

Research Article

Agricultural Engineering., 47(1) (2024) 75-93
DOI: 10.22055/agen.2024.45495.1698

ISSN (P): 2588-526X
ISSN (E): 2588-5944

The effects of silicon and some nutrients recovered from plant residues on their concentration in soil

S.Mohammadi¹, F. Sadeghzadeh^{2*}, M.A. Bahmanyar³ S.M. Emadi⁴ and M. Qajar Spanal⁵

1. Ph.D. Student of Department of Soil Science, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran
2. Associate Professor, Department of Soil Science, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran
3. Profesor, Department of Soil Science, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran
4. Associate Professor, Department of Soil Science, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran
5. Associate Professor, Department of Soil Science, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran

Received: 12 December 2023

Accepted: 17 February 2024

*Corresponding Author: fardin.upm@gmail.com

Abstract

Introduction: Recovery of nutrients from plant residues is a sustainable and economical method in agriculture. Considering the important role of nutrients, it is essential to supply these elements in the soil and achieve the appropriate yield. The amount of nutrients in the plant residues after harvesting is very variable due to the difference between the species used. Each plant residue contains some nutrients that during the decomposition process, these nutrients can be available to the soil and crops in different amounts. That the excessive use of chemical fertilizers has caused environmental problems and unused plant residues in the environment have created problems for the environment and farmers. Therefore, to solve these problems, recovering important elements such as silicon from plant residues can be effective in improving the quality and quantity of many different products and plants. Rice straw, wheat straw and sugarcane bagasse are among the most common plant residues that have been studied in different studies to recover nutrients from them with different methods. In particular, rice straw is known as one of the most important plant residues that can be found in abundance in the north of Iran. Obviously, there is still a need for a better understanding of the amount of nutrients recovery from plant residues with different methods and there is an effect of these elements on improving the condition of the soil. The purpose of this study was to compare the residues of rice straw, wheat straw and sugarcane bagasse and the methods of recovering nutrients from these residues in order to add macro-nutrients (nitrogen, phosphorus and potassium) and micro-nutrients (iron, zinc, copper and manganese) into the soil.

Materials and Methods: This research was carried out based on a factorial experiment in the form of a completely "randomized" design with three replications during 2022-2023. The treatments of plant residues in three levels (rice straw, wheat straw and sugarcane bagasse) and the methods of recovering elements from these residues in five levels (biochar, straw, digestion, ash and ash with Hcl acid) were examined. Soil samples, from a depth of 0-25 cm with silty loam texture were randomly taken from the forest parts of Mazandaran province, Iran, characterized by a Mediterranean climate, Csa type, with an average annual rainfall of 676 mm, and average air



temperature of $14C^0$, and then were air-dried. After preparing the samples, the characteristics of the treatments, including pH, electrical conductivity, total nitrogen, phosphorus, potassium, iron, zinc, manganese, copper, and silicon were measured. Analysis of variance (ANOVA) assessed the statistical significance of the differences in the studied variables among the different treatments. Tukey test was used for the post-hoc comparisons at a p-level < 0.01 . Prior to the statistical analysis, QQ-plots were used to check the normality of sample distribution, and the data were square root-transformed whenever necessary. Moreover, the principal component analysis (PCA) was used to cluster the studied variables in groups related to the studied treatments.

Results and Discussion: The results of analysis of variance showed the effect of plant residues and element recovery method on all studied characteristics including soil characteristics (pH, electrical conductivity and organic carbon), macronutrients (nitrogen, phosphorus and potassium) and micronutrients (silicon, manganese, copper, iron and zinc) were significant at the probability level of 1%. The results showed that the biochar treatment of rice straw had the maximum amount of pH (7.66), organic carbon (2.61%), nitrogen (0.24%), phosphorus (46 mg/kg), potassium (781 mg/kg) and silicon (261.33 mg/kg) compared to other treatments. Also, the results of the compare means showed that sugarcane bagasse biochar treatment had the maximum amount of manganese (25.01 mg/kg), zinc (3.20 mg/kg), iron (48.27 mg/kg) and copper (2.20 mg/kg) compared to other treatments. The application of principal component analysis showed that three distinct groups (for rice straw/biochar, sugarcane bagasse/biochar and control treatments) were demonstrated, without clear overlap of the points related to these treatments and their element recovery methods.

Conclusions: In general, this study confirmed that the treatment of rice straw residues and the method of recovering its elements through biochar play a significant role in increasing the quality and fertility of the soil and can be recommended to farmers.

Keywords: *Nitrogen, phosphorous, potassium, rice straw, sugarcane bagasse, wheat straw.*

تأثیر سیلیسیم و برخی عناصر غذایی بازیایی شده از بقایای گیاهی بر غلظت آنها در خاک

سمیرا محمدی^۱، فردین صادق زاده^{۲*}، محمد علی بهمنیار^۳، مصطفی عمادی^۴ و مهدی قاجار سپانلو^۵

- ۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
- ۲- دانشیار گروه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران
- ۳- استاد گروه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران
- ۴- دانشیار گروه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران
- ۵- دانشیار گروه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱

پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

واژه‌های کلیدی:

باگاس نیشکر،

پتاسیم،

فسفر،

کاه برنج،

کاه گندم،

نیترژن.

چکیده

عناصر غذایی به ویژه عناصر پرمصرف فسفر، پتاسیم و نیترژن برای خاک و رشد گیاه ضروری هستند. مطالعه حاضر با هدف بررسی اثرات بقایای کاه برنج، کاه گندم و باگاس نیشکر و روش‌های بازیایی عناصر از این بقایا، برای افزودن عناصر غذایی به خاک انجام شد. این تحقیق بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ اجرا گردید. تیمارهای بقایای گیاهی در سه سطح (کاه برنج، کاه گندم و باگاس نیشکر) و روش‌های بازیایی عناصر از این بقایا در پنج سطح (بیوجار، کاه، هضم تر، خاکستر و خاکستر با اسید HCl) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد بیشترین غلظت عناصر پرمصرف در خاک در تیمار بیوجار کاه برنج بود که غلظت نیترژن، فسفر، پتاسیم و سیلیسیم نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۳/۴۲، ۳/۰۶، ۳۹/۳۹ و ۲/۲۵ برابر افزایش یافت. همچنین علاوه بر این نتایج مقایسه میانگین نشان داد تیمار بیوجار باگاس نیشکر حداکثر مقدار منگنز (۲۵/۰۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، روی (۳/۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، آهن (۴۸/۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و مس (۲/۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را در مقایسه با سایر تیمارها داشت. از جمله نتیجه‌گیری‌های مهم این تحقیق می‌توان به این نکته اشاره کرد که بقایا و کاه برنج فقط مواد ضایعاتی نیستند، بلکه بیشتر از یک ماده دور ریختنی ارزش دارند. با توجه به مقرون به صرفه بودن و میزان بالای تولید برنج در کشور، به ویژه در شمال ایران، می‌توان استفاده‌های بهتری از بقایای برنج نمود. همچنین از دیگر مزایای این فرآیند پیشنهادی این است که مشکل دفع ضایعات پوسته برنج از بین رفته و محصول ارزشمندی نیز به دست می‌آید. به طور کلی، این مطالعه تأیید کرد که تیمار بقایای کاه برنج و روش بازیایی عناصر آن از طریق بیوجار، در افزایش کیفیت و حاصلخیزی خاک نقش بسزایی دارد و می‌تواند قابل توصیه به کشاورزان باشد.

