Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Soil Management and Sustainable Production

Print ISSN: 2322-1267
Online ISSN: 2322-1275

Soil Science Society of Iran

Investigation of azolla compost, azolla biochar and rice husk biochar on the improvement of some soil chemical properties

Fateme Bagheri[1], Jila Baharlouei[*2], Banafshe Khalili[3], Elham Chavoshi[4]

1. Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. E-mail: en.sb2011@yahoo.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. E-mail: jbahar5411@yahoo.com
3. Assistant Prof., Dept. of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: bkhalili@cc.iut.ir
4. Associate Prof., Dept. of Soil Science, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. E-mail: chavoshie@yahoo.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 06.08.2022
Revised: 10.24.2023
Accepted: 10.30.2023

Keywords:
Azolla biochar,
Azolla compost,
Incubation,
Organic modifier,
Rice husk biochar

ABSTRACT

Background and Objectives: The most obvious problem of calcareous soils is lack of plant available iron. Iron chelates are among the effective methods that are used to deal with iron deficiency, but they are not economical. Nano fertilizers are a suitable option to meet the needs of the plant with the lowest cost and high efficiency. The aim of this study was the green synthesis of nanocarbon dot iron fertilizers in two forms, uncoated and coated with polylactic acid polymer, and their characterization and the incubation study of these fertilizers in a period of one month in a calcareous soil.

Materials and Methods: For this research, at first, soil samples were taken from the edge of the lagoon. After producing the remedial treatments (rice husk biochar, azolla biochar and azolla compost), they were mixed with the soil sampled from the edge of the lagoon at three levels of 0 (control), 2 and 4% and the treatment was carried out. The samples were incubated in closed incubation containers of 1 kg for a period of six months and the treatments were prepared in 3 repetitions. At the end of the incubation period, the chemical characteristics of the soil including: acidity, electrical conductivity, cation exchange capacity, percentage of organic matter, percentage of organic carbon, and amount of: calcium, magnesium, sodium, potassium, phosphorus, and nitrogen, were measured. This research was conducted as a factorial experiment and in the form of a completely randomized design.

Results: The results of the analysis of variance showed that the effect of the type of biochar and its level, as well as their mutual effect on all the examined characteristics, was significant at the 1% level compared to the control sample. Among the remedial treatments, biochar azolla treatment recorded the best result compared to other remedial treatments with the highest increasing performance on the available phosphorus, nitrogen, sodium, magnesium, organic matter percentage and pH. After that, azolla compost remedial treatment with high increase performance on available potassium, electrical conductivity and cation exchange capacity recorded a better result. The best performance of the modifying treatments was mainly observed at the level of 4 mass percent of the treatment mixed with the soil. By increasing the level of the modifier compound with soil, a significant

increase was observed at the level of 5% in all the measured characteristics and elements.

Conclusion: The results of the analysis of variance of the effect of time, biochar type, level of polluted water and level of biochar on all the investigated parameters showed a significant effect at the 1% level compared to the control sample. According to the results of this research, by using biological conditioner such as biochar and compost, it can be seen reducing the amount of agricultural waste and the problems caused by them (depositing, burying and burning them), we can use these problems as an opportunity. Used to modify, strengthen and improve the chemical properties of soils.

Cite this article: Bagheri, Fateme, Baharlouei, Jila, Khalili, Banafshe, Chavoshi, Elham. 2024. Investigation of azolla compost, azolla biochar and rice husk biochar, on the improvement of some soil chemical properties. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13 (4), 29-52.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/EJSMS.2024.20276.2064
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار
شاپا چاپی: ۱۲۶۷-۲۳۲۲
شاپا آنلاین: ۱۲۷۵-۲۳۲۲
انجمن علوم خاک ایران

بررسی کمپوست آزولا، بیوچارهای آزولا و پوسته برنج بر بهبود برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک

فاطمه باقری[۱]، ژیلا بهارلوئی*[۲]، بنفشه خلیلی[۳]، الهام چاوشی[٤]

۱. دانشجوی دکترای گروه علوم خاک، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. رایانامه: en.sb2011@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم خاک، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. رایانامه: jbahar5411@yahoo.com
۳. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: bkhalili@cc.iut.ir
٤. دانشیار گروه علوم خاک، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. رایانامه: chavoshie@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۰۳/۱۸
تاریخ ویرایش: ۱٤۰۲/۰۸/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۲/۰۸/۰۸

واژه‌های کلیدی:
اصلاح‌کننده آلی،
انکوباسیون،
بیوچار آزولا،
بیوچار پوسته برنج،
کمپوست آزولا

چکیده

سابقه و هدف: با توجه به دو معضل زیست‌محیطی که در سالیان گذشته گریبان‌گیر استان‌های شمالی کشور است، شامل حجم بالای پسماند پس از برداشت برنج و رشد بیرویه سرخس آبی آزولا و پسماند حاصل از جمع‌آوری آن از سطح آب‌ها، این پژوهش در راستای تولید اصلاح‌کننده‌های زیستی حاصل از این پسماندها و بررسی تأثیر آن‌ها در بهبود و تقویت خاک‌های پیرامون تالاب انزلی انجام گرفت. از این‌رو کمپوست آزولا، بیوچار آزولا و هم‌چنین بیوچار پوسته برنج به عنوان اصلاح‌کننده‌های زیستی تهیه گردیدند. سپس به بررسی تأثیر این سه اصلاح‌کننده بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و غلظت برخی عناصر در خاک حاشیه تالاب انزلی پرداخته شد.

مواد و روش‌ها: از خاک حاشیه تالاب انزلی نمونه‌برداری شد. تیمارهای اصلاح‌کننده بیوچار پوسته برنج و بیوچار آزولا به روش پایرولیز در دما و فشار بالا و در شرایط کمبود اکسیژن تولید گردید. پس از تولید تیمارهای اصلاح‌کننده (بیوچار پوسته برنج، بیوچار آزولا و کمپوست آزولا)، این اصلاح‌کننده‌ها در سه سطح صفر (شاهد)، ۲ و ٤ درصد جرمی، با خاک نمونه‌برداری شده مخلوط شدند. سپس نمونه‌ها در ظرف‌های انکوباسیون در بسته، برای مدت زمان ماند ٦ ماه انکوبه شدند. تیمارها در ۳ تکرار به صورت آزمایش فاکتوریل (با دو فاکتور) و در قالب طرح کامل تصادفی در گلخانه نگهداری شدند. در پایان دوره انکوباسیون، نمونه‌ها به آزمایشگاه شیمی خاک انتقال داده شدند. برخی ویژگی‌های شیمیائی خاک شامل اسیدیته، هدایت الکتریکی، گنجایش تبادل کاتیونی، درصد کربن آلی و فرم قابل دسترس عناصر کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، فسفر و نیتروژن کل اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد، اثر نوع بیوچار، سطوح آن و اثر متقابل آن‌ها بر تمامی ویژگی‌های مورد بررسی، در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. در بین تیمارهای اصلاحی، تیمار بیوچار آزولا بیش‌ترین میزان فسفر (۱۷ درصد)، نیتروژن (۱۵ درصد)، سدیم (۲۰ درصد)، منیزیم قابل دسترس (۲۸ درصد)، درصد کربن آلی (۱۰ درصد) و pH (یک واحد) را نسبت به سایر تیمارهای اصلاح‌کننده ثبت نمود. پس از آن کاربرد کمپوست آزولا بیش‌ترین افزایش پتاسیم قابل دسترس (۱۱ درصد)، هدایت الکتریکی (٦۰ درصد) و گنجایش تبادل کاتیونی (۲۳ درصد) را در پی داشت. بیش‌ترین عملکرد تیمارهای اصلاح‌کننده در سطح ٤ درصد جرمی اختلاط شده تیمار با خاک مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان دریافت که با استفاده از اصلاح‌کننده‌های زیستی هم‌چون انواع زغال‌های زیستی و کمپوست، علاوه بر کاهش حجم پسماند کشاورزی و تبعات آن (دپو کردن، دفن کردن و آتش‌زدن)، می‌توان از این معضلات به عنوان فرصتی در جهت اصلاح، تقویت و بهبود خواص شیمیایی خاک‌ها استفاده نمود.

استناد: باقری، فاطمه، بهارلوئی، ژیلا، خلیلی، بنفشه، چاوشی، الهام (۱۴۰۲). بررسی کمپوست آزولا، بیوچارهای آزولا و پوسته برنج، بر بهبود برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک. *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۳ (۴)، ۵۲-۲۹.
DOI: 10.22069/EJSMS.2024.20276.2064

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

در چند دهه اخیر مصرف نهاده‌های شیمیایی در زمین‌های کشاورزی موجب معضلات زیست‌محیطی بسیاری از جمله آلودگی منابع آب و افت کیفیت محصولات کشاورزی گردیده است. یکی از این منابع آلاینده کودهای شیمیایی هستند که موجب آسیب زدن به اکوسیستم‌های آب و خاک می‌شوند (۱). بنابراین ارائه راهکاری جایگزین و زیستی برای بهبود و تقویت خاک‌های کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد. معضل دیگر در شمال کشور (به‌خصوص استان گیلان و تالاب بندرانزلی)، سرخسی آبی و شناور در تالاب انزلی به نام آزولا می‌باشد که به جهت اهمیتی که در تثبیت نیتروژن (در همزیستی با سیانوباکتری آنابنا) دارد، جهت تقویت کشت برنج وارد ایران شد ولی به‌دلیل عدم مدیریت و رها شدن تصادفی در سطح تالاب بندرانزلی و هم‌چنین سرعت رشد بالا، معضلات زیست‌محیطی را سبب شده است (۲). از سوی دیگر مقدار پوسته برنج باقی مانده پس از برداشت و پاکسازی برنج حدود ۱ تا ۱/۵ تن در هر هکتار برآورد می‌شود. این بقایا با رهاشدن در طبیعت، محیطی مناسب برای رشد انواع میکروارگانیسم‌های فرصت‌طلب و مضر برای سلامتی می‌باشند و سبب آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه می‌شود، علاوه بر این سوزاندن این حجم از پسماند موجب افزایش کربن‌دی‌اکسید اتمسفر و گرم شدن کره زمین می‌گردد (۳).

