

(OPEN ACCESS)

Comparative effects of two types of biochar on leachate quality, cations leaching coefficient, and chemical properties of a calcareous saline-sodic soil

**Mahboubeh Torabi¹, Fatemeh Jahanian², Mahboubeh Zarabi^{*3},
Shahryar Mahdavi⁴, Zahra Varasteh Khanlari⁵**

1. M.Sc. Student of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: mahboob6969torabi@yahoo.com
2. M.Sc. Student of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: samsung.jahanian@yahoo.com
3. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: mzarabi@malayeru.ac.ir; zarabi7@gmail.com
4. Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: sh.mahdavi@malayeru.ac.ir
5. Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: zahra.varasteh@malayeru.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 06.29.2025

Revised: 12.24.2025

Accepted: 12.28.2025

Keywords:

Biochar,
Cation leaching coefficient,
Leaching,
Saline-sodic soil,
Soil reclamation

ABSTRACT

Background and Objectives: Organic amendments are widely recognized as effective strategies for reclaiming saline-sodic soils. This study evaluated the effects of two types of biochar, produced from sugarcane bagasse (SB) and walnut shells (WB), on leachate quality, the cation leaching coefficient, and the chemical properties of a calcareous, silty clay, saline-sodic soil after five leaching cycles. The experiment was conducted using leaching column under controlled laboratory conditions at Malayer University, Iran.

Materials and Methods: A factorial experiment was arranged in a completely randomized design with three replications. Soil columns were amended with SB and WB at rates of 1%, 2%, and 4% (w/w), along with unamended control soil. A gypsum pulse (2 g L⁻¹) equivalent to one pore volume was initially applied, followed by one week of incubation at 25 ± 2 °C. Thereafter, columns were leached monthly with one pore volume of distilled water for five consecutive months. The concentrations of Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, and K⁺, as well as pH, EC, and SAR in the leachates, were measured. Additionally, at the end of the leaching period, we analyzed selected chemical properties of the leached soils.

Results: Leaching time significantly affected pH, and the interaction between biochar type and leaching time significantly influenced EC and SAR in the leachates (P < 0.01). Leachate pH increased progressively, exceeding 9.5, while EC and SAR decreased with time. In the final leaching cycle, EC and SAR values from the SB treatments were significantly higher (P < 0.05) than those from WB and the control, with

SAR values exceeding 13 (meq L^{-1})^{0.5}. Cumulative concentrations of leached Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , and K^+ after five leaching cycles were significantly affected by the treatments ($P < 0.01$). The highest cumulative leached Na^+ and Ca^{2+} occurred in SB treatments, whereas WB produced the highest Mg^{2+} and K^+ leached. The order of cation leaching coefficients was $\text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+$, with mean sodium leaching coefficients of 295.4, 256.6, and 196.7 month^{-1} for SB, WB, and the control, respectively. At the end of the experiment, soil pH, EC_e , SAR, and ESP decreased relative to the initial soil. Although treatments did not significantly affect soil pH, they significantly affected EC_e , SAR, and ESP ($P < 0.01$). The highest EC_e (1.05 dS m^{-1}), SAR ($13.6 (\text{meq L}^{-1})^{0.5}$), and ESP (24.1%) were recorded in the control, while the lowest values ($\text{EC}_e = 0.64 \text{ dS m}^{-1}$, $\text{SAR} = 1.61 (\text{meq L}^{-1})^{0.5}$, $\text{ESP} = 8.4\%$) were found in the 4% SB treatment, which did not differ significantly from the 1% level.

Conclusion: After five leaching cycles, WB improved drainage water quality more effectively than SB. The cation leaching coefficient sequence was $\text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+$, with sodium exhibiting the highest mobility in SB treatments. By the end of the leaching process, the saline-sodic soil (control) became sodic, whereas both biochar types improved soil chemical conditions. No significant differences were observed among SB levels; therefore, the 1% SB application rate is recommended for further research. For field-scale implementation, additional trials under local conditions with native irrigation water and subsurface drainage are advised.

Cite this article: Torabi, Mahboubeh, Jahanian, Fatemeh, Zarabi, Mahboubeh, Mahdavi, Shahryar, Varasteh Khanlari, Zahra. 2026. Comparative effects of two types of biochar on leachate quality, cations leaching coefficient, and chemical properties of a calcareous saline-sodic soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 16 (2), 33-56.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23817.2201

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



مقایسه اثر دو نوع بیوپچار بر کیفیت زه آب، ضریب آبشویی کاتیون ها و ویژگی های شیمیایی خاک شور و سدیمی آهکی

محبوبه ترابی^۱، فاطمه جهانیان^۲، محبوبه ضرابی^{۳*}، شهریار مهدوی^۴، زهرا وارسته خانلری^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: mahboob6969torabi@yahoo.com

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: samsung.jahanian@yahoo.com

۳. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: smzarabi@malayeru.ac.ir
zarrabi7@gmail.com

۴. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: sh.mahdavi@malayeru.ac.ir

۵. استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: zahra.varasteh@malayeru.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
سابقه و هدف: استفاده از اصلاح کننده های آلی، اغلب راهکار مناسبی برای اصلاح خاک های شور و سدیمی می باشد. به منظور بررسی اثر دو نوع بیوپچار حاصل از باگاس نیشکر و گردو بر کیفیت زه آب خروجی و ضریب آبشویی کاتیون ها، هم چنین برخی ویژگی های شیمیایی یک خاک شور و سدیمی آهکی با بافت رس سیلتی پس از پنج دوره آبشویی، آزمایشی با استفاده از ستون های آبشویی در آزمایشگاه خاکشناسی دانشگاه ملایر اجرا شد.	نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷
مواد و روش ها: آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. ابتدا به خاک های تیمار شده با سطوح مختلف بیوپچارهای باگاس نیشکر و گردو (۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) و خاک شاهد یک حجم منفذی، پالس گچ با غلظت ۲ گرم در لیتر اضافه شد و ستون ها به مدت یک هفته در شرایط انکوباسیون (25±2 °C) نگهداری شدند. سپس ستون های خاک هر ماه و به مدت ۵ ماه با یک حجم منفذی آب مقطر آبشویی شدند. غلظت کاتیون ها (سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم)، pH، EC و SAR در زه آب های خارج شده و هم چنین در پایان آبشویی برخی از ویژگی های شیمیایی خاک های آبشویی شده، اندازه گیری شد.	واژه های کلیدی: آبشویی، اصلاح خاک، بیوپچار، خاک شور و سدیمی، ضریب آبشویی کاتیون
یافته ها: نتایج بیانگر اثر ساده معنی دار زمان بر pH و اثر متقابل معنی دار بیوپچار و زمان بر EC و SAR در زه آب ها (P<۰/۰۱) بود. مقدار pH در زه آب ها با افزایش زمان آبشویی افزایش و به مقادیر بیشتر از ۹/۵ رسید. نتایج نشان دهنده کاهش مقدار EC و SAR در زه آب ها با افزایش زمان آبشویی بود و در زه آب ماه آخر در سطوح مختلف تیمار بیوپچار باگاس نیشکر،	

مقدار EC و SAR به صورت معنی داری ($P < 0.05$) بیش تر از سطوح مختلف تیمار بیوچار گردو و شاهد به دست آمد. مقدار SAR در آخرین زه آب سطوح مختلف بیوچار باگاس نیشکر بیش تر از $0.5 \text{ (meq l}^{-1})$ ۱۳ بود. اثر تیمارها بر مقدار سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم تجمعی آبشویی شده از خاک ها پس از ۵ دوره آبشویی معنی دار ($P < 0.01$) بود. بیش ترین سدیم و کلسیم تجمعی آبشویی شده در تیمار بیوچار باگاس نیشکر و بیش ترین منیزیم و پتاسیم تجمعی آبشویی شده در تیمار بیوچار گردو مشاهده شد. ترتیب بزرگی ضریب آبشویی کاتیون ها به صورت پتاسیم > منیزیم > کلسیم > سدیم به دست آمد. میانگین ضریب آبشویی کاتیون سدیم در خاک های تیمار شده با بیوچار باگاس نیشکر ($295/4 \text{ month}^{-1}$) و بیوچار گردو ($257/6 \text{ month}^{-1}$) بیش تر از خاک شاهد ($196/7 \text{ month}^{-1}$) بود. در پایان آبشویی pH ، EC_e ، SAR و ESP در خاک های شاهد و تیمار شده نسبت به خاک اولیه کاهش یافت. نتایج نشان داد اثر تیمارها بر pH معنی دار نمی باشد، اما اثر آن ها بر EC_e ، SAR و ESP معنی دار ($P < 0.01$) است. بیش ترین EC_e ($1/0.5 \text{ dS m}^{-1}$)، SAR ($13/6 \text{ (meq l}^{-1})^{0.5}$) و ESP ($24/1$) در خاک شاهد مشاهده شد و کم ترین EC_e ($0/64 \text{ dS m}^{-1}$)، SAR ($1/61 \text{ (meq l}^{-1})^{0.5}$) و ESP ($8/4$) مشاهده شده در تیمار بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد، با مقدار این ویژگی ها در تیمار بیوچار باگاس نیشکر ۱ درصد تفاوت معنی دار نداشت.

نتیجه گیری: نتایج تحقیق نشان داد پس از پنج دوره آبشویی، کیفیت زه آب های خروجی از تیمار بیوچار گردو بهتر از تیمار بیوچار باگاس نیشکر است. ترتیب بزرگی ضریب آبشویی کاتیون ها از خاک های تیمار شده به صورت پتاسیم > منیزیم > کلسیم > سدیم بود و ضریب آبشویی سدیم در تیمار بیوچار باگاس نیشکر بیش تر از تیمار بیوچار گردو به دست آمد. در پایان آبشویی، خاک شاهد به خاک سدیمی تبدیل شد و افزودن هر دو تیمار موجب بهبود شرایط خاک مورد مطالعه شد. نظر به عملکرد بهتر و عدم وجود اختلاف معنی دار بین سطوح مختلف بیوچار باگاس نیشکر، استفاده از سطح بیوچار باگاس نیشکر ۱ درصد جهت مطالعات بعدی در خاک مورد آزمایش توصیه می شود. لازم به ذکر است کاربرد عملی نتایج این تحقیق در منطقه مورد مطالعه، نیازمند تکرار آزمایشات در محل و با استفاده از آب محلی منطقه همراه با احداث زهکش های زیرزمینی است.

استناد: ترابی، محبوبه، جهانیان، فاطمه، ضرابی، محبوبه، مهدوی، شهریار، وارسته خانلری، زهرا (۱۴۰۵). مقایسه اثر دو نوع بیوچار بر کیفیت زه آب، ضریب آبشویی کاتیون ها و ویژگی های شیمیایی خاک شور و سدیمی آهکی. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۶ (۲)، ۵۶-۳۳.

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23817.2201



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

توسعه خاک‌های متأثر از نمک به یک تهدید بزرگ و چالش برای تولید پایدار در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان تبدیل شده است (۱). غلظت زیاد نمک‌های محلول، به‌ویژه یون سدیم و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی نامطلوب در این خاک‌ها موجب کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌گردد (۲). برآورده شده است که بیش از ۱۱۰۰ میلیون هکتار از اراضی جهان تحت‌تأثیر شوری و سدیمی شدن قرار دارند و تقریباً ۶۰ درصد آنها شور، ۲۶ درصد سدیمی و ۱۴ درصد شور و سدیمی است (۳). بنابراین مدیریت این خاک‌ها از مباحث مهم در تأمین نیاز غذایی جمعیت در حال رشد است (۴).

