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

Soil Properties of a Calcareous Soil and Cationic Nutrient Uptake by *Zea Mays* L. as Influenced by Sheep Manure and Rice Husk Biochars

Mahdi Najafi-Ghiri[1]✉ | Hamid Reza Boostani[2] | Ehsan Bijanzadeh[3]

1. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran. E-mail: mnajafighiri@shirazu.ac.ir,
2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran. E-mail: hrboostani@shirazu.ac.ir
3. Department of Agroecology, Faculty of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran. E-mail: bijanzd@shirazu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Aug. 10, 2024

Revised: Aug. 27, 2024

Accepted: Oct. 15, 2024

Published online: Jan. 2025

Keywords:
Balanced Cation Uptake,
Calcium to Potassium Ratio,
Soluble Calcium,
Soluble Potassium,
Soluble Sodium.

ABSTRACT

The balanced absorption of cations in calcareous soils is influenced by the high concentrations of calcium and sodium, while the addition of amendments like biochars can further modify the cation absorption dynamics. This study evaluated the impact of adding biochars derived from sheep manure and rice husks (produced at 300°C and 500°C) to calcareous soil on various soil properties (pH, EC, CEC, and soluble and exchangeable K, Ca, and Na), as well as on corn growth and the uptake of these cations. Results indicated that sheep manure biochar exhibited higher pH, electrical conductivity (EC), and concentrations of potassium, calcium, and sodium compared to rice husk biochar, with these properties intensifying as production temperature increased. The application of sheep manure biochar raised soil EC by 0.4 dS m^{-1} and increased soluble cation concentrations. Conversely, rice husk biochar selectively enhanced the soluble potassium concentration by 0.7 mmol L^{-1}. Both types of biochar reduced the calcium-to-potassium ratio (from 4.44 to 0.97–1.64) and increased exchangeable potassium and sodium levels (by 5– 10 mmol kg^{-1} and 0.5–1.5 mmol kg^{-1}, respectively). Corn yield improved significantly, ranging from 16% to 160%, with biochar application. Although sheep manure biochar enhanced cation content in corn shoots compared to rice husk biochar, it decreased the calcium-to-potassium, potassium-to-sodium, and calcium-to-sodium ratios in plant tissues. Overall, rice husk biochars proved more effective than sheep manure biochars due to their lower salinity, higher potassium content, reduced sodium levels, and the promotion of a more balanced cation absorption by plant roots.

Cite this article: Najafi-Ghiri, M., Boostani, H. R., & Bijanzadeh, E. (2025) Soil Properties of a Calcareous Soil and Cationic Nutrient Uptake by Zea Mays L. as Influenced by Sheep Manure and Rice Husk Biochars, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (11), 2209-2223. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380679.669777

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380679.669777

EXTENDED ABSTRACT

Background and purpose:

The balanced absorption of cationic nutrient in calcareous soils can be affected by the high concentration of calcium and sodium, and the addition of compounds such as biochar, which has a variety of soluble cation contents, can make the absorption of cations more complicated.

Materials and Methods:

In the current research, the effect of adding two percent (w/w) of biochars prepared from sheep manure and rice husk at two temperatures of 300 and 500°C to a calcareous soil with loamy sand texture on its pH, electrical conductivity, cation exchange capacity, concentrations of calcium, potassium and sodium in soil solution and the exchangeable forms, the ratio of these cations in soil solution as well as the dry matter yield and absorption of calcium, potassium and sodium by *Zea mays* L. and comparison of these cations ration in plant shoot were investigated in a greenhouse experiment.

Findings:

The results indicated that sheep manure biochar had higher values of pH, electrical conductivity, potassium, calcium and sodium than rice husk biochar and these characteristics increased with the increase of production temperature from 300 to 500°C. The application of sheep manure biochar increased the electrical conductivity and the concentration of soluble calcium, potassium and sodium, while rice husk biochar increased the concentration of soluble potassium and did not affect the concentration of soluble calcium and sodium. With the application of all biochars, the ratio of calcium to potassium decreased, but this was more with the application of sheep manure biochar. The ratio of potassium to sodium also increased with the use of all biochars, and the effect of rice husk biochar was greater. The amount of exchangeable potassium and sodium also increased with the use of biochars, while the amount of exchangeable calcium decreased only with the use of sheep manure biochar produced at 500°C. The dry matter yield of corn increased from 16 to 160% with the use of different biochars, with the use of sheep manure and rice husk biochars produced at 300°C, respectively. The use of sheep manure biochar increased the amount of calcium, potassium and sodium in corn compared to rice husk biochar, but decreased the ratio of calcium to potassium, potassium to sodium and calcium to sodium. A significant relationship between corn yield and the ratio of calcium to potassium in corn was obtained.

Conclusion:

In general, it can be concluded that rice husk biochars have been more effective than sheep manure biochars in improving corn growth in the studied soil and this can be a result of less salinity, more potassium and less sodium addition into the soil and more balanced absorption of cations by the roots.

Author Contributions

Conceptualization, Mahdi Najafi-Ghiri; methodology, Hamid Reza Boostani; software, Mahdi Najafi-Ghiri; validation, Mahdi Najafi-Ghiri, Hamid Reza Boostani and Ehsan Bijanzadeh; formal analysis, Mahdi Najafi-Ghiri; investigation, Mahdi Najafi-Ghiri, Hamid Reza Boostani and Ehsan Bijanzadeh; resources, Mahdi Najafi-Ghiri; data curation, Mahdi Najafi-Ghiri, Hamid Reza Boostani and Ehsan Bijanzadeh; writing—original draft preparation, Mahdi Najafi-Ghiri; writing—review and editing, Mahdi Najafi-Ghiri, Hamid Reza Boostani and Ehsan Bijanzadeh; visualization, Mahdi Najafi-Ghiri; supervision, Mahdi Najafi-Ghiri, Hamid Reza Boostani and Ehsan Bijanzadeh ; project administration, Mahdi Najafi-Ghiri; funding acquisition, Mahdi Najafi-Ghiri. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript."

Data Availability Statement

Data is available on request from the authors.

Acknowledgements

This work was supported by Shiraz University.

Ethical considerations

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

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، شماره ۱۱ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

ویژگی‌های یک خاک آهکی و جذب کلسیم، پتاسیم و سدیم به‌وسیله ذرت (*Zea mays* L.) با کاربرد بیوچارهای کود گوسفند و سبوس برنج

مهدی نجفی‌قیری[۱]✉ | حمیدرضا بوستانی[۲] | احسان بیژن‌زاده[۳]

۱. نویسنده مسئول، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، داراب، ایران. رایانامه: mnajafighiri@shirazu.ac.ir

۲. بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، داراب، ایران. رایانامه: hrboostani@shirazu.ac.ir

۳. بخش اگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، داراب، ایران. رایانامه: bijanzd@shirazu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۲۴

تاریخ انتشار: بهمن ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
پتاسیم محلول،
جذب متوازن کاتیون‌ها،
سدیم محلول،
کلسیم محلول،
نسبت کلسیم به پتاسیم.

چکیده

جذب متعادل کاتیون‌ها در خاک‌های آهکی می‌تواند تحت تأثیر غلظت بالای کلسیم و سدیم قرار گیرد و افزودن ترکیباتی مانند بیوچارها می‌تواند وضعیت جذب کاتیون‌ها را پیچیده‌تر کند. در تحقیق حاضر تأثیر افزودن بیوچارهای کود گوسفند و سبوس برنج در دو درجه حرارت ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس به یک خاک آهکی بر pH، قابلیت هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی و غلظت پتاسیم، کلسیم و سدیم محلول و تبادلی خاک و رشد ذرت و جذب پتاسیم، کلسیم و سدیم مورد بررسی قرار گرفت. بیوچار کود گوسفند دارای pH، قابلیت هدایت الکتریکی، پتاسیم، کلسیم و سدیم بیشتری نسبت به بیوچار سبوس برنج بود و با افزایش درجه حرارت تولید، مقدار آنها افزایش یافت. کاربرد بیوچارهای کود گوسفند قابلیت هدایت الکتریکی (تا ۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر) و غلظت کاتیون‌های محلول را افزایش داد ولی بیوچار سبوس برنج فقط غلظت پتاسیم محلول را افزایش داد (تا ۰/۷ میلی‌مول بر لیتر). با کاربرد همه بیوچارها، نسبت کلسیم به پتاسیم کاهش یافت (از ۴/۴۴ به ۰/۹۷ تا ۱/۶۴). مقدار پتاسیم و سدیم تبادلی با کاربرد بیوچارها افزایش نشان داد (به‌ترتیب تا ۱۰-۵ و ۱/۵-۰/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم). عملکرد ذرت با کاربرد بیوچارها از ۱۶ تا ۱۶۰ درصد افزایش یافت. کاربرد بیوچار کود گوسفند مقدار کاتیون‌ها را در شاخساره ذرت نسبت به بیوچار سبوس برنج افزایش اما نسبت کلسیم به پتاسیم، پتاسیم به سدیم و کلسیم به سدیم را کاهش داد. به‌طور کلی، بیوچارهای سبوس برنج به‌دلیل شوری کمتر، پتاسیم بیشتر و سدیم کمتر و جذب متعادل کاتیون‌ها توسط ریشه مؤثرتر از بیوچارهای کود گوسفند هستند.

