Utilization of biochar in sugarcane and sugar-industry management. *Sugar Tech*, 14(4): 321-326.
Sahin, O., Taskin, M. B., Kaya, E. C., Atakol, O., Emir, E., Inal, A. & Gunes, A. (2017). Effect of acid modification of biochar on nutrient availability and maize growth in a calcareous soil. *Soil Use and Management*, 33(3): 447-456.
Siedt, M., Schäffer, A., Smith, K. E., Nabel, M., Roß-Nickoll, M. & van Dongen, J. T. (2020). Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides. *Science of the Total Environment*, 751: 141607.
Singh, R., Babu, J. N., Kumar, R., Srivastava, P., Singh, P. & Raghubanshi, A. S. (2015). Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: an ecological perspective. *Ecological Engineering*, 77: 324–347.
Song, D., Tang, J., Xi, X., Zhang, S., Liang, G., Zhou, W., & Wang, X. (2018). Responses of soil nutrients and microbial activities to additions of maize straw biochar and chemical fertilization in a calcareous soil. *European Journal of Soil Biology*, 84: 1-10.
Taskin, M. B., Kadioglu, Y. K., Sahin, O., Inal, A., & Gunes, A. (2019). Effect of acid modified biochar on the growth and essential and non-essential element content of bean, chickpea, soybean, and maize grown in calcareous soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *50*(13), 1604-1613.
Wellburn, A. R., & Lichtenthaler, H. (1984). Formulae and program to determine total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. In *Advances in Photosynthesis Research: Proceedings of the VIth International Congress on Photosynthesis, Brussels, Belgium*, August 1–6, 1983 Volume 2 (pp. 9-12). Springer Netherlands.
Werner, S., Kätzl, K., Wichern, M., Buerkert, A., Steiner, C. & Marschner, B. (2018). Agronomic benefits of biochar as a soil amendment after its use as waste water filtration medium. *Environmental pollution*, 233, pp.561-568.
Yang, L., Liao, F., Huang, M., Yang, L. & Li, Y. (2015). Biochar improves sugarcane seedling root and soil properties under a pot experiment. *Sugar Tech*, 17(1): 36-40.
Yin, D., Wang, X., Peng, B., Tan, C. & Ma, L. Q. 2017. Effect of biochar and Fe-biochar on Cd and As mobility and transfer in soil-rice system. *Chemosphere*, 186: 928-937.
Yu, H., Zou, W., Chen, J., Chen, H., Yu, Z., Huang, J., Tang, H., Wei, X. & Gao, B. (2019). Biochar

amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal of Environmental Management*, 232: 8-21.

Zhang, Y., Wang, J., & Feng, Y. (2021). The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review. *Catena*, *202*, 105284.