* عهده دار مکاتبات

Email: fardin.upm@gmail.com

مقدمه

عناصر غذایی به ویژه عناصر پرمصرف فسفر، پتاسیم و نیتروژن برای رشد گیاه و محصول ضروری هستند. این مواد مغذی با افزودن کودهای معدنی و یا آلی به خاک در اختیار گیاهان قرار می‌گیرد. با این حال، تخمین زده شده است که طی ۵۰ تا ۳۰۰ سال آینده ذخایر این عناصر به ویژه سنگ فسفات به اتمام خواهند رسید (۲). این موضوع مهم اطمینان از عرضه مداوم کودهای مختلف حاوی این عناصر را برای تغذیه بشر در آینده مطرح می‌کند. علاوه بر این، به دلیل نگرانی‌های فزاینده در سال‌های اخیر در مورد غذای سالم‌تر، تولید محصولات با ایمنی بالاتر برای تولیدکنندگان بسیار حیاتی و مهم شده است. بنابراین، رویه استفاده از عناصر غذایی از طریق روش‌های مختلف به صورت کود در مزارع نیازمند بازنگری و تغییر است (۲۷).

در مطالعات مختلفی به اثرات مختلف سیلیسیم و سایر عناصر غذایی بر خاک و به دنبال آن بر گیاه اشاره شده است. به عنوان مثال، از اثرات سیلیسیم روی خاک می‌توان به کاهش آشوبی پتاسیم و فسفر موجود در خاک، بهبود فعالیت‌های میکروبی خاک، افزایش پایداری مواد آلی موجود در خاک، افزایش ظرفیت نگهداشت آب و افزایش مقدار محصول از طریق بهبود وضعیت خاک اشاره کرد (۲۳). کاربرد سیلیسیم در کشت برنج نیز می‌تواند بر رشد و بهبود کیفیت این محصول تاثیر بگذارد و گیاه را در مقابل تنش‌های زیستی و غیرزیستی مقاوم نماید (۸). در میان عناصر پرمصرف نیتروژن یکی از مهمترین عناصر محدود کننده رشد گیاه است و عدم جذب این عنصر در هر مرحله از رشد باعث کاهش عملکرد می‌شود. بنابراین سطوح بالای نیتروژن موجب تولید مواد فوسنتری بیشتری شده که این عمل به علت افزایش غلظت کلروفیل برگ و افزایش تعداد پنجه در واحد سطح می‌باشد (۷). همانند نیتروژن، فسفر نیز یک عنصر ضروری برای گیاه می‌باشد و اثبات شده است که کمبود فسفر می‌تواند بر رشد و عملکرد گیاه به طور مستقیم تأثیر گذار باشد (۴). علاوه بر این پتاسیم یک عنصر ضروری است که باعث افزایش مواردی

مانند تعداد پنجه، تعداد خوشه، تعداد خوشچه‌های بارور، جذب نیتروژن و فسفر، طول و سطح برگ در گیاه می‌شود (۳۳). مطالعات متعددی نیز به بررسی نقش و اثرات مختلف عناصر غذایی کم مصرف مثل آهن، روی، مس و منگنز بر خاک و گیاه پرداخته‌اند (۸؛ ۱۸). با توجه به نقش مهم عناصر غذایی، موضوع تامین این عناصر در خاک و دستیابی به میزان عملکرد مناسب امری ضروری است. مقدار عناصر غذایی در بقایای گیاهی پس از برداشت به علت تفاوت بین گونه‌های استفاده شده، بسیار متغیر است. هر کدام از بقایای گیاهی حاوی مقداری مواد مغذی است که در میان آنها عناصر پرمصرف نیتروژن و پتاسیم غالب هستند. در طی فرآیند تجزیه، این عناصر غذایی با مقادیری متفاوت می‌توانند در دسترس خاک و محصولات قرار گیرند (۲۹). در جزئیات بیشتر، با توجه به اینکه کاربرد بی‌رویه از کودهای شیمیایی باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی شده است، و نیز بقایای گیاهی بدون استفاده یا کم استفاده در محیط مشکلاتی برای محیط زیست و کشاورزان ایجاد کرده است، بنابراین برای برطرف نمودن این مشکلات بازیابی عناصر مهم مثل سیلیسیم از بقایای گیاهی، می‌تواند در بهبود کیفیت و کمیت بسیاری از محصولات و گیاهان مختلف مؤثر باشد (۱۳). کاه برنج، کاه گندم و باگاس نیشکر از متداول‌ترین بقایای گیاهی هستند که در مطالعات مختلف به بازیابی عناصر غذایی از آنها با روش‌های مختلف پرداخته شده است. به عنوان مثال، در تحقیق فرناندس و همکاران^۱ (۶) برای بازیابی سیلیسیم از کاه برنج با خلوص بالا، از روش پیش تصفیه خاکستر کاه برنج با مواد قلیایی و اسیدی استفاده شد، به طوری که در این روش مواد کربنی کاهش و خلوص سیلیسیم به ۹۸ درصد افزایش یافت. همچنین مطالعه دیگری به بررسی استفاده از کاه گندم برای استخراج سیلیسیم پرداخته است که در این تحقیق سیلیسیم با استفاده از روش استخراج قلیایی و خنثی سازی اسیدی از خاکستر کاه گندم تهیه شده است (۲۰). بدیهی است که هنوز هم نیاز به درک بهتری از میزان بازیابی عناصر غذایی از بقایای گیاهی با

1- Fernandes et al.

آماده‌سازی بقایا، بازیابی عناصر در پنج صورت مورد مقایسه قرار گرفت که شامل کاه بقایای گیاهی، خاکستر بقایای گیاهی (تولید شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶ ساعت) (۱۰)، خاکستر با اسید هیدروکلریک، بایوچار تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد (۱۷) و هضم بقایای گیاهی با اسید نیتریک و اسید پرکلریک (۱) بودند. پس از آماده‌سازی تیمارها، ویژگی‌های تیمارها، عناصر پرمصرف و کم‌مصرف اندازه‌گیری شدند که شامل: pH، هدایت الکتریکی (۱۶؛ ۱۵)، نیتروژن کل (۳۲) و فسفر و پتاسیم (۳۰؛ ۲۲)، آهن، روی، منگنز و مس (۲۱؛ ۲۲) و سیلیسیم (۲۶). برخی خصوصیات تیمارهای مورد مطالعه در جداول ۲ تا ۴ ارائه شده است. بعد آماده‌سازی تیمارها در گلدان‌های یک کیلوگرمی با یک درصد وزنی مواد بازیابی شده اضافه شدند و در شرایط رطوبتی اشباع برای مدت دو ماه در شرایط انکوباسیون قرار داده شده‌اند. در این آزمایش ۱۵ تیمار با ۳ تکرار وجود داشت که با تیمار شاهد در مجموع ۴۸ گلدان در شرایط انکوباسیون قرار گرفت و بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل شد. بعد از پایان دوره انکوباسیون نمونه‌ها در شرایط هوا خشک قرار گرفته شدند. بعد از هوا خشک شدن نمونه از الک دو میلی متری گذرانده و ویژگی‌های خاک، عناصر پرمصرف و کم‌مصرف و سیلیسیم اندازه‌گیری شدند.