استناد: نجفی قیری؛ مهدی، بوستانی؛ حمیدرضا، بیژن‌زاده؛ احسان، (۱۴۰۳) ویژگی‌های یک خاک آهکی و جذب کلسیم، پتاسیم و سدیم به‌وسیله ذرت (Zea mays L.) با کاربرد بیوچارهای کود گوسفند و سبوس برنج، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۱۱)، ۲۲۲۳-۲۲۰۹.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380679.669777

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380679.669777

مقدمه

امروزه بیوچارها به‌دلیل ویژگی‌های منحصر بفرد خود جهت اهداف زیست‌محیطی و کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بیوچارها حاصل گرماکافت[1] آهسته ترکیبات آلی در درجه حرارت بالا و در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن محدود می‌باشند؛ در این فرآیند، ترکیبات کربنی آلیفاتیک به آروماتیک با پایداری بیشتر نسبت به تجزیه میکروبی تبدیل می‌شوند (Lehmann & Joseph, 2009).

خاک‌های آهکی بخش وسیعی از اراضی ایران را پوشش می‌دهند. در این خاک‌ها مقدار کربنات کلسیم خاک از کمتر از ۱۰ درصد تا بیش از ۷۰ درصد متغیر است (نجفی‌قیری, 2010). در محلول خاک‌های آهکی معمولاً مقدار کلسیم به فراوانی یافت می‌شود. غلظت بالای کلسیم نسبت به پتاسیم در خاک‌های آهکی می‌تواند سبب رقابت بین کاتیون‌ها شده و جذب عناصر را توسط ریشه گیاه مختل کند (Najafi-Ghiri et al., 2017; Najafi-Ghiri, Mirsoleimani, et al., 2022). بیوچارها به دلیل دارا بودن مقدار زیادی املاح کلسیم، پتاسیم و سدیم می‌باشند اما اطلاعات در مورد تأثیر آنها بر ترکیب شیمیایی محلول خاک‌های آهکی و در نتیجه جذب متعادل عناصر توسط گیاه ناچیز است.

پیشینه پژوهش

با توجه به ترکیب شیمیایی بسیار متفاوت مواد اولیه تولید بیوچارها، آنها دارای دامنه وسیعی از ویژگی‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی (مانند pH، شوری، ظرفیت تبادل کاتیونی، سطح ویژه، گروه‌های عاملی و ترکیب عنصری (مقدار کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سدیم و فسفر قابل استفاده) می‌باشند. به‌علاوه، شرایط تولید بیوچار بخصوص درجه حرارت گرماکافت نیز می‌تواند این تغییرات را بیشتر کند. این تنوع در ویژگی‌ها می‌تواند تأثیرات مختلفی را بر خاک‌ها بگذارد (Boostani, Hardie, & Najafi-Ghiri, 2023; Rasuli et al., 2022). در پژوهشی (Rasuli et al., 2022) در بررسی بیوچار تولید شده از بقایای گندم و ذرت در سه درجه حرارت ۲۵۰، ۴۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس نشان داده شد که بیوچار گندم دارای پتاسیم بیشتر و کلسیم و منیزیم کمتر نسبت به بیوچار ذرت بودند و با افزایش درجه حرارت گرماکافت مقدار همه کاتیون‌های بازی افزایش یافت. در پژوهش دیگری (Khanmohammadi et al., 2015) نیز بیان شد که با افزایش درجه حرارت گرماکافت از ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس، مقدار قابلیت هدایت الکتریکی و pH آن به‌ترتیب ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر و ۳/۸ واحد افزایش یافت.

گزارش شده است که در برخی خاک‌های منطقه داراب که تحت کشت پرتقال رقم واشنگتن ناول بوده‌اند با وجود مقدار کافی پتاسیم قابل استفاده در خاک اما بیشتر باغات از کمبود پتاسیم رنج می‌برده‌اند (Najafi-Ghiri et al., 2017). محققان بیان می‌کنند که این می‌تواند در نتیجه رقابت کلسیم با پتاسیم برای جذب توسط ریشه و یا انتقال آن به اندام‌های هوایی گیاه باشد (Hien et al., 2017; Marschner, 2011). در پژوهشی (Wacal, Ogata, Basalirwa, Sasagawa, Ishigaki, et al., 2019) بیان شد که عدم تعادل در مقدار پتاسیم، کلسیم و منیزیم تبادلی سبب تغذیه نامناسب پتاسیم توسط کنجد شده است و این به دلیل تأثیر کلسیم و منیزیم در جلوگیری از جذب پتاسیم بوده است. از طرف دیگر بالا بودن مقدار سدیم در محلول خاک نیز می‌تواند علاوه بر تأثیر مضر بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، جذب سایر کاتیون‌ها را تحت تأثیر قرار دهد (Hien et al., 2017). بنابراین ترکیب شیمیایی محلول خاک می‌تواند در جذب عناصر کاتیونی تأثیر بسزایی داشته باشد.

با توجه به تفاوت در ماده اولیه بیوچارها و شرایط تولید آنها این تأثیر می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال در پژوهشی (Moradi et al., 2019) بیان شد که افزودن بیوچار حاصل از شاخ و برگ درخت انگور به مقدار ۲ درصد به یک خاک آهکی، مقدار پتاسیم محلول از ۱۱/۴ به ۲۱/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش و مقدار سدیم محلول از ۲۵۰۷ به ۲۰۰۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت در حالی‌که مقدار کلسیم محلول تحت تأثیر کاربرد بیوچار قرار نگرفت. در پژوهشی دیگر (Poormansour et al., 2019) نشان داده شد که کاربرد بیوچار حاصل از بقایای گندم تا ۵ درصد سبب افزایش ۶۹ برابری پتاسیم، ۳ برابری سدیم و ۴/۶ برابری کلسیم در محلول یک خاک آهکی شد اما بر مقدار منیزیم محلول تأثیری نداشت. نتایج متفاوتی نیز در تغییر مقدار کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم محلول در خاک‌های با ویژگی‌های مختلف توسط محققان گزارش شده است (Abbas et al., 2018; Gaskin et al., 2010; Kim et al., 2016).

اگرچه بیشتر خاک‌های آهکی دارای مقدار کافی پتاسیم قابل استفاده به شکل محلول و تبادلی هستند اما مقدار بالای کلسیم و سدیم

1 Pyrolysis

در محلول خاک می‌تواند جذب متعادل این کاتیون‌ها را دچار مشکل کند. بیوچارها پس از افزوده شدن به خاک می‌توانند این ترکیب را تغییر داده و در نتیجه جذب متعادل کاتیون‌ها توسط گیاه را پیچیده‌تر کنند. بنابراین هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر افزودن دو بیوچار تولید شده از کود گوسفند و سبوس برنج در دو درجه حرارت ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس بر تغییرات شیمیایی یک خاک آهکی و رشد و وضعیت جذب عناصر غذایی کاتیونی توسط گیاه ذرت *Zea mays* L. می‌باشد.

روش‌شناسی پژوهش

تولید بیوچارها و تجزیه آنها

کود گوسفندی پوسیده که به‌طور گسترده در باغات مرکبات منطقه داراب استفاده می‌شوند، از دامپروری‌های فعال منطقه مورد مطالعه و سبوس برنج نیز از کارخانه‌های تولید سبوس برنج استان فارس تهیه گردید (۲۸ درجه و ۴۵ دقیقه و دو ثانیه شمالی و ۵۴ درجه و ۲۶ دقیقه و ۴۵ ثانیه شرقی). نمونه‌ها در درجه حرارت ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس آسیاب و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. جهت تهیه بیوچار، مقدار ۱۰۰ گرم از نمونه‌های کود گوسفند و سبوس برنج در بشر ۲۵۰ میلی‌لیتر قرار داده شد و به‌وسیله ورقه‌های آلومینیمی پوشانده شدند و با مفتول محکم گردیدند تا شرایط اکسیژن محدود ایجاد گردد. گرماکافت نمونه‌ها در کوره الکتریکی (Shimifan, F47) در درجه حرارت ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت صورت گرفت. آهنگ افزایش درجه حرارت کوره حدود ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه بود. یک شبانه‌روز به نمونه‌ها اجازه داده شد تا به درجه حرارت محیط برسند (Boostani, Hardie, Najafi-Ghiri, et al., 2023). مقدار pH و قابلیت هدایت الکتریکی بیوچارها به‌ترتیب در سوسپانسیون و عصاره ۱:۲۰ ترکیب به آب پس از به‌ترتیب یک و نیم ساعت تکان دادن انجام شد (Sun et al., 2014; Yang et al., 2016). ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه‌های بیوچار به روش استات آمونیم (Abdelhafez et al., 2014) با افزودن ۲۰ میلی‌لیتر استات آمونیم مولار خنثی به ۴ گرم نمونه بیوچار، تکان دادن به مدت یک ساعت و صاف کردن با کاغذ صافی واتمن ۴۲ انجام و در عصاره حاصل مقدار کلسیم، پتاسیم و سدیم به روش شعله‌سنجی با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر (Corning 510, UK) و منیزیم به روش تیتراسیون با EDTA اندازه‌گیری شد. مقدار کربن، هیدروژن و نیتروژن نیز در نمونه‌ها با دستگاه CHN analyzer (ThermoFinnigan Flash EA 1112 Series) اندازه‌گیری شد. مقدار پتاسیم، کلسیم و سدیم کل نمونه‌ها پس از خاکستر کردن نمونه‌ها در کوره الکتریکی در درجه حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس و انحلال در اسید کلریدریک دو مولار به روش شعله‌سنجی با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر (Corning 510, UK) اندازه‌گیری شد.