شرایط مناسب آب و هوایی استان گیلان موجب شده‌است تا سرخس آبی آزولا در سطح تالاب‌ها و آبگیرهای منطقه از رشد خوبی برخوردار باشد. این سرخس آبزی، با داشتن قابلیت تثبیت نیتروژن در سال‌های اخیر به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از آزولا به‌عنوان کمپوست، ذخیره آب و عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف را افزایش می‌دهد و با بهبود ساختمان خاک، عناصر را به تدریج در اختیار گیاه قرار داده و موجب افزایش محصول می‌گردد. علاوه براین، استفاده از کمپوست، ظرفیت نگهداری عناصر غذایی را افزایش و چگالی خاک را کاهش می‌دهد که بدین دلیل اصلاح‌کننده‌ای مناسب برای خاک‌های سنگین و رسی می‌باشد. متأسفانه نمی‌توان از آزولا مستقیماً به‌عنوان اصلاح‌کننده استفاده کرد و حتماً باید به فرم‌های کمپوست یا بیوچار باشد، زیرا افزودن مستقیم مواد آلی (آزولا یا کاه و کلش برنج) به خاک به دلیل خشبی بودن و داشتن میزان نسبت کربن به نیتروژن بالا، تعادل نسبت کربن به نیتروژن خاک را برهم میزند، سرعت چرخه‌های معدنی شدن نیتروژن را کاهش می‌دهند، از سویی چون ریزموجودات خاک نیاز به نیتروژن دارند و این نیتروژن را از خاک می‌گیرند، گیاه با کمبود مواجه می‌شود که نهایتاً افت شدید خواص شیمیایی خاک را به دنبال دارد (٤).

بیوچار ماده‌ای تهیه شده از زیست‌توده‌های گیاهی و پسماند کشاورزی است که سوختن آن در حضور میزان اندک و یا نبود کامل اکسیژن انجام می‌شود. از دیدگاه کشاورزی یکی از مزایای بیوچار، مدیریت پسماند کشاورزی می‌باشد. گسترش کشاورزی آلی از یک سو و آلودگی‌های جوی از سوی دیگر باعث شده‌است تا استفاده از این نوع اصلاح‌کننده در دنیا روزبه‌روز افزایش پیدا کند ولی متأسفانه این ماده آلی در ایران تا حدودی ناشناخته است (۵). مزایای بیوچار در بحث کربن‌اندوزی و افزایش حاصلخیزی خاک بیش از یک دهه است که در سطح جهانی مطرح است، فواید افزودن بیوچار به خاک شامل افزایش ذخیره کربن آلی پایدار، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش اسیدیته خاک و افزایش نگهداری نیتروژن معدنی می‌باشد. کاربرد بیوچار در خاک سبب افزایش در گنجایش تبادل کاتیونی و بهبود سایر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک می‌شود. افزودن

بیوچار و ماده آلی، تأثیر مثبتی در میزان قابلیت دسترسی عناصر، افزایش خاکدانه‌سازی و کیفیت فیزیکی خاک، قابلیت هدایت الکتریکی، مقدار نیتروژن کل، فسفر، کلسیم، منیزیم و پتاسیم دارد. افزودن بیوچار و ماده آلی به خاک، باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه می‌گردد (٦). در این پژوهش برای اولین بار در کشور، سعی شده‌است تا از دو معضل زیست‌محیطی که هر دو گریبان‌گیر محیط‌زیست و منابع طبیعی شمال کشور شده‌است (آزولا و پسماند کشاورزی پوسته برنج)، در راستای مدیریت و بهبود خاک‌های منطقه استفاده گردد. از آن‌جایی‌که پژوهش‌های اندکی در زمینه تأثیر اصلاحی بیوچار آزولا بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک صورت گرفته‌است، در این پژوهش سعی شده به بررسی بخشی از این خلاءهای اطلاعاتی پرداخته شود. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر بیوچار آزولا، بیوچار پوسته برنج و هم‌چنین کمپوست آزولا به‌عنوان سه ماده اصلاح‌کننده، در بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های پیرامون تالاب انزلی است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم خاک دانشگاه گیلان با مختصات جغرافیایی (عرض ۳۷ درجه شمال و طول ٤۹ درجه شرق) در آبان ماه ۱٤۰۰ انجام شد. نمونه‌های گیاه آزولا فیلیکولوییدس از سطح تالاب بندرانزلی جمع‌آوری شد و سپس هواخشک گردید. برای تولید بیوچار، ابتدا نمونه‌های گیاهی در آون در دمای ۷۱ درجه سلسیوس به مدت ۲٤ ساعت خشک و سپس آسیاب گردید و در نهایت نمونه‌ها از الک ۱۰ مش عبور داده شد. سپس در داخل سیلندرهای دوجداره دربسته (به جهت کاهش دسترسی اکسیژن به محتوای اولیه) ریخته شد. در ادامه آزولا و پوسته برنج داخل کوره الکتریکی و در دمای ٤۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. زمان لازم جهت تکمیل فرایند پیرولیز ۲ ساعت بود. پس از خنک‌شدن نمونه و رسیدن به دمای محیط، بیوچار تولیدشده به‌منظور افزودن به خاک و نیز انجام آزمایش‌ها در ظروف پلاستیکی دربسته نگهداری شد (۷).

برای تولید کمپوست آزولا، آزولای جمع‌آوری شده پس از آبگیری به جعبه‌های پلاستیکی انتقال یافت و عملیات کمپوست‌سازی طی ۳ ماه درون جعبه‌های پوشیده با ورق آلومینیوم و در زیر نور خورشید انجام شد. روزانه از روش هوازی به صورت زیر و رو کردن توده استفاده گردید که در آن دما ابتدا تا ٤۵ درجه افزایش و پس از چند روز به ۳٦ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. برای حفظ میزان رطوبت توده کمپوست در ٦۰ درصد حجمی، آبپاشی با آب شهر انجام شد. پس از ۳ ماه کمپوست آماده شد (۸).

نمونه‌برداری از خاک به‌صورت تصادفی و مرکب از منطقه‌ای در مجاورت تالاب بندرانزلی (مقدار تقریبی ۱۸۰ کیلوگرم خاک) با کاربری نهالستان از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری انجام شد، نمونه‌های خاک پس از هواخشک شدن، از الک ۱۰ مش عبور داده شد. سپس برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شد.

در مرحله بعد نمونه‌های خاک با تیمارها (بیوچارها و کمپوست) به میزان صفر (شاهد)، ۲ و ٤ درصد جرمی، مخلوط و در ظرف‌های مورد نظر (یک کیلوئی) ریخته شدند (۹). خاک‌های تیمار شده جهت انکوباسیون به گلخانه انتقال داده شد و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در رطوبت ٦۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه نگهداری شدند. دوره انکوباسیون ۱۸۰ روز و پس از انتقال ظروف به گلخانه در نظر گرفته شد (۱۰). در پایان دوره انکوباسیون، ظروف نمونه‌برداری جهت انجام آزمایش‌ها به آزمایشگاه انتقال یافت. اندازه‌گیری اسیدیته خاک در گل اشباع و با استفاده از اسیدیته‌سنج، اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در عصاره اشباع، به‌وسیله دستگاه هدایت‌سنج

الکتریکی و گنجایش تبادل کاتیونی خاک، به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم اندازه‌گیری شد (۱۱). جهت اندازه‌گیری نیتروژن کل از روش کجلدال و فسفر قابل‌دسترس خاک به روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری شد (۱۱). پتاسیم و سدیم قابل دسترس توسط دستگاه فلیم فتومتر، میزان کلسیم و منیزیم قابل‌دسترس به روش تیتراسیون، بافت خاک به روش هیدرومتری، جرم مخصوص ظاهری خاک به روش پارافین و کلوخه اندازه‌گیری شدند (۱۱). درصد آهک خاک به روش تیتراسیون با اسیدکلریدریک (۱۲)، و برای تعیین کربن آلی از روش والکلی‌بلک استفاده شد (۱۱). در کمپوست و بیوچار، برای اندازه‌گیری عناصر از روش تخریب ماده آلی، به صورت خاکستر تر (هضم اسیدی) استفاده و غلظت پتاسیم، سدیم، کلسیم، منیزیم و همچنین فسفر قابل‌دسترس در آن اندازه‌گیری گردید (۱۱). مقدار کربن، هیدروژن و نیتروژن زغال زیستی با استفاده از دستگاه Elemental Analyzer اندازه‌گیری گردید (۱۱). این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی و در ۳ تکرار شامل تیمارهای اصلاح‌کننده (بیوچار پوسته برنج، بیوچار آزولا و کمپوست آزولا) و در ۳ سطح ترکیبی اصلاح‌کننده با خاک (۰، ۲ و ٤ درصد جرمی) در ظروف انکوباسیون یک کیلوئی و به مدت ٦ ماه انجام گرفت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS و مقایسه میانگین داده‌ها به کمک آزمون LSD در سطح ۵ درصد و رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک در جدول ۱ ارائه شده است. از این پس در برخی جداول، جهت سهولت بیوچار پوسته برنج (RHB)، بیوچار آزولا (AB)، کمپوست آزولا (ACo) ذکر شده است.

نتایج آنالیز شیمیایی موجود در آزولا و تیمارهای اصلاحی به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مطالعاتی.

Table 1. Some physical and chemical properties of soil.

ویژگی Property	واحد Unit	میزان Rate
اسیدیته (pH)	-	6.5
هدایت الکتریکی (EC)	(دسی‌زیمنس بر متر) ($dS.m^{-1}$)	0.2
گنجایش تبادل کاتیونی (CEC)	(سانتی‌مول بر کیلوگرم) ($cmol.kg^{-1}$)	23.5
کربن آلی (OC)	(درصد) (%)	3.4
نسبت کربن به نیتروژن (CN^{-1})	-	3.8
فسفر قابل دسترس (Available P)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم) ($mg\ kg^{-1}$)	12.8
نیتروژن کل (TN)	(درصد) (%)	0.94
کربنات کلسیم معادل ($CaCO_3$)	(درصد) (%)	ناچیز
جرم مخصوص ظاهری (BD)	(گرم بر سانتی‌مترمکعب ($g.cm^{-3}$)	1.33
سدیم قابل دسترس (Available Na)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم) ($mg\ kg^{-1}$)	25
پتاسیم قابل دسترس (Available K)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم) ($mg\ kg^{-1}$)	79.8
کلسیم قابل دسترس (Available Ca)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم) ($mg\ kg^{-1}$)	76
منیزیم قابل دسترس (Available Mg)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم) ($mg\ kg^{-1}$)	32
بافت خاک (Soil Texture)	-	لومی‌شنی (Sandy loam)

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی آزولا.

Table 2. Chemical properties of treatments.