تجزیه آماری

ابتدا از تجزیه واریانس و سپس مقایسه میانگین با استفاده از روش آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار LSD ($p < 0.01$) برای ارزیابی سطح معنی‌داری تفاوت‌های خصوصیات مورد مطالعه در میان تیمارهای آزمایش استفاده شد. همچنین فرضیه توزیع نرمال داده‌ها با استفاده از تست QQ-plots انجام شد. سپس با استفاده از تست تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) میزان تاثیر خصوصیات مورد مطالعه بر تیمارهای آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. تمام تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم افزار SPSS و ترسیم شکل‌ها با نرم افزار EXCEL انجام شد.

روش‌های مختلف و اثر این عناصر بر بهبود وضعیت خاک وجود دارد.

برای رسیدن به این هدف، این مطالعه در جستجوی آن است که کدامیک از بقایای کاه برنج، کاه گندم و باگاس نیشکر و روش‌های بازیابی برای افزودن سیلیسیم، عناصر غذایی ضروری پرمصرف (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) و کم مصرف (آهن، روی، مس و منگنز) قابل جذب به خاک مناسب‌تر است. فرض بر این است که انواع بقایای گیاهی ذکر شده و روش‌های بازیابی عناصر غذایی ضروری پرمصرف و کم مصرف از این بقایا بر غلظت عناصر قابل استفاده مذکور در خاک اثرگذار باشند.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بین ۳۶ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۳ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۰۳ دقیقه طول شرقی واقع شده در روستای ابدال از توابع رودپی شمالی در استان مازندران است. با توجه به آمار بلندمدت ۲۰ ساله، متوسط بارندگی سالانه ۶۷۶ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۴ درجه سلسیوس است.

نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک با بافت سیلت لوم به طور تصادفی از قسمت‌های شالیزاری روستای ابدال از عمق ۰-۲۵ سانتی‌متری به صورت مخلوط معرف منطقه مورد نظر، به آزمایشگاه منتقل و هوا خشک شدند. نمونه‌ها پس از هوا خشک کردن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و ویژگی‌های قابلیت هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع توسط دستگاه هدایت‌سنج در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و پ‌هاش در گل اشباع با استفاده از پ‌هاش متر، کربن آلی با استفاده از روش واکلی و بلاک، نیتروژن کل بر اساس روش کج‌جدال (۲) و فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک (۳)، آهن، روی، منگنز و مس قابل جذب خاک (۱۱) و سیلیسیم خاک (۱) انجام شد. (جدول ۱)

تیمارهای مورد مطالعه و روش‌های بازیابی عناصر

در این مطالعه از بقایای گیاهی کاه گندم، باگاس نیشکر و کاه برنج برای بازیابی عناصر استفاده شد. بعد از تهیه و

نتایج و بحث

خلاصه نتایج تجزیه واریانس متغیرهای مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است، pH، هدایت الکتریکی و کربن آلی خاک تحت تأثیر متقابل بقایای گیاهی و روش بازیابی عناصر در سطح احتمال یک درصد معنی دار شدند. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بقایای گیاهی و روش بازیابی عناصر نشان داد که بیشترین pH (۷/۶۶) و هدایت الکتریکی خاک (۳/۸۳ دسی‌زیمنس بر متر) به ترتیب مربوط به تیمارهای بیوچار کاه برنج و هضم کاه برنج بود (جدول ۶). مطالعات نشان داده است که کاربرد بیوچار کاه برنج باعث افزایش pH خاک شده است (۱۴) به نظر می‌رسد کاربرد بیوچار دارای بالاترین pH مانند بیوچار کاه برنج سبب افزایش pH خاک شده است. این موضوع می‌تواند برای افزایش هدایت الکتریکی خاک در تیمار هضم کاه برنج نیز در نظر گرفته شود. علاوه بر این، دمای پایین در تولید بیوچار سبب شده است که بیوچار کاه برنج دارای pH متعادل‌تری باشد. نتایج مقایسه میانگین همچنین نشان داد که بیشترین کربن آلی خاک (۲/۶۱ درصد) به تیمار بیوچار کاه برنج و کمترین کربن آلی خاک (۱/۱۲ درصد) به تیمار شاهد اختصاص یافت (جدول ۶). این نتیجه در تطابق با نتایج تحقیقات ژانگ و همکاران^۱ (۹) می‌باشد که نشان دادند افزودن بیوچار کاه برنج باعث افزایش مقدار کربن آلی خاک شد. بیوچارها به دلیل ماده آلی بالا بخصوص بیوچار کاه برنج سبب افزایش کربن آلی خاک می‌شوند. در جزئیات بیشتر، میزان مواد آلی در بیوچار تولیدی کاه برنج در دمای پایین به دلیل اینکه مواد آلی فرار به طور کامل از بین نرفته، بالا است (۵). در همین راستا در مطالعه‌ای مشخص شد که خاک کرت‌های اصلاح شده با بیوچار کاه برنج، بهبود قابل توجهی در زیست توده گندم نشان داد که احتمالاً به

دلیل اثرات مفید این بیوچار بر خواص خاک مانند کربن آلی و در دسترس بودن عناصر غذایی است (۲۵).

