J. Crop Product. Process. 2025, 15(1), 107-126; DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702

Journal of Crop Production and Processing

Journal homepage: https://jcpp.iut.ac.ir/

Original Article

The Effects of Applying Sewage Sludge Compost Amended with Different Organic Matter and Its Biochar, on Yield and Minerals Concentration in Lettuce (*Lactuca sativa* L.)

Mohammad Ali Bahmanyar [1*], Seyed Mostafa Emadi[2], Seyed Ali Reza Mousavi Elyerdi[3]

1, 2 and 3. Professor, Associate Professor and Graduated M.Sc. Student, Respectively, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Extended Abstract

Introduction: In many parts of the world, vegetables form a significant part of the family's daily food basket due to their great nutritional value and the important role they play in human health. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is an annual plant from the Asteraceae (Compositae) family that is rich in vitamins and essential minerals for human's healthy nutrition. Due to the lack of organic matter and the deficiency of nutrients in most soils of the arid-semiarid regions, it is necessary to supplement these soils to enhance organic matter and nutrients content of the soils. The main sources of organic material for soils include sewage sludge, compost and their biochar. Adding sewage sludge to the soil, due to the presence of some pollutants, heavy metals, and pathogenic agents may cause contamination in the product and ultimately threaten human's health. Therefore, the use of sewage sludge as compost and its biochar in vegetable cultivation to solving the problem of sewage sludge disposal has been quite affordable from both economic and environmental point of view. Biochar is known as an organic fertilizer for agricultural production systems, due to its high durability and its richness in nutrients. Also, during the process of biochar formation, pollutants and heavy elements are reduced in sewage sludge and hence biochar is used as a modifier and improver of agricultural soil properties. As a result, the use of biochar has the potential to be hired to tackle productivity limitations through increased soil fertility. Therefore, biochar is capable to reduce the concentration of heavy elements in the plant, leading consequently to increase in the concentration of nutrients and crop yield. Thus, this research was conducted with the aim of investigating the effect of applying sewage sludge compost amended with different organic matter (rice straw and citrus shoots) and its biochar, on yield and minerals concentration in lettuce (*Lactuca sativa* L.).

Materials and Methods: This experiment was carried out in pots in the form of a randomized complete block design with 13 treatments and three replicates in the greenhouse of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, north of Iran, in 2023. The treatments included: raw sewage sludge, sewage sludge biochar, sludge compost containing rice straw, sludge compost containing rice straw-biochar, sludge compost containing citrus shoots, sludge compost containing citrus shoots-biochar (all at two levels of half and one percent) and the control treatment. Sewage sludge, sewage sludge compost and their biochar were mixed with poting soil following passing through a 10 mesh or 2 mm sieve for each treatment before transplanting (half percent and one percent of poting soil weight, i.e. equaling to 40 and 80 grams, respectively). After implementing the treatments, two lettuce seedlings (Roman cultivar) were planted in each pot. In the stage of maximum vegetative growth of lettuce (about two and a half months after planting), the dry

Received: Sep. 21, 2024; Revised: Jan. 31, 2025; Accepted: Feb. 1, 2025; Published Online: Mar. 15, 2025.

* Corresponding Author: mali.bahmanyar@gmail.com

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

Journal Of Crop Production and Proccessing

Journal of Crop Production and Processing

Journal homepage: https://jcpp.iut.ac.ir/

weight of the shoot and root of lettuce was determined with the help of a balance after drying in an oven at a temperature of 70 ºC for 3 days. Using plant samples taken, the concentration of N, P, K, Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Ni, and Pb was measured in the shoots and roots of lettuce plants.