استفاده از اصلاح‌کننده‌های معدنی حاوی یون کلسیم مانند گچ (۵، ۶)، یا ترکیباتی که موجب افزایش حلالیت مواد معدنی کلسیم‌دار خاک می‌شوند مانند گوگرد عنصری و اسید سولفوریک (۷، ۸)، اصلاح‌کننده‌های آلی و معدنی (۹، ۱۰)، گیاه پالایی (۱۱) و نانو ذرات (۱۲) از روش‌های احیای خاک‌های شور و سدیمی که از جمله خاک‌های متأثر از نمک می‌باشند، است. در اصلاح خاک‌های شور و سدیمی به روش آبشویی، همراه با آبشویی نمک‌های مازاد محلول، یون سدیم موجود در مکان‌های تبدلی با یک کاتیون دوظرفیتی (ترجیحاً یون کلسیم) جایگزین شده و وارد محلول خاک می‌شود و سپس سدیم محلول، از طریق آبشویی از خاک خارج می‌شود (۱۳).

نکته حائز اهمیت در استفاده از گچ در اصلاح خاک‌های شور و سدیمی، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، وجود ترکیبات آهکی با حلالیت کم در این خاک‌ها است. حلالیت ترکیبات آهکی در حضور گچ به دلیل اثر یون مشترک کلسیم کاهش می‌یابد. افزودن مواد آلی به خاک‌های شور و سدیمی روش دیگری برای احیا و افزایش حاصلخیزی خاک است

(۱۴). در مطالعات مختلف به استفاده از ترکیبات آلی مختلفی مانند ورمی‌کمپوست (۱۵) بیوجار و کمپوست (۹، ۱۶) و همچنین استفاده ترکیبی از اصلاح‌کننده‌های آلی و معدنی (۱۷ و ۱۸) جهت احیا خاک‌های شور و سدیمی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن‌ها اشاره شده است. تولید گاز دی‌اکسیدکربن از تجزیه ماده آلی و کاهش اسیدیته خاک در اثر استفاده تلفیقی از ماده آلی همراه با گچ در این خاک‌ها موجب افزایش حلالیت ترکیبات آهکی موجود در خاک شده و موجب کاهش پراکنش ذرات خاک و اصلاح خاک می‌شود (۱۹).

امروزه بیوجار به عنوان یک ماده کربن‌دار چندکاره جدید به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک برای بهبود ویژگی‌های خاک استفاده می‌شود (۲۰). بیوجار، زغال تهیه شده از زیست‌توده‌های گیاهی و ضایعات کشاورزی است که طی فرایند پیرولیز و سوختن کند و آرام مواد آلی در شرایطی با حداقل اکسیژن یا نبود آن تولید می‌شود (۲۱). با توجه به ترکیب شیمیایی متفاوت زیست‌توده‌های گیاهی، بیوجارهای تولید شده از آن‌ها نیز دارای ویژگی‌های متفاوتی می‌باشند (۲۲). در مطالعات مختلف اثر مثبت بیوجارهای مختلف در افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک، کاهش شوری خاک از طریق جذب املاح، کاهش pH و به طور کلی بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی خاک گزارش شده است (۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶).

مساحت زیادی از اراضی کشور ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. در این نوع اقلیم‌ها مشکلات تجمع نمک در خاک‌ها و توسعه خاک‌های متأثر از نمک وجود دارد (۲۷). تجمع نمک در خاک‌ها باعث کاهش قابل‌توجه عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود. خاک‌های شور و سدیمی یکی از انواع خاک‌های متأثر از نمک بوده و در این خاک‌ها غلظت املاح محلول خاک بیش‌تر از ۴ دسی‌زیمنس

بر متر ($EC_e > 4 \text{ dS m}^{-1}$) و هم‌چنین درصد سدیم تبدیلی بیش‌تر از ۱۵ ($ESP > 15$) است (۲۸). وسعت اراضی شور و سدیمی در ایران حدود ۱۵ تا ۲۶ میلیون هکتار (۱۰ تا ۱۵ درصد از مساحت کشور) است (۲۹). اراضی کلیل‌آباد واقع در شمال شهرستان ملایر، دارای خاک شور و سدیمی آهکی می‌باشند. به دلیل شرایط نامناسب زهکشی در این اراضی، آب افزوده شده به این خاک‌ها در سطح خاک باقی مانده و به دلیل فزونی تبخیر بر بارندگی، در اثر تبخیر آب، املاح در سطح خاک تجمع می‌یابند و این امر از جمله عوامل مؤثر در شوری ثانویه این خاک‌ها است. این پژوهش با هدف مقایسه اثر دو نوع بیوپار حاصل از پوست گردو و باگاس نیشکر بر کیفیت زه‌آب‌ها و آبشویی کاتیون‌های کلسیم و منیزیم، سدیم و پتاسیم از یک خاک شور و سدیمی آهکی و هم‌چنین تغییر ویژگی‌های شیمیایی آن پس از ۵ دوره آبشویی با آب مقطر، با این فرض که افزودن بیوپارها به خاک و آبشویی آن باعث کاهش pH و EC و هم‌چنین بهبود برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک می‌شود، انجام شد. از آن‌جایی‌که هدف از انجام این تحقیق صرفاً بررسی اثر بیوپارها بر کیفیت زه‌آب‌ها و آبشویی کاتیون‌ها از خاک مورد مطالعه است، از آب مقطر جهت آبشویی استفاده شد. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق به عنوان شرایط مرجع، قابل تفسیر بوده و می‌توانند مبنایی برای مقایسه با نتایج حاصل از آب‌های واقعی منطقه و در شرایط واقعی در تحقیقات بعدی باشند.

مواد و روش‌ها

دشت ملایر واقع در استان همدان دارای آب و هوای کوهستانی و گاهی سرد است. میزان بارش سالانه در ناحیه ملایر ۳۱۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۱۳/۸ درجه سلسیوس گزارش شده است (۳۰). خاک مورد استفاده در این تحقیق از اراضی

شور و سدیمی منطقه کلیل‌آباد شهرستان ملایر از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری (۹) با مختصات جغرافیایی $48^{\circ} 33' 70''$ شمالی و $34^{\circ} 20' 74''$ شرقی جمع‌آوری گردید. پس از هوا خشک نمودن، به منظور ایجاد یکنواختی، نمونه خاک تهیه شده از الک ۲ و ۴ میلی‌متری عبور داده شد. از خاک ۲ میلی‌متری جهت آنالیز خاک و از ۴ میلی‌متری جهت انجام مطالعات آبشویی استفاده شد. قبل از شروع آزمایشات آبشویی، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتر (۳۱)، ظرفیت مزرعه به روش وزنی (۳۲)، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه (۳۳)، کربنات کلسیم معادل به روش خشی‌سازی با اسید (۳۴)، گچ به روش استون (۲۸)، درصد ماده آلی به روش والکی بلاک (۳۵)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جایگزینی کاتیونی (۳۶) تعیین شد. هم‌چنین در عصاره اشباع خاک (۲۸)، قابلیت هدایت الکتریکی با دستگاه هدایت‌سنج مدل Jenway 4310، اسیدیته با دستگاه pH متر مدل Metrohm 744، غلظت کاتیون‌های کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون (۳۷) و غلظت کاتیون‌های سدیم و پتاسیم به کمک دستگاه فلیم‌فتومتر مدل Jenway PFP7 اندازه‌گیری شد. نتایج تجزیه خاک نشان داد، بافت خاک مورد مطالعه در کلاس رس سیلتی قرار دارد و مقدار کربن آلی آن کم و برابر با ۰/۳۴ درصد می‌باشد. با توجه به مقادیر pH، EC_e ، SAR، ESP و مقدار آهک، خاک مورد مطالعه یک خاک شور و سدیمی رس سیلتی آهکی است (جدول ۱).

هدف از این تحقیق استفاده از بیوپارهایی با EC پایین و سدیم کل کم به دلیل شور و سدیمی بودن خاک مورد مطالعه و هم‌چنین استفاده از بیوپارهایی با نسبت C/N و محتوای نیتروژن، پتاسیم، کلسیم و منیزیم کل متفاوت، به دلیل تأثیر عوامل مذکور در فرایند جایگزینی سدیم در مکان‌های تبدیلی بود.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد مطالعه.

Table 1. Some physicochemical properties of studied soil.

ویژگی	واحد	مقدار	ویژگی	واحد	مقدار
Property	Unit	Value	Property	Unit	Value
اسیدیته (pH)	-	8.6	کربن آلی (Organic Carbon)	(%)	0.34
قابلیت هدایت الکتریکی اشباع (EC_e)	($dS\ m^{-1}$)	12.3	رس (Clay)	(%)	43
ظرفیت تبادل کانیونی (CEC)	($cmol_c\ kg^{-1}$)	17.8	سیلت (Silt)	(%)	48
نسبت جذب سدیم (SAR)	($(meq\ l^{-1})^{0.5}$)	48.5	شن (Sand)	(%)	9
درصد سدیم نبادلی (ESP)	(%)	78.7	بافت (Texture)	-	رس سیلتی (Silty Clay)
کربنات کلسیم معادل (ECC)	(%)	30.5	جرم مخصوص ظاهری (Bulk Density)	($g\ cm^{-3}$)	1.4
گچ (Gypsum)	(%)	4.2	ظرفیت مزرعه (Field Capacity)	(%)	29.5

اندازه‌گیری شدند (جدول ۲). با توجه به جدول ۲، EC بیوجار گردو ($0.42\ dS\ m^{-1}$) کم‌تر از بیوجار باگاس نیشکر ($2.9\ dS\ m^{-1}$) است. محتوای نیتروژن، پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم کل در بیوجار باگاس نیشکر بیش‌تر از بیوجار گردو بوده و نسبت C/N در بیوجار باگاس نیشکر کم‌تر از بیوجار گردو است.

جهت آماده‌سازی ستون‌های خاک از ستون‌هایی از جنس پلاستیک به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۴/۸ سانتی‌متر استفاده شد. در انتهای ستون‌ها یک لایه سنگریزه به ارتفاع ۲ سانتی‌متر جهت زهکشی آزاد داخل ستون‌ها ریخته شد و سپس خاک عبور داده شده از الک ۴ میلی‌متری با درصدهای وزنی مختلف از بیوجارهای گردو و باگاس نیشکر شامل یک درصد (۲۸/۴ تن در هکتار)، دو درصد (۵۶/۸ تن در هکتار) و چهار درصد (۱۱۳/۶ تن در هکتار)، با در نظر گرفتن جرم مخصوص ظاهری و عمق ۱۰ سانتی‌متر، کاملاً مخلوط به درون ستون‌های پلاستیکی تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری در سه تکرار انتقال داده شدند. ستون‌های خاک شاهد نیز بدون اضافه نمودن تیمارها آماده شدند.

بدین منظور ابتدا از مواد اولیه شامل کود مرغی، کاه و کلش گندم، پوست گردو و باگاس نیشکر که برخی در منطقه مورد مطالعه وجود داشته و برخی از استان‌های دیگر تهیه شده بودند، از طریق فرایند پیرولیز و در درجه حرارت ۴۰۰-۳۵۰ درجه سلسیوس در مدت زمان ۶ تا ۸ ساعت، بیوجار تهیه شد. پس از آسیاب نمودن و عبور از الک ۰/۵ میلی‌متری، مقدار EC و سدیم کل بیوجارهای آماده شده، اندازه‌گیری شد. سپس از بین بیوجارها، بیوجار گردو و بیوجار باگاس نیشکر به دلیل داشتن EC پایین و سدیم کل کم جهت مطالعات انتخاب شدند. بیوجار گردو از مواد اولیه پوسته قهوه‌ای گردو، جمع‌آوری شده از باغ‌های گردو شهرستان ملایر واقع در استان همدان و بیوجار باگاس نیشکر از مواد اولیه باگاس نیشکر، جمع‌آوری شده از شرکت کشت و صنعت نیشکر دهخدا واقع در شهرستان باوی استان خوزستان تهیه شد. برخی ویژگی‌های شیمیایی بیوجارهای گردو و باگاس نیشکر، همانند قابلیت هدایت الکتریکی و اسیدیته در نسبت ۱:۲۰ بیوجار به آب مقطر (۳۸)، درصد کل عناصر، سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم به روش هضم اسیدی (۳۹)، درصد نیتروژن به روش کلدال (۴۰) و کربن به روش اکسیداسیون (۳۸)

جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی بیوچارها.