جمع آوری نمونه خاک و تجزیه آن

نمونه خاک مورد مطالعه از مزارع تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، جنوب‌شرقی استان فارس (۲۸ درجه و ۴۵ دقیقه و ۱ ثانیه شمالی، ۵۴ درجه و ۲۶ دقیقه و ۵۳ ثانیه شرقی و ارتفاع ۱۱۰۸ متر از سطح دریا) و از عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر برداشت گردید. نمونه پس از انتقال به آزمایشگاه در هوای آزاد خشک و برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتر (Rowell, 2014)، pH در گل اشباع خاک (Thomas, 1996)، کربنات کلسیم معادل با خنثی‌سازی با اسید کلریدریک و تیتراسیون با هیدروکسید سدیم (Staff, 1954)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک (Rhoades, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی با جایگزینی کاتیون‌ها با آمونیم (Sumner & Miller, 1996) و مقدار کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson & Sommers, 1996) اندازه‌گیری گردیدند.

تیمارها و آزمایش گلخانه‌ای

آزمایش‌های مربوط به تأثیر افزودن بیوچارها بر ترکیب شیمیایی محلول و تبادلی خاک و جذب کاتیون‌ها توسط ذرت *Zea mays* L. در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۵ تیمار شامل شاهد (بدون افزودن بیوچار)، بیوچارهای کود گوسفند و سبوس برنج تولید شده در دماهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس روی خاک تهیه شده با سه تکرار انجام گرفت. برای این کار، به دو کیلوگرم خاک، ۴۰ گرم بیوچار (معادل دو درصد وزنی) اضافه گردید و خوب مخلوط شد. سه تیمار تری و خشکی روی نمونه‌ها انجام شد تا مخلوط خاک و بیوچار به تعادل برسد (Boostani, Hardie, & Najafi-Ghiri, 2023). سپس کشت گیاه به تعداد پنج بذر ذرت (*Zea mays* L.) رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ در عمق حدود ۲ سانتی‌متری انجام شد. در هفته دوم رشد گیاه در هر گلدان فقط دو بوته نگهداری شد و بقیه حذف گردیدند. در طول دوره رشد، رطوبت گلدان‌ها روزانه به‌صورت وزنی با استفاده از آب مقطر در حدود ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه نگهداشته شدند. رطوبت ظرفیت مزرعه نمونه خاک

با استفاده از صفحات فشاری در آزمایشگاه تعیین گردید. پس از ۱۰ هفته از رشد گیاه، اندام‌های هوایی از محل طوقه برداشته شدند. نمونه‌های گیاهی برداشت شده پس از شستشو با آب مقطر، به‌مدت ۷۲ ساعت در درجه حرارت ۶۵ درجه سلسیوس در آون نگهداری تا خشک شدند و سپس وزن گردیدند. غلظت کلسیم، پتاسیم و سدیم در اندام‌های هوایی گیاه، پس از خاکستر کردن نمونه‌ها در کوره الکتریکی در درجه حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس و حل در هیدروکلریک اسید دو مولار با استفاده از روش شعله‌سنجی (Corning 510, UK) اندازه‌گیری گردید. مقدار جذب عناصر توسط گیاه از حاصل‌ضرب عملکرد ماده خشک گیاه در درصد عنصر در گیاه به دست آمد. محاسبه نسبت عناصر در گیاه بر حسب مول به مول انجام شد.

پس از برداشت گیاه، نمونه‌های خاک هوا خشک شدند و پس از خرد کردن کاملاً مخلوط شده و ویژگی‌های مختلف خاک به روش بیان شده برای خاک اولیه انجام شد. تعیین مقدار عناصر قابل استخراج با استات آمونیم، با افزودن ۲۰ میلی‌لیتر استات آمونیم مولار خنثی به نمونه‌ها و نیم ساعت تکان دادن و صاف کردن نمونه و تکرار این روش در دو مرحله انجام شد (Helmke & Sparks, 1996). سپس غلظت کلسیم، پتاسیم و سدیم در عصاره حاصل به‌روش شعله‌سنجی با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر (Corning 510, UK) اندازه‌گیری شد.

تجزیه آماری داده ها

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 20.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) انجام شد و تمامی آزمون‌های آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار در نظر گرفته شدند. برای بررسی اثر تیمار بیوچار از آنالیز واریانس (ANOVA) و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون Tukey HSD post hoc استفاده شد. همه نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Office Excel 2013 تهیه شدند.

یافته‌های پژوهش و بحث

ویژگی‌های خاک و بیوچارهای مورد استفاده

جدول ۱ ویژگی‌های خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این خاک دارای بافت لوم‌شنی با ۱۲ درصد رس بود. مقدار کربنات‌های کلسیم در این خاک ۵۵ درصد بوده و pH کمی قلیایی داشت. خاک مورد استفاده دارای ماده آلی کم و غیرشور بود. بر اساس مطالعات (Najafi-Ghiri et al., 2011) و (Azadi & Shakeri, 2021) این خاک به عنوان یک خاک بافت درشت با گستردگی فراوان در مناطق خشک و نیمه‌خشک استان فارس می‌باشد.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های خاک مورد استفاده

ویژگی	مقدار
شن (درصد)	۵۸
سیلت (درصد)	۳۰
رس (درصد)	۱۲
pH	۷/۶
قابلیت هدایت الکتریکی گل اشباع (دسی‌زیمنس بر متر)	۰/۶
ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بر کیلوگرم)	۱۲
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۵۵
کربن آلی (درصد)	۰/۵

برخی ویژگی‌های بیوچارهای مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است. بیوچارهای مورد استفاده دارای pH قلیایی بودند و افزایش درجه حرارت گرماکافت، مقدار pH آنها را افزایش داد. قابلیت هدایت الکتریکی بیوچار کود گوسفند بیشتر از بیوچار سبوس برنج بود و افزایش درجه حرارت گرماکافت سبب افزایش شوری آنها تا ۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر شد. مقدار پتاسیم، کلسیم و سدیم در بیوچار تهیه شده از کود گوسفند بسیار بیشتر از سبوس برنج بود و افزایش درجه حرارت گرماکافت، مقدار آنها را افزایش داد. بیوچار کود گوسفندی مقدار کربن و نیتروژن بیشتر و هیدروژن کمتری نسبت به بیوچار سبوس برنج داشتند. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که بیوچارهای تولید شده از بقایای گیاهی اکثراً دارای pH قلیایی می‌باشند که این به دلیل وجود مقدار بالای کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سدیم، کربنات‌ها و بی‌کربنات‌ها در آنها می‌باشد (Song & Guo, 2012). افزایش درجه حرارت تولید بیوچار سبب افزایش pH آنها می‌شود که این در نتیجه

تغلیظ بیشتر املاح قلیایی در ترکیبات آلی (Shinogi & Kanri, 2003) و تجزیه گروه‌های عاملی اسیدی در نتیجه از دست رفتن اکسیژن (Li et al., 2002) می‌باشد. به طور کلی شوری بیوچار مربوط به وجود املاح مختلف معدنی در آن می‌باشد و با افزایش درجه حرارت تولید بیوچار، غلظت این املاح به دلیل خروج ترکیبات فرار بیشتر و در نتیجه قابلیت هدایت الکتریکی بیوچار تولیدی بیشتر می‌شود (Rasuli et al., 2022). باید در نظر داشت که بیوچارهای تولید شده از مواد مختلف و تحت شرایط متفاوت دارای ویژگی‌های مختلف شیمیایی و ترکیب عنصری مختلفی می‌باشند (Boostani et al., 2019; Najafi-Ghiri, Boostani, et al., 2022; Rasuli et al., 2022).

جدول ۲. برخی ویژگی‌های بیوچارهای مورد استفاده

ویژگی	بیوچار کود گوسفند		بیوچار سبوس برنج	
	۳۰۰°C	۵۰۰°C	۳۰۰°C	۵۰۰°C
pH	۹/۹	۱۱/۰	۹/۰	۱۰/۳
قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	۳/۹	۴/۳	۰/۸	۱/۲
ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بر کیلوگرم)	۱۹/۷	۱۸/۹	۱۸/۹	۱۵/۳
کربن (درصد)	۲۵/۴	۳۱/۸	۴۵/۰	۵۰/۰
هیدروژن (درصد)	۱/۹	۰/۸	۲/۳	۱/۱
نیتروژن (درصد)	۱/۲	۱/۶	۱/۳	۱/۱
پتاسیم (درصد)	۲/۳۶	۲/۴۷	۰/۸۱	۱/۰۲
کلسیم (درصد)	۵/۸۰	۷/۵۰	۰/۲۱	۰/۲۵
سدیم (درصد)	۰/۷۳	۰/۷۷	۰/۰۶	۰/۰۷

ویژگی‌های خاک

نتایج تجزیه واریانس تأثیر بیوچار بر برخی ویژگی‌های خاک، مقدار و نسبت کاتیون‌های محلول و تبادلی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان داد که کاربرد بیوچارهای مورد استفاده بر مقدار pH و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک تأثیری نداشت اما بر مقدار شوری و مقدار کاتیون‌ها در فاز محلول و تبادلی خاک مؤثر بود.