ویژگی Property	درصد وزن خشک Dry weight (%)	ویژگی Property	درصد وزن خشک Dry weight (%)
چربی خام (Crude fat)	3.2	نیتروژن (N)	5.5
پروتئین خام (Crude protein)	27	فسفر (P)	0.8
فیبر خام (Crude fiber)	8.8	کلسیم (Ca)	0.7
پتاسیم (K)	3.4	منیزیم (Mg)	0.75

جدول ۳- ویژگی‌های شیمیایی تیمارها.

Table 3. Chemical properties of treatments.

ویژگی Property	واحد Unit	بیوچار پوسته برنج RHB	بیوچار آزولا AB	کمپوست آزولا ACo
اسیدیته (pH)	-	7.2	8.0	7.1
هدایت الکتریکی (EC)	(دسی‌زیمنس بر متر) ($dS.m^{-1}$)	0.43	0.58	5.5
گنجایش تبادل کاتیونی (CEC)	(سانتی‌مول بر کیلوگرم) ($cmol.kg^{-1}$)	27.5	24.5	29.0
کربن آلی (OC)	(درصد) (%)	0.49	0.61	2.70
کربن/ نیتروژن (C/N)	-	69.6	56.0	39.5
فسفر قابل دسترس (Available P)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم) ($mg\ kg^{-1}$)	35	42	27
نیتروژن (N)	(درصد) (%)	0.69	0.75	0.38
هیدروژن (H)	(درصد) (%)	2.81	2.75	2.85
کربن (C)	(درصد) (%)	48	42	15
سدیم قابل دسترس (Available Na)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم) ($mg\ kg^{-1}$)	51.5	60.7	56.3
پتاسیم قابل دسترس (Available K)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم) ($mg\ kg^{-1}$)	84	91	98
کلسیم قابل دسترس (Available Ca)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم) ($mg\ kg^{-1}$)	88.5	68.0	76.5
منیزیم قابل دسترس (Available Mg)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم) ($mg\ kg^{-1}$)	34.6	44.3	42.5

مطابق جدول ۳، مشاهده شد که هر سه تیمار اصلاحی ماهیت قلیایی داشتند. هدایت الکتریکی بیوچار پوسته برنج و بیوچار آزولا تقریباً مشابه بود اما هدایت الکتریکی کمپوست آزولا به‌طور قابل‌توجهی بیش‌تر بود. گنجایش تبادل کاتیونی در بیوچار آزولا از دو تیمار دیگر بالاتر بود. درصد کربن آلی در بیوچارها کم‌تر از یک اما در کمپوست آزولا که سرشار از مواد آلی است، بیش‌تر از ۲ بود. میزان فسفر قابل دسترس در بیوچارها بیش‌تر از کمپوست آزولا بود. فرم قابل دسترس عناصر کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم در دو نوع بیوچار نسبتاً بالا بوده و می‌تواند به رفع کمبود خاک در این زمینه کمک شایانی نماید.

جدول ٤، نتایج تجزیه واریانس اثر نوع تیمارها (بیوچار آزولا، بیوچار پوسته برنج و کمپوست آزولا) و سطح تیمارها (درصد ترکیب با خاک با مقادیر ۰، ۲ و ٤ درصد) و اثرات متقابل آن‌ها بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک را نشان می‌دهد در ادامه آمده است.

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر برخی ویژگی‌های خاک.

Table 4. Analysis of variance of the effect of treatments on the some soil characteristics.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of Square			
		اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	کربن آلی OC
نوع تیمار Treatments (A)	2	0.005^{ns}	0.030^{**}	13.730^{**}	0.021^{**}
سطح اصلاح‌کننده Rate of Treatment (B)	2	0.796^{**}	0.106^{**}	419.950^{**}	0.025^{**}
نوع تیمار × سطح تیمار A×B	4	0.044^{**}	0.016^{**}	5.480^{**}	0.001^{**}
خطا Error	18	0.004	0.0001	1.305	0.0001
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		0.912	3.176	3.150	1.830

*، ** و ns به‌ترتیب نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و معنادار نشدن است

**, *, ns are significant at the probability levels of 5 and 1%, and not significant respectively

اثرات اصلی نوع تیمار، سطح اصلاح‌کننده و اثرات متقابل آن‌ها بر برخی ویژگی‌های شیمیایی مورد مطالعه خاک معنی‌دار (سطح یک درصد) بود و تنها اثر نوع تیمار بر روی اسیدیته معنادار نشد.

جدول ۵ نتایج تجزیه واریانس اثر نوع و سطح اصلاح‌کننده و اثرات متقابل آن‌ها بر برخی عناصر شیمیایی خاک ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود اثرات اصلی تیمار و سطوح تیمار و اثرات متقابل آن‌ها بر همه عناصر شیمیایی اندازه‌گیری‌شده، معنی‌دار (سطح یک درصد) است.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر نوع تیمار و سطح تیمار بر برخی عناصر شیمیایی خاک.

Table 5. Analysis of variance the effect of type and rate of treatments, on the amount of some element.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of Square					
		کلسیم در دسترس	منیزیم در دسترس	سدیم در دسترس	پتاسیم در دسترس	نیتروژن کل	فسفر در دسترس
تیمارها Treatment (A)	2	111.00**	144.20**	224.38**	531.50**	86.08**	52.33**
سطح تیمارها Rate of Treatment (B)	2	103.77**	273.30**	279.78**	564.40**	11.32**	107.44**
نوع تیمار × سطح تیمار A×B	4	1.90**	9.18**	10.85**	27.73**	1.190**	1.11**
خطا Error	18	0.09	0.05	0.07	0.08	0.12	0.37
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		0.33	0.40	0.04	0.26	1.614	2.06

** نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد است

** is significant at the probability levels of 1%

در ادامه، جداول مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای اصلاحی و سطوح تیمارها بر برخی از ویژگی‌ها و عناصر شیمیایی خاک ارائه شده است (جدول‌های ٦ و ۷).

جدول ٦- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر برخی از ویژگی‌های شیمیایی.

Table 6. Comparison of the average effect of type and rate of treatment on chemical characteristics.

تیمارها Treatments	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC ($dS.m^{-1}$)	گنجایش تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بر کیلوگرم) CEC ($cmol.kg^{-1}$)	کربن آلی (درصد) OC (%)
نوع تیمار Type of Treatment				
بیوچار پوسته برنج RHB	6.96 a	0.41 b	35.14 b	0.71 a
بیوچار آزولا AB	7.00 a	0.45 a	36.05 b	0.70 a
کمپوست آزولا ACo	6.95 a	0.33 c	37.58 a	0.62 b
سطح تیمار Rate of Treatment				
0%	6.95 c	0.28 c	29.94 c	0.63 c
2%	7.02 b	0.41 b	35.33 b	0.68 b
4%	7.24 a	0.50 a	43.51 a	0.73 a

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان می‌دهد که تیمار بیوچار پوسته برنج بیش‌ترین اثر معنی‌دار (سطح پنج درصد) را بر اسیدیته و درصد کربن آلی دارد. تیمار بیوچار آزولا افزایش معنی‌داری را بر سه ویژگی اسیدیته، هدایت الکتریکی و گنجایش تبادل کاتیونی نشان داد. علاوه بر این، در خصوص سطح تیمار اصلاحی طبق جدول در هر سه تیمار بیوچار پوسته برنج، بیوچار آزولا و کمپوست آن، با افزایش میزان سطح ترکیب آن‌ها با خاک از صفر (تیمار شاهد) تا ٤ درصد، افزایش معنی‌داری در میزان همه ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده مشاهده گردید.

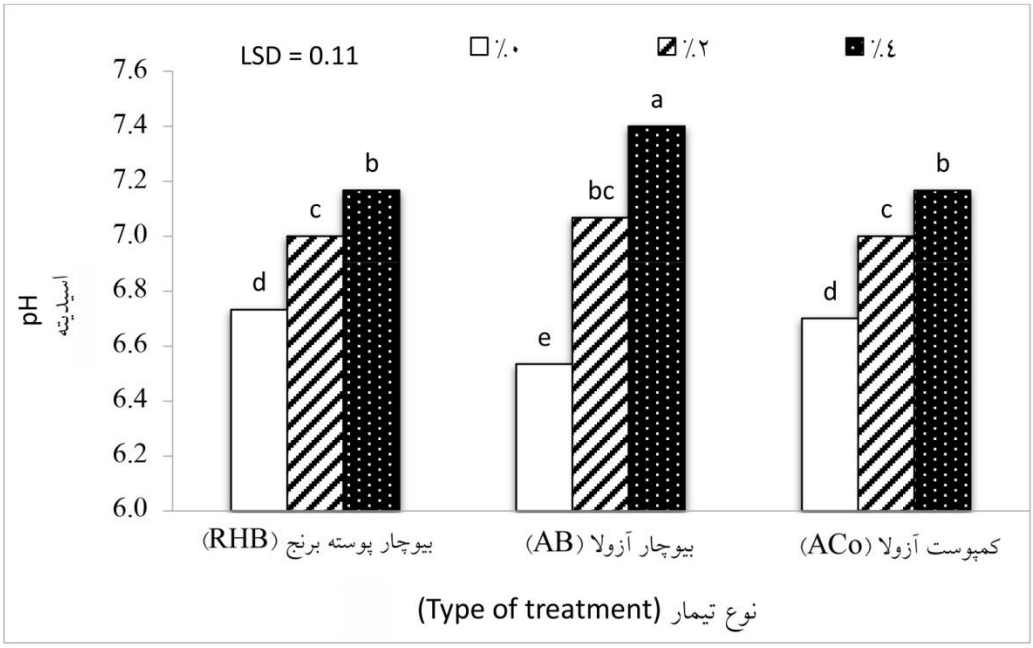
جدول ۷- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر غلظت برخی عناصر شیمیایی خاک.

Table 7. Comparison of the average effect of type and treatment rate on some elements.