Table 2. Some chemical properties of biochars.

بیوچار باگاس نیشکر Sugarcane Bagasse Biochar (SB)	بیوچار گردو Walnut Biochar (WB)	واحد Unit	ویژگی Property
مقدار Value			
7.5	7.5	-	اسیدیته (pH)
2.9	0.42	(dS m ⁻¹)	قابلیت هدایت الکتریکی (EC)
0.09	0.01	(%)	سدیم کل (Total Sodium)
2.27	0.65	(%)	کلسیم کل (Total Calcium)
1.0	0.36	(%)	منیزیم کل (Total Magnesium)
1.20	0.55	(%)	پتاسیم کل (Total Potassium)
1.12	0.52	(%)	نیترژن کل (Total Nitrogen)
78	60	(%)	کربن (Carbon)
69.6	115.4	-	نسبت کربن به نیترژن (C/N)

قابلیت هدایت الکتریکی $1/7 \text{ dS m}^{-1}$ و اسیدیته $5/6$ (۵/۶) به ستون‌های آبخویی شاهد و تیمار شده اضافه شد. جهت محاسبه حجم منفذی از رابطه ۱ استفاده شد و از حاصل ضرب درصد تخلخل به دست آمده از رابطه ۱ در حجم ستون‌های آبخویی، حجم منفذی به دست آمد.

$$(۱) \left(1 - \frac{\text{جرم مخصوص ظاهری}}{\text{جرم مخصوص حقیقی}} \right) \times 100 = \text{درصد تخلخل}$$

ستون‌های آماده شده به مدت یک هفته در شرایط انکوباسیون با دمای 25 ± 2 درجه سلسیوس و با حفظ ۶۰ درصد رطوبت مزرعه به روش وزنی، نگهداری شدند. بعد از گذشت یک هفته ستون‌ها به روش متناوب با فاصله زمانی ۳۰ روزه به مدت ۵ ماه با یک حجم منفذی تحت آبخویی با آب مقطر قرار گرفتند. شرایط آب و هوایی منطقه در فصول پاییز و زمستان و اوایل بهار سرد بوده و احتمال حلالیت نمک‌ها در دمای پایین کم است و امکان آبخویی در این زمان‌ها

با پرکردن لایه به لایه خاک و ضربه زدن یکنواخت، جرم مخصوص ظاهری در ستون‌های خاک شاهد نزدیک مقدار واقعی و برابر با $1/42$ گرم بر سانتی‌مترمکعب با مصرف ۳۷۵ گرم خاک و جرم مخصوص ظاهری در تیمارها حدود $1/32$ گرم بر سانتی‌مترمکعب با مصرف ۳۴۳ گرم خاک به دست آمد (۵). در مجموع ۲۱ ستون آبخویی آماده شد. آبخویی خاک‌های شور و سدیمی به دلیل تورم، پراکندگی و مهاجرت ذرات رس و کاهش هدایت آبی مشکل است و افزودن کلسیم به این خاک‌ها می‌تواند از این مشکل جلوگیری کند (۴). گچ به عنوان یک منبع کلسیمی به دلیل حلالیت، ارزانی، در دسترس بودن و راحتی استفاده رایج‌ترین اصلاح‌کننده مورد استفاده در خاک‌های شور و سدیمی است (۸). گچ با افزایش غلظت الکترولیت و افزایش غلظت یون کلسیم در محلول، می‌تواند هدایت هیدرولیکی خاک را افزایش دهد (۴۱). بدین منظور یک پالس گچی، برابر با یک حجم منفذی (با غلظت ۲ گرم بر لیتر،

نرمال بودن داده‌ها انجام شد و پس از اطمینان از حالت توزیع نرمال، نسبت به تجزیه و تحلیل آن‌ها اقدام گردید. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD (5%) انجام شد. هم‌چنین رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Office 2013 انجام شد.

نتایج و بحث

کیفیت زه‌آب‌های خروجی

اسیدیته (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR): نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر ساده زمان بر مقدار pH زه‌آب‌ها و هم‌چنین اثر ساده بیوپچار و زمان و هم‌چنین اثر متقابل بیوپچار و زمان بر مقدار EC و SAR زه‌آب‌ها معنی‌دار ($P < 0/01$) است (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین اثر زمان بر pH زه‌آب‌ها نشان داد، بیش‌ترین pH مشاهده شده در ماه چهارم از آبتشویی (۹/۷) اختلاف معنی‌دار ($P < 0/05$) با pH در سایر زمان‌ها دارد. کم‌ترین pH (۸/۵) نیز با اختلاف معنی‌دار ($P < 0/05$) با سایر تیمارها، در زه‌آب ماه اول مشاهده شد (شکل ۱). نتایج نشان داد مقدار pH در زه‌آب‌های ماه دوم تا پنجم نسبت به ماه اول افزایش یافته است. در سایر مطالعات نیز افزایش pH زه‌آب‌ها با افزایش زمان آبتشویی، در خاک‌های تیمار شده با انواع بیوپچار گزارش شده است (۱۶، ۴۳). آبتشویی یون سدیم از خاک‌ها می‌تواند دلیل افزایش pH باشد (۱۶). از آنجایی‌که محدوده نرمال pH برای آب آبیاری ۶/۵ تا ۸/۴ می‌باشد (۴۲)، نظر به این‌که زه‌آب‌های خارج شده از خاک‌ها در هر ۵ زمان از آبتشویی دارای pH بیش‌تر از ۸/۴ می‌باشند، می‌توان بیان نمود زه‌آب‌های خارج شده در هر ۵ زمان آبتشویی دارای محدودیت مصرف می‌باشند.

وجود ندارد. از آنجایی‌که در منطقه مورد مطالعه حدود ۵ ماه از سال دمای هوا گرم است، بنابراین به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، آبتشویی به مدت پنج ماه انجام شد. در آخرین دور آبتشویی در خاک شاهد، به‌دلیل کاهش هدایت آبی، آبتشویی در مدت زمان طولانی‌تری انجام شد. زه‌آب‌های خارج شده از ستون‌ها در هر ماه جمع‌آوری شده و حجم زه‌آب‌ها، pH، EC، SAR، غلظت کاتیون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم و پتاسیم به روش‌های ذکر شده با هدف بررسی روند تغییر پارامترها و هم‌چنین مقادیر آن‌ها در آخرین زه‌آب خارج شده اندازه‌گیری شد. جهت بررسی سرعت آبتشویی کاتیون‌ها در مدت زمان آبتشویی و محاسبه ضریب آبتشویی معادله درجه اول (۲) بر داده‌های حاصل از غلظت تجمعی کاتیون‌های آبتشویی شده برازش داده شد.

$$y = bx + a \quad (2)$$

در این معادله، y برابر با کل غلظت تجمعی آبتشویی شده (meq kg^{-1})، b معادل سرعت آبتشویی ($\text{meq kg}^{-1} \text{ month}^{-1}$) و a عرض از مبدا (meq kg^{-1}) و برابر با مقدار اولیه می‌باشد. ضریب آبتشویی با ضرب نمودن پارامتر a در پارامتر b معادله محاسبه شد و به‌عنوان شاخصی برای نمایش شدت کلی فرآیند آبتشویی استفاده گردید. در پایان آبتشویی، خاک درون ستون‌های آبتشویی تخلیه و خشک شده و برخی از ویژگی‌های شیمیایی آن‌ها به روش‌های ذکر شده اندازه‌گیری شد.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل شامل دو فاکتور بیوپچار و زمان در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد.

جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده شد. قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، تست

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر درصدهای مختلف بیوپچار گردو و باگاس نیشکر بر مقدار pH، EC و SAR زه آب‌ها در زمان‌های مختلف آبیویی.

Table 3. Analysis of variance for the effects of different rates of walnut and sugarcane bagasse biochar on the pH, EC and SAR of leachates at various leaching times.

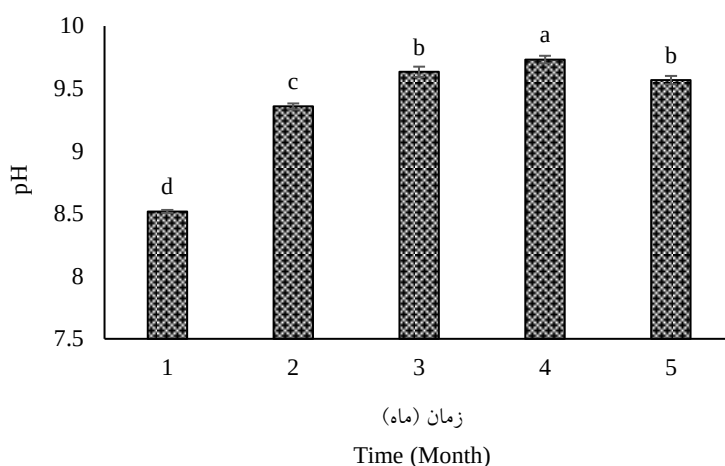
میانگین مربعات Means square			درجه آزادی df	منبع تغییرات Sources of variations
SAR	EC	pH		
10345.41 **	714.60 **	5.071 **	4	زمان (Time)
82.41 **	0.644 **	0.029 ^{ns}	6	بیوپچار (Biochar)
283.13 **	1.46 **	0.025 ^{ns}	24	زمان × بیوپچار (Time×Biochar)
3.81	0.005	0.016	70	خطا (Error)
4.47	1.51	1.34		ضریب تغییرات (CV%)

pH (اسیدیته)، EC (قابلیت هدایت الکتریکی) و SAR (نسبت جذب سدیم)

^{ns} و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

pH (acidity), EC (Electrical Conductivity) and SAR (Sodium Adsorption Ratio)

^{ns}, ** non-significant and significant at the 1% probability level, respectively



شکل ۱- مقایسه میانگین pH زه آب‌ها تحت زمان‌های مختلف آبیویی.

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح پنج درصد و خطوط عمودی بر روی ستون‌ها نشان‌دهنده خطای استاندارد (n=21) می‌باشند.