Results and Discussion: The highest dry weight of the shoots (30.1 g/pot) and roots (12.2 g/pot) of lettuce were obtained in the presence of 1% sewage sludge biochar (BSS_1) and the lowest amounts (17.9 and 4.71 g/pot, respectively) were observed in the absence of sewage sludge biochar, i.e. in the control treatment. Being rich in nutrients and improving soil properties, sewage sludge biochar led to an increase in plant yield. The maximum concentration of nitrogen in the shoots (5.02%) and roots (3.04%) of lettuce was obtained in 1% sewage sludge biochar treatment (BSS_1), indicating 63% and 1.2 times increases, respectively, compared to the the control treatment (i.e. absence of sewage sludge biochar). With the application of 1% sewage sludge biochar (BSS_1) and 1% sludge compost containing citrus shoots-biochar (BCc_1), the phosphorus concentration of the shoots and roots increased. Also, the maximum concentration of potassium in the shoots (5.52%) and roots (1.80%) of lettuce was observed in the presence of 1% sludge compost containing rice straw-biochar (BCr_1) and 1% sludge compost containing citrus branch-biochar (BCc_1) treatments, respectively. The highest concentration of copper in shoots and roots of lettuce was obtained in the presence of 1% sludge compost containing citrus branch-biochar (BCc_1) treatment. The 1% sludge compost containing rice straw-biochar (BCr_1) treatment led to the highest concentration of manganese in the shoots and roots of lettuce. The 1% sewage sludge biochar (BSS_1) treatment resulted in the highest concentration of iron and zinc in the shoots and roots of lettuce. Due to the negative surface elecritcal charge, biochar adsorbs cationic nutrients and with the availability of these elements as well as the richness of biochar itself in essential nutrients for plant growth, it leads to an increase in the absorption of nutrients by the plant. The highest concentration of lead, nickel and cadmium in the shoots and roots of lettuce was obtained upon exposure to the 1% sewage sludge treatment (SS_1); they indicated 1.35 times, 89% and 3.65 times increases, respectively, in the shoot of letteucecompared to the control treatment. The 1% sewage sludge treatment (SS_1) resulted in 100%, 72% and 2.8 times increases, respectively, in the concentration of these metals in the roots of lettuce. By converting the sewage sludge into compost and particularly into biochar, the heavy elements of sewage sludge became immobile and stabilized, resulting in decreases in the concentration of the mentioned heavy elements in the plant shoot and root.

Conclusions: Application of sewage sludge biochar, sludge compost containing rice straw-biochar and sludge compost containing citrus shoot-biochar, particularly at the level of 1%, showed the highest amount of dry weight in the shoots and roots of lettuce. The latter treatment led, also, to increases in the concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, copper, manganese, iron and zinc in the shoots and roots of lettuce. These beneficial effects can be attributed to the fact that biochars are richer in nutrients, improve soil physical conditions, and thus enhance plant growth, than sewage sludge treatment. Application of sewage sludge resulted in the maximum concentration of lead, nickel and cadmium in the shoots and roots of lettuce; though, converting the sewage sludge into biochar, led to stabilization of these heavy metals and hence less avialability to the plant roots and consequently decreases in the heavy metals concentration in lettuce plants. Therefore, application of 1% sewage sludge biochar, sludge compost containing rice straw-biochar and sludge compost containing citrus shoot-biochar is recommended to achieve maximum yield and dry weight and maximum concentration of macro and micro elements and reduce the absorption of heavy elements by lettuce.

Keywords: Cadmium, Dry weight, Iron, Lead, Nitrogen

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

How to Cite: Bahmanyar M. A., Emadi S. M., Mousavi Elyerdi S. A. R. The Effects of applying sewage sludge compost amended with different organic matter and its biochar, on yield and minerals concentration in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *J. Crop Product. Process*. 2025, 15(1), 107-126 (*In Persian*). DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی، ۱۴۰۴، دوره ۱۵، شماره ۱، ص. ۱۲۶-۱۰۷، DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702

نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی
صفحه خانگی نشریه: https://jcpp.iut.ac.ir/

مقاله پژوهشی

تأثیر کاربرد کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با ماده آلی متفاوت و بایوچار حاصل از آن بر عملکرد و غلظت عناصر معدنی کاهو (*Lactuca sativa* L.)