تیمارها Treatments	منیزیم در دسترس Available Mg	کلسیم در دسترس Available Ca	سدیم در دسترس Available Na	پتاسیم در دسترس Available K	نیتروژن کل Total N	فسفر در دسترس Available P
	میلی‌گرم بر کیلوگرم ($mg.kg^{-1}$)					
نوع تیمار Type of Treatments						
بیوچار پوسته برنج RHB	91.71 b	42.02 c	62.41 c	104.27 c	21.24 b	28.33 b
بیوچار آزولا AB	86.45 c	47.74 b	71.93 a	107.27 b	24.74 a	32.33 a
کمپوست آزولا ACo	93.12 a	49.73 a	69.77 b	118.83 a	18.57 c	28.00 b
سطح تیمار Rate of Treatment						
0%	87.40 c	41.35 c	62.71 c	101.83 c	17.98 c	26.55 c
2%	89.79 b	45.74 b	67.57 b	110.94 b	21.57 b	28.77 b
4%	94.10 a	52.40 a	73.84 a	117.61 a	25.01 a	33.33 a

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، در تیمار نوع ماده اصلاح‌کننده، بیوچار آزولا بیش‌ترین اثر معنی‌دار (در سطح پنج درصد) را بر غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و سدیم قابل دسترس داشت، در حالی‌که تیمار کمپوست آزولا بیش‌ترین اثر معنی‌داری را روی غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و پتاسیم قابل دسترس نشان داد. در خصوص سطح تیمارهای اصلاحی، بالاترین غلظت عناصر مورد بررسی در سطح ٤ درصد به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با سایر سطوح داشت.

در ادامه نمودارهای مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای اصلاحی (بیوچارآزولا، بیوچار پوسته برنج و کمپوست برنج) و سطوح تیمارها (۰، ۲ و ٤ درصد) بر بعضی ویژگی‌ها و عناصر شیمیایی خاک ارائه می‌گردد (شکل‌های ۱ تا ۱۰).



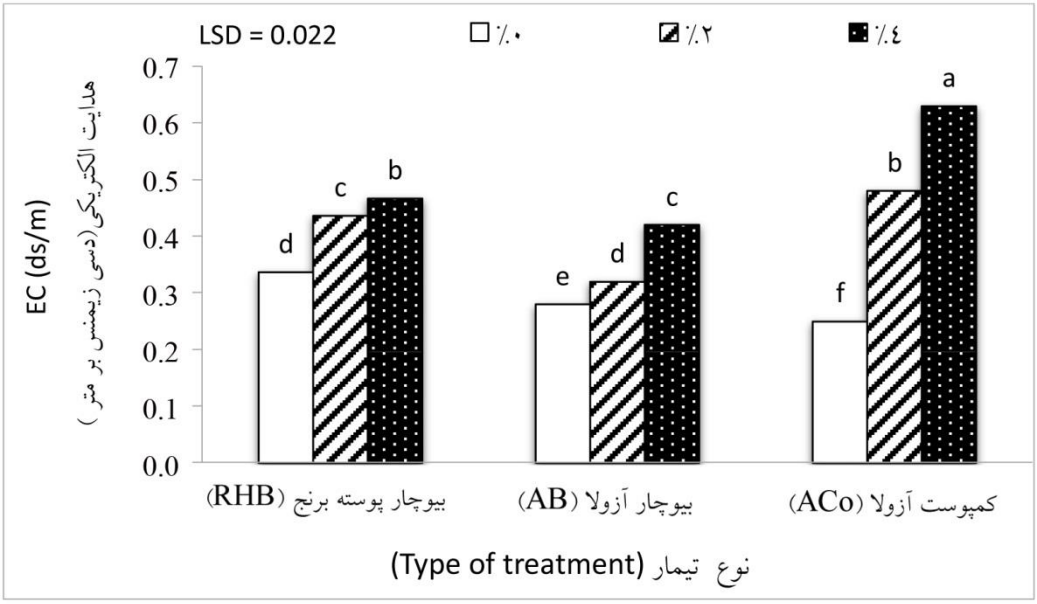
شکل ۱- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر میزان pH خاک.

حروف مشابه، فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.

مخفف لاتین بیوچار پوسته برنج (RHB)، بیوچار آزولا (AB) و کمپوست آزولا (ACo) می‌باشد.

Figure 1. Comparison of the effect of the treatments type and its level on soil pH. Different letters represent significant difference (P<0.05) between means by LSD test. Latin abbreviation, it is rice husk biochar (RHB), Azolla biochar (AB) and Azolla compost (ACo).

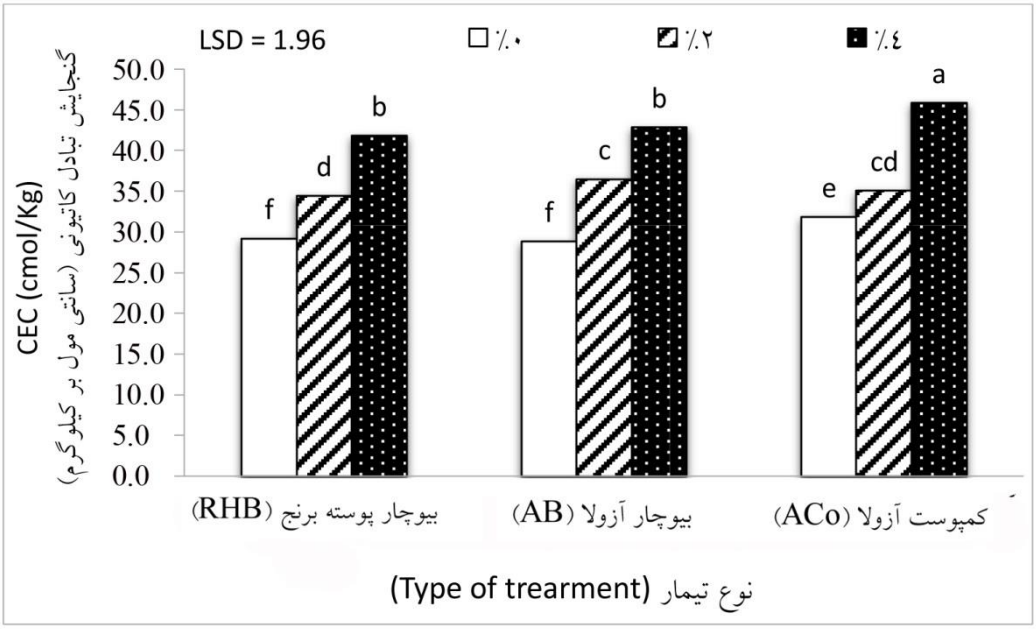
با توجه به شکل ۱ نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح اختلاط تیمارها با خاک، میزان pH نیز افرایش معناداری (در سطح ۵ درصد) داشت. درخاک‌های حاوی مواد اصلاحی نسبت به خاک شاهد pH در حدود نیم واحد افزایش نشان داد. در بین تیمارهای اصلاح‌کننده، بیش‌ترین میزان pH خاک در خاک اصلاح شده با بیوچار آزولا به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) با سایر تیمارها داشت. علت این امر به بالاتر بودن خاصیت قلیایی بیوچار آزولا نسبت به دو تیمار دیگر برمی‌گردد. قلیایی بودن بیوچار مربوط به دمای تولید بیوچار و نوع ماده اولیه آن است. جدا شدن مواد معدنی از بخش آلی در دمای بیش‌تر از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد. کاهش اسیدیته به دلیل تولید گروه‌های عاملی کربوکسیلی در زمان اکسیداسیون سطح بیوچار اتفاق می‌افتد. از دلایل دیگر افزایش اسیدیته در خاک اسیدی، تبادل سریع یون هیدروژن بین خاک و اصلاح‌کننده است. بیوچار قابلیت افزایش pH خاکی را دارد که به شدت اسیدی است، به ویژه زمانی که pH بیوچار بالاتر از pH خاک باشد (۷). این عمل در نتیجه ایجاد اکسیدهای فلز از کاتیون‌های پایه (مانند پتاسیم، کلسیم، سیلیکون و منیزیم) در طی پیرولیز رخ می‌دهد. بنابراین، مواد اولیه بیوچار با بیش‌ترین غلظت مواد معدنی، بیش‌ترین اجزای خاکستر بیوچار را تشکیل می‌دهند و بالاترین pH را دارند. هنگامی که pH خاک افزایش می‌یابد، حلالیت کاتیون‌های فلزی در محلول خاک کاهش می‌یابد و فلزات محلول، بیش‌تر به صورت فسفات، رسوب می‌کنند (۱۳).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر میزان هدایت الکتریکی خاک (دسی‌زیمنس بر متر).
حروف مشابه، فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.
مخفف لاتین بیوچار پوسته برنج (RHB)، بیوچار آزولا (AB) و کمپوست آزولا (ACo) می‌باشد.

Figure 2. Comparison of the average effect of the treatments type and its level on the soil EC ($dS.m^{-1}$).
Different letters represent significant difference ($P<0.05$) between means by LSD test.
Latin abbreviation, it is rice husk biochar (RHB), Azolla biochar (AB) and Azolla compost (ACo).

مقایسه میانگین داده‌ها در شکل ۲ نشان داد که بیش‌ترین میزان هدایت الکتریکی در تیمار کمپوست آزولا به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) با سایر تیمارها داشت. هم‌چنین با افزایش سطح اصلاح‌کننده در خاک نسبت به نمونه شاهد، میزان هدایت الکتریکی افزایش یافت به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار هدایت الکتریکی خاک در سطح اختلاط ٤ درصد ماده اصلاح‌کننده با خاک به‌دست آمد. کاربرد اصلاح‌کننده موجب افزایش ٦۰ درصدی هدایت الکتریکی خاک در تیمارهای اصلاح شده با کمپوست آزولا و افزایش دو برابری هدایت الکتریکی خاک در تیمارهای بیوچار نسبت به نمونه شاهد گردید. پژوهش‌گران دلیل این امر را وجود مقادیر بالایی از کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، منیزیم و سایر فلزات موجود در اصلاح‌کننده‌ها دانسته‌اند. در خصوص تیمار بیوچار این افزایش به‌دلیل از دست دادن مواد فرار و افزایش غلظت عناصر در بخش خاکستر می‌باشد (١٤، ١٥). در خصوص تیمار کمپوست، پژوهشی نشان داد که کاربرد کمپوست منجر به افزایش هدایت الکتریکی در خاک شد که این افزایش در خاک شنی نسبت به خاک لوم رسی بیش‌تر بود (١٦). در پژوهشی مشابه با افزودن بیوچار برنج و کود دامی گزارش شد که افزودن زغال زیستی و ماده آلی، تأثیر مثبتی در میزان ظرفیت زراعی مزرعه، قابلیت دسترسی عناصر و افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک داشت (٦).