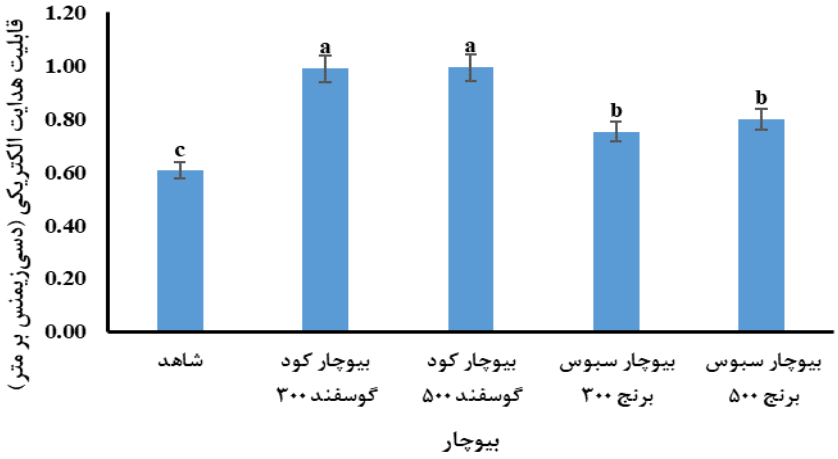
جدول ۳. تجزیه واریانس تأثیر بیوچار بر برخی ویژگی‌های خاک و سدیم، پتاسیم و کلسیم محلول و تبادلی و نسبت آنها

منابع تغییرات	درجه آزادی	pH	قابلیت هدایت الکتریکی	ظرفیت تبادل کاتیونی	کاتیون‌های محلول		
					کلسیم	پتاسیم	سدیم
بین گروه	۴	۰/۰۲^{ns}	۰/۰۵۵**	۰/۰۱^{ns}	۰/۲۲**	۱/۲۳**	۱/۱**
درون گروه	۵	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
منابع تغییرات	درجه آزادی	نسبت مولی کاتیون‌ها			کاتیون‌های تبادلی		
		کلسیم/پتاسیم	کلسیم/سدیم	پتاسیم/سدیم	کلسیم	پتاسیم	سدیم
بین گروه	۴	۴/۳**	۰/۱۹**	۰/۱۶**	۲۱/۴*	۳۲/۷**	۱/۱**
درون گروه	۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۳/۰	۰/۰۸	۰/۰۱

** و * به‌ترتیب سطح معنی‌داری ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و ns تفاوت غیرمعنی‌دار را نشان می‌دهد.

قابلیت هدایت الکتریکی خاک مورد استفاده ۰/۶ دسی‌زیمنس بر متر بود و بیوچار کود گوسفند مقدار آن را به ۰/۹۹ دسی‌زیمنس بر متر افزایش داد و درجه حرارت تولید بیوچار تأثیری بر آن نداشت در حالی‌که بیوچار سبوس برنج تولید شده در درجه حرارت ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس مقدار آن را به‌ترتیب به ۰/۷۵ و ۰/۸۰ دسی‌زیمنس بر متر افزایش داد (شکل ۱). به‌طور کلی مقدار افزایش شوری با کاربرد بیوچار کود گوسفند به طور معنی‌داری بیشتر از بیوچار سبوس برنج بود. بیوچارهای مختلف با توجه به ویژگی‌های خود و خاک می‌توانند شوری خاک را تحت تأثیر قرار دهند. در مطالعه حاضر مقدار افزایش شوری خاک بر اثر کاربرد بیوچار با مقدار شوری اولیه بیوچار ارتباط داشت و بیوچار کود گوسفند مقدار pH خاک را بیشتر از بیوچار سبوس برنج افزایش داد. به هر حال نتایج متفاوتی توسط پژوهشگران

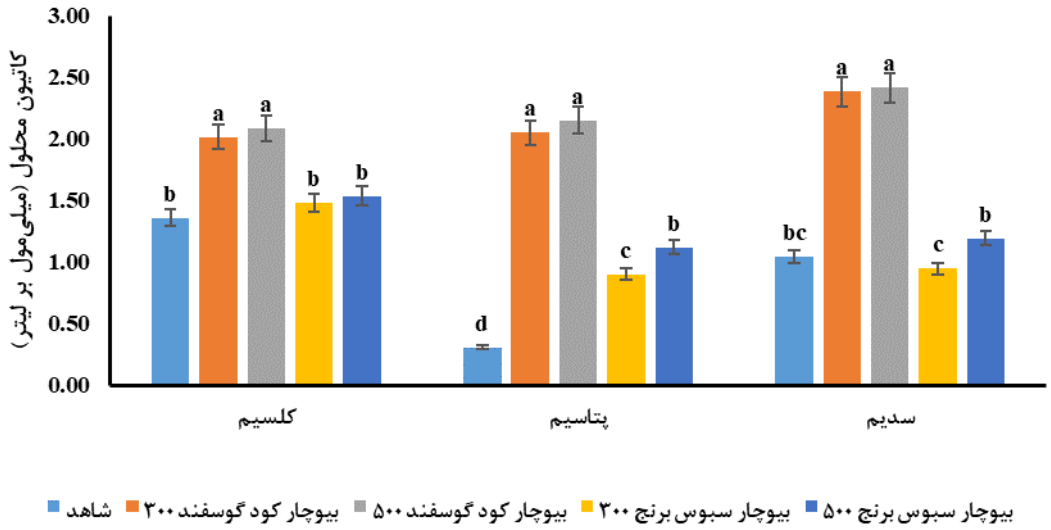
مختلف در ارتباط با تأثیر بیوچار بر شوری خاک گزارش شده است. در حالی که افزایش شوری خاک با کاربرد بیوچار بقایای گندم و ذرت تا ۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر (Rasuli et al., 2022) و بیوچار کود گوسفند و ورمی‌کمپوست تا ۰/۹ دسی‌زمینس بر متر (Boostani et al., 2020) برای خاک‌های آهکی ایران گزارش شده است اما برخی تحقیقات کاهش شوری خاک در نتیجه کاربرد برخی بیوچارها مانند تفاله ریشه شیرین بیان برای خاک‌های آهکی (Najafi-Ghiri, Boostani, et al., 2022) و بیوچار بقایای ذرت و گندم برای خاک‌های شور و سدیمی (Cui et al., 2022; Zhao et al., 2020) گزارش کرده‌اند. بنابراین در کاربرد بیوچارها باید به نوع ماده اولیه و نوع خاک توجه بیشتری شود و به‌نظر می‌رسد درجه حرارت تولید بیوچار اهمیت کمتری در تغییر شوری خاک دارد.



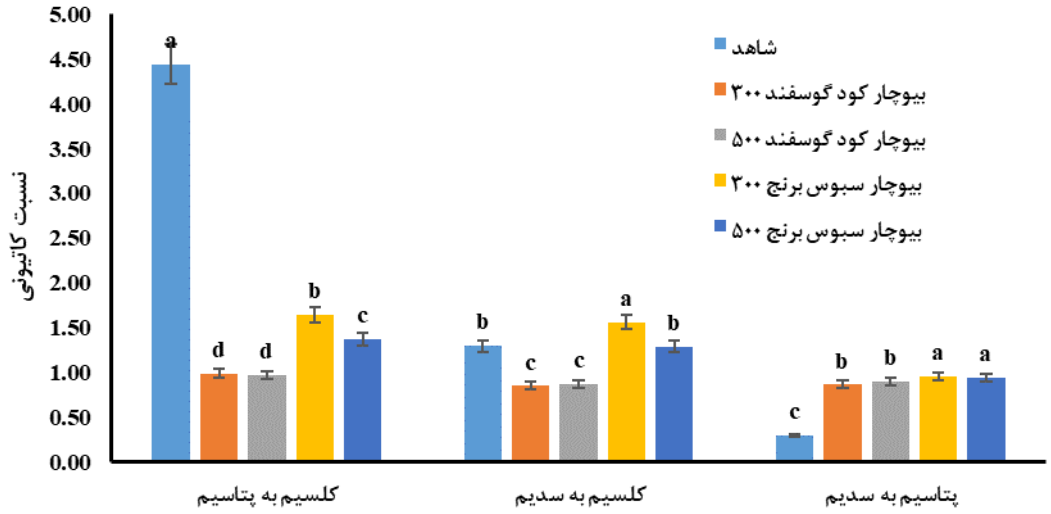
شکل ۱. قابلیت هدایت الکتریکی خاک تحت تأثیر کاربرد بیوچار (میانگین‌های دارای حروف متفاوت برای هر ویژگی در سطح پنج درصد با آزمون توکی معنی‌دار هستند)

شکل ۲ غلظت کلسیم، پتاسیم و سدیم را در محلول خاک تحت تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار نشان می‌دهد. مقدار کلسیم در خاک شاهد ۱/۳۶ میلی‌مول در لیتر بود و بیوچارهای مختلف مقدار آن را از ۱/۴۸ میلی‌مول در لیتر که برای بیوچار سبوس برنج در درجه حرارت گرماکافت ۳۰۰ درجه سلسیوس بود تا ۲/۰۸ میلی‌مول در لیتر در بیوچار کود گوسفندی در درجه حرارت گرماکافت ۵۰۰ درجه سلسیوس افزایش دادند. تأثیر بیوچار کود گوسفند به‌طور معنی‌داری بیشتر از سبوس برنج بود اما درجه حرارت تولید بیوچار تأثیری بر آن نداشت. مقدار پتاسیم در محلول خاک شاهد ۰/۳۱ میلی‌مول در لیتر بود و افزودن بیوچار کود گوسفند تولید شده در درجه حرارت ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس مقدار آن را به‌ترتیب تا ۲/۰۵ و ۲/۱۵ میلی‌مول بر لیتر (بدون تفاوت معنی‌دار) افزایش داد. این میزان افزایش با کاربرد بیوچار سبوس برنج تولید شده در دماهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۰/۹۰ و ۱/۱۲ میلی‌مول در لیتر (با تفاوت معنی‌دار) بود. کاربرد بیوچار کود گوسفند مقدار سدیم محلول را افزایش داد اما بیوچار سبوس برنج تأثیری بر آن نداشت. به‌علاوه، مقدار سدیم محلول با کاربرد بیوچار سبوس برنج در دو درجه حرارت مختلف با یکدیگر تفاوت معنی‌دار داشتند و درجه حرارت بالاتر، سدیم محلول بیشتری را عرضه کرد.