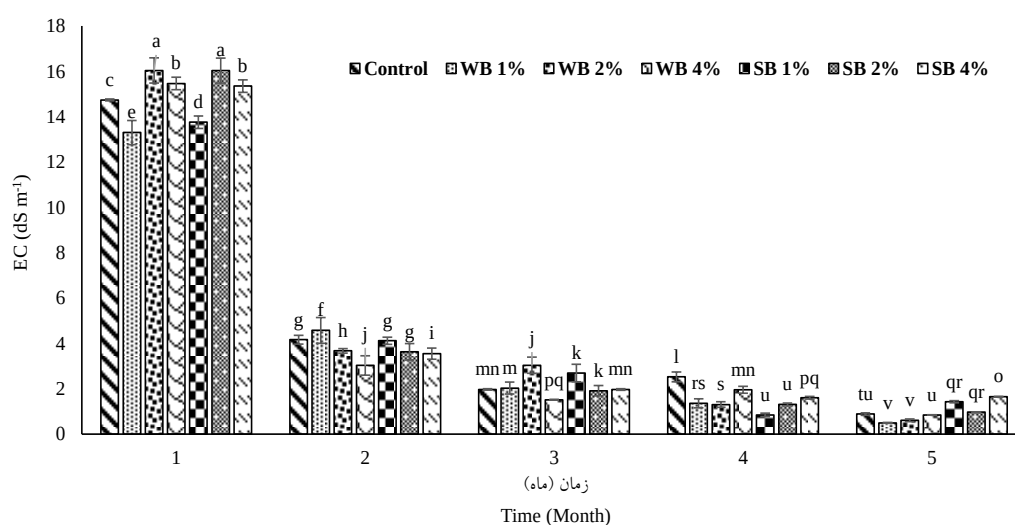
Figure 1. Mean comparison of pH in leached under different leaching times.
Means with the same letter in each column indicate no significant difference based on the LSD test at the 5% level and vertical bars on the columns represent the standard error (SE) (n=21).

با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بیوپچار و زمان بر مقدار قابلیت هدایت الکتریکی (EC) زه آب‌ها، بیش‌ترین EC در ماه اول مشاهده شد و مقدار آن در تیمارهای بیوپچار گردو ۲ درصد (۱۶/۰۴ dS m⁻¹) و بیوپچار باگاس نیشکر ۲ درصد (۱۶/۰۳ dS m⁻¹) اختلاف معنی‌دار (P<۰/۰۵) با سایر تیمارها داشت (شکل ۲). نتایج نشان داد مقدار EC در ماه اول بیش‌تر از سایر ماه‌ها است و با گذشت

با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بیوپچار و زمان بر مقدار قابلیت هدایت الکتریکی (EC) زه آب‌ها، بیش‌ترین EC در ماه اول مشاهده شد و مقدار آن در تیمارهای بیوپچار گردو ۲ درصد

تیمار بیوچار باگاس نیشکر، با اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) بیش‌تر از خاک شاهد و سطوح مختلف تیمار بیوچار گردو به‌دست آمد. احتمالاً دلیل این امر، EC بیش‌تر بیوچار باگاس نیشکر ($2/9 \text{ dS m}^{-1}$) نسبت به بیوچار گردو ($0/42 \text{ dS m}^{-1}$) است (جدول ۲). در سایر مطالعات نیز افزایش EC زه‌آب‌ها در اثر افزودن اصلاح‌کننده‌ها به خاک گزارش شده است (۲۳).

زمان کاهش می‌یابد و اثر تیمارها بر EC وابسته به زمان است و در ماه‌های بعد، تفاوت بین تیمارها کاهش یافته است. در سایر مطالعات نیز روند کاهشی برای EC زه‌آب‌ها در طول دوره آبیویی گزارش شده است (۱۶، ۲۳). در ماه پنجم بیش‌ترین مقدار EC تیمار بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد ($1/65 \text{ dS m}^{-1}$) با اختلاف معنی‌دار با سایر تیمارها ($P < 0.05$) مشاهده شد. مقادیر EC در زه‌آب ماه پنجم سطوح مختلف



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل زمان و بیوچار بر قابلیت هدایت الکتریکی (EC) زه‌آب‌ها.

WB= بیوچار گردو، SB= بیوچار باگاس نیشکر و اعداد ۱، ۲ و ۴ به درصد بیوچارهای استفاده شده اشاره دارند.

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح پنج درصد

و خطوط عمودی بر روی ستون‌ها نشان‌دهنده خطای استاندارد ($n=3$) می‌باشند.

Figure 2. Mean comparison for the interaction effect of time and biochar on leachate Electrical Conductivity (EC). WB= Walnut Biochar, SB= Sugarcane Bagasse Biochar, and the numerals 1, 2, and 4 correspond to the percentages of the biochars employed. Means with the same letter in each column indicate no significant difference based on the LSD test at the 5% level and vertical bars on the columns represent the standard error (SE) ($n=3$).

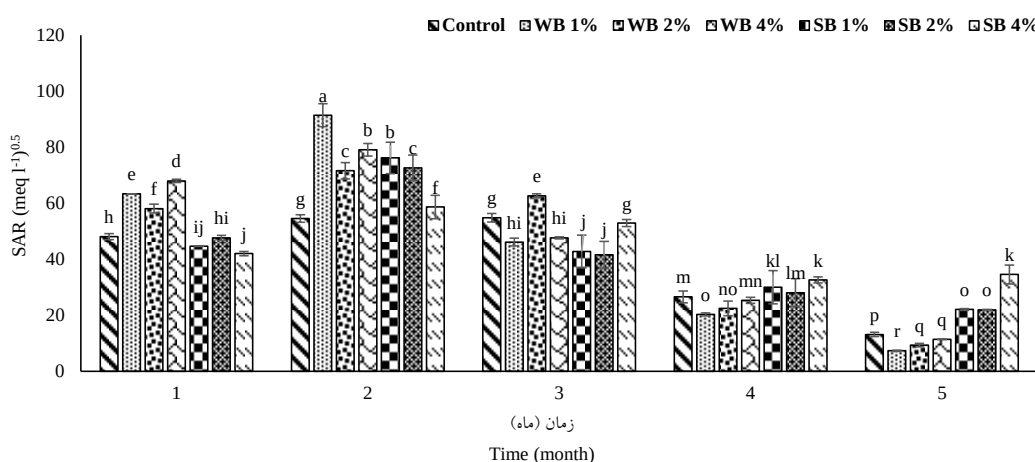
$0/49-0/84 \text{ dS m}^{-1}$ و زه‌آب تیمارهای بیوچار باگاس نیشکر (در دامنه $0/96-1/65 \text{ dS m}^{-1}$) و شاهد ($0/88 \text{ dS m}^{-1}$)، دارای محدودیت جزئی تا متوسط شوری می‌باشند.

مطابق نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار و زمان بر نسبت جذب سدیم (SAR) زه‌آب‌ها، بیش‌ترین SAR در ماه دوم مشاهده شد و مقدار آن

با توجه به مقادیر EC و مطابق راهنمای کیفیت آب آبیاری (۴۲)، زه‌آب‌های ماه اول و دوم در خاک شاهد و خاک‌های تیمار شده دارای محدودیت شدید و زه‌آب‌های ماه سوم و چهارم دارای محدودیت جزئی تا متوسط مصرف از نظر شوری می‌باشند. در زه‌آب‌های ماه پنجم، زه‌آب تیمارهای بیوچار گردو از نظر شوری دارای محدودیت نبوده (در دامنه

است. با توجه به نتایج به دست آمده می توان اظهار داشت، اثر تیمارها بر SAR وابسته به زمان بوده و با افزایش زمان آبتیوی، تفاوت بین تیمارها کاهش می یابد. افزایش SAR در ماه دوم، ممکن است ناشی از افزایش غلظت سدیم محلول در زه آب ها به دلیل تبادل سدیم تبادلی با کلسیم موجود در محلول خاک باشد. دلایان و ذبیحی (۲۰۲۲) نیز با افزودن مواد آلی به خاک شور و سدیمی و آبتیوی آن گزارش نمودند، میزان SAR در دور اول آبتیوی به دلیل آبتیوی بیش تر املاح و جایگزین شدن سدیم افزایش یافته و به تدریج میزان آن با آبتیوی بیش تر کاهش یافته است (۴۵). مقادیر بیش تر SAR در زه آب ها نشان دهنده آبتیوی بیش تر یون سدیم و غلظت کم تر یون کلسیم و منیزیم آبتیوی شده از خاک های مورد مطالعه می باشد.

در تیمار بیوچار گردو ۱ درصد ($(\text{meq l}^{-1})^{0.5}$ ۹۱/۵) اختلاف معنی دار با سایر تیمارها ($P < 0.05$) داشت (شکل ۳). در زه آب ماه اول، SAR کم تر از ماه دوم بود و بیش ترین مقدار در تیمار بیوچار گردو ۴ درصد ($(\text{meq l}^{-1})^{0.5}$ ۶۷/۹) و کم ترین مقدار در تیمار بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد ($(\text{meq l}^{-1})^{0.5}$ ۴۲/۱) مشاهده شد. پس از ماه دوم، SAR در همه تیمارها کاهش یافت و در ماه پنجم به کم ترین مقدار رسید، به گونه ای که در تیمار بیوچار گردو ۱ درصد ($(\text{meq l}^{-1})^{0.5}$ ۷/۳) کم ترین و در تیمار بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد ($(\text{meq l}^{-1})^{0.5}$ ۳۴/۶) بیش ترین مقدار مشاهده شد. نتایج نشان می دهد که حداکثر آبتیوی سدیم در ماه دوم رخ داده و با گذشت زمان، میزان سدیم آبتیوی شده کاهش یافته



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل زمان و بیوچار بر نسبت جذب سدیم (SAR) زه آب ها.

WB= بیوچار گردو، SB= بیوچار باگاس نیشکر و اعداد ۱، ۲ و ۴ به درصد بیوچارهای استفاده شده اشاره دارند.

میانگین های دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی دار براساس آزمون LSD در سطح پنج درصد و خطوط عمودی بر روی ستون ها نشان دهنده خطای استاندارد (n=۳) می باشند.

Figure 3. Mean comparison for the interaction effect of time and biochar on leachate Sodium Adsorption Ratio (SAR).

WB= Walnut Biochar, SB= Sugarcane Bagasse Biochar, and the numerals 1, 2, and 4 correspond to the percentages of the biochars employed. Means with the same letter in each column indicate no significant difference based on the LSD test at the 5% level and vertical bars on the columns represent the standard error (SE) (n=3).

SAR می‌باشند. زه‌آب ماه پنجم در خاک شاهد $(\text{meq l}^{-1})^{0.5}$ (۱۳/۱) و هر سه سطح تیمار بیوچار گردو (دامنه $(\text{meq l}^{-1})^{0.5}$ ۷/۱۱-۳/۴) محدودیتی از نظر استفاده برای آبیاری ندارند. از آنجایی که مقدار SAR در زه‌آب ماه پنجم هر سه سطح تیمار بیوچار باگاس نیشکر در دامنه $(\text{meq l}^{-1})^{0.5}$ ۶/۶-۲۱/۳۴ قرار دارد و به دلیل داشتن EC کم‌تر از $2/9 \text{ dSm}^{-1}$ ، دارای محدودیت شدید از نظر SAR می‌باشد.

غلظت تجمعی و ضریب آبشویی کاتیون‌ها: نتایج تجزیه واریانس نشان داد غلظت تجمعی کاتیون‌های سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم آبشویی شده پس از پنج ماه آبشویی به‌طور معنی‌داری ($P < 0/01$) تحت‌تأثیر سطوح مختلف بیوچارها قرار دارد (جدول ۴).

احتمالاً SAR بیش‌تر در زه‌آب تیمار بیوچار باگاس نیشکر، در نتیجه جایگزینی بیش‌تر یون سدیم با یون کلسیم حاصل از حلالیت کربنات کلسیم بومی خاک و آزاد ازی یون کلسیم از بیوچار باگاس نیشکر باشد. خاک تحت آبشویی، حاوی مقدار قابل‌توجهی کربنات کلسیم (۳۰/۵ درصد) می‌باشد و درصد کلسیم کل در بیوچار باگاس نیشکر (۲/۲۷ درصد) بیش‌تر از بیوچار گردو (۰/۶۵ درصد) است. در سایر مطالعات نیز حلالیت کربنات کلسیم به عنوان عامل مؤثر در خروج سدیم از مکان‌های تبدلی در خاک‌های شور و سدیمی آهکی گزارش شده است (۴۶، ۴۷). با توجه به مقادیر SAR و مطابق راهنمای کیفیت آب آبیاری (۴۲)، زه‌آب‌های ماه اول تا چهارم در خاک شاهد و خاک‌های تیمار شده دارای محدودیت مصرف از نظر

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر درصدهای مختلف بیوچار گردو و باگاس نیشکر بر غلظت تجمعی سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم آبشویی شده.