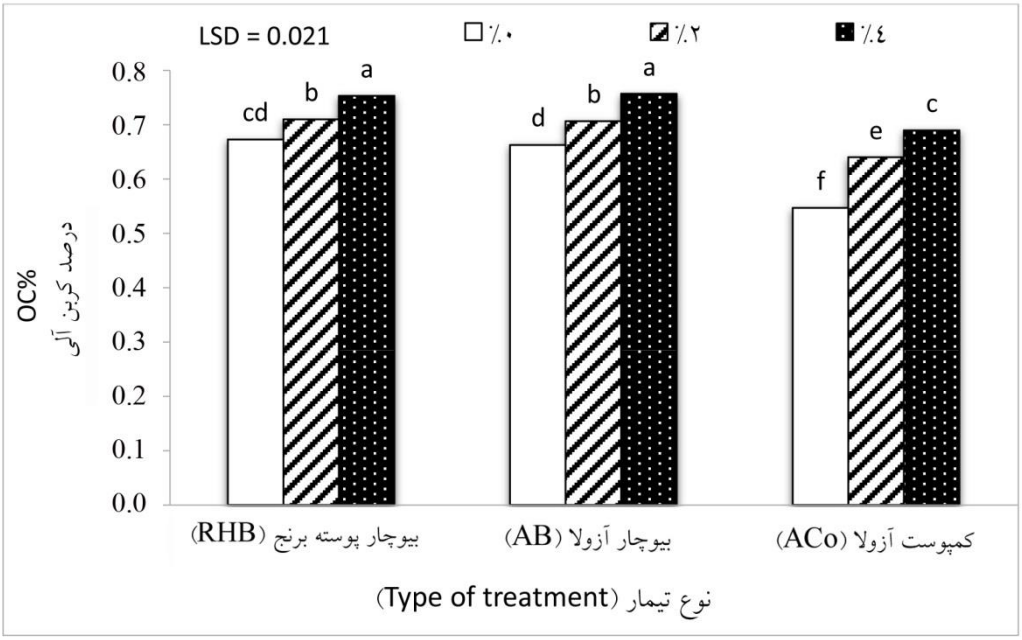
شکل ۳- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (سانتی‌مول بر کیلوگرم).

حروف مشابه، فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.

مخفف لاتین بیوچار پوسته برنج (RHB)، بیوچار آزولا (AB) و کمپوست آزولا (ACo) می‌باشد.

Figure 3. Comparison of the average effect of the treatments type and its level on soil CEC (cmol.kg^{-1}).
Different letters represent significant difference (P<0.05) between means by LSD test.
Latin abbreviation, it is rice husk biochar (RHB), Azolla biochar (AB) and Azolla compost (ACo).

مطابق مقایسه میانگین داده‌ها در شکل ۳ بیش‌ترین میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، در تیمار کمپوست آزولا به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) با سایر تیمارها داشت و منجر به افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در حد ۲۳ درصد نسبت به شاهد گردید. هم‌چنین با افزایش سطح اصلاح‌کننده در خاک نسبت به نمونه شاهد، میزان گنجایش تبادل کاتیونی خاک افزایش یافت، به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار آن در سطح اختلاط ٤ درصد ماده اصلاح‌کننده با خاک به‌دست آمد. پژوهش‌گران در پژوهشی مشابه بیان داشتند که کاربرد کمپوست در خاک باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شد (١٦). هر دو خاک اصلاح شده با بیوچار از نظر افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی جایگاه یکسانی داشتند. بیش‌ترین مقدار کاتیون‌های بازی تبادلی در خاک‌های تیمار شده با بیوچار ممکن است در خاکستر (قسمت معدنی) بیوچار باشد. قسمت خاکستر بیوچار کمک می‌کند که بلافاصله مواد مغذی تجمع یافته آزاد شود. هنگامی که زغال زیستی به خاک اضافه شود، اکسیداسیون سطوح زنده و غیرزنده زغال زیستی باعث افزایش گروه‌های کربوکسیل در سطح، بار منفی بیش‌تر و در نتیجه افزایش توانایی در جذب کاتیون‌ها می‌شود (۱۳). پژوهش‌گران بیان نمودند که بیوچار از ترکیبات آروماتیک پایدار تشکیل شده است. افزایش درجه حرارت تولید بیوچار سبب افزایش ترکیبات آروماتیک پایدار و خشبی شدن بیش‌تر مواد آلی و در نتیجه مقاومت آن در برابر تجزیه می‌شود. ظرفیت تبادل کاتیونی بیوچار، معیاری برای سنجش توانایی بیوچار برای جذب مواد مغذی کاتیونی است. به‌عبارت دیگر، بیوچار با ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد با جلوگیری از شستشوی مواد مغذی در خاک، اثر مفیدی دارد (۱۷).



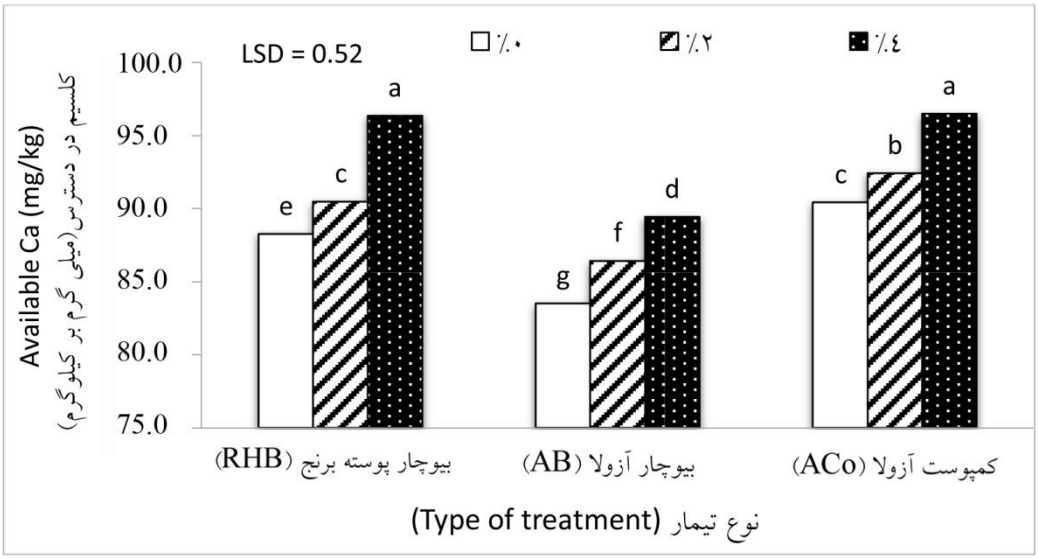
شکل ٤- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر مقدار درصد کربن آلی خاک.

حروف مشابه، فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.

مخفف لاتین بیوچار پوسته برنج (RHB)، بیوچار آزولا (AB) و کمپوست آزولا (ACo) می‌باشد.

Figure 4. Comparison of the average effect of treatments type and its level on soil OC%. Different letters represent significant difference (P<0.05) between means by LSD test. Latin abbreviation, it is rice husk biochar (RHB), Azolla biochar (AB) and Azolla compost (ACo).

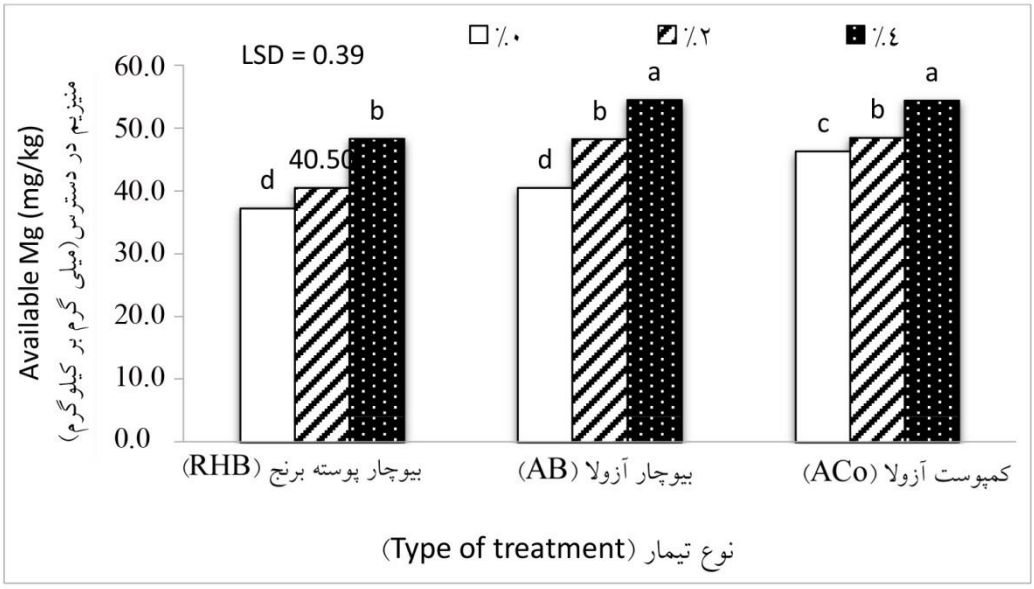
مقایسه میانگین داده‌ها در شکل ٤ نشان داد که در بین تیمارهای اصلاحی، هر دو نوع بیوچار آزولا و بیوچار پوسته برنج به‌طور مشابه باعث افزایش معنادار کربن آلی خاک در سطح ۵ درصد شدند. به طوری‌که این افزایش نسبت به شاهد حدود ۱۰ درصد به‌دست آمد. در هر سه تیمار اصلاحی، با افزایش سطح اصلاح‌کننده در خاک، میزان کربن آلی خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. افزایش کربن آلی در خاک‌های اصلاح‌شده با بیوچار می‌تواند ناشی از مقدار بالای کربن آلی در بیوچار باشد. افزایش مقدار کربن آلی خاک به‌دلیل ماهیت بیوچار و محتوای کربن زیاد آن، ناشی از فرایند کربنیزاسیون طی فرایند تولید آن است (۱۸). وجود کربن آلی خاک برای حفظ عملکرد کشاورزی، نگهداری مواد مغذی به‌ویژه پتاسیم، فسفر و نیتروژن، نگهداشت آب و حفظ که محل سکونت میکروب‌های خاک است که ساختار خاک را ارتقا می‌دهند، بسیار حیاتی است. محتوای کربن آلی موجود در بیوچار، بسته به منبع ماده اولیه، می‌تواند بیش از ۹۰ درصد باشد. هرچه دمای تولید بیوچار بالاتر باشد، میزان مواد فرار بیش‌تری از زیست‌توده جدا می‌شود و در انتها تنها مواد کربنی است که در خاکستر باقی می‌ماند و این گونه محتوای کربنی توده بیوچار افزایش می‌یابد (۱۹).



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر مقدار کلسیم قابل استفاده (میلی‌گرم بر کیلوگرم).
حروف مشابه، فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.
مخفف لاتین بیوچار پوسته برنج (RHB)، بیوچار آزولا (AB) و کمپوست آزولا (ACo) می‌باشد.