عناصر پرمصرف

طبق نتایج تجزیه واریانس تأثیر متقابل بقایای گیاهی و روش بازیابی عناصر بر همه عناصر پرمصرف اندازه‌گیری شده در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۵). در جزئیات بیشتر، نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بقایای گیاهی و روش بازیابی عناصر نشان داد که بیشترین مقادیر نیتروژن (۲۴/۰ درصد)، فسفر (۴۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پتاسیم (۷۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) همگی به تیمار بیوچار کاه برنج اختصاص داشت (جدول ۶)، این نتایج نیز در مطالعه‌ای رنجبر (۱۴۰۱) گزارش شده است (۲۲). به طور عکس، کمترین مقادیر نیتروژن (۰/۰۶ درصد)، فسفر (۱۴/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پتاسیم (۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) همگی به تیمار شاهد اختصاص داشت (جدول ۵). به نظر می‌رسد تیمار بیوچار کاه برنج توانسته است تأثیر زیادی را در مقایسه با دیگر تیمارها بر روی مقادیر عناصر پرمصرف خاک داشته باشد. بیوچار کاه برنج حاوی فسفر بالایی است که می‌تواند به طور مستقیم بر این بخش در خاک تأثیر بگذارد. علاوه بر این، کاربرد این تیمار در خاک pH خاک و دیگر خواص خاک را تغییر می‌دهد. بیوچار برنج به طور مستقیم با آزادسازی فسفر از خود بیوچار قابلیت دسترسی فسفر خاک را افزایش می‌دهد و یا با کاهش جذب فسفر به طور غیرمستقیم در دسترس بودن فسفر خاک را افزایش می‌دهد (۳۰). ارتوفسفات و پیروفسفات اشکال اصلی فسفر در بیوچار هستند که می‌توانند به طور مستقیم محتوای فسفر خاک را افزایش دهند. در مطالعه حاضر، کاربرد بیوچار کاه برنج منجر به بالاترین افزایش pH شد که به افزایش حلالیت فسفر در خاک کمک کرد. به عبارت دیگر، استفاده از این بیوچار می‌تواند فرم عوامل تثبیت و جذب فسفر مانند آهن، آلومینیوم و کلسیم را تغییر دهد

و بدین صورت تأثیر قابل توجهی بر تغییر شکل فسفر و فراهمی آن در خاک داشته باشد (۳۴). علاوه بر فسفر، در این تحقیق افزودن بیوپچار کاه برنج در مقایسه با سایر تیمارها، باعث افزایش pH خاک و افزایش غلظت پتاسیم قابل دسترس و نیتروژن کل شد. این ممکن است به دلیل ماهیت قلیایی بیوپچار با ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و غلظت و اثربخشی مواد مغذی خود و وجود گروه‌های عاملی مانند گروه‌های کربوکسیل و قلیائیت در سطح باشد که اثربخشی بیوپچار در بهبود حاصلخیزی خاک را تعیین می‌کند (۱۲).

جدول (۱) برخی خصوصیات خاک مورد مطالعه

Table (1) Some characteristics of the studied treatments

مقدار amount	واحد Unit	ویژگی‌ها Properties
7.08	-	بی‌اچ pH
1.14	دسی‌زیمنس بر متر dS/m	هدایت الکتریکی Electrical conductivity
1.12	درصد %	کربن آلی Organic carbon
0.07	درصد %	نیتروژن کل Total nitrogen
15	میلی‌گرم بر کیلوگرم mg/kg	فسفر قابل جذب Available phosphorus
230	میلی‌گرم بر کیلوگرم mg/kg	پتاسیم قابل جذب Available potassium
20.01	میلی‌گرم بر کیلوگرم mg/kg	آهن قابل جذب Available iron
9.34	میلی‌گرم بر کیلوگرم mg/kg	منگنز قابل جذب Available manganese
1.56	میلی‌گرم بر کیلوگرم mg/kg	مس قابل جذب Available copper
1.02	میلی‌گرم بر کیلوگرم mg/kg	روی قابل جذب Available zinc

محمدی و همکاران: تاثیر سیلیسیم و برخی عناصر غذایی باز یابی ...

جدول (۲) برخی خصوصیات تیمارهای مورد مطالعه

Table (2) Some characteristics of the studied treatments

عناصر کم مصرف Micro elements				عناصر پر مصرف Macro elements				خصوصیات شیمیایی Chemical properties		
منگنز Manganese	مس Copper	روی Zinc	آهن Iron	فسفر Phosphorus	پتاسیم Potassium	نیتروژن Nitrogen	سیلیسیم Silicon	بی اچ pH	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity (dS/m)	تیمار کاه گندم Treatment of wheat straw
میلی گرم بر کیلو گرم (mg/kg)				درصد (%)						
49.3	10.3	17.1	93.33	192.95	0.615	0.51	1.723	7.1	1.11	کاه گندم Wheat straw
126.2	10.52	50.12	301.4	410.16	1.786	0.73	5.063	7.1	0.79	بایوچار Biochar
112.3	11	30.32	225.12	298.14	1.002	0.09	2.546	7.1	0.93	خاکستر Ash
102	10	30	190	281.51	0.719	0.12	2.163	6.9	1.43	خاکستر با اسید Ash dissolved in acid
98.21	10.2	28	173	276.21	1.112	0.55	1.529	6.1	1.39	هضم Digestion

جدول (۳) برخی خصوصیات تیمارهای مورد مطالعه

Table (3) Some characteristics of the studied treatments

عناصر کم مصرف Micro elements				عناصر پر مصرف Macro elements				خصوصیات شیمیایی Chemical properties		
منگنز Manganese	مس Copper	روی Zinc	آهن Iron	فسفر Phosphorus	پتاسیم Potassium	نیتروژن Nitrogen	سیلیسیم Silicon	پی اچ pH	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity (dS/m)	تیمار کاه برنج Treatment of rice straw
میلی گرم بر کیلو گرم (mg/kg)				درصد (%)						
92.30	23.6	26.02	114.4	212.95	0.815	0.61	3.223	7.4	0.61	کاه برنج Rice straw
224.29	15.19	56.31	385.2	480.16	1.986	1.29	7.063	7.5	1.25	بايوچار Biochar
120.12	12	33.36	198.88	312.14	1.022	0.02	4.546	7.5	0.73	خاکستر Ash
122.13	12.6	30.04	200.68	301.51	0.819	0.10	3.963	7.1	1.19	خاکستر با اسید Ash dissolved in acid
101.42	12.86	34	186.56	396.88	1.012	1.55	3.729	6.1	1.55	هضم Digestion

محمدی و همکاران: تاثیر سیلیسیم و برخی عناصر غذایی باز یابی ...

جدول (۴) برخی خصوصیات تیمارهای مورد مطالعه
Table 4- Some characteristics of the studied treatments

عناصر کم مصرف Micro elements				عناصر پر مصرف Macro elements			خصوصیات شیمیایی Chemical properties			
منگنز Manganese	مس Copper	روی Zinc	آهن Iron	فسفر Phosphorus	پتاسیم Potassium	نیتروژن Nitrogen	سیلیسیم Silicon	پی اچ pH	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity (dS/m)	تیمار باگاس نیشکر Sugarcane bagasse treatment
میلی گرم بر کیلو گرم (mg/kg)				درصد (%)						
33.1	12.23	21.31	100.6	200.95	0.415	0.49	2.723	6.8	0.55	باگاس نیشکر Sugarcane bagasse
98.6	14.01	66.02	331.2	476.16	0.786	1.51	6.063	6.8	0.65	بایوچار Biochar
92.1	13	40.01	212.26	306.14	0.222	0.08	3.546	6.7	0.85	خاکستر Ash
89.3	12.69	48	182.18	294.51	0.119	0.15	3.163	6.6	1.30	خاکستر با اسید Ash dissolved in acid
80.62	12	56.6	168.34	383.16	0.312	0.61	2.529	6.0	1.32	هضم Digestion