Table 4. Analysis of variance for the effects of different rates of walnut and sugarcane bagasse biochar on the cumulative concentration of leached Na, Ca, Mg, and K.

میانگین مربعات Means square				درجه آزادی df	منبع تغییرات Sources of variation
پتاسیم K^+	منیزیم Mg^{2+}	کلسیم Ca^{2+}	سدیم Na^+		
0.067 **	2.23 **	2.86 **	83.34 **	6	بیوچار (Biochar)
0.4	0.9	0.051	0.177	14	خطا (Error)
0.84	3.16	5.38	0.60		ضریب تغییرات (CV%)

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

** Significant at the 1% probability level

باگاس نیشکر ۱، ۲ و ۴ درصد به‌ترتیب ۲۴/۱، ۲۳/۵ و ۲۲/۶ درصد بیش‌تر از خاک شاهد به‌دست آمد. کم‌ترین مقدار سدیم تجمعی آبشویی شده در خاک شاهد ($6/2 \text{ meq kg}^{-1}$) و بیش‌ترین مقدار در تیمار بیوچار نیشکر ۱ درصد ($74/8 \text{ meq kg}^{-1}$) مشاهده شد. آبشویی بیش‌تر کاتیون سدیم از خاک‌های تیمار

مطابق نتایج مقایسه میانگین (جدول ۵)، مقدار سدیم تجمعی آبشویی شده از سطوح مختلف هر دو تیمار به‌طور معنی‌دار ($P < 0/05$) بیش‌تر از خاک شاهد است. مقدار سدیم تجمعی آبشویی شده در تیمارهای بیوچار گردو ۱، ۲ و ۴ درصد به‌ترتیب ۱۲/۵، ۱۲/۴ و ۱۹/۱ درصد و در تیمارهای بیوچار

شده نسبت به خاک شاهد، نشان‌دهنده جایگزینی کاتیون سدیم تبادلی با کاتیون‌های دیگر است. تیمارها با فراهم نمودن کاتیون‌های دو ظرفیتی کلسیم و منیزیم موجب جایگزینی یون سدیم و ورود آن به محلول خاک شده‌اند (۹). برخلاف تیمار بیوچار باگاس نیشکر، در تیمار بیوچار گردو با افزایش سطوح مصرف، مقدار سدیم تجمعی آبشویی شده افزایش یافت.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر درصدهای مختلف بیوچار گردو و باگاس نیشکر بر غلظت تجمعی سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم (میلی‌اکی‌والان بر کیلوگرم) آبشویی شده.

Table 5. Mean comparison of the effects of different percentages of walnut and sugarcane bagasse biochar on the cumulative concentration of leached Na, Ca, Mg, and K (meq kg⁻¹).

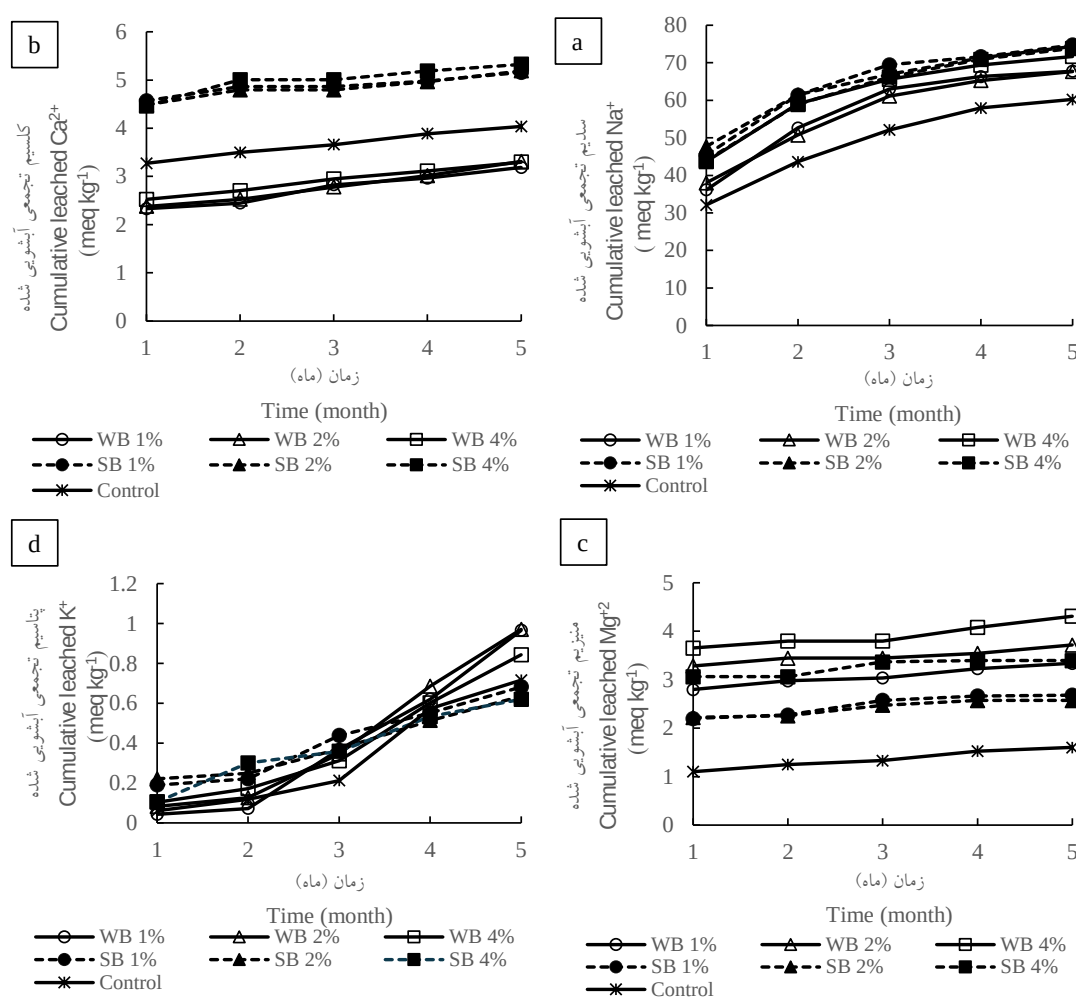
پتاسیم K ⁺	منیزیم Mg ²⁺	کلسیم Ca ²⁺	سدیم Na ⁺	تیمار Treatment
0.71 ± 0.006 c	1.60 ± 0.10 e	4.03 ± 0.12 b	60.21 ± 0.12 e	شاهد (Control)
0.96 ± 0.003 a	3.37 ± 0.09 c	3.20 ± 0.17 c	67.67 ± 0.17 d	بیوچار گردو ۱ درصد (WB1)
0.97 ± 0.001 a	3.73 ± 0.03 b	3.30 ± 0.20 c	67.70 ± 0.20 d	بیوچار گردو ۲ درصد (WB2)
0.84 ± 0.002 b	4.27 ± 0.06 a	3.30 ± 0.12 c	71.60 ± 0.38 c	بیوچار گردو ۴ درصد (WB4)
0.68 ± 0.001 d	2.67 ± 0.01 d	5.17 ± 0.60 a	74.77 ± 0.15 a	بیوچار باگاس نیشکر ۱ درصد (SB1)
0.64 ± 0.005 e	2.57 ± 0.02 d	5.17 ± 0.50 a	74.40 ± 0.31 ab	بیوچار باگاس نیشکر ۲ درصد (SB2)
0.62 ± 0.001 f	3.40 ± 0.03 c	5.30 ± 0.72 a	73.93 ± 0.30 b	بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد (SB4)

مقادیر به‌صورت میانگین ± خطای استاندارد نشان داده شده‌اند. حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD هستند.

Values are expressed as mean ± standard error (SE). Different letters within a column indicate significant differences at p < 0.05 (LSD test)

آبشویی و مقدار کل سدیم تجمعی آبشویی‌شده بیش‌تر در خاک‌های تیمار شده با بیوچار باگاس نیشکر نسبت به خاک‌های تیمار شده با بیوچار گردو، می‌تواند نشان‌دهنده توانایی بیش‌تر بیوچار باگاس نیشکر در تامین کاتیون‌های جایگزین‌شونده با کاتیون سدیم از جمله کاتیون کلسیم باشد. طبق جدول ۲ درصد کلسیم در بیوچار باگاس نیشکر ۳/۵ برابر بیوچار گردو است.

شکل ۴ غلظت تجمعی کاتیون‌های سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم آبشویی شده را در مدت زمان ۵ ماه آبشویی نشان می‌دهد. بر اساس ضرایب (a×b) به‌دست آمده از برازش نمودار غلظت‌های تجمعی کاتیون‌های سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم آبشویی شده (شکل ۴) بر معادله ۲، ترتیب بزرگی ضریب آبشویی سدیم به‌صورت شاهد > بیوچار گردو > بیوچار باگاس نیشکر به‌دست آمد (جدول ۶). ضریب



شکل ۴- غلظت تجمعی کاتیون‌های سدیم (a)، کلسیم (b)، منیزیم (c) و پتاسیم (d) آبشویی شده.

WB= بیوچار گردو، SB= بیوچار باگاس نیشکر، و اعداد ۱، ۲ و ۴ به درصد بیوچارهای استفاده شده اشاره دارند.

بیوچار گردو نیز اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. ترتیب بزرگی ضریب آبشویی کلسیم از تیمارها به‌صورت بیوچار گردو > شاهد > بیوچار باگاس نیشکر به‌دست آمد (جدول ۶). مقدار تجمعی و ضریب آبشویی کم‌تر کلسیم از سطوح مختلف بیوچار گردو، در مقایسه با سطوح مختلف تیمار بیوچار باگاس نیشکر و خاک شاهد نشان می‌دهد، کلسیم موجود در این تیمار توانسته است جایگزین سدیم موجود در مکان‌های تبادلی شده و کم‌تر توسط

نتایج مقایسه میانگین نشان داد سطوح مختلف تیمار بیوچار گردو موجب کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) و تیمار بیوچار باگاس نیشکر موجب افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) مقدار کلسیم تجمعی آبشویی شده نسبت به خاک شاهد شده است (جدول ۵). بیش‌ترین کلسیم تجمعی آبشویی شده در تیمار بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد ($5/3 \text{ meq kg}^{-1}$) مشاهده شد. بین سطوح مختلف تیمار بیوچار باگاس نیشکر اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. هم‌چنین بین سطوح مختلف تیمار

آبشویی از خاک خارج شده است. مقدار بیش‌تر سدیم
تجمعی آبشویی شده از تیمار بیوچار گردو در مقایسه
با خاک شاهد گواه این موضوع است. از طرفی مقدار
تجمعی و ضریب آبشویی بیش‌تر کلسیم از سطوح

مختلف تیمار بیوچار باگاس نیشکر، احتمالاً به دلیل
درصد کلسیم بیشتر و نسبت C/N کم‌تر این ترکیب
است.

جدول ۶- ضرایب معادله مرتبه اول ($y=bx+a$) در خاک‌های شاهد و تیمار شده.

Table 6. Parameters of the first-order equation ($y=bx+a$) in control and treated soils.