Figure 5. Comparison of the average effect of the treatments type and its level on available Ca (mg/kg). Different letters represent significant difference (P<0.05) between means by LSD test. Latin abbreviation, it is rice husk biochar (RHB), Azolla biochar (AB) and Azolla compost (ACo).

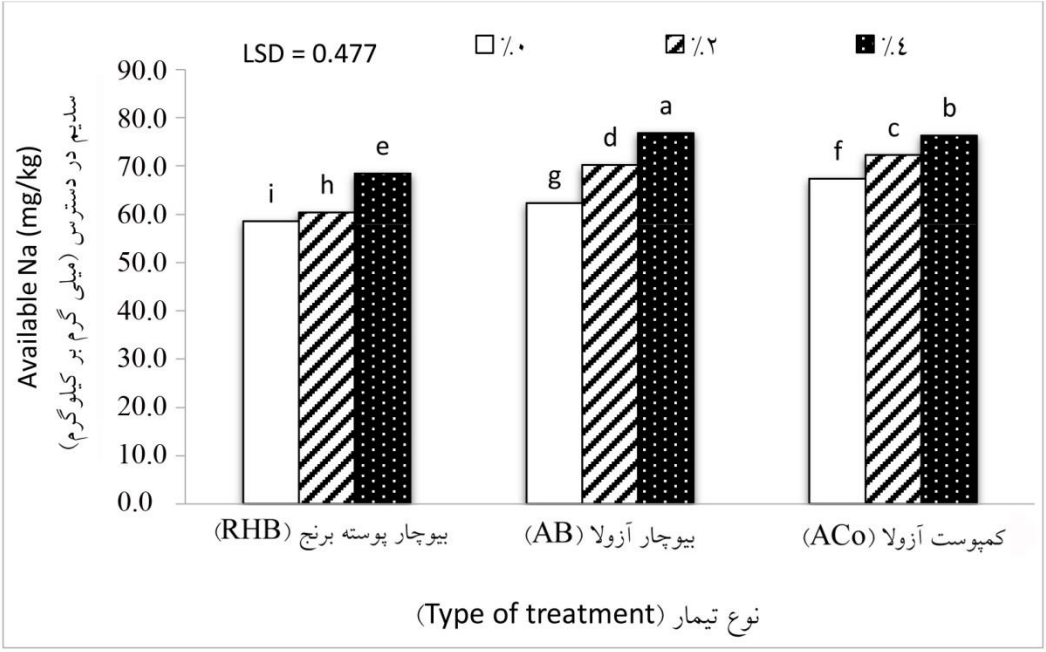
با توجه به مقایسه میانگین داده‌ها در شکل ۵ بین تیمارهای اصلاحی، بیش‌ترین میزان کلسیم قابل دسترس خاک در بیوچار پوسته برنج و کمپوست آزولا مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) با سایر تیمارها داشتند. به‌طوری‌که این افزایش نسبت به شاهد در حد ۱۰ درصد به‌دست آمد. در هر سه تیمار اصلاحی، با افزایش سطح اصلاح‌کننده در خاک، میزان کلسیم خاک به طور معنی‌داری افزایش یافت. در مطالعه‌ای پژوهش‌گران اعلام نمودند که بیوچار حاوی مقادیر بالایی از عناصر کربن، هیدروژن، نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم است و با افزودن آن به خاک، میزان این عناصر به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد (۲۰). در پژوهشی، اثر بیوچار پوسته برنج بر خواص خاک اسیدی بررسی گردید. افزایش معنادار در میزان کربن آلی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، فسفر، پتاسیم و کلسیم خاک نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد (۱۹). احتمالاً بالا بودن مقدار کلسیم موجود در بیوچار به‌کار برده شده، موجب افزایش کلسیم محلول در خاک شد (۱۰). نتایج پژوهشی نشان داد که افزودن بیوچار حاصل از پوسته گردو به خاک، باعث افزایش کلسیم خاک شد (۲۲). پژوهش‌گران دیگر نشان دادند که کاربرد بیوچار پوسته برنج سبب افزایش کلسیم در خاک شد و بیش‌ترین افزایش در سطح ۳ درصد بوده است (۲۳). در پژوهشی مشابه قربانی و همکاران (۲۰۱۸) افزایش قابل توجه ذخیره آب، افزایش کل محتوای کربن، نیتروژن، پتاسیم و فسفر، هم‌چنین میزان رطوبت خاک پس از کاربرد بیوچار را گزارش کردند (۷). نتایج همه پژوهش‌ها با نتایج این مطالعه مطابقت داشت.



شکل ٦- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر مقدار منیزیم قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم).
حروف مشابه، فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال ٥ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.
مخفف لاتین بیوچار پوسته برنج (RHB)، بیوچار آزولا (AB) و کمپوست آزولا (ACo) می‌باشد.

Figure 6. Comparison of the average effect of the treatments type and its level on available Mg (mg/kg). Different letters represent significant difference (P<0.05) between means by LSD test. Latin abbreviation, it is rice husk biochar (RHB), Azolla biochar (AB) and Azolla compost (ACo).

طبق مقایسه میانگین داده‌ها در شکل ٦ در بین تیمارهای اصلاحی، میزان منیزیم قابل دسترس خاک در کمپوست ازولا و بیوچار آزولا نسبت به سایر تیمارها به‌طور معنی‌داری (در سطح ٥ درصد) افزایش نشان داد و این افزایش نسبت به شاهد در حد ٢٨ درصد بود. در هر سه تیمار اصلاحی، با افزایش سطح اصلاح‌کننده در خاک، میزان منیزیم قابل دسترس خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان منیزیم قابل دسترس در سطح ٤ درصد اختلاط تیمار اصلاح‌کننده با خاک به‌دست آمد. نتایج پژوهشی مشابه نشان داد که کاربرد بیوچار، موجب افزایش مقدار منیزیم محلول خاک شد. علت این امر، میزان بالای منیزیم در بیوچار نسبت به خاک است (٢٣). رابرتز و همکاران (٢٠١٥) نشان دادند که نمونه‌های بیوچار جلبک دریایی دارای سطوح بالایی از کاتیون‌های قابل تعویض باقی مانده مانند کلسیم، پتاسیم، منیزیم و سدیم هستند (٢٤). وانگ و همکاران (٢٠١٦) گزارش کردند که بیوچار مشتق شده از جلبک، حاوی غلظت بالایی از عناصر کمیاب مختلف از جمله کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم است (٢٠). در یک مطالعه جداگانه، بیوچار تولید شده از جلبک‌های دریایی قرمز و قهوه‌ای دارای غلظت بالایی از نیتروژن، فسفر، پتاسیم و منیزیم بود. به طورکلی، مطابق بسیاری از پژوهش‌ها، بیوچار تولید شده از گونه‌های مختلف جلبک دارای سطح بالایی از pH، نیتروژن و مواد مغذی معدنی قابل استخراج از جمله فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم می‌باشد (٨).



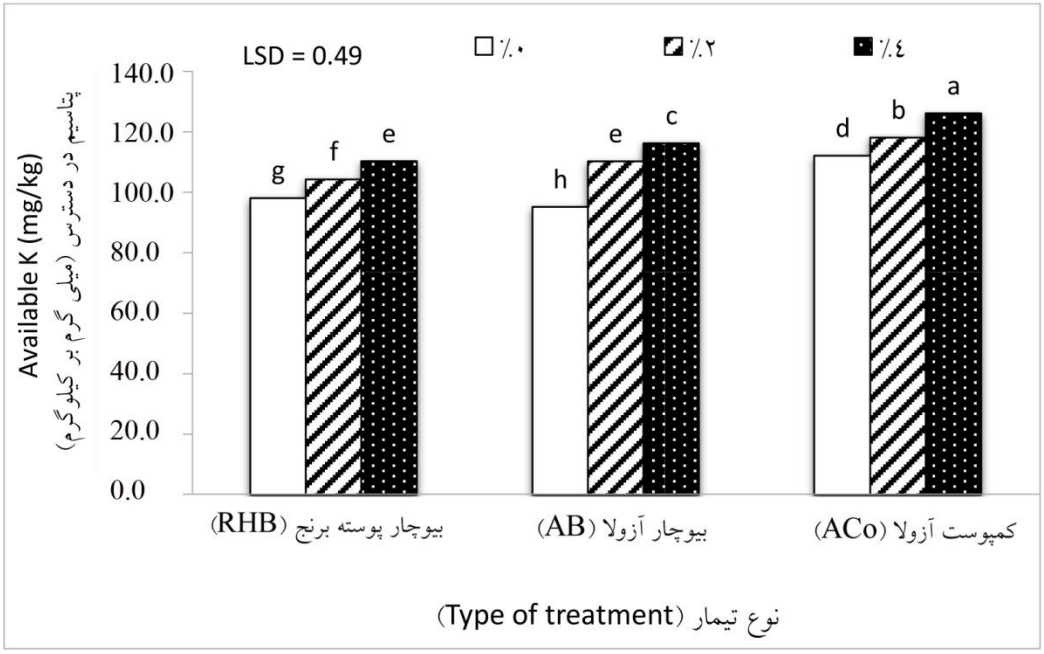
شکل ۷- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر مقدار سدیم در دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم).

حروف مشابه، فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.

مخفف لاتین بیوچار پوسته برنج (RHB)، بیوچار آزولا (AB) و کمپوست آزولا (ACo) می‌باشد.

Figure 7. Comparison of the average effect of the treatments type and its level on available Na (mg/kg). Different letters represent significant difference (P<0.05) between means by LSD test. Latin abbreviation, it is rice husk biochar (RHB), Azolla biochar (AB) and Azolla compost (ACo).