محمدعلی بهمنیار[1]*، سید مصطفی عمادی[2] و سید علیرضا موسوی الیردی[3]

چکیده– به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با ماده آلی متفاوت و بایوچار حاصل از آن بر عملکرد و غلظت عناصر معدنی کاهو(*Lactuca sativa L.*)، آزمایشی گلدانی در قالب طرح پایه‌ی بلوک‌های کامل تصادفی در ۱۳ تیمار و سه تکرار در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱۴۰۲ اجرا شد. تیمار ها شامل: لجن فاضلاب خام، بایوچار لجن فاضلاب، کمپوست لجن حاوی کاه برنج، بایوچار کمپوست لجن حاوی کاه برنج، کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات، بایوچار کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات (همگی در دو سطح نیم و یک درصد) و تیمار شاهد بود. نتایج نشان داد که بیشترین وزن خشک اندام هوایی و ریشه کاهو با کاربرد بایوچار لجن فاضلاب یک درصد به‌دست آمد. همچنین حداکثر غلظت نیتروژن در اندام هوایی (۵/۰۲ درصد) و ریشه (۳/۰۴ درصد) در تیمار بایوچار لجن فاضلاب یک درصد و حداکثر غلظت فسفر در اندام هوایی (۰/۳۷ درصد) و ریشه (۰/۲ درصد) در تیمار بایوچار کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات یک درصد مشاهده شد. علاوه بر این کاربرد بایوچار کمپوست لجن حاوی کاه برنج یک درصد، بیشترین تأثیر مثبت را بر غلظت پتاسیم در اندام هوایی و ریشه کاهو به‌ترتیب با افزایش ۲۷ درصدی و ۱/۱۴ برابری نسبت به شاهد نشان داد. ضمناً با افزایش سطح کاربرد هر سه نوع بایوچار به یک درصد، غلظت مس، منگنز، آهن و روی در اندام هوایی و در ریشه کاهو به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. همچنین بیشترین غلظت سرب، نیکل و کادمیم در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو در تیمار لجن فاضلاب یک درصد حاصل شد که با تبدیل لجن فاضلاب به کمپوست و همچنین بایوچار، غلظت عناصر سنگین مخصوصاً در بایوچارها کاهش یافت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد در سطح یک درصد بایوچارهای لجن فاضلاب، کمپوست لجن حاوی کاه برنج و کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات منجر به افزایش غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو و درنتیجه بهبود عملکرد آن شده و در مقایسه با لجن فاضلاب، سبب کاهش غلظت عناصر سنگین در گیاه کاهو می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آهن، سرب، کادمیم، نیتروژن، وزن خشک.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳، اولین انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

۱، ۲ و ۳. به‌ترتیب استاد، دانشیار و دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

*: نویسنده مسئول، رایانامه: mali.bahmanyar@gmail.com

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۳ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

مقدمه

در بسیاری از نقاط جهان سبزی‌ها به‌دلیل ارزش غذایی فراوان و نقش مهمی که در سلامتی انسان دارند، بخش قابل‌توجهی از سبد روزانه خواربار خانواده را تشکیل می‌دهند. کاهو (*Lactuca sativa* L.) گیاهی است یکساله از خانواده مرکبان (*Asteraceae Compositae*) و روزبلند که سرشار از ویتامین‌ها و مواد معدنی ضروری برای سلامتی انسان است (۳۷). تأمین تقاضای روز افزون مواد غذایی جامعه از یک سو، کمبود و بحران آب از سوی دیگر، ضرورت بهبود حاصلخیزی خاک را به‌منظور افزایش بهره‌وری منابع آب و خاک اجتناب ناپذیر ساخته است. باتوجه به کمبود مواد آلی و فقر عناصر غذایی در اکثر خاک‌های منطقه، افزودن منابع مناسب جهت افزایش مواد آلی و عناصر غذایی ضروری است (۱۵). عمده‌ترین منابع تأمین‌کننده مواد آلی برای خاک‌ها شامل فضولات دامی، بقایای گیاهی، کودهای سبز، لجن فاضلاب، کمپوست و بایوچار آنها است (۱۵).