کاتیون Cation								تیمار Treatment
Ca ²⁺				Na ⁺				
r ²	a×b	b	a	r ²	a×b	b	a	
	month ⁻¹	meq kg ⁻¹ month ⁻¹	meq kg ⁻¹		month ⁻¹	meq kg ⁻¹ month ⁻¹	meq kg ⁻¹	
0.99	0.59	0.19	3.1	0.94	196.7	7.0	28.1	شاهد (Control)
0.97	0.46	0.22	2.1	0.85	264.9	7.7	34.4	بیوچار گردو ۱ درصد (WB1)
0.99	0.50	0.24	2.1	0.91	254.6	7.4	34.4	بیوچار گردو ۲ درصد (WB2)
0.99	0.46	0.20	2.3	0.87	277.2	6.6	42.0	بیوچار گردو ۴ درصد (WB4)
0.91	0.58	0.13	4.5	0.86	302.9	6.9	43.9	بیوچار باگاس نیشکر ۱درصد (SB1)
0.93	0.70	0.16	4.4	0.90	286.0	6.3	45.4	بیوچار باگاس نیشکر ۲ درصد (SB2)
0.85	0.84	0.19	4.4	0.90	297.4	7.2	41.3	بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد (SB4)
کاتیون Cation								تیمار Treatment
K ⁺				Mg ²⁺				
r ²	a×b	b	a	r ²	a×b	b	a	
	month ⁻¹	meq kg ⁻¹ month ⁻¹	meq kg ⁻¹		month ⁻¹	meq kg ⁻¹ month ⁻¹	meq kg ⁻¹	
0.92	-0.03	0.18	-0.19	0.98	0.12	0.13	0.9	شاهد (Control)
0.95	-0.07	0.24	-0.30	0.98	0.35	0.13	2.7	بیوچار گردو ۱ درصد (WB1)
0.94	-0.06	0.24	-0.26	0.92	0.32	0.10	3.2	بیوچار گردو ۲ درصد (WB2)
0.95	-0.03	0.19	-0.16	0.91	0.54	0.16	3.4	بیوچار گردو ۴ درصد (WB4)
0.97	0.003	0.13	0.02	0.89	0.29	0.14	2.1	بیوچار باگاس نیشکر ۱درصد (SB1)
0.96	0.007	0.11	0.07	0.90	0.21	0.10	2.1	بیوچار باگاس نیشکر ۲ درصد (SB2)
0.97	0.001	0.13	0.01	0.79	0.29	0.10	2.9	بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد (SB4)

WB= بیوچار گردو، SB= بیوچار باگاس نیشکر، و اعداد ۱، ۲ و ۴ به درصد بیوچارهای استفاده شده اشاره دارند

WB= Walnut Biochar, SB= Sugarcane Bagasse Biochar, and the numerals 1, 2, and 4 correspond to the percentages of the biochars employed

مقایسه میانگین مقادیر منیزیم تجمعی آبشویی
شده نشان داد، مقدار منیزیم تجمعی آبشویی شده از
سطوح مختلف تیمارها با اختلاف معنی‌دار ($P<0.05$)

بیش‌تر از خاک شاهد است (جدول ۵). بیش‌ترین
مقدار منیزیم تجمعی به میزان ۴/۳ meq kg⁻¹ مربوط
به تیمار بیوچار گردو ۴ درصد بود که نسبت به تیمار

احتمالاً دلیل این امر می‌تواند جایگزینی یون کلسیم حاصل از بیوچار گردو با یون‌های منیزیم و احتمالاً یون‌های پتاسیم موجود در مکان‌های تبادلی، علاوه بر یون سدیم باشد. آبشویی کم‌تر یون کلسیم از تیمار بیوچار گردو نیز موید این موضوع است. آبشویی کم‌تر یون پتاسیم از تیمارهای بیوچار باگاس نیشکر نسبت به بیوچار گردو و شاهد، نشان می‌دهد احتمالاً در خاک‌های تیمار شده با بیوچار باگاس نیشکر، در پایان آبشویی بخشی از مکان‌های تبادلی با پتاسیم اشغال شده است (شکل ۲). پتاسیم از جمله عناصر غذایی پرمصرف مورد نیاز گیاهان می‌باشد و غالباً در خاک‌های متأثر از نمک، مقدار کاتیون پتاسیم در مکان‌های تبادلی کم است، اضافه نمودن بیوچار باگاس نیشکر به خاک‌های شور و سدیمی می‌تواند به حاصلخیزی پتاسیمی خاک کمک نماید.

ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های آبشویی شده
اسیدیته (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی اشباع (EC_e)، نسبت جذب سدیم (SAR) و درصد سدیم تبادلی (ESP): پس از ۵ مرحله آبشویی، برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های آبشویی شده، جهت بررسی اثر بیوچارها اندازه‌گیری شد. نتایج تجزیه واریانس در خاک‌های آبشویی شده نشان‌دهنده اثر غیرمعنی‌دار بیوچارها بر اسیدیته (pH) و اثر معنی‌دار ($P < 0.01$) بیوچارها بر قابلیت هدایت الکتریکی اشباع (EC_e)، نسبت جذب سدیم (SAR) و درصد سدیم تبادلی (ESP) بود (جدول ۷).

شاهد افزایش ۱۶۹ درصدی داشت. کم‌ترین مقدار منیزیم تجمعی به میزان $1/6 \text{ meq kg}^{-1}$ در شاهد مشاهده شد. نتایج نشان داد مقدار منیزیم تجمعی آبشویی شده از سطوح مختلف تیمار بیوچار گردو با اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) بیش‌تر از مقادیر آبشویی شده از سطوح مختلف تیمار بیوچار باگاس نیشکر است. ترتیب بزرگی ضریب آبشویی منیزیم نیز به‌صورت شاهد $>$ بیوچار باگاس نیشکر $>$ بیوچار گردو به‌دست آمد (جدول ۶). پتاسیم تجمعی آبشویی شده نیز به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر تیمارها قرار گرفت. بر اساس نتایج مقایسه میانگین، پتاسیم تجمعی آبشویی شده از سطوح مختلف تیمار بیوچار گردو بیش‌تر از شاهد و سطوح مختلف تیمار بیوچار نیشکر به‌دست آمد. بیش‌ترین مقدار پتاسیم تجمعی به میزان $0/97 \text{ meq kg}^{-1}$ مربوط به تیمار بیوچار گردو ۲ درصد بود که نسبت به تیمار شاهد افزایش ۳۶ درصدی داشت (جدول ۵). کم‌ترین مقدار پتاسیم تجمعی نیز به میزان $0/62 \text{ meq kg}^{-1}$ مربوط به تیمار بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد بود که نسبت به تیمار شاهد کاهش ۱۳ درصدی داشت. با افزایش سطح مصرف هر دو تیمار، آبشویی پتاسیم از خاک کاهش یافت. ترتیب بزرگی ضریب آبشویی پتاسیم به‌صورت بیوچار باگاس نیشکر $>$ شاهد $>$ بیوچار گردو به‌دست آمد (جدول ۶). اگرچه درصد منیزیم و پتاسیم موجود در بیوچار باگاس نیشکر به ترتیب ۲/۸ و ۲ برابر درصد منیزیم و پتاسیم موجود در بیوچار گردو می‌باشد (جدول ۲)، مقدار منیزیم و پتاسیم آبشویی شده از خاک‌های تیمار شده با بیوچار گردو بیش‌تر از بیوچار باگاس نیشکر است (شکل ۲).

جدول ۷- تجزیه واریانس اثر درصدهای مختلف بیوچار گردو و باگاس نیشکر بر pH، EC_e، SAR و ESP در خاک‌های آبشویی شده.

Table 7. Analysis of variance for the effects of different rates of walnut and sugarcane bagasse biochar on the pH, EC_e, SAR and ESP in leached soils.

میانگین مربعات Means square				درجه آزادی df	منابع تغییرات Sources of variations
ESP	SAR	EC _e	pH		
90.95 **	56.48 **	0.053 **	0.031 ^{ns}	4	بیوچار (Biochar)
2.25	0.21	0.0046	0.013	14	خطا (Error)
12.79	12.07	8.76	1.39		ضریب تغییرات (CV%)

pH (اسیدیته)، EC_e (قابلیت هدایت الکتریکی اشباع)، SAR (نسبت جذب سدیم) و ESP (درصد سدیم تبدیلی)

^{ns} و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

pH (acidity), EC_e (Electrical Conductivity of Saturation Extract), SAR (Sodium Adsorption Ratio), ESP (Exchangeable Sodium Percentage)

^{ns}, ** non-significant and significant at the 1% probability level, respectively

میکرو و فسفر در این خاک‌ها وجود خواهد داشت (۵۰).

قابلیت هدایت الکتریکی اشباع (EC_e) نیز در خاک‌های شاهد و تیمار شده پس از آبشویی کاهش و به کم‌تر از میزان مشاهده شده در خاک اولیه (۱۲/۳ dS m⁻¹) رسید (جدول ۸). در سایر مطالعات نیز کاهش EC_e پس از آبشویی در خاک‌های تیمار شده با کمپوست زباله سبز، کمپوست زیستی و بیوچار تراشه چوب (۹)، کود سبز و گچ (۸)، کود گاوی و کمپوست (۹) گزارش شده است. مطابق نتایج حاصل از مقایسه میانگین، بیش‌ترین EC_e در خاک شاهد آبشویی شده (۱/۱ dS m⁻¹) مشاهده شد که اختلاف معنی‌دار (P<۰/۰۵) با سایر تیمارها داشت. نتایج نشان داد به‌جز تیمار بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد که دارای کم‌ترین مقدار EC_e (۰/۶۴ dSm⁻¹) است، بین EC_e سایر خاک‌های تیمار شده اختلاف معنی‌دار وجود ندارد. مطابق دستورالعمل تقسیم‌بندی خاک‌ها، خاک‌های آبشویی شده مشکل شوری ندارند (۲۸).

میزان pH در خاک‌های شاهد و تیمار شده پس از آبشویی کاهش و به کم‌تر از میزان مشاهده شده در خاک اولیه (۸/۶) رسید (جدول ۸). چاتنی و همکاران (۲۰۱۵) نیز در بررسی اثر بیوچار بر خاک شور و سدیمی، کاهش pH را گزارش نمودند (۹). البته در برخی مطالعات افزایش pH خاک، در اثر افزودن بیوچار به خاک‌ها (۴۳، ۵۱) و در برخی کاهش pH خاک در نتیجه مصرف اصلاح‌کننده‌های آلی (۴۵) گزارش شده است. ضریب آبشویی بالای کاتیون قلیایی سدیم از خاک‌های تیمار شده نسبت به سایر کاتیون‌ها (جدول ۶) و همچنین تولید پروتون در محلول خاک در نتیجه افزایش فشار گاز دی‌اکسیدکربن حاصل از افزایش فعالیت میکروبی و تولید اسیدهای آلی در اثر تجزیه بیوچار، می‌تواند دلیل کاهش pH در خاک‌های آبشویی شده نسبت به خاک اولیه باشد (۹). نتایج مقایسه میانگین نشان داد اثر تیمارها بر pH خاک‌های آبشویی شده معنی‌دار نیست (جدول ۸). نکته حایز اهمیت این است که، pH خاک‌های تیمار شده پس از آبشویی همچنان بالا بوده و مسائل مرتبط با مشکلات تغذیه‌ای عناصر

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر درصدهای مختلف بیوچار گردو و باگاس نیشکر بر pH, EC_e (dS m⁻¹), SAR ((meq l⁻¹)^{0.5}) و ESP (%) در خاک‌های آبشویی شده.