جدول (۵) خلاصه نتایج تجزیه واریانس میانگین مربعات خصوصیات خاک و عناصر اندازه گیری شده

Table (5) Summary of the results of mean square variance analysis of soil properties and elements

منگنز Manganese	مس Copper	روی Zinc	آهن Iron	سلیسیم Silicon	پتاسیم Potassium	فسفر Phosphorus	نیتروژن Nitrogen	کربن آلی Organic carbon	بی اچ pH	هدایت الکتریکی Electrical conductivity	درجه آزادی درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of variations
244.60**	1.45**	11.18**	1413.76**	330067.71**	78238.37**	1630.81**	0.01**	7.95**	1.64**	1.44 ^{ns}	2	بقایای گیاهی Plant remains
239.26**	1.78**	3.51**	1263.44**	12735.91**	205564.80**	1125.39**	0.06**	1.17**	0.37**	26.94**	4	روش بازیابی Recovery method
179.50**	0.52**	1.42**	243.70**	5157.95**	27473.73**	148.38**	0.009**	0.06**	0.35**	5.73**	8	بقایای گیاهی × روش بازیابی Plant residues × method of recovery
49.41	0.16	0.49	174.17	188	8819.33	176.03	0.006	0.07	0.12	7.15	22	خطای آزمایش Errors
2.22	1.41	3.11	1.72	0.7	1.01	2.31	1.02	1.01	0.28	0.37	-	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of (%) variation

عناصر کم‌مصرف

۷۸/۵۱ درصد واریانس متغیرهای مورد مطالعه را توضیح دادند (جدول ۸). در جزئیات بیشتر، مولفه اول ۵۱/۰۷ درصد این تغییرپذیری و مولفه دوم ۲۷/۴۴ درصد آن را توضیح داد. به طوری که متغیرهای نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، مس، روی، سیلیسیم و کربن آلی خاک یک اثر معنی دار را بر روی مولفه اول نشان دادند در حالی که پتاسیم و pH این اثر را روی مولفه دوم نشان دادند (جدول ۸). همچنین هدایت الکتریکی خاک در این آزمون اثر خود را روی مولفه سوم نشان داد. با رسم مقادیر اثرات نمونه‌ها در دو مولفه اصلی ذکر شده، تفاوت آشکاری بین تیمارهای مورد مطالعه پدیدار شد. به عبارت دیگر، سه گروه کاملاً تمایز یافته (برای تیمارهای گاه برنج/بیوچار، باگاس نیشکر/بیوچار و شاهد)، بدون در نظر گرفتن هم‌پوشانی واضح نقاط مربوط به این تیمارها و روش‌های بازیابی عناصر از آنها ثابت شدند (شکل ۱).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد تأثیر متقابل بقایای گیاهی و روش بازیابی عناصر بر میزان سیلیسیم در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بقایای گیاهی و روش بازیابی عناصر نشان داد که بیشترین مقدار سیلیسیم (۲۶۱/۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به تیمار بیوچار گاه برنج و کمترین مقدار سیلیسیم (۱۱۶/۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به تیمار شاهد اختصاص داشت (جدول ۷). با این حال، مقایسه میانگین برای سایر عناصر کم‌مصرف شامل منگنز، روی، آهن و مس نتایج متفاوتی را نشان داد. در جزئیات بیشتر، بیشترین مقدار عناصر کم‌مصرف ذکر شده (مقادیر ۲۵/۰۱، ۳/۲۰، ۴۸/۲۷ و ۲/۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای عناصر منگنز، روی، آهن و مس) به تیمار بیوچار باگاس نیشکر اختصاص داشت. کمترین مقدار منگنز، روی و مس نیز به تیمار شاهد اختصاص داشت، در حالی که کمترین مقدار آهن مربوط به تیمار خاکستر با اسید گاه گندم بود (جدول ۷). به طور کلی گاه برنج و به خصوص بیوچار آن از منابع شناخته شده غنی از سیلیسیم هستند، بنابراین این تیمار می‌تواند به عنوان یک کود سیلیسیم خوب مورد استفاده قرار گیرد (۳۱). بنابراین افزایش مقدار سیلیسیم خاک را می‌توان به مقدار زیاد این عنصر غذایی در بیوچار گاه برنج و سطح ویژه بسیار بالای آن نسبت داد. استفاده از این تیمار به عنوان اصلاح کننده خاک در زمین‌های کشاورزی می‌تواند در دسترس بودن سیلیسیم در خاک را افزایش دهد، کشاورزی پایدار را از طریق چرخه سیلیسیم و مواد مغذی در خاک حمایت کند و در نهایت بهره‌وری محصول را بهبود بخشد (۲۴).

افزایش عناصر منگنز، روی، آهن و مس در تیمار بیوچار باگاس نیشکر می‌تواند به دلیل غلظت بالای این عناصر در این بیوچار باشد. همچنین کاربرد بیوچار باگاس نیشکر که دارای pH اسیدی است، سبب افزایش حلالیت این عناصر در خاک می‌شود (۹). به طور کلی کاربرد بیوچار با افزایش مواد آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک سبب افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی خاک می‌شود (۱۴).

کاربرد آنالیز مولفه اصلی این نتیجه را اثبات کرد که در این آنالیز سه مولفه اصلی تشخیص داده شدند که حدود

جدول (۶) نتایج مقایسه میانگین خصوصیات شیمیایی و عناصر پر مصرف اندازه گیری شده
 Table (6) The results of the compare mean of measured soil chemical properties and macro elements