لجن فاضلاب محصول جانبی فرآیند تصفیه بیولوژیکی فاضلاب بوده که به‌دلیل سرعت صنعتی‌شدن و شهرنشینی در مقادیر زیاد توسط تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تولید می‌شود و دفع آن به‌طور فزاینده‌ای به یک مشکل بزرگ جهانی تبدیل شده‌است (۲۶). در کشور ایران از یک سو دفع مناسب پسماندهای شهری و صنعتی و از سوی دیگر یافتن منابع آلی مناسب برای اراضی کشاورزی به‌منظور افزایش تولید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۳۷). امروزه استفاده از لجن فاضلاب به‌عنوان کود در زمین‌های کشاورزی علاوه بر برطرف کردن مشکل دفع آن، اثرات مثبتی بر فعالیت بیولوژیکی، خواص شیمیایی و فیزیکی خاک (بهبود ساختار و توانایی نگهداری آب، کاهش چگالی ظاهری، افزایش تخلخل و بهبود پایداری ساختاری خاک) دارد که درنتیجه سبب افزایش حاصلخیزی خاک، بهبود رشد و عملکرد گیاه می‌شود. زیرا لجن حاوی مقدار زیادی مواد آلی و مواد مغذی (از جمله N, P, K) برای رشد گیاه است. با این وجود، لجن فاضلاب حاوی عناصر سنگین و آلاینده‌های آلی نیز هست، که ممکن است منبع بالقوه آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی باشد و اثرات نامطلوبی بر گیاهان زراعی و در نهایت سلامت انسان داشته باشد. بنابراین، مدیریت ایمن لجن فاضلاب یک نگرانی عمده زیست‌محیطی فعلی است (۵ و ۲۶) که از جمله این روش‌ها می تواند تبدیل لجن فاضلاب به کمپوست و حتی تبدیل کمپوست تولید شده به بایوچار باشد.

کمپوست‌سازی، یک روش مؤثر، ارزان، طبیعی و سازگار با محیط‌زیست، برای مدیریت لجن فاضلاب و به حداقل رساندن خطرات آن است (۳۳) زیرا پاتوژن‌ها درنتیجه تبدیل زباله‌های آلی به مواد آلی، تجزیه شده و فلزات سنگین نیز تثبیت می‌شوند (۱۷). به‌علاوه، کمپوست لجن فاضلاب (SSC) معمولاً سرشار از نیتروژن، فسفر، پتاسیم و ریزمغذی‌هایی است که برای رشد گیاه ضروری هستند و حاوی سطوح بالایی از مواد آلی بوده که از طریق تأثیر بر خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک به رشد گیاه کمک می‌کند (۱۳). بنابراین استفاده از آن به‌عنوان کودی خوب و جذاب جهت افزایش ماده آلی و حاصلخیزی خاک معرفی شده که سبب حفظ تعادل مثبت ریز مغذی‌ها در آن می‌شود (۱۲).

بایوچار طی فرآیند پیرولیز یا تبدیل حرارتی ضایعات آلی (بقایای گیاهی، کود دامی و زباله‌های شهری) تحت اکسیژن رسانی جزئی حاصل می‌شود که در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از اصلاح‌کننده‌های بسیار مناسب در محیط خاک تحقیقات زیادی را به خود اختصاص داده است (۱۶ و ۳۵). اگرچه لجن فاضلاب دارای عناصر سنگین و عوامل بیماری‌زا بوده ولی طی فرآیند پیرولیز و تبدیل آن به بایوچار، این عوامل کاهش یافته و ناپویا (عناصر تثبیت و به فرم کل در می‌آیند) می‌شوند. درنتیجه برای استفاده به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک مناسب و ایمن شده و می‌تواند چرخه مواد مغذی و ترسیب کربن را ارتقا دهد (۷).