Table 8. Mean comparison of the effects of different percentages of walnut and sugarcane bagasse biochar on the pH, EC_e (dS m⁻¹), SAR ((meq l⁻¹)^{0.5}) and ESP (%) in leached soils.

ESP	SAR	EC _e	pH	تیمار Treatment
24.1 ± 0.61 a	13.6 ± 0.36 a	1.05 ± 0.07 a	8.30 ± 0.11 a	شاهد (Control)
10.27 ± 0.12 b	2.02 ± 0.16 b-d	0.79 ± 0.02 b	8.14 ± 0.07 a	بیوچار گردو ۱ درصد (WB1)
10.70 ± 0.58 b	2.52 ± 0.03 bc	0.74 ± 0.12 bc	8.20 ± 0.03 a	بیوچار گردو ۲ درصد (WB2)
9.80 ± 0.45 b	2.28 ± 0.29 b-d	0.72 ± 0.15 bc	8.13 ± 0.08 a	بیوچار گردو ۴ درصد (WB4)
9.50 ± 0.58 b	2.75 ± 0.33 b	0.70 ± 0.10 bc	8.20 ± 0.05 a	بیوچار باگاس نیشکر ۱ درصد (SB1)
9.30 ± 0.44 b	1.82 ± 0.31 cd	0.77 ± 0.09 b	8.02 ± 0.06 a	بیوچار باگاس نیشکر ۲ درصد (SB2)
8.40 ± 0.58 b	1.61 ± 0.21 d	0.64 ± 0.12 c	8.02 ± 0.02 a	بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد (SB4)

مقادیر به صورت میانگین ± خطای استاندارد نشان داده شده‌اند. حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD هستند.

Values are expressed as mean ± standard error (SE). Different letters within a column indicate significant differences at p < 0.05 (LSD test)

SAR از $(\text{meq l}^{-1})^{-0.5}$ ۴۸/۵ در خاک اولیه به $(\text{meq l}^{-1})^{-0.5}$ ۱۳/۶ کاهش یافت، اما همچنان در دامنه SAR برای خاک‌های متأثر نمک قرار دارد. دلیل کاهش SAR در خاک شاهد می‌تواند اثر پالس گچ اولیه اضافه شده به خاک و خروج سدیم محلول و تبدلی موجود در خاک در اثر فرایند آبشویی باشد. ضریب آبشویی سدیم از خاک شاهد موید این مسأله است (جدول ۶). در خاک‌های تیمار شده نیز رهاسازی یون‌های کلسیم و منیزیم از تیمارها و حل شدن ترکیبات کلسیمی بومی خاک موجب افزایش غلظت آن‌ها در محلول خاک و جایگزینی آن‌ها با یون سدیم تبدلی شده و یون سدیم موجود در محلول در طی فرایند آبشویی از خاک خارج شده و SAR خاک‌های تیمار شده کاهش یافته است (۴۶ و ۴۷).

نتایج تجزیه واریانس بیانگر اثر معنی‌دار (P<۰/۰۱) بیوچارها بر ESP در خاک‌های آبشویی شده است (جدول ۷). آبشویی خاک شاهد و تیمار شده موجب کاهش ESP نسبت به مقدار آن در خاک

میزان SAR در خاک‌های شاهد و تیمار شده نیز بعد از آبشویی، نسبت به خاک اولیه $(\text{meq l}^{-1})^{-0.5}$ ۴۸/۵ کاهش یافت (جدول ۸). نتایج تجزیه واریانس نشان داد، اثر بیوچارها بر SAR خاک‌های آبشویی شده معنی‌دار (P<۰/۰۱) است (جدول ۷). بیش‌ترین SAR، همانند EC_e در خاک شاهد با مقدار $(\text{meq l}^{-1})^{-0.5}$ ۱۳/۶ و کم‌ترین مقدار در تیمار بیوچار باگاس نیشکر ۴ درصد $(\text{meq l}^{-1})^{-0.5}$ ۱/۶۱ مشاهده شد (جدول ۸). بین SAR در خاک‌های تیمار شده با سطوح مختلف بیوچار گردو اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. در خاک‌های تیمار شده با بیوچار باگاس نیشکر با افزایش درصد بیوچار استفاده شد، SAR کاهش یافت. در خاک‌های تیمار شده آبشویی شده، مقدار SAR به زیر حد تعیین شده برای خاک‌های شور و سدیمی $(\text{meq l}^{-1})^{-0.5}$ ۱۳ رسید. در سایر مطالعات نیز کاهش SAR خاک‌ها در اثر تیمار با کمپوست و بیوچار (۹) و گچ و ترکیبات آلی (۴۹) گزارش شده است. اگرچه در خاک شاهد آبشویی‌شده، مقدار

اولیه (۷۸/۷ درصد) شد. بر اساس نتایج مقایسه میانگین، بیشترین ESP (۲۴/۱ درصد)، همانند EC_e و SAR در خاک شاهد مشاهده شد که با ESP سایر تیمارها اختلاف معنی‌دار ($P < 0.01$) داشت (جدول ۸). بین ESP در تیمارها اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. با توجه به نتایج به دست آمده، آبخویی خاک شاهد با آب مقطر به مدت ۵ ماه، به دلیل کاهش EC آن ($1/dSm^{-1}$) در حالی که هم‌چنان مقادیر pH (۸/۳)، SAR ($0.5 (meq\ l^{-1})$) و ESP (۲۴/۱ درصد) آن زیاد می‌باشند (جدول ۸) موجب تبدیل شدن آن به یک خاک سدیمی شد. مسدود شدن منافذ درشت و کاهش هدایت آبی به واسطه فرایندهای فیزیکی (انبساط و پراکنده شدن رس‌ها) از تبعات سدیمی شدن خاک است (۵۲) و این امر در آخرین دور آبخویی در خاک شاهد ملاحظه شد. به‌همین دلیل آبخویی خاک مورد بررسی بدون اضافه نمودن اصلاح‌کننده توصیه نمی‌شود. بر خلاف خاک شاهد آبخویی شده، در خاک‌های تیمار شده درصد سدیم تبدلی به کم‌تر از ۱۵ درصد رسید. نتایج نشان می‌دهند افزودن تیمارها به خاک، موجب تبادل ترجیحی کاتیون‌های کلسیم و منیزیم با کاتیون سدیم موجود در مکان‌های تبدلی شده (۵۳) و ESP کاهش یافته است. با توجه به این‌که در محلول خاک رقیق، جذب کاتیون‌های دو ظرفیتی در مکان‌های تبدلی افزایش می‌یابد (۵۴)، در مطالعه حاضر نیز در مراحل مختلف آبخویی به دلیل اضافه نمودن آب مقطر به ستون‌های خاک، محلول خاک رقیق شده و جذب ترجیحی کاتیون‌های دو ظرفیتی در خاک‌های تیمار شده افزایش یافته است. اثر این فرایند در مراحل آخر آبخویی به دلیل آبخویی اکثر نمک‌های محلول خاک در مراحل اولیه آبخویی، بیش‌تر است. از آنجایی که در خاک‌های تیمار شده، تیمارها حاوی کلسیم و منیزیم می‌باشند و هم‌چنین احتمال حلالیت کربنات

کلسیم بومی خاک در اثر تجزیه تیمارها وجود دارد (۴۶ و ۴۷)، بنابراین در مراحل پایانی آبخویی در خاک‌های تیمار شده، برخلاف خاک شاهد هم‌چنان ذخایر کاتیون‌های دو ظرفیتی وجود داشته و وارد مکان‌های تبدلی می‌شوند و این امر موجب کاهش ESP در خاک‌های تیمار شده، می‌تواند باشد. در خاک شاهد از آنجایی که غلظت کلسیم محلول ابتدا کم بوده و هم‌چنین در اثر آبخویی کلسیم محلول نیز از خاک خارج شده است، ESP هم‌چنان زیاد است. در سایر مطالعات نیز کاهش ESP خاک‌های تیمار شده (۲۳) گزارش شده است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج تحقیق نشان داد، زه‌آب ماه پنجم در خاک‌های تیمار شده با هر سه سطح بیوپار گردو از نظر EC و SAR جهت مصارف آبیاری، محدودیتی نداشته و زه‌آب خاک‌های تیمار شده با هر سه سطح بیوپار باگاس نیشکر از نظر EC دارای محدودیت جزئی تا متوسط و از نظر SAR دارای محدودیت شدید است. از طرفی pH در زه‌آب ماه پنجم در هر سه سطح هر دو تیمار، بیش‌تر از ۹/۵ بوده و دارای محدودیت است. ترتیب بزرگی ضریب آبخویی کاتیون‌ها از خاک‌ها به صورت پتاسیم > منیزیم > کلسیم > سدیم بوده و ضریب آبخویی سدیم در خاک‌های تیمار شده با بیوپار باگاس نیشکر بیش‌تر از خاک‌های تیمار شده با بیوپار گردو به دست آمد. دلیل این امر می‌تواند توانایی بیش‌تر بیوپار باگاس نیشکر در تامین کاتیون‌های جایگزین‌شونده با کاتیون سدیم از جمله کاتیون کلسیم و در نتیجه اصلاح خاک باشد. با توجه به مقادیر EC_e ، SAR، ESP و pH به دست آمده برای خاک‌های آبخویی‌شده، در پایان آبخویی خاک شور و سدیمی اولیه به یک خاک سدیمی تبدیل شد و خاک‌های تیمار شده به خاک‌های

استفاده از آب محلی یا آب‌هایی با ویژگی‌های شیمیایی مشخص و در اعماق بیش‌تر انجام شود. هم‌چنین جهت عملیاتی نمودن و کاربردی نمودن نتایج این تحقیق در منطقه مطالعاتی، احداث زهکش‌های زیرزمینی نیز لازم است.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل کار پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد در دانشگاه ملایر است. بدین‌وسیله نویسندگان مراتب سپاس خود را از حمایت‌های مالی و معنوی دانشگاه ملایر اعلام می‌دارند.

غیرشور و غیرسدیمی تبدیل شدند. اثر مثبت سطوح مختلف تیمار بیوچار باگاس نیشکر بر فاکتورهای ذکر شده، بیش‌تر از سطوح مختلف بیوچار گردو بود و با توجه به نتایج به‌دست آمده از مقایسه میانگین‌ها، استفاده از تیمار بیوچار باگاس نیشکر ۱ درصد در مطالعه تکمیلی بعدی توصیه می‌شود. شایان ذکر است، نتایج این تحقیق با استفاده از آب مقطر می‌تواند به‌عنوان وضعیت ایده‌آل یا حداکثر پتانسیل آبخویی در منطقه مورد مطالعه شناخته شود. توصیه می‌شود، جهت کاربردی نمودن نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، آزمایشات آبخویی بر روی خاک تیمار شده با بیوچار باگاس نیشکر ۱ درصد در منطقه و با

منابع

1. Shaaban, M. (2024). Salt-affected soils. P. 203-215, In: A. Núñez-Delgado (ed), Frontier Studies in Soil Science, Springer Nature Switzerland AG, Spain. doi:org/10.1007/978-3-031-50503-4.
2. Qadir, M., & Oster, J. D. (2004). Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Science of the total environment*, 323(1-3), 1-19. doi:10.1016/j.scitotenv.2003.10.012.
3. Fao, I., & ISRIC, I. (2012). Jrc: Harmonized world soil database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
4. Qadir, M., Qureshi, A. S., & Cheraghi, S. A. M. (2008). Extent and characterization of salt-affected soils in Iran and strategies for their amelioration and management. *Land Degradation & Development*, 19(2), 214-227. doi:10.1002/ldr.818.
5. Mahmoodabadi, M., Yazdanpanah, N., Sinobas, L. R., Pazira, E., & Neshat, A. (2013). Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agricultural water management*, 120, 30-38. doi:10.1016/j.agwat.2012.08.018.
6. El-Henawy, A. S., Khalifa, M. R., Gaheen, S. A., & El-Faramawy, H. (2024). Gypsum and Nano-gypsum effects on certain soil characteristics and sorghum yield under saline-sodic soil conditions. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64(3), 1009-1018. doi: 10.21608/ejss.2024.283535.1749.
7. Sadiq, M., Hassan, G., Mehdi, S. M., Hussain, N., & Jamil, M. (2007). Amelioration of saline-sodic soils with tillage implements and sulfuric acid application. *Pedosphere*, 17(2), 182-190. doi:10.1016/S1002-0160(07)60024-1.
8. Amezketa, E., Aragüés, R., & Gazol, R. (2005). Efficiency of sulfuric acid, mined gypsum, and two gypsum by-products in soil crusting prevention and sodic soil reclamation. *Agronomy Journal*, 97(3), 983-989. doi:10.2134/agronj2004.0236.
9. Chaganti, V. N., Crohn, D. M., & Šimůnek, J. (2015). Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 158, 255-265. doi:10.1016/j.agwat.2015.05.016.