پتاسیم Potassium	فسفر Phosphorus	نیتروژن Nitrogen	کربن آلی Organic carbon	هدایت الکتریکی Electrical conductivity	بی اچ pH	تیمار Treatment	پتاسیم Potassium	فسفر Phosphorus	نیتروژن Nitrogen	کربن آلی Organic carbon	هدایت الکتریکی Electrical conductivity	بی اچ pH	تیمار Treatment
(mg/kg) میلی گرم بر کیلوگرم		درصد (%)		دسی زیمنس بر متر (dS/m)			(mg/kg) میلی گرم بر کیلوگرم		درصد (%)		دسی زیمنس بر متر (dS/m)		
500.66 ^e	19.78 ^{hi}	0.07 ^h	1.30 ^h	2.19 ^{cd}	7.19 ^c	کاه گندم Wheat straw	668.33 ^b	34.22 ^b	0.09 ^{fgh}	2.28 ^b	1.07 ^e	7.51 ^b	کاه برنج Rice straw
608.34 ^c	24.90 ^{fg}	0.13 ^{cd}	1.42 ^g	1.89 ^{cde}	7.21 ^c	بايوچار کاه گندم Wheat straw biochar	781 ^a	46 ^a	0.24 ^a	2.61 ^a	2.66 ^{bc}	7.66 ^a	بايوچار کاه برنج Rice straw biochar
453.34 ^f	15.33 ^j	0.11 ^{def}	2.12 ⁱ	3.53 ^{ab}	7.07 ^{de}	خاکستر با اسید کاه گندم Wheat straw ash dissolved in acid	530 ^d	28.50 ^{def}	0.15 ^c	2.09 ^c	2.61 ^{bc}	7.16 ^{cd}	خاکستر با اسید کاه برنج Rice straw ash dissolved in acid
456.67 ^f	16 ^{ij}	0.10 ^{efg}	2.19 ^{cd}	2.19 ^{cd}	7.19 ^c	خاکستر کاه گندم Wheat straw ash	547.33 ^d	30.43 ^{bc}	0.11 ^{def}	2.23 ^b	7.53 ^b	7.53 ^b	خاکستر کاه برنج Rice straw ash
453.33 ^f	16.33 ^{ij}	0.09 ^{fg}	2.12 ⁱ	3.50 ^{ab}	7.11 ^{cd}	هضم کاه گندم Digestion of Wheat straw	534.34 ^d	26.91 ^{def}	0.12 ^{cde}	2.08 ^c	3.83 ^a	7.14 ^{cd}	هضم کاه برنج Digestion of rice straw
261.34 ^{hi}	22.66 ^{gh}	0.12 ^{de}	1.61 ^f	3.22 ^{ab}	6.93 ^f	خاکستر با اسید باگاس نیشکر Sugarcane bagasse ash dissolved in acid	282.33 ^h	29.60 ^{cde}	0.08 ^{gh}	1.85 ^d	1.44 ^{de}	6.98 ^{ef}	باگاس نیشکر Sugarcane bagasse
274.66 ^{hi}	15.85 ^{efg}	0.10 ^{ef}	1.74 ^e	1.93 ^{cde}	6.95 ^f	خاکستر باگاس نیشکر Sugarcane bagasse ash	386 ^g	33 ^{bc}	0.20 ^b	2.10 ^c	1.60 ^{de}	6.90 ^f	بايوچار باگاس نیشکر Sugarcane bagasse biochar
250 ⁱ	14.67 ^j	0.06 ^h	1.12 ⁱ	1.12 ^e	7.13 ^{cd}	شاهد Control	260 ^{hi}	18.66 ^{hij}	0.11 ^{def}	1.60 ^f	3.26 ^{ab}	6.90 ^f	هضم باگاس نیشکر Digestion of sugarcane bagasse

توجه: حروف کوچک انگلیسی در هر ستون در سطح احتمال یک درصد نشان دهنده تفاوت معنی دار است.

Note: English lowercase letters in each column indicate a significant difference at the 1% probability level.

محمدی و همکاران: تاثیر سیلیسیم و برخی عناصر غذایی بازیابی ...

جدول (۷) نتایج مقایسه میانگین عناصر کم مصرف اندازه گیری شده
Table(7) The results of the compare mean of measured micro elements

سیلیسیم Silicon	منگنز Manganese	مس Copper	روی Zinc	آهن Iron	تیمار Treatment	سیلیسیم Silicon	منگنز Manganese	مس Copper	روی Zinc	آهن Iron	تیمار Treatment
میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg)						میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg)					
141 ⁱ	11.02 ^{ef}	1.09 ^f	1.08 ^{fg}	17.16 ^{ij}	کاه گندم Wheat straw	205 ^b	10.85 ^{ef}	1.15 ^{ef}	1.53 ^e	26.28 ^{def}	کاه برنج Rice straw
148 ^h	14.34 ^{cd}	1.26 ^{de}	1.20 ^{fg}	26.29 ^{def}	بایوچار کاه گندم Wheat straw biochar	261 ^a	14.39 ^{cd}	1.66 ^b	2.16 ^{bc}	31.94 ^{bc}	بایوچار کاه برنج Rice straw biochar
129 ^k	13 ^{de}	1.40 ^c	1.09 ^{fg}	16.27 ^j	خاکستر با اسید کاه گندم Wheat straw ash dissolved in acid	177 ^d	12.03 ^{ef}	1.13 ^{ef}	1.26 ^f	22.78 ^{fgh}	خاکستر با اسید کاه برنج Rice straw ash dissolved in acid
136 ^j	9.99 ^{fg}	1.08 ^f	1.07 ^{fg}	17.38 ^{ij}	خاکستر کاه گندم Wheat straw Ash	188 ^c	11.28 ^{ef}	1.15 ^{ef}	1.26 ^f	21.02 ^{ghi}	خاکستر کاه برنج Rice straw ash
122.66 ^l	11.33 ^{ef}	۱,۰۷ ^f	1.09 ^{fg}	17.26 ^{ij}	هضم کاه گندم Digestion of wheat straw	178 ^d	11 ^{ef}	1.16 ^{ef}	1.26 ^f	21.07 ^{ghi}	هضم کاه برنج Digestion of rice straw
161 ^f	12.88 ^{de}	1.40 ^c	2 ^{cd}	27.73 ^{de}	خاکستر با اسید باگاس نیشکر Sugarcane bagasse ash dissolved in acid	175 ^d	19 ^b	1.33 ^{cd}	2.30 ^b	33.28 ^b	باگاس نیشکر Sugarcane bagasse
168 ^e	16.24 ^c	1.37 ^{cd}	2.26 ^b	28.77 ^{cd}	خاکستر باگاس نیشکر Sugarcane bagasse ash	188 ^c	25.01 ^a	2.20 ^a	3.20 ^a	48.27 ^a	بایوچار باگاس نیشکر Sugarcane bagasse biochar
116.33 ^m	8.46 ^g	1.05 ^f	1.02 ^g	19.54 ^{hij}	شاهد Control	155 ^g	11.20 ^{ef}	1.46 ^c	1.93 ^d	24.67 ^{efg}	هضم باگاس نیشکر Digestion of Sugarcane bagasse