نسبت مولی کلسیم، پتاسیم و سدیم در محلول خاک با کاربرد بیوچار در شکل ۳ نشان داده شده است. نسبت کلسیم به پتاسیم در محلول خاک شاهد ۴/۴۴ بود و با افزودن بیوچارهای مختلف به طور معنی‌داری کاهش یافت. بیوچارهای کود گوسفند بدون تأثیر معنی‌دار درجه حرارت تولید، مقدار آن را تا ۰/۹۸ کاهش دادند در حالی که بیوچارهای سبوس برنج تولید شده در درجه حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس مؤثرتر از درجه حرارت ۳۰۰ درجه سلسیوس بودند (۱/۳۷ در مقابل ۱/۶۴). نسبت مولی کلسیم به سدیم در محلول خاک شاهد ۱/۲۹ بود و با افزودن بیوچار کود گوسفند کاهش معنی‌داری نشان داد و به ۰/۸۵ رسید در حالی‌که بیوچار سبوس برنج تولید شده در درجه حرارت ۳۰۰ درجه سلسیوس مقدار آن را به ۱/۵۶ افزایش داد اما بیوچار سبوس برنج تولید شده در درجه حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس تأثیری بر آن نداشت. نسبت مولی پتاسیم به سدیم در محلول خاک شاهد ۰/۲۹ بود و بیوچارهای مختلف مقدار آن را از ۰/۸۶ تا ۰/۹۵ افزایش دادند. بیوچارهای سبوس برنج مؤثرتر از بیوچارهای کود گوسفند بودند.



شکل ۲. غلظت کلسیم، پتاسیم و سدیم محلول تحت تأثیر کاربرد بیوچار (میانگین‌های دارای حروف متفاوت برای هر ویژگی در سطح پنج درصد با آزمون توکی معنی‌دار هستند)



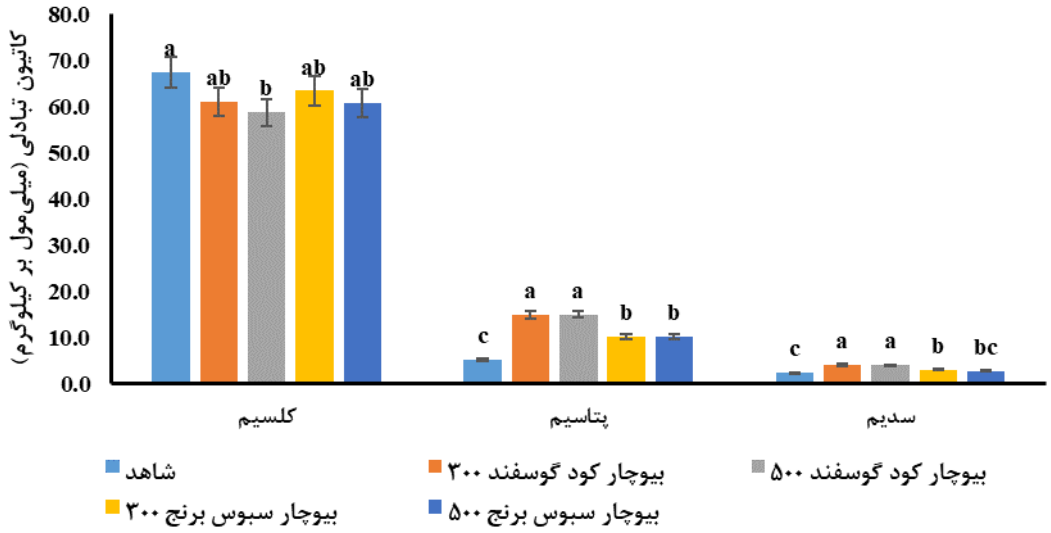
شکل ۳. نسبت کاتیون‌ها در محلول خاک تحت تأثیر کاربرد بیوچار (میانگین‌های دارای حروف متفاوت برای هر ویژگی در سطح پنج درصد با آزمون توکی معنی‌دار هستند)

به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که بیوچار کود گوسفند غلظت هر سه کاتیون کلسیم، پتاسیم و سدیم را در محلول خاک افزایش داده است اما این تأثیر برای پتاسیم (۵۶۰ درصد) بسیار بیشتر از کلسیم و سدیم (به‌ترتیب ۴۸ و ۱۲۸ درصد) بوده است و این سبب شده نسبت پتاسیم به کلسیم و سدیم در محلول خاک بیشتر شود. ارتباط منفی و معنی‌دار بین قابلیت هدایت الکتریکی و نسبت کلسیم و سدیم به پتاسیم (به‌ترتیب ضریب همبستگی **۰/۸۶- و *۰/۶۶-) نشان دهنده این است که افزایش غلظت املاح محلول در کاربرد بیوچارهای مورد استفاده بیشتر به دلیل پتاسیم است. بر خلاف بیوچار کود گوسفند، بیوچار سبوس برنج تأثیری بر کلسیم و سدیم محلول نداشته اما مقدار پتاسیم محلول را تا ۲۰۰ درصد افزایش داده است و این سبب شده که همانند بیوچار کود گوسفند نسبت پتاسیم به کلسیم و سدیم به شدت افزایش یابد. با توجه به اینکه مقدار پتاسیم، کلسیم و سدیم در بیوچار کود گوسفند به‌ترتیب ۳، ۲۸ و ۱۲ برابر بیوچار سبوس برنج است (جدول ۲) چنین نیز انتظار می‌رود که مقدار افزایش پتاسیم، کلسیم و سدیم در خاک‌های تیمار شده با بیوچار کود گوسفند بیشتر از بیوچار سبوس برنج باشد. در واقع نسبت پتاسیم به کلسیم و سدیم در بیوچار سبوس برنج بسیار بالاتر از بیوچار کود گوسفند می‌باشد. با توجه به نتایج گزارش شده توسط برخی پژوهشگران در ارتباط با کمبود پتاسیم در برخی گیاهان رشد یافته در خاک‌های آهکی با وجود مقدار کافی آن در خاک (Najafi-Ghiri et al., 2017)، می‌توان رقابت کاتیون‌ها را در محلول خاک بسیار مهم دانست و افزایش نسبت

پتاسیم به سایر کاتیون‌ها می‌تواند در جذب آنها توسط ریشه گیاه مؤثر باشد (Obreza et al., 1993).

باید در نظر داشت که با افزایش مقدار سدیم و کاهش مقدار کلسیم، وضعیت فیزیکی خاک‌ها می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد. با توجه به شکل های ۲ و ۳ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بیوچار سبوس برنج بر مقدار سدیم و نسبت کلسیم به سدیم در محلول خاک تأثیر ناچیزی داشته اما بیوچار کود گوسفند با وجود افزایش مقدار کلسیم و سدیم در محلول خاک، نسبت کلسیم به سدیم را کاهش داده است و این بدان معنی است که در درازمدت، افزودن بیوچار کود گوسفندی می‌تواند نسبت جذب سدیم (SAR) را افزایش داده و ویژگی‌های فیزیکی خاک را تحت تأثیر قرار دهد. به هر حال افزایش مقدار شوری خاک در نتیجه افزایش غلظت سدیم و کلسیم را هم باید در نظر گرفت. در پژوهشی (Awan et al., 2021) با بررسی تأثیر چند بیوچار مختلف نشان داده شد که برخی بیوچارها قادرند با جذب بخشی از سدیم و آزادسازی کلسیم و منیزیم محلول مقدار درصد جذب سدیم محلول را در آب آبیاری کاهش دهند که این خلاف نتایج به‌دست آمده در این پژوهش می‌باشد. در پژوهشی دیگر (Cui et al., 2022) نیز نشان داده شد که با کاربرد بیوچار تولید شده از بقایای گندم مقدار همه کاتیون‌ها بجز پتاسیم کاهش یافت و آنها بیان کردند که این می‌تواند در نتیجه تمایل بیوچار برای جذب این کاتیون‌ها باشد.