بسیاری از مطالعات نشان دادند که بایوچار علاوه بر غنی بودن از عناصر غذایی، یک ماده اصلاح‌کننده مفید برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک، حفظ ماده آلی خاک، افزایش بهره‌وری کود استفاده شده و درنهایت افزایش جذب عناصر غذایی و تولید محصول مؤثر است (۴۱). دادبو و

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

همکاران (٤) تولید بایوچار از لجن فاضلاب برای کاربرد در کشت پایدار گیاه کاهو و کاهش تغییرات آب و هوایی را بررسی و بیان کردند که وزن خشک اندام هوایی و ریشه کاهو با افزودن بایوچار لجن فاضلاب ۵ درصد به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. بهبود عملکرد زراعی پس از کاربرد بایوچار لجن فاضلاب (حاوی عناصر غذایی ضروری برای رشد کاهو) می‌تواند به جذب مواد غذایی موجود در بایوچار و مواد اولیه آن توسط گیاه اختصاص یابد. سوزا و فیگوئریدو (۳۸) نیز اثرات بایوچار لجن فاضلاب بر حاصلخیزی خاک و رشد تربچه را مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه گرفتند که غلظت نیتروژن و فسفر برگ تربچه با افزایش سطح بایوچار لجن فاضلاب تا ۴۰ گرم در کیلوگرم، افزایش یافت. این افزایش غلظت نیتروژن به‌دلیل سطوح بالای نیتروژن در بایوچار بود. فروهر و همکاران (۸) دریافتند که کاربرد بایوچار لجن فاضلاب و همچنین بایوچار کمپوست زباله شهری سبب افزایش غلظت پتاسیم اندام هوایی گیاه ذرت نسبت به تیمار شاهد شد. زی و همکاران (٤٤) نیز در پژوهشی نشان دادند که کاربرد ۱/۵ تن بایوچار لجن فاضلاب در هکتار سبب افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف از جمله مس در گیاه ذرت شد. همچنین فاریا و همکاران (۷) به این نتیجه رسیدند که بایوچار لجن فاضلاب منجر به جذب بیشتر مواد مغذی توسط گیاهان و عملکرد بالاتر گیاه شد. درکل کاربرد بایوچار لجن فاضلاب می‌تواند جایگزین کودهای معدنی (نیتروژن، فسفر و عناصر کم‌مصرف) برای تولید محصول شود. در پژوهشی که عید و همکاران (۵) بر اثرات کاربردهای مختلف لجن فاضلاب بر تجمع فلزات سنگین، رشد و عملکرد اسفناج انجام دادند، دریافتند که افزایش سطح کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش غلظت تمام فلزات سنگین در ریشه و اندام هوایی اسفناج شد. پیروتی و افیونی (۳۰) در پژوهشی نشان دادند که افزودن بایوچار و لجن فاضلاب باعث کاهش معنی‌دار جذب فلزات سنگین در گیاه و خاک می‌شود و با توجه به نتایج می‌توان از بایوچار به‌عنوان تثبیت کننده عناصرسنگین در خاک استفاده کرد. افزودن لجن فاضلاب به خاک‌ها، به‌دلیل حضور برخی آلاینده‌ها، عناصر سنگین و عوامل بیماری‌زا ممکن است سبب بروز آلودگی در محصول و در نهایت بیماری انسان شود (۲٦). بنابراین بهتر است با روش‌هایی این خطرات و عوامل منفی را کاهش یا از بین برد که از جمله این روش‌ها می‌تواند تبدیل لجن فاضلاب به کمپوست و حتی تبدیل کمپوست تولید شده به بایوچار باشد. بنابراین بکارگیری لجن فاضلاب به‌صورت کمپوست و بایوچار آن در کشت سبزیجات علاوه بر برطرف کردن مشکل دفع آن و با توجه به ماندگاری بالای بایوچار، غنی بودن از نظر عناصر مغذی و کاهش آلاینده‌ها و عناصر سنگین در طی فرآیند تشکیل بایوچار، از لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی کاملاً مقرون به صرفه بوده و به‌عنوان یک اصلاح‌کننده و بهبود دهنده خصوصیات خاک و کود غنی در کشاورزی می‌توانند راهی برای کاهش محدودیت‌های بهره‌وری و افزایش حاصلخیزی در خاک و درنتیجه سبب کاهش غلظت عناصر سنگین در گیاه و افزایش غلظت عناصر غذایی و عملکرد محصول باشند (۷ و ۱۲). با این همه، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کاربرد کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با ماده آلی متفاوت (کاه و کلش برنج و سرشاخه مرکبات) و بایوچار حاصل از آن بر عملکرد و غلظت عناصر معدنی کاهو انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی میزان افزایش عملکرد و غلظت عناصر معدنی کاهو در اثر کاربرد کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با ماده آلی متفاوت و بایوچار حاصل از آن، این آزمایش به‌صورت گلدانی در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱۴۰۲ اجرا شد. خاک مورد نیاز جهت پر کردن گلدان‌ها از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری مزرعه برداشت و به گلخانه انتقال داده شد. بخشی از نمونه خاک جهت تعیین و اندازه‌گیری برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی طبق روش‌های مرسوم از جمله بافت، کربن آلی، آهک، ECهدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، اسیدیته خاک و نیتروژن کل و فسفر، پتاسیم، مس،