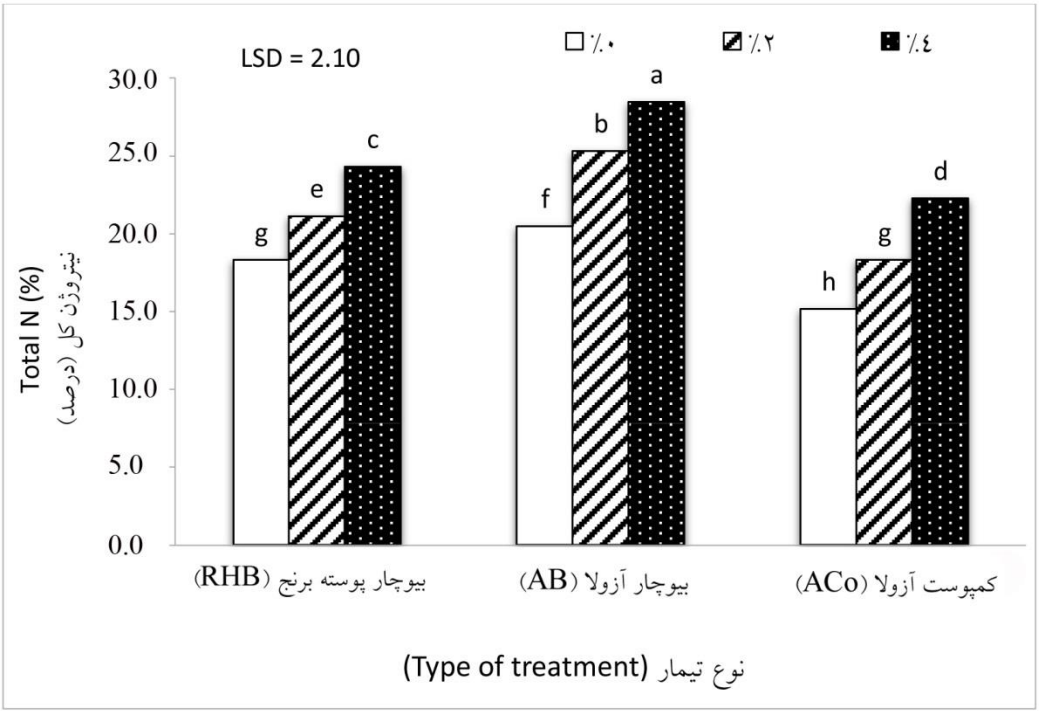
نتایج مقایسه میانگین داده‌ها در شکل ۷، نشان داد که در بین تیمارهای اصلاحی، با افزودن بیوچار آزولا به خاک، بیش‌ترین میزان سدیم قابل دسترس در خاک به‌دست آمد که نسبت به شاهد منجر به افزایشی در حد ۲۰ درصد گردید. هم‌چنین با افزایش سطح تمامی تیمارهای اصلاح‌کننده در خاک، مقدار سدیم قابل دسترس به طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) افزایش یافت. به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان سدیم قابل دسترس در سطح ٤ درصد اختلاط تیمار اصلاح‌کننده با خاک به‌دست آمد. پژوهش‌گران بیان کردند که کاربرد بیوچار پوست گردو پس از ۲۵ و ٦۷ روز موجب افزایش سدیم تبادلی خاک گردید (۲۲). پژوهش‌گران در پژوهشی گزارش کردند که افزودن بیوچار سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و افزایش عناصری مانند سدیم، پتاسیم و کلسیم در خاک می‌شود، اما افزایش میزان سدیم به حدی نیست که برای خاک ایجاد شوری نماید (۹).



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر مقدار پتاسیم قابل دسترس خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم).
حروف مشابه، فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.
مخفف لاتین بیوچار پوسته برنج (RHB)، بیوچار آزولا (AB) و کمپوست آزولا (ACo) می‌باشد.

Figure 8. Comparison of the average effect of the treatments type and its level on available K (mg/kg). Different letters represent significant difference (P<0.05) between means by LSD test. Latin abbreviation, it is rice husk biochar (RHB), Azolla biochar (AB) and Azolla compost (ACo).

مطابق مقایسه میانگین داده‌های شکل ۸، مشخص شد که در بین تیمارهای اصلاحی، میزان پتاسیم قابل دسترس خاک در کمپوست آزولا نسبت به سایر تیمارها به‌طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) افزایش نشان داد و این افزایش نسبت به شاهد در حد ۱۱ درصد بود. در هر سه تیمار اصلاحی، با افزایش سطح اصلاح‌کننده در خاک، میزان پتاسیم قابل دسترس خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان پتاسیم قابل دسترس در سطح ٤ درصد اختلاط تیمار اصلاح کننده با خاک به‌دست آمد. نتایج پژوهشی نشان داد که کاربرد بیوچار در خاک پس از پایان ٦ ماه انکوباسیون موجب افزایش پتاسیم تبادلی خاک شد (۲۲). پژوهش‌گران دیگر گزارش کردند که کاربرد بیوچار پوسته برنج روی یک نوع خاک شنی، افزایش معنادار پتاسیم محلول خاک را درپی‌داشت (۲۳). علت این امر بالا بودن میزان پتاسیم موجود در بیوچار پوسته برنج گزارش شد. در پژوهشی دیگر با اضافه کردن بیوچار پوسته برنج به خاک، میزان پتاسیم خاک افزایش ۲/۵ برابری داشت (۲۱). پژوهش‌گران دیگر نیز مشاهده نمودند که کاربرد بیوچار باعث افزایش معنادار مقدار پتاسیم خاک شده‌است که همگی با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد (۲٤). باتوجه به ترکیبات متفاوت بقایای گیاهی در تولید بیوچار، ماده حاصله ممکن است ویژگی‌های متفاوتی از خود نشان دهد. این ویژگی‌های متفاوت ممکن است تأثیرات متفاوتی روی نیتروژن، فسفر، پتاسیم و ریزمغزی‌ها (آهن، روی، مس و منگنز) داشته باشد (۲۵).



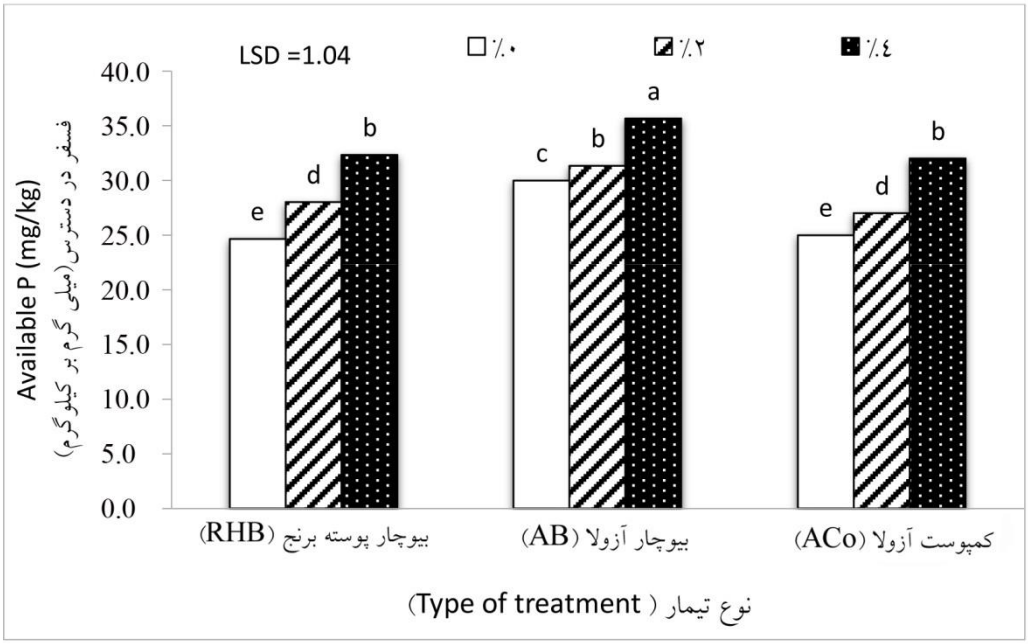
شکل ۹- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر مقدار درصد نیتروژن کل.

حروف مشابه، فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.

مخفف لاتین بیوچار پوسته برنج (RHB)، بیوچار آزولا (AB) و کمپوست آزولا (ACo) می‌باشد.

Figure 9. Comparison of the average effect of the type of treatment and its level on soil $\%N_t$. Different letters represent significant difference ($P<0.05$) between means by LSD test. Latin abbreviation, it is rice husk biochar (RHB), Azolla biochar (AB) and Azolla compost (ACo).

طبق مقایسه میانگین داده‌ها در شکل ۹، در بین تیمارهای اصلاحی، بیوچار آزولا بیش‌ترین میزان نیتروژن کل را در خاک نشان داد، به‌طوری‌که این افزایش نسبت به شاهد در حد ۳۰ درصد بود. هم‌چنین در هر سه تیمار اصلاحی، با افزایش سطح اصلاح‌کننده در خاک، میزان نیتروژن کل خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان نیتروژن در سطح ٤ درصد اختلاط تیمار اصلاح‌کننده با خاک به‌دست آمد. نجفی قیری (۲۰۱۵) در پژوهشی گزارش کرد که کاربرد بیوچار چوب ذرت، مقدار نیتروژن کل خاک را افزایش می‌دهد (۲۵). منافذ زغال زیستی و سطح داخلی بالای آن‌ها و افزایش توانایی جذب مواد آلی باعث ایجاد یک زیستگاه مناسب برای حمایت از میکروب‌هایی که فرایند کاتالیزی برای کاهش از دست رفتن نیتروژن را برعهده دارند، می‌شود. پژوهش‌گران بر روی شاخص‌های کیفیت خاک مشاهده کردند که تغییرات مقدار نیتروژن خاک الگوی مشابهی با تغییرات کربن آلی خاک دارد و هر دوی این عناصر موجب بهبود شرایط زیستی خاک می‌شود (۱۸). افزودن بیوچار به خاک توانایی جذب عناصر غذایی مانند نیتروژن و فسفر را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، نتایج یک مطالعه نشان داد، کاربرد مستقیم بیوچار ممکن است به‌طور موقت فراهمی زیستی نیتروژن را در خاک کاهش دهد و نیاز به کوددهی نیتروژن را ایجاد کند. هم‌چنین کاهش آبشوئی نیتروژن از خاک با استفاده از بیوچار مشاهده شده است (۲۲).



شکل ۱۰- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار و سطح آن بر مقدار فسفر قابل دسترس خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم).
حروف مشابه، فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.
مخفف لاتین بیوچار پوسته برنج (RHB)، بیوچار آزولا (AB) وکمپوست آزولا (ACo) می‌باشد.

Figure 10. Comparison of the average effect of the treatment type and its level on available soil P (mg/kg). Different letters represent significant difference (P<0.05) between means by LSD test. Latin abbreviation, it is rice husk biochar (RHB), Azolla biochar (AB) and Azolla compost (ACo).