مقدار کاتیون‌های قابل استخراج با استات آمونیم مولار در شکل ۴ نشان داده شده است. مقدار کلسیم در خاک شاهد ۶۷ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک بود و فقط بیوچار کود گوسفند تولید شده در درجه حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس مقدار آن را تا ۵۹ میلی‌مول بر کیلوگرم کاهش داد و سایر بیوچارها تأثیر معنی‌داری بر آن نداشتند. مقدار پتاسیم نیز در خاک شاهد۵/۳ میلی‌مول بر کیلوگرم بود و همه بیوچارها مقدار آن را از ۱۰/۳ تا ۱۵/۱ میلی‌مول بر کیلوگرم افزایش دادند و بیوچارهای کود گوسفند مؤثرتر از بیوچارهای سبوس برنج بودند. مقدار سدیم نیز از ۲/۵ میلی‌مول در کیلوگرم در خاک شاهد به ۴/۱ میلی‌مول در کیلوگرم با کاربرد بیوچار کود گوسفند افزایش یافت. بیوچار سبوس برنج تولید شده در درجه حرارت ۳۰۰ درجه سلسیوس سبب افزایش مقدار سدیم شد اما بیوچار سبوس برنج تولید شده در درجه حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس تأثیری بر آن نداشت. به طور کلی بیوچارهای کود گوسفند مؤثرتر از سبوس برنج در افزایش سدیم تبادلی بودند.



شکل ٤. مقدار کاتیون‌های قابل استخراج با استات آمونیم مولار تحت تأثیر کاربرد بیوچار (میانگین‌های دارای حروف متفاوت برای هر ویژگی در سطح پنج درصد با آزمون توکی معنی‌دار هستند)

مقدار کاتیون‌های قابل استخراج با استات آمونیم می‌تواند به عنوان شاخصی از ظرفیت بافری کردن کاتیون‌های محلول خاک در نظر گرفته شود. هر چه مقدار کاتیون در این بخش بیشتر باشد خاک توانایی بیشتری در جلوگیری از تغییرات غلظت کاتیون‌ها در محلول خاک دارد (Havlin et al., 2005). بالا بودن قابل ملاحظه مقدار کلسیم قابل استخراج با استات آمونیم می‌تواند هم به دلیل مقدار بالای کلسیم تبادلی و هم به دلیل انحلال بخشی از کربنات کلسیم خاک باشد. از طرفی استات آمونیم علاوه بر استخراج پتاسیم تبادلی می‌تواند بخشی از پتاسیم غیرتبادلی را در لبه‌های کانی‌های پتاسیم‌دار خاک آزاد کند (نجفی‌قیری, 2024). تأثیر بیوچارها بر پتاسیم بیشتر از کلسیم بوده است و این به دلیل مقدار بالای پتاسیم در بیوچارها و همچنین نقش آنها در آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی می‌باشد. با توجه به مقادیر بالاتر پتاسیم در بیوچار کود گوسفند نقش آن نیز در افزایش پتاسیم قابل استخراج با استات آمونیم بیشتر بوده است. افزایش مقدار پتاسیم

قابل استخراج با استات آمونیم و همچنین افزایش آزادسازی پتاسیم با کاربرد بیوچارهای تولید شده از بقایای ذرت، پنبه گندم، کود گوسفند، زباله‌های شهری و تفاله ریشه شیرین بیان توسط پژوهشگران (Najafi-Ghiri et al., 2024; Najafi-Ghiri, Boostani, et al., 2022; Rasuli et al., 2022) گزارش شده است. در پژوهشی نشان داده شد که افزودن بیوچار سبوس برنج سبب افزایش پتاسیم تبادلی (از ۱۲۹ به ۶۴۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کلسیم تبادلی (از ۲۷۵۳ به ۳۳۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در نتیجه کاهش بیش از چهار برابری نسبت کلسیم به پتاسیم شد اما بر مقدار منیزیم تبادلی خاک تأثیری نداشت (Wacal, Ogata, Basalirwa, Sasagawa, Masunaga, et al., 2019). باید توجه داشت که سدیم قابل استخراج با استات آمونیم با کاربرد بیوچارهای مختلف بخصوص بیوچار کود گوسفند افزایش یافته است و این نشان می‌دهد که بیوچارها در درازمدت می‌توانند مقدار درصد سدیم تبادلی را افزایش دهند که این تأثیر منفی با آبشویی خاک‌ها نمی‌تواند به‌راحتی رفع شود.

رشد ذرت و جذب کاتیون‌ها

نتایج تجزیه واریانس نشان از تأثیر معنی‌دار بیوچارهای مختلف بر عملکرد ماده خشک گیاهی، جذب و غلظت کلسیم، پتاسیم و سدیم و نسبت آنها در بخش هوایی گیاه ذرت می‌باشد (جدول ۴).

جدول ٤. تجزیه واریانس تأثیر بیوچار بر عملکرد وزن خشک، غلظت و جذب کاتیون‌ها و نسبت آنها توسط ذرت

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد	غلظت عناصر			جذب عناصر غذایی			نسبت مولی کاتیون‌ها		
			کلسیم	پتاسیم	سدیم	کلسیم	پتاسیم	سدیم	کلسیم به پتاسیم	کلسیم به سدیم	پتاسیم به سدیم
بین گروه	۴	۰/۳۵**	۰/۰۲*	۰/۲۷**	۰/۰۳**	۳۰**	۳۰۶**	۲/۶**	۰/۰۰۱**	۱۱/۱**	۱۵۶**
درون گروه	۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۳۳	۰/۵۴	۰/۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۶	۱/۱

**** و * به‌ترتیب سطح معنی‌داری ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و ns تفاوت غیرمعنی‌دار را نشان می‌دهد.**

عملکرد ماده خشک ذرت تحت تأثیر بیوچارهای مورد استفاده قرار گرفت و با کاربرد همه بیوچارها افزایش یافت (جدول ۵). بیشترین افزایش با کاربرد بیوچار سبوس برنج تولید شده در درجه حرارت ۳۰۰ درجه سلسیوس (۱۶۰ درصد) به دست آمد در حالی‌که کمترین افزایش مربوط به بیوچار کود گوسفند تولید شده در درجه حرارت ۳۰۰ درجه سلسیوس (۱۶ درصد) بود. بیوچارها از راه‌های مختلف مانند افزودن عناصر غذایی مختلف به خاک (به‌خصوص کلسیم، منیزیم و پتاسیم)، نگهداری رطوبت خاک، افزایش فعالیت ریزجانداران و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌توانند سبب افزایش رشد گیاه شوند (Hossain et al., 2020).

جدول ۵. مقدار و نسبت عناصر غذایی کاتیونی در ذرت تحت تأثیر کاربرد بیوچار

بیوچار	مقدار عناصر غذایی (درصد)			عملکرد	جذب عناصر غذایی			نسبت کاتیون‌ها		
	کلسیم	پتاسیم	سدیم		کلسیم	پتاسیم	سدیم	کلسیم به پتاسیم	پتاسیم به سدیم	کلسیم به سدیم
شاهد	۰/۷۵b	۳/۴۴b	۰/۰۹۰b	۰/۶۲e	۴/۶d	۲۱/۱d	۰/۵۵d	۰/۲۱۱c	۲۲/۷a	۴/۸۰b
بیوچارکود گوسفند ۳۰۰°C	۰/۹۷a	۳/۸۹a	۰/۳۰۰a	۰/۷۲d	۶/۹c	۲۷/۸c	۲/۱۵b	۰/۲۴۲abc	۷/۷b	۱/۸۵c
بیوچار کود گوسفند ۵۰۰°C	۰/۹۵a	۳/۹۱a	۰/۳۰۴a	۱/۱۴c	۱۰/۸b	۴۴/۳b	۳/۴۵a	۰/۲۳۷bc	۷/۶b	۱/۷۹c
بیوچار سبوس برنج ۳۰۰°C	۰/۷۹ab	۳/۱۵c	۰/۰۷۶b	۱/۶۳a	۱۴/۴a	۵۱/۲a	۱/۲۳c	۰/۲۷۵a	۲۴/۶a	۶/۷۷a
بیوچار سبوس برنج ۵۰۰°C	۰/۸۴ab	۳/۲۰c	۰/۰۷۹b	۱/۳۱b	۱۱/۱b	۴۱/۹b	۱/۰۳c	۰/۲۵۸ab	۲۳/۹a	۶/۱۵a

میانگین‌های با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد با آزمون توکی می‌باشند

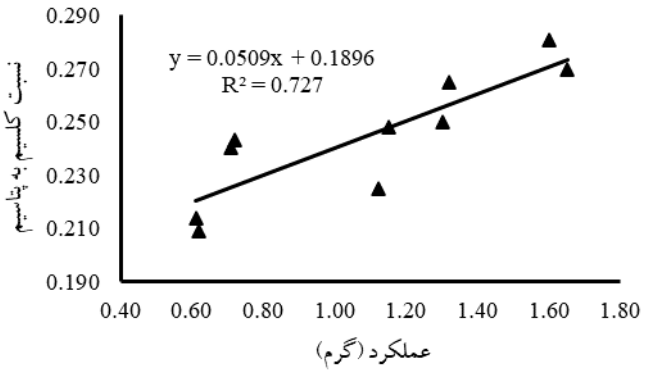
همه بیوچارها مقدار کلسیم ذرت را از ۱۲ تا ۲۹ درصد افزایش دادند و تفاوتی بین بیوچارهای مختلف مشاهده نشد (جدول ۵). مقدار پتاسیم ذرت در خاک شاهد ۳/۴۴ درصد بود و بیوچارهای کود گوسفند مقدار آن را به ۳/۹۰ درصد افزایش دادند اما بیوچارهای سبوس برنج سبب کاهش آن تا ۳/۱۵ درصد شدند. مقدار سدیم ذرت با کاربرد بیوچار کود گوسفند افزایش نشان داد در حالی‌که بیوچار سبوس برنج تأثیری بر آن نداشت. همه بیوچارها مقدار جذب کلسیم و پتاسیم را افزایش دادند اما این تأثیر با کاربرد بیوچار سبوس برنج و کود گوسفند تولید شده در درجه حرارت ۳۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب بیشترین و کمترین بود. جذب سدیم در خاک شاهد ۰/۵۵ میلی‌گرم بود و کاربرد

بیوچارهای مختلف سبب افزایش جذب آن از ۸۰ تا ۵۳۰ درصد شد.