10. Gharaibeh, M. A., Eltaif, N. I., & Shunnar, O. F. (2009). Leaching and reclamation of calcareous saline-sodic soil by moderately saline and moderate-SAR water using gypsum and calcium chloride. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(5), 713-719. **doi:10.1002/jpln.200700327.**
11. Qadir, M., Oster, J. D., Schubert, S., Noble, A. D., & Sahrawat, K. L. (2007). Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in agronomy*, 96, 197-247. **doi:10.1016/S0065-2113(07)96006-X.**
12. Kheir, A., Shabana, M., & Seleiman, M. (2018). Effect of gypsum, sulfuric acid, nano-zeolite application on saline-sodic soil properties and wheat productivity under different tillage types. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 9(12), 829-838. **doi:10.21608/jssae.2018.36552.**
13. Qadir, M., Qureshi, R. H., & Ahmad, N. (1996). Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and *Leptochloa fusca*. *Geoderma*, 74(3-4), 207-217. **doi:10.1016/S0016-7061(96)00061-4.**
14. Leogrande, R., & Vitti, C. (2019). Use of organic amendments to reclaim saline and sodic soils: a review. *Arid Land Research and Management*, 33(1), 1-21. **doi:10.1080/15324982.2018.1498038.**
15. Ding, Z., Kheir, A. M., Ali, O. A., Hafez, E. M., ElShamey, E. A., Zhou, Z., Wang, B., Lin, X. E., Ge, Y., Fahmy, A. E., & Seleiman, M. F. (2021). A vermicompost and deep tillage system to improve saline-sodic soil quality and wheat productivity. *Journal of environmental management*, 277, 111388. **doi:10.1016/j.jenvman.2020.111388.**
16. Sadegh-Zadeh, F., Parichehreh, M., Jalili, B., & Bahmanyar, M. A. (2018). Rehabilitation of calcareous saline-sodic soil by means of biochars and acidified biochars. *Land Degradation & Development*, 29(10), 3262-3271. **doi:10.1002/ldr.3079.**
17. Zhou, M., Liu, X., Meng, Q., Zeng, X., Zhang, J., Li, D., Wang, J., Du, W., & Ma, X. (2019). Additional application of aluminum sulfate with different fertilizers ameliorates saline-sodic soil of Songnen Plain in Northeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 3521-3533. **doi:10.1007/s11368-019-02311-9.**
18. Rashmi, I., Meena, B. P., Rajendiran, S., Jayaraman, S., Joshy, C. G., Ali, S., Mina, B. L., Kumar, K., Kumar, A., Kumawat, A., & Kala, S. (2024). Can gypsum and organic amendments achieve sustainability, productivity and maintain soil health under soybean-mustard cropping in sodic soils of western India. *Soil and Tillage Research*, 240, 106075. **doi:10.1016/j.still.2024.106075.**
19. Hanay, A., Büyüksönmez, F., Kiziloglu, F. M., & Canbolat, M. Y. (2004). Reclamation of saline-sodic soils with gypsum and MSW compost. *Compost science & utilization*, 12(2), 175-179. **doi:10.1080/1065657X.2004.10702177.**
20. 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. **doi:10.1016/j.jenvman.2018.10.117.**
21. 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. **doi:10.1016/j.jaap.2011.11.018.**
22. Tang, J., Zhu, W., Kookana, R., & Katayama, A. (2013). Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. *Journal of bioscience and bioengineering*, 116(6), 653-659. **doi:10.1016/j.jbiosc.2013.05.035.**
23. Chaganti, V. N., & Crohn, D. M. (2015). Evaluating the relative contribution of physiochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water. *Geoderma*, 259, 45-55. **doi:10.1016/j.geoderma.2015.05.005.**

24. Lashari, M. S., Ye, Y., Ji, H., Li, L., Kibue, G. W., Lu, H., Zheng, J., & Pan, G. (2015). Biochar–manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: a 2-year field experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(6), 1321-1327. **doi:10.1002/jsfa.6825.**
25. Wang, P., Lin, X., Liu, Q., Lin, Z., Yang, Y., Chen, H., & Fan, S. (2023). Interactions between flue gas desulfurization gypsum and biochar on water infiltration characteristics and physicochemical properties of saline-alkaline soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), 1273. **doi:10.1007/s10661-023-11894-3.**
26. Dahlawi, S., Naeem, A., Rengel, Z., & Naidu, R. (2018). Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 625, 320-335. **doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.257.**
27. Bernstein, L. (1975). Effects of salinity and sodicity on plant growth. *Annual Review of Phytopathology*, 13, 295-312. **doi:10.1146/annurev.py.13.090175.001455.**
28. Richards, L. A. (ed). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils (No. 60). US Government Printing Office, USA, 160p.
29. Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M., Aghakhani, A., & Feizi, M. (2007). Effects of irrigation water salinity and leaching on soil chemical properties in an arid region. *International Journal of Agriculture and Biology*, 9(4), 466-469. **doi: 1560–8530/2007/09–3–466–469.**
30. Farokhzadeh, B., & Vaseghnezhad, H. (2021). Evaluation of geostatistical methods in hydrological drought severity zoning in the Malayer plain. *Jornal of Rainwater Catchment Systems*, 8(4 (27)), 25-36. **doi: 20.1001.1.24235970.1399.8.4.3.4.** [In Persian]
31. Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465. **doi:10.2134/agronj1962.00021962005400050028x.**
32. Michael, P. S., Fitzpatrick, R. W., & Reid, R. J. (2017). Effects of live wetland plant macrophytes on acidification, redox potential and sulphate content in acid sulphate soils. *Soil Use and Management*, 33(3), 471-481. **doi:10.1111/sum.12362.**
33. Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. P. 363-375, In: A. Klute (ed), *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. USA. **doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.**
34. Richard, H. L., & Donald, L. S. (2020). Carbonate and Gypsum. P. 437-474. In: D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, H. Richard, and R. H. Loeppert (eds), *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods*, Soil Science Society of America, Inc, American Society of Agronomy, Inc. John Wiley & Sons, USA.
35. Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. P 539-579, In: A. L. Page (ed), *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, American Society. Agronomy, Madison WI, USA.
36. So, H. B., Kopittke, P. M., Menzies, N. W., & Bigwood, R. C. (2004). Measurement of exchangeable cations in saline soils. In: B. Singh, et al (eds), *Supersoil 2004: Proceedings of the 3rd Australian New Zealand Soils Conference*, The Regional Institute Ltd, University of Sydney, Australia.
37. Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Richard, H., & Loeppert, R. H. (eds.). (2020). *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods*. American Society; Agronomy; Madison WI, USA. 1424p.
38. Wang, Y., Lin, Y., Chiu, P. C., Imhoff, P. T., & Guo, M. (2015). Phosphorus release behaviors of poultry litter biochar as a soil amendment. *Science of the total Environment*, 512, 454-463. **doi:10.1016/j.scitotenv.2015.01.093.**

39. Kanagasuppurathinam, C., Coumaravel, K., Bagavathiammal, U., Saravanane, P., & Selvaraj, S. (2024). Production and Analysis of Physical, Chemical and Physico-chemical Properties of Biochar from Various Feed Stock Sources. *International Journal of Plant & Soil Science*, 36(4), 312-322. doi: 10.9734/IJPSS/2024/v36i44484.
40. Bradstreet, R. B. (1954). Kjeldahl method for organic nitrogen. *Analytical Chemistry*, 26(1), 185-187. doi:org/10.1021/ac60085a028.
41. McNeal, B. L., & Coleman, N. T. (1966). Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 30(3), 308-312. doi:10.2136/sssaj 966.03615995003000030007x.
42. Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, 174 p.
43. Laird, D. A., Fleming, P., Davis, D. D., Horton, R., Wang, B., & Karlen, D. L. (2010). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), 443-449. doi:10.1016/j.geoderma. 2010.05.013.
44. Wong, V. N., Dalal, R. C., & Greene, R. S. (2009). Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: a laboratory incubation. *Applied Soil Ecology*, 41(1), 29-40. doi:10.1016/j.apsoil. 2008.08.006.
45. Dalalian, M., Zabihi, F., & Sarbazrashid, S. (2021). Laboratory Evaluation the Organic Amender's Effect on the Leaching Process of Saline-Sodic Soils. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 11(2), 13-31. doi: 10.30495/wsrcj.2021.19210. [In Persian]
46. Gharaibeh, M. A., Eltaif, N. I., & Shunnar, O. F. (2009). Leaching and reclamation of calcareous saline-sodic soil by moderately saline and moderate-SAR water using gypsum and calcium chloride. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(5), 713-719. doi:10.1002/jpln.200700327.
47. Li, F., & Keren, R. (2008). Native CaCO₃ mineral dissolution and its contribution to sodic calcareous soil reclamation under laboratory conditions. *Arid Land Research and Management*, 22(1), 1-15. doi:10.1080/1532498070 1784225.
48. Ghafoor, A., Murtaza, G., Rehman, M. Z., Saifullah, & Sabir, M. (2012). Reclamation and salt leaching efficiency for tile drained saline-sodic soil using marginal quality water for irrigating rice and wheat crops. *Land Degradation & Development*, 23(1), 1-9. doi:10.1002/ldr.1033.
49. Sabbag Tazeh, E., Pazira, E., Neyshabouri, M. R., Abbasi, F., & Abyaneh, H. Z. (2013). Effects of two organic amendments on EC, SAR and soluble ions concentration in a saline-sodic soil. *International Journal of Biosciences*, 3(9), 55-68. doi:10.12692/ijb/3.9.55-68.
50. Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (1985). Soil fertility and fertilizers. Collier Macmillan Publishers, London, 754p.
51. Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. (2007). Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 45(8), 629-634. doi:10.1071/SR07109.
52. Van der Zee, S. E., Shah, S. H. H., Van Uffelen, C. G. R., Raats, P. A., & dal Ferro, N. (2010). Soil sodicity as a result of periodical drought. *Agricultural Water Management*, 97(1), 41-49. doi:10.1016/j.agwat.2009.08.009.
53. Udo, E. J. (1978). Thermodynamics of potassium-calcium and magnesium-calcium exchange reactions on a kaolinitic soil clay. *Soil Science Society of America Journal*, 42(4), 556-560. doi:10.2136/sssaj1978.03615995004200040004x.
54. Reeve, R. C., & Doering, E. J. (1966). The high-salt-water dilution method for reclaiming sodic soils. *Soil Science Society of America Journal*, 30(4), 498-504. doi:10.2136/sssaj 1966.03615995003000040029x.