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

شکل ۱. کمپوست های لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه برنج و سرشاخه مرکبات

منگنز، آهن، روی، سرب، نیکل و کادمیم قابل جذب خاک قبل ازکشت نمونه‌برداری و آماده‌سازی شد.

آنالیز و اندازه‌گیری‌های مربوط به خاک شامل اسیدیته با نسبت ۱ به ۵ و قرائت با استفاده از الکترود شیشه‌ای دستگاه pH متر (۲٤)، هدایت الکتریکی عصاره خاک و قرائت توسط دستگاه EC سنج (۲۸)، بافت خاک به روش هیدرومتری (۹)، کربن آلی به روش والکی بلک (۲۸)، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با اسید (۲۷)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش استات آمونیوم (۳) با دستگاه فلیم‌فتومتر (Sherwood 410, UK)، نیتروژن کل به روش هضم کجلدال (٤۲) با استفاده از دستگاه کجلتک (Kjeltec 2300, Denmark)، فسفر قابل جذب توسط استخراج با بیکربنات سدیم (۲۹) به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (PG Instrument T90+, UK)، پتاسیم قابل جذب توسط استخراج با استات آمونیوم (٤۲) به کمک دستگاه فلیم‌فتومتر (Sherwood 410, UK)، عناصر کم‌مصرف (Fe, Mn, Cu, Zn) و عناصر سنگین (Cd, Ni, Pb) قابل جذب عصاره‌گیری توسط DTPA (۲۰) و با دستگاه جذب اتمی (Varian SpectrAA-10, Australia) انجام شد (جدول ۱).

لجن فاضلاب از تصفیه خانه شهرستان ساری تهیه شد و همچنین به منظور کمپوست‌سازی موثر و کمک به ایجاد شرایط مناسب برای تولید کمپوست لجن فاضلاب، از سرشاخه مرکبات و کاه و کلش برنج (خرد شده و عبور از الک ۲ میلی‌متر)، به عنوان عوامل حجیم کننده مقرون به صرفه (قابل تهیه در منطقه) استفاده شد. کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه و کلش برنج (نسبت ٤ به ۱ لجن فاضلاب و کاه و کلش برنج) و کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات (نسبت ٤ به ۱ لجن فاضلاب و سرشاخه مرکبات) تولید شدند. تولید کمپوست‌ها در بشکه‌هایی در داخل گلخانه صورت گرفت بدین شکل که مرتباً به آن آب اضافه شده و همچنین به‌طور منظم محتویات بشکه‌ها به‌خوبی هم‌زده شد تا شرایط تهیه کمپوست فراهم گشته و بعد از چند ماه کپوست‌ها آماده شدند (شکل ۱).