نسبت مولی کلسیم به پتاسیم ذرت در تیمار شاهد ۰/۲۱ بود و با کاربرد بیوچارهای سبوس برنج افزایش یافت اما بیوچارهای کود گوسفند تأثیری بر آن نداشتند (جدول ۵). نسبت پتاسیم به سدیم با کاربرد بیوچار کود گوسفند افزایش یافت اما بیوچار سبوس برنج بر آن تأثیری نداشت. نسبت کلسیم به سدیم ذرت در تیمار شاهد ۴/۸۰ بود و با کاربرد بیوچار کود گوسفند تا ۱/۷۹ کاهش و با کاربرد بیوچار سبوس برنج تا ۶/۷۷ افزایش نشان داد.

بیوچارها از طرفی سبب افزایش مقدار عناصر غذایی در خاک می‌شوند و از طرف دیگر با افزایش رشد گیاه سبب می‌شوند گیاه عناصر بیشتری را جذب کند (Butnan et al., 2015; Hossain et al., 2020). در مطالعه حاضر با کاربرد هر چهار بیوچار، عملکرد ماده خشک گیاه افزایش نشان داد و این سبب شد مقدار کلسیم و پتاسیم جذب شده ذرت با کاربرد بیوچار از ۳۰ تا ۲۱۰ درصد افزایش یابد. در مورد غلظت سدیم در گیاه باید دقت داشت که کاربرد بیوچارهای کود گوسفند به دلیل مقدار بالای سدیم در آنها و افزوده شدن به خاک می‌تواند مقدار جذب سدیم را توسط گیاه تا شش برابر افزایش دهد. افزایش عملکرد ماده خشک ذرت با کاربرد بیوچار بقایای ذرت در خاک‌های قلیایی با کاربرد ۶/۵ گرم بیوچار ذرت در گلدان تا ۷۵ درصد توسط پژوهشگران (Amin, 2018) گزارش شده است. آنها بیان کردند که این افزایش رشد به دلیل افزایش قابلیت استفاده فسفر در خاک و افزایش جذب آن توسط گیاه بوده است. در پژوهش دیگری (Abu Zied Amin, 2016) نشان داده شد که افزودن بیوچار چوب بلال ذرت به یک خاک آهکی شن‌لومی (مشابه خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر)، مقدار پتاسیم محلول و قابل استخراج با استات آمونیم به‌ترتیب از ۱۰۰ و ۴۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ۲۳۷ و ۷۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت و این سبب افزایش ۳۰ درصدی مقدار پتاسیم گیاه و ۱۲۳ درصدی عملکرد ماده خشک ذرت گردید.

نسبت کاتیون‌ها در گیاه نیز می‌تواند شاخص مهمی از وضعیت تغذیه‌ای گیاه باشد (Havlin et al., 2005). با وجود نسبت بالای کلسیم به پتاسیم در محلول خاک شاهد (۴/۴۴) اما این نسبت در گیاه بسیار کم و حدود ۰/۲۱ بوده که نشان از توانایی ریشه گیاه در جذب مؤثرتر پتاسیم نسبت به کلسیم می‌باشد. با کاربرد بیوچارهای مختلف نسبت کلسیم به پتاسیم در خاک به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر شده و به ۱/۰ تا ۱/۶ رسیده اما این نسبت در گیاه افزایش یافته و در بالاترین حد خود با کاربرد بیوچار سبوس برنج به ۰/۲۸ رسیده است. این نشان می‌دهد که افزودن بیوچار می‌تواند سبب استفاده مؤثرتر کلسیم توسط ریشه گیاه نسبت به پتاسیم شود. از طرف دیگر بیوچار کود گوسفند با افزایش قابل ملاحظه غلظت سدیم محلول خاک، نسبت جذب سدیم به کلسیم را کاهش داده و در نتیجه نسبت این دو عنصر از ۴/۸ به ۱/۸ کاهش یافته در حالی که بیوچار سبوس برنج با تأثیر اندک بر سدیم محلول خاک، نسبت جذب کلسیم به سدیم را افزایش داده است. در مورد جذب پتاسیم نسبت به سدیم نیز همین موضوع صدق کرده و بیوچار کود گوسفند توانسته نسبت پتاسیم به سدیم را در گیاه کاهش دهد. این بدان معنی است که کاربرد بیوچار کود گوسفند سبب استفاده مؤثرتر ریشه گیاه از سدیم محلول نسبت به کلسیم و پتاسیم شده است. با وجود افزایش نسبت پتاسیم به سدیم در محلول خاک اما این نسبت را در گیاه کاهش داده است. ارتباط مثبت و معنی‌داری (شکل ۶) بین عملکرد گیاه و نسبت کلسیم به پتاسیم در گیاه به دست آمد و این نشان می‌دهد که هر عاملی که سبب جذب مؤثرتر کلسیم نسبت به پتاسیم توسط گیاه ذرت شود می‌تواند عملکرد آن را افزایش دهد. در پژوهشی (Jia et al., 2019) نشان داده شد که با افزایش مقدار بیوچار افزوده شده به محیط کشت گیاه تاج خروس، نسبت کلسیم به پتاسیم در ریشه و اندام هوایی به‌ترتیب از ۰/۲۴ و ۰/۳۱ به ۰/۱۰ و ۰/۲۳ کاهش یافته که این مخالف نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌باشد و به نظر می‌رسد باید نوع بیوچار، روش تهیه و نوع گیاه در نظر گرفته شود. همچنین مقدار سدیم در ریشه و اندام هوایی به‌ترتیب تا پنج و دو برابر افزایش یافت. برخی پژوهشگران (Butnan et al., 2015) نیز کاهش نسبت کلسیم و منیزیم به پتاسیم با کاربرد بیوچار در ذرت گزارش کردند. پژوهشگران دیگر (Alam et al., 2003) بیان کردند که افزایش مقدار پتاسیم برگ سبب کاهش مقدار کلسیم و منیزیم در آن می‌شود و این به دلیل مداخله پتاسیم در فراهمی کلسیم و منیزیم در غلظت‌های خاص می‌باشد.



شکل ٦. ارتباط بین عملکرد ماده خشک ذرت و نسبت کلسیم به پتاسیم در شاخساره

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بیوچارها علاوه بر ترسیب کربن و کاهش گازهای گلخانه‌ای سبب تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های آهکی می‌شوند. میزان این تغییرات به ماده اولیه بیوچار و شرایط تولید بستگی دارد. در پژوهش حاضر تأثیر افزودن بیوچارهای تولید شده از کود گوسفند و سبوس برنج در دو درجه حرارت متفاوت ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس بر ترکیب شیمیایی محلول خاک و جذب کاتیون‌ها توسط گیاه ذرت در یک خاک آهکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیوچارهای به کار رفته تأثیری بر pH خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی نداشتند اما شوری خاک را افزایش دادند که البته تأثیر پتاسیم در افزایش شوری خاک بیشتر از کلسیم و سدیم بود که این می‌تواند در تأمین پتاسیم خاک‌هایی که دچار کمبود پتاسیم هستند و یا نسبت کلسیم به پتاسیم در آنها بالاست مؤثر باشد. اگرچه درجه حرارت تولید بیوچار تأثیر زیادی در ویژگی‌های آن نداشت اما نوع ماده اولیه بسیار تأثیرگذار بود. بیوچار حاصل از سبوس برنج دارای املاح کمتری نسبت به بیوچار کود گوسفند بود و تأثیر کمتری بر شوری خاک داشت. عملکرد ماده خشک ذرت با کاربرد بیوچار سبوس برنج افزایش چشمگیری نسبت به بیوچار کود گوسفند یافت که این می‌تواند به دلیل نسبت مناسب جذب کلسیم نسبت به پتاسیم توسط گیاه و همچنین بهبود ویژگی‌های مختلف فیزیکی و زیستی خاک باشد که نیاز است در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار گیرد. به هر حال باید در کاربرد بیوچارهای مختلف نسبت عناصر موجود در آنها و تأثیر آنها بر ترکیب شیمیایی محلول خاک و در نتیجه نسبت جذب عناصر توسط ریشه گیاه را در نظر گرفت.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

نجفی‌قیری، مهدی. (۱۳۸۹). بررسی خصوصیات مورفولوژیکی و کانی‌شناسی و وضعیت پتاسیم در خاک‌های استان فارس. پایان‌نامه دکتری، بخش علوم خاک، دانشگاه شیراز. شیراز.

نجفی‌قیری، مهدی. (۱۴۰۳). تعادل و پویایی پتاسیم در خاک‌های آهکی ایران. انتشارات دانشگاه تهران. تهران. ۱۷۲ ص.