مطابق مقایسه میانگین داده‌ها در شکل ۱۰ در بین تیمارهای اصلاحی، میزان فسفر قابل دسترس خاک در بیوچار آزولا نسبت به سایر تیمارها به‌طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) افزایش نشان داد و این افزایش نسبت به شاهد در حد ۱۷ درصد بود. در هر سه تیمار اصلاحی، با افزایش سطح اصلاح‌کننده در خاک، میزان فسفر قابل دسترس خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان فسفر قابل دسترس در سطح ٤ درصد اختلاط تیمار اصلاح‌کننده با خاک به‌دست آمد. در پژوهشی پژوهش‌گران بیان کردند که کاربرد کمپوست می‌تواند به اندازه کودهای شیمیایی، در افزایش فسفر قابل‌جذب خاک مؤثر باشد، که دلیل احتمالی این امر افزایش فعالیت میکروبی پس از کاربرد کمپوست و در نتیجه آزادسازی فسفر در طول معدنی شدن مواد آلی ذکر گردید (۸). عواملی مانند تشکیل ترکیبات فسفر هومیک که حلالیت فسفر را افزایش می‌دهند و به سهولت جذب گیاه می‌شوند، جایگزینی یون هومات به جای فسفات‌های جذب سطحی شده و آزادسازی یون فسفات، افزایش ترکیبات آلی محلول مانند قندها و اسیدهای آلی در محلول خاک و جایگزینی آنیونی با یون‌های ارتوفسفات روی مکان‌های جذب، ایجاد پوشش بر روی سطوح جذب‌کننده، ایجاد کمپلکس با یون‌های کلسیم، آهن و آلومینیوم و افزایش دفع آنیونی بر فراهمی فسفر مؤثر می‌باشند (۲٦). از آن‌جایی‌که pH خاک به دلیل کاربرد بیوچار افزایش می‌یابد، حلالیت کاتیون‌های فلزی در محلول خاک کاهش می‌یابد و بیش‌تر به صورت فسفات رسوب می‌کند (۱۸).

نتیجه‌گیری کلی

در بین تیمارهای اصلاحی، بیوچار آزولا باعث افزایش معنی‌دار میزان نیتروژن کل، سدیم، منیزیم و فسفر قابل دسترس، درصد ماده آلی و اسیدیته خاک نسبت به سایر تیمارهای اصلاح‌کننده و شاهد شد. پس از آن کمپوست آزولا منجر به افزایش معنی‌دار میزان پتاسیم قابل دسترس، هدایت الکتریکی و گنجایش تبادل کاتیونی خاک نسبت به سایر تیمارهای اصلاحی و شاهد گشت. بیش‌ترین تأثیر در سطح ٤ درصد جرمی اختلاط تیمارها با خاک مشاهده شد. با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که استفاده مجدد از ضایعات آلی در قالب بیوچار و کمپوست، علاوه‌بر کاهش حجم پسماندهای کشاورزی و زیستی، جلوگیری از دپوی آن‌ها و هم‌چنین سوزاندن آن‌ها می‌تواند باعث بهبود خواص شیمیایی و فیزیکی خاک گردد. بنابراین توصیه می‌گردد در امر مدیریت محیط زیست و بهبود شرایط خاک از این پسماندها به عنوان فرصت استفاده گردد. در آخر به پژوهش‌گران توصیه می‌گردد تا به بررسی بهبود خواص بیولوژیکی خاک با استفاده از این اصلاح‌کننده‌ها در شرایط تنش‌های محیطی از جمله: شوری، خشکی و ... پرداخته شود.

منابع

1. Gui, J., Liu, X., Zhang, Y., Shen, J., Han, W., Zhang, W., Christie, P., Goulding, K., Vitousek, P., & Zhang, F. (2010). Significant acidification in major Chinese. *Croplands Science*. 327, 1008-1010. **DOI: 10.1126/science.1182570.**
2. Javdankherad, E. (2015). Measurement and determination of normal alkanes in surface sediments at the outlet of Anzali lagoon. *1th national environment conference*. Tehran. Iran. [In Persian]. **https://civilica.com/doc/279330.**
3. Rafati, M., Moslehi, M., & Ahmadi, A. (2019). Investigation of the effects of Azolla combination with organic and inorganic fertilizers on growth indices of deltoid poplar. *Journal of Environmental Science and Technology*. 21 (2), 227-239. [In Persian]. **DOI: 10.22034/JEST.2019. 13965.**
4. Khosravi, H. (2022). The role of biomineralization of nitrogen in organic matter in the decomposition of crop residues. *Iranian Journal of Biology*. 6 (11), 84-91. [In Persian]. **DOI: 20.1001. 1.20089406.1401.6.11.8.5.**
5. Rahimi, A., Abbaspoor, A., Asghari, H. R., & Ghorbani, H. (2016). Kinetics of surface absorption of chromate from aqueous solutions by rice bran and elder leaf biochar. *2th national conference on sustainable management of soil resources and environment (quality, health and security of soil)*.Kerman, Iran. [In Persian]. **https://civilica.com/doc/558259.**
6. Zaman, B., Shabanpour, M., & Forghani, A. (2016). The effect of straw and rice stubble biochar and organic matter on some soil physical properties. *15th Congress of Soil Sciences of Iran*. [In Persian]. **https://civilica.com/doc/ 729571/.**
7. Ghorbani, M., Asadi, H., & Abrishamkesh, S. (2019). Effects of rice husk biochar on selected soil properties and nitrate leaching in loamy sand and clay soil. *International Soil and Water Conservation Research*. 7 (3), 258-265. **https://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S2095633918302442.**
8. Mousavi Dizkuhi, H., Shahsavani, Sh., Derakhshan Shadmehri, A., Parsaeeyan, M., & Razavipour, T. (2013). The effect of Nitrocara biological fertilizer, Azolla compost and phosphorus on the stemworm population. *The 15th Congress of Soil Sciences of Iran*. Tehran. Iran. [In Persian]. **https://civilica.com/doc/ 729540.**
9. Vahedi, R., & Rasouli, M. (2019). The effect of tree pruning residue compost on some microbiological indicators of a calcareous soil in the presence of mycorrhizae under rhizobox

conditions. *Journal of Water and Soil*. 32 (6), 1165-1177. [In Persian]. **DOI: 10.22067/JSW.V32I5.71736.**

10. Mohammady, S., Forghanhi, A., & Saburi, A. (2017). Investigating the effects of two types of biochar on the nutrient status of acidic soil. *The 1th international conference and the second national conference on agriculture, environment and food security.* Jiroft University. 18-32. [In Persian]. **https://issc.areeo.ac.ir/article_32915.html.**
11. Ryan, J., Estefan, G., & Rashid, A. (2006). Soil and Plant Analysis Laboratory Manual. ICARDA. 37, 2185-2198. **DOI: 10.4236/vp.2020.64020.**
12. Power, J., & Prasad, R. (2002). Translated by Moazardalan, M., & Sawaghebi, Gh. Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture. Tehran. University of Tehran Press. 388p. [In Persian]
13. Cheng, Y., Cai, Z., Chang, S. X., Wang, J., & Zhang, J. (2012). Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N_2O production in a cultivated Black Chernozem. *Journal of Biology and Fertility of Soils*. 48 (8), 946-941. **DOI: 10.1007/s00374-012-0687-0.**
14. Kim, P., & Hensley, D. N. (2014). Nutrient release from switchgrass derived biochar pellets embedded with fertilizers. *Geoderma*. 232, 341-351. **DOI:10.1016/j.geoderma.2014.05.017.**
15. Zolfi Bavariyani, M., Ronaghi, A., Karimiyan, N., & Ghasemi, R. (2016). The effect of biochar prepared from poultry manure at different temperatures on the chemical properties of a calcareous soil. *Journal of Soil and Water Sciences, Agricultural Science and Technology and Natural Resources*. Isfahan University of Technology. 75, 85-73. [In Persian]. **DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.20.75.73.**
16. Goleig, B., Shariatmadari, H., & Soleimani, M. (2015). The effect of rice coal biochar on some soil properties and corn growth, Master Thesis in Soil Science. Isfahan University of Technology. [In Persian]. **https://elmnet.ir/ article/ 10803406-22132/.**
17. Bahrami, A., Emadodin, I. M., Ranjbar, A., & RudolfBork, H. (2010). Landuse change and soil degradation: a case study, north of Iran. *Agriculture & Biology Journal of North America*. 1 (4), 600-605. **https://scihub.org/ABJNA/PDF/2010/4/1-4-600-605.pdf.**
18. Zhang, A. F., Bian, R. J., Pan, G. X., Cui, L. Q., Hussain, Q., Li, L. Q., Zheng, J. W., Zheng, J. F., Zhang, X. H., & Han, X. J. (2012). Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas 18- emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crops*. 127, 153-160. **https:// www.sciencedirect.com/science/article/ pii/S0165237017309312.**
19. Singh, H. P., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2003). Allelopathic interactions & allelochemicals: New possibilities or sustainable weed. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 22 (4), 239-311. **DOI: /10.1080/713610858.**
20. Wang, G., Li, H., Ye, X., Geng, Z., Zhou, H., Guo, X., & Zhang, Y. (2016). The influence of biochar type on long-term stabilization for Cd and Cu in contaminated paddy soils. *Journal of Hazardous Materials.* 304, 40-48. **DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.10.048.**
21. Novak, J. M., Busscher, W. J., Laird, D. L., Ahmedna, M., Watts, D. W., & Niandou, M. A. (2009). Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science*. 174 (2), 105-112. **DOI: l0.1097SS.0b013e3 18t98td9a.**
22. Xu, G., Shao, H. B., & Sun, J. N. (2013). What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: direct or indirect mechanism. *Ecological Engineering*. 52, 119-124. **DOI: 10.1016/ j.ecoleng.2012.12.091.**
23. Widowati, W. H., Guritno, B., & Soehono, L. A. (2012). The Effect of biochar on the growth and N fertilizer requirement of Maize (*Zea mays* L.) in green house Experiment. *Journal of*

Agricultural Science. 5 (4), 255-264. **DOI:10.5539/jas.v4n5p255.**

24. Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2009). Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic and climate change potential. *Enviroment Science Technology*. 44, 27-33. **DOI: 10.1021/es902266r.**
25. NajafiQiri, M. (2015). The effect of application of different biochar on soil properties and the ability to absorb some nutrients in calcareous soil. *Journal of Soil Research*. 3, 352-358. [In Persian]. **DOI: 10.22092/IJSR.2014.103501.**
26. Karaca, S., Gurses, A., Ejder, M., & Acikyildiz, M. (2014). Kinetic modeling of liquidphase adsorption of phosphate on dolomite. *Journal Colloid and Interface Science*. 277, 257-263. **DOI: 10.1016/j.jcis.2004.04.042.**