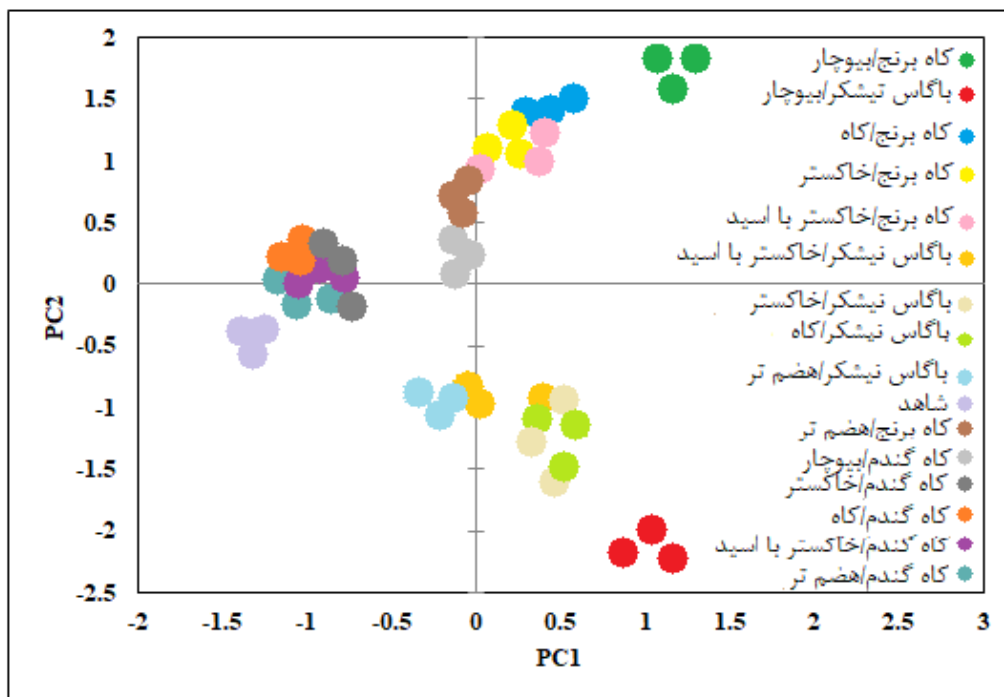
توجه: حروف کوچک انگلیسی در هر ستون در سطح احتمال یک درصد نشان دهنده تفاوت معنی دار است.

Note: English lowercase letters in each column indicate a significant difference at the 1% probability level

جدول (۸) مقدار اثرات متغیرهای مورد مطالعه روی سه مولفه برای تیمارها و روش‌های بازیابی عناصر در آنالیز مولفه اصلی
 Table (8) The amount of the effects of the studied variables on the four components for the treatments and methods of element recovery in the principal component analysis

مولفه سوم The third component	مولفه دوم The second component	مولفه اول The first component	
0.901	0.002	0.043	هدایت الکتریکی Electrical conductivity
0.186	0.017	0.629	نیتروژن Nitrogen
0.005	0.136	0.791	فسفر Phosphorus
0.006	0.711	0.111	پتاسیم Potassium
0.017	0.196	0.733	آهن Iron
0.001	0.323	0.492	منگنز Manganese
0.019	0.202	0.671	مس Copper
0.001	0.293	0.635	روی Zinc
0.028	0.823	0.053	بی اچ pH
0.001	0.140	0.702	کربن آلی Organic carbon
0.001	0.169	0.755	سیلیسیم Silicon

مقادیر هایبالات شده نشان دهنده موثر بودن متغیرهای مورد مطالعه روی مولفه مورد نظر است.
 The highlighted values indicate the effectiveness of the studied variables on the desired component.



شکل (۱) میزان همپوشانی تیمارهای مورد مطالعه روی دو مولفه اصلی به وسیله آنالیز مولفه اصلی.

Figure (1) The degree of overlap of the studied treatments on two main components by principal component analysis. (Rice straw biochar, Sugarcane bagasse biochar, rice straw, Rice straw ash, Ash with rice straw acid, Ash with sugarcane bagasse acid, sugarcane bagasse ash, sugarcane bagasse, Digestion of Sugarcane bagasse, Control, Digestion of rice straw, wheat straw biochar, wheat straw Ash, wheat straw, Ash with wheat straw acid and Digestion of wheat straw, In order from top to bottom).

دیگر مزایای این فرآیند پیشنهادی این است که مشکل دفع ضایعات کاه برنج از بین رفته و محصول ارزشمندی نیز به دست می‌آید. به عنوان مثال سیلیس به دست آمده با استفاده از این روش کاربرد زیادی دارد که می‌تواند به عنوان فیلتر در محصولات لاستیکی و کاغذ، عوامل ضد چسبندگی و کاتالیزور مهم در صنایع شیمیایی استفاده شود. علاوه بر این روش بیوچار ذکر شده در این تحقیق، در بسیاری از مطالعات به عنوان یک روش مناسب برای تامین عناصر غذایی خاک عنوان شده است (۱۹). نتایج نشان داد در بین روش‌های بازیابی عناصر از بقایای گیاهی، بایوچار کاه برنج و بایوچار باگاس تیشکر نسبت به روش‌های دیگر وضعیت بهتری در افزایش غلظت عناصر در خاک داشتند. کاربرد آنالیز مولفه اصلی نیز نشان داد که سه گروه کاملاً تمایز یافته (برای

نتیجه گیری

از نتیجه‌گیری‌های مهم این تحقیق می‌توان به این نکته اشاره کرد که بقایای گیاهی و کاه برنج فقط یک ماده ضایعاتی نیست، بلکه بیشتر از یک ماده دور ریختنی ارزش دارد و بنابراین به جای دور ریز آن می‌توان از آن استفاده‌های با ارزشی کرد. با استفاده مؤثر از محتوای سیلیس موجود در آن و تولید سیلیس رسوب شده از آن، مشاهده شده است که تقریباً بیش از ۹۰ درصد سیلیسیم بازیافت می‌شود. تخمین هزینه دقیق این فرآیند امکان پذیر نیست، با این حال برآورد تقریبی هزینه نشان داده است که این بقایا از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه هستند (۲۸). به عبارت دیگر، با توجه به میزان بالای تولید برنج در کشور، به ویژه در شمال ایران، از بقایا و کاه برنج می‌توان استفاده‌های بهتری نمود. همچنین از

(۰/۷۹). علاوه بر این، نمونه‌های جمع‌آوری شده در میان تیمارهای آزمایشی در سه گروه کاملاً متمایز به دلیل تفاوت در متغیرهای مورد مطالعه دسته‌بندی می‌شوند و گروه چهارم که مربوط به بقیه تیمارها با همپوشانی واضح است، تفاوت چندانی از نظر متغیرها و خصوصیات مورد مطالعه ندارند. در کل، نتایج این مطالعه می‌تواند برای مدیریت حاصلخیزی خاک در کاربرد گسترده بقایای کاه برنج و روش بازیابی عناصر آن از طریق بیوچار به سمت افزایش کیفیت و حاصلخیزی خاک مفید باشد.