REFERENCES

Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., & Murtaza, G. (2018). Effect of biochar on alleviation of cadmium toxicity in wheat (Triticum aestivum L.) grown on Cd-contaminated saline soil. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*, 25668-25680.

Abdelhafez, A. A., Li, J., & Abbas, M. H. (2014). Feasibility of biochar manufactured from organic wastes on the stabilization of heavy metals in a metal smelter contaminated soil. *Chemosphere*, *117*, 66-71.

Abu Zied Amin, A. E.-E. (2016). Impact of corn cob biochar on potassium status and wheat growth in a calcareous sandy soil. *Communications in soil science and plant analysis*, *47*(17), 2026-2033.

Alam, S., Kamei, S., & Kawai, S. (2003). Amelioration of manganese toxicity in young rice seedlings with potassium. *Journal of Plant Nutrition*, *26*(6), 1301-1314.

Amin, A. E.-E. A. Z. (2018). Phosphorus dynamics and corn growth under applications of corn stalks biochar in a clay soil. *Arabian Journal of Geosciences*, *11*(14), 379.

Awan, S., Ippolito, J. A., Ullman, J., Ansari, K., Cui, L., & Siyal, A. (2021). Biochars reduce irrigation water sodium adsorption ratio. *Biochar*, *3*, 77-87.

Azadi, A., & Shakeri, S. (2021). Potassium pools distribution in some calcareous soils as affected by climatic conditions, physiographic units, and some physicochemical properties in Fars Province, southern Iran. *Eurasian Soil Science*, *54*(5), 702-715.

Boostani, H. R., Hardie, A. G., & Najafi-Ghiri, M. (2020). Effect of Organic Residues and Their Derived Biochars on the Zinc and Copper Chemical Fractions and Some Chemical Properties of a Calcareous Soil. *Communications in soil science and plant analysis*, *51*(13), 1725-1735.

Boostani, H. R., Hardie, A. G., & Najafi-Ghiri, M. (2023). Chemical fractions, mobility and release kinetics of Cadmium in a light-textured calcareous soil as affected by crop residue biochars and Cd-contamination levels. *Chemistry and Ecology*, 1-14.

Boostani, H. R., Hardie, A. G., Najafi-Ghiri, M., & Bijanzadeh, E. (2023). Investigation of interaction effects of biochars and silicon on growth and chemical composition of Zea mays L. in a Ni-polluted calcareous soil. *Scientific Reports*, *13*(1), 19935.

Boostani, H. R., Najafi-Ghiri, M., Hardie, A. G., & Khalili, D. (2019). Comparison of Pb stabilization in a contaminated calcareous soil by application of vermicompost and sheep manure and their biochars produced at two temperatures [Article]. *Applied Geochemistry*, *102*, 121-128. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.01.013

Butnan, S., Deenik, J. L., Toomsan, B., Antal, M. J., & Vityakon, P. (2015). Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. *Geoderma*, *237*, 105-116.

Cui, L., Liu, Y., Yan, J., Hina, K., Hussain, Q., Qiu, T., & Zhu, J. (2022). Revitalizing coastal saline-alkali soil with biochar application for improved crop growth. *Ecological Engineering*, *179*, 106594.

Gaskin, J. W., Speir, R. A., Harris, K., Das, K., Lee, R. D., Morris, L. A., & Fisher, D. S. (2010). Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agronomy Journal*, *102*(2), 623-633.

Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (2005). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (Vol. 515). Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.

Helmke, P. A., & Sparks, D. L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, *5*, 551-574.

Hien, H. N., Maneepong, S., & Suraninpong, P. (2017). Effects of potassium, calcium, and magnesium ratios in soil on their uptake and fruit quality of pummelo. *Journal of Agricultural Science (Toronto)*, *9*(12), 110-121.

Hossain, M. Z., Bahar, M. M., Sarkar, B., Donne, S. W., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Kirkham, M. B., Chowdhury, S., & Bolan, N. (2020). Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*, *2*, 379-420.

Jia, W., Wang, C., Ma, C., Wang, J., Sun, H., & Xing, B. (2019). Mineral elements uptake and physiological response of Amaranthus mangostanus (L.) as affected by biochar. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *175*, 58-65.

Khanmohammadi, Z., Afyuni, M., & Mosaddeghi, M. R. (2015). Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar. *Waste Management & Research*, *33*(3), 275-283.

Kim, H.-S., Kim, K.-R., Yang, J. E., Ok, Y. S., Owens, G., Nehls, T., Wessolek, G., & Kim, K.-H. (2016). Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (Zea mays L.) response. *Chemosphere*, *142*, 153-159.

Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar systems. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, 147-181.

Li, L., Quinlivan, P. A., & Knappe, D. R. (2002). Effects of activated carbon surface chemistry and pore structure on the adsorption of organic contaminants from aqueous solution. *Carbon*, *40*(12), 2085-2100.

Marschner, H. (2011). Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press.

Moradi, S., Rasouli-Sadaghiani, M. H., Sepehr, E., Khodaverdiloo, H., & Barin, M. (2019). Soil nutrients status affected by simple and enriched biochar application under salinity conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*, 1-13.

Najafi-Ghiri, M. (2010). Study of morphological and mineralogical properties and potassium status of soils of Fars province Shiraz University]. Iran.

Najafi-Ghiri, M. (2024). *Potassium Equilibration and Dynamics in the Soils of Iran* (Vol. 1). Tehran University Press.

Najafi-Ghiri, M., Abtahi, A., Owliaie, H., Hashemi, S. S., & Koohkan, H. (2011). Factors Affecting Potassium Pools Distribution in Calcareous Soils of Southern Iran. *Arid Land Research and Management*, *25*(4), 313-327.

Najafi-Ghiri, M., Boostani, H. R., Farrokhnejad, E., & Cheraghleh, A. (2024). Soil Potassium Fractionations, Release and Fixation in a Cadmium Contaminated Soil Treated with Plant Residue and Biochar. *Eurasian Soil Science*, *57*(2), 220-232.

Najafi-Ghiri, M., Boostani, H. R., & Hardie, A. G. (2022). Investigation of biochars application on potassium forms and dynamics in a calcareous soil under different moisture conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *68*(3), 325-339.

Najafi-Ghiri, M., Mirsoleimani, A., & Amin, H. (2017). Nutritional status of Washington Navel orange orchards in arid lands of southern Iran [Article]. *Arid Land Res Manag*, *31*(4), 431-445. https://doi.org/10.1080/15324982.2017.1347587

Najafi-Ghiri, M., Mirsoleimani, A., Boostani, H. R., & Amin, H. (2022). Influence of wood vinegar and potassium application on soil properties and Ca/K ratio in citrus rootstocks. *J Soil Sci Plant Nutr*, *22*(1), 334-344.

Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis. part 3—chemical methods* (pp. 961-1010). Madison.

Obreza, T. A., Alva, A. K., & Calvert, D. V. (1993). *Citrus fertilizer management on calcareous soils*. Cooperative Extension Service, University of Florida, Institute of Food and ….

Poormansour, S., Razzaghi, F., & Sepaskhah, A. R. (2019). Wheat straw biochar increases potassium concentration, root density, and yield of faba bean in a sandy loam soil. *Communications in soil science and plant analysis*, *50*(15), 1799-1810.

Rasuli, F., Owliaie, H., Najafi-Ghiri, M., & Adhami, E. (2022). Effect of biochar on potassium fractions and plant-available P, Fe, Zn, Mn and Cu concentrations of calcareous soils. *Arid Land Research and Management*, *36*(1), 1-26.

Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3—Chemical Methods* (pp. 417-435). Madison.

Rowell, D. L. (2014). Soil Science: Methods and Applications. Routledge.

Shinogi, Y., & Kanri, Y. (2003). Pyrolysis of plant, animal and human waste: physical and chemical characterization of the pyrolytic products. *Bioresource technology*, *90*(3), 241-247.

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.

Staff, U. S. L. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *US Dept. Agr. Handbook.*, *6*.

Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3—Chemical Methods* (pp. 1201-1229). Madison.

Sun, Y., Gao, B., Yao, Y., Fang, J., Zhang, M., Zhou, Y., Chen, H., & Yang, L. (2014). Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical Engineering Journal*, *240*, 574-578.

Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3—Chemical Methods* (pp. 475-490). Madison.

Wacal, C., Ogata, N., Basalirwa, D., Sasagawa, D., Ishigaki, T., Handa, T., Kato, M., Tenywa, M. M., Masunaga, T., & Yamamoto, S. (2019). Imbalanced soil chemical properties and mineral nutrition in relation to growth and yield decline of sesame on different continuously cropped upland fields converted paddy. *Agronomy*, *9*(4), 184.

Wacal, C., Ogata, N., Basalirwa, D., Sasagawa, D., Masunaga, T., Yamamoto, S., & Nishihara, E. (2019). Growth and K nutrition of sesame (Sesamum indicum L.) seedlings as affected by balancing soil exchangeable cations Ca, Mg, and K of continuously monocropped soil from upland fields converted paddy. *Agronomy*, *9*(12), 819.

Yang, X., Liu, J., McGrouther, K., Huang, H., Lu, K., Guo, X., He, L., Lin, X., Che, L., & Ye, Z. (2016). Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*, 974-984.

Zhao, W., Zhou, Q., Tian, Z., Cui, Y., Liang, Y., & Wang, H. (2020). Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain. *Science of the Total Environment*, *722*, 137428.