بعد از مرحله کمپوست‌سازی نیز، برای تهیه بایوچار، پس از هوا خشک شدن لجن فاضلاب و کمپوست‌های تهیه شده، در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد ابتدا به مدت دو ساعت در زمان اولیه (زمان مورد نیاز برای رسیدن به دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) و در ادامه به مدت سه ساعت در زمان ثانویه (مدت زمانی که کوره در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد هست) در داخل کوره الکتریکی (شکل ۲) قرار داده شدند (این کوره تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را پشتیبانی می‌کند و از دو المنت در داخل خود و بدنه عایق حرارت و اکسیژن تشکیل شده است) تا فرآیند آتشکافت (فرآیند سوختن کند و آرام مواد آلی در شرایط کم یا عدم وجود اکسیژن) صورت پذیرد (۱٤ و ۳٤). سپس بایوچار به‌دست آمده و همچنین لجن فاضلاب و کمپوست‌های هوا خشک شده، از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند.

قم گیاه کاهو مورد کشت در این مطالعه، معمولی (رومی) به‌صورت نشاء بود و طرح در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در ۱۳ تیمار و سه تکرار و جمعاً به تعداد ۳۹ عدد گلدان اجرا شد.

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702] [Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک اولیه قبل از اجرای آزمایش

بافت خاک	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته	ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بار مثبت بر کیلوگرم)	آهک (درصد)	کربن آلی (درصد)	نیتروژن (درصد)	فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	مس (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	سرب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	نیکل (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	کادمیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
لوم رسی	۰/۸	۷/۵۸	۳۳/۵	۳۱/٦	۱/۰۱	۰/۱۰	۱۱/۳	۳۰۸	۱/٤۵	۲/۹۳	۷/۵۱	۱/٤۵	۱/۸۷	۰/٤۱۸	۰/۱٤۳

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702] [Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

شکل ۲. کوره الکتریکی

تیمارها شامل: ۱) شاهد (Blank)، ۲) لجن فاضلاب خام (SS) (دو سطح نیم و یک درصد)، ۳) بایوچار لجن فاضلاب (BSS) (دو سطح نیم و یک درصد)، ٤) کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه برنج (Cr) (دو سطح نیم و یک درصد)، ٥) بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه برنج (BCr) (دو سطح نیم و یک درصد)، ٦) کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات (Cc) (دو سطح نیم و یک درصد) و ۷) بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات (BCc) (دو سطح نیم و یک درصد)، در مجموع ۱۳ تیمار بود

پس از آماده شدن نمونه‌های خاک، گلدان‌های پلاستیکی (با ظرفیت تقریبی ۸ کیلوگرم خاک)، شماره‌گذاری شده و در کف هر گلدان مقداری شن یا کلوخه درشت به‌عنوان زهکش ریخته و سپس هر گلدان با حدود ۸ کیلوگرم از نمونه‌های خاک پر شد.

جهت اجرای عملیات طرح، پس از پرکردن خاک در گلدان‌ها و اعمال تیمارها، کودهای شیمیایی مورد لزوم مطابق نیاز کودی، براساس آزمون خاک (۲۲) محاسبه و با خاک گلدان مخلوط شد. کودهای شیمیایی براساس آزمون خاک شامل کود فسفره به میزان ۱۰۰ کیلوگرم درهکتار پنتا اکسید فسفر (P_2O_5) از منبع سوپر فسفات تریپل و کود نیتروژنه به میزان ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار از منبع اوره بودند (تمامی کود فسفره در قبل از نشاءکاری و ۱/۳ کود نیتروژنه در زمان نشاء، ۱/۳ چهار هفته بعد نشاء و ۱/۳ باقیمانده شش هفته بعد از نشاء به گلدان‌ها اضافه شد).

لجن فاضلاب، کمپوست لجن فاضلاب و بایوچار آن‌ها بعد از خرد و عبور از الک ۱۰ مش یا ۲ میلی‌متر برای هر تیمار قبل از نشاء، با خاک گلدان‌ها مخلوط شدند (نیم درصد و یک درصد وزن خاک گلدان به‌ترتیب ٤۰ و ۸۰ گرم). پس از