تیمارهای کاه برنج/ بیوچار، باگاس نیشکر/ بیوچار و شاهد)، بدون در نظر گرفتن همپوشانی واضح نقاط مربوط به این تیمارها و روش‌های بازیابی عناصر از آنها (مشاهده شده بر اساس دایره‌های رنگی) ثابت شدند. در جزئیات بیشتر، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی به تفکیک تفاوت در خواص مورد مطالعه بین تیمارهای آزمایشی کمک می‌کند. مؤلفه اول به وضوح نشان می‌دهد که تیمارها از نظر فسفر، سیلیسیم، آهن، نیتروژن، کربن آلی، روی، مس و منگنز متفاوت هستند و بقیه خصوصیات در مؤلفه‌های بعدی قرار دارند. در این میان، فسفر بیشترین میزان تغییرپذیری بین تیمارها را نشان داد

References

1. AOAC. 1990. official methods of analysis. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, Virginia, 84–85.
2. Bremner, J.M., and Mulvaney, C.S. 1982. Nitrogen total. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, R.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2*, second ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, 595–624.
3. Claessen, M.E. C. 1997. *Manual for Methods of Soil Analysis*. 2nd ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos.
4. Csatho, P., and Radimsky, L. 2009. Two worlds within EU27: Sharp contrasts in organic and mineral nitrogen-phosphorus use, nitrogen-phosphorus balances, and soil phosphorus status: Widening and deepening gap between western and central Europe. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 40: 999–1019.
5. Cui, L., Yan, J., Yang, Y., Li, L., Quan, G., Ding, C., Chen, T., Fu, Q., and Chang A. 2013. Biochar for heavy metals in soil. *BioResources*, 8: 5536–5548.
6. Fernandes, I. J., Calheiro, D., Sánchez, F. A., Camacho, A. L. D., Rocha, T. L. A. D. C., Moraes. C. A. M. and Sousa. V. C. D. 2017. Characterization of silica produced from rice husk ash: comparison of purification and processing methods. *Materials Research*, 20: 512-518
7. Haefel, S. M., Naklang, K., Harnpichitvitaya, D., Jearakongman, S., Skulkhu, E., Romyen, P., Tabtım, S. and Suriya-Arunroj, S. 2006. Factor affecting rice yield and fertilizer response in rain fed lowlands of northeast Thailand. *Field Crop Research*. 98: 39- 51.
8. Han, Y. Q., Wen, J. H., Peng, Z. P., Zhang, D. Y. and Hou, M. L. 2018. Effects of silicon amendment on the occurrence of rice insect pests and diseases in a field test. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10): 2172-2181.
9. Jing, Y., Zhang, Y., Han, I., Wang, P., Mei, Q. and Huang, Y. 2020. Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil. *Scientific Reports*, 10:8837.
10. Kalapathy, U., A. Proctor and Shultz, J. 2002. An improved method for production of silica from rice hull ash. *Bioresource technology*, 85(3): 285-289.
11. Lindsay, W. and Norvell, W. A. 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of American Journal*, 42: 421-428.
12. Liu, Z., Yuan, D., Qin, X., He, P. and Fu, Y. 2023. Effect of Mg-Modified Waste Straw Biochar on the Chemical and Biological Properties of Acidic Soils. *Molecules*, 28: 5225.
13. Marcińczyk, M., Sik Ok, Y. and Oleszczuk, P. 2022. From waste to fertilizer: Nutrient recovery from wastewater by pristine and engineered biochars. *Chemosphere*, 306: 135310
14. Masulili, A., Utomo, W.H. and Syechfani, M. S. 2010. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science*, 2: 39–47.
15. McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. In *method of soil analysis*, Page A. L (Ed). Part 2. *Chemical and Microbiological Properties*. 2nd Ed Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy, 199-244.
16. Nelson, D.W., Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In A. L Page (ed). *Method of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy, 539 -579

17. Nabizadeh, S., Sadegh Zadeh, F., Jalili, B., and Emadi, M. 2019. Adsorption of Methylene Blue Using Biochar, soil and Treated Soil with Biochar from aqueous solutions. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(6): 281-292.(in Persian with English abstract)
18. Pahlavan- Rad, M. R. and Pessarakli, M. 2009. Response of Wheat Plants to Zinc, Iron, and Manganese Applications and Uptake and Concentration of Zinc, Iron, and Manganese in Wheat Grains. *Communications In Soil Science and Plant Analysis*, 40(7-8): 1322-1332.
19. Parhizkar, M., Shabanpour, M., Lucas-Borja, M.E. and Zema, D.A. 2023. Effects of rice husk biochar on rill detachment capacity in deforested hillslopes. *Ecological Engineering*, 191: 106964.
20. Patel, K. G., Misra, N. M. and Shettigar, R. R. 2016. Preparation and Characterization of Silica Gel from Wheat Straw. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 7: 344–347.
21. Planc, O.C. 1992. Plant analysis reference procedures for the southern region of the united states. The University of Gerorgia, 68-69.
22. Ranjbar, M. 2022. The effect of different types of biochar on the concentration of some nutrients and sugarcane growth. Ph.D. Thesis. Biotechnology Management - Soil Chemistry and Fertility, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, pp: 28. (in Persian)
23. Sekhar, G., Yadav, P. I. P. and Syriac, E. 2018. Effect of Silicon on Soil Physico-chemical Properties in Laterite derived Paddy Soils of Kerala. *Journal of Krishi Vigyan*, 6 (2):75.
24. Seleiman, M.F., Refay, Y., Al-Suhaibani, N., Al-Ashkar, I., El-Hendawy, S. and Hafez, E. M. 2019. Integrative Effects of Rice-Straw Biochar and Silicon on Oil and Seed Quality, Yield and Physiological Traits of *Helianthus annuus* L. Grown under Water Deficit Stress. *Agronomy*, 9: 637.
25. Singh Mavi, M., Singh, G., Choudhary, O. P., Singh, A., Bhushan Vashisht, B., Singh Sekhon, K., Pathania, N. and Singh, B. 2023. Successive addition of rice straw biochar enhances carbon accumulation in soil irrigated with saline or non-saline water. *Environmental Research*, 217: 114733.
26. Snyder, G.H. 2001. Chapter 11 Methods for silicon analysis in plants, soils, and fertilizers. *Studies in Plant Science*, 8: 185-196.
27. Tateda, M. 2016. Production and Effectiveness of Amorphous Silica Fertilizer from Rice Husks Using a Sustainable Local Energy System. *Journal of Scientific Research and Reports*, 9: 1-12.
28. Todkar, B.S., Deorukhkar, O.A. and Deshmukh, S.M. 2016. Extraction of Silica from Rice Husk. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12: 69-74.
29. Torma, S., Vilcek, J., Losak, T., Kuzel, S. and Martensson, A. 2018. Residual plant nutrients in crop residues – an important resource. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B Soil and Plant Science*, 68: 358–366.
30. Tolli, H. and Semnani, A., 2003. Decomposition methods of soils, plants, water and fertilizers. Shahid Chamran University, first edition, pp: 219. (in Persian)
31. Wang, Y., Xiao, X. and Chen, B. 2018. Biochar Impacts on Soil Silicon Dissolution Kinetics and their Interaction Mechanisms. *Scientific Reports*,8: 8040.
32. Westeman, R.E.L., Jones, J. B., Case, V. W. 1990. Soil testing and plant analysis. Soil Science Society of America SSSA.
33. Yang, Z., Li, X., He, X. and Liu, Y. 2021. Recovery of silicon and potassium from rice straw through thermal conversion and residue leaching. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2): 105057.
34. Zhang, Y., Chen, H., Xiang, J., Xiong, J., Wang, Y., Wang, Z. and Zhang, Y. 2022. Effect of Rice-Straw Biochar Application on the Acquisition of Rhizosphere Phosphorus in Acidified Paddy Soil. *Agronomy*, 12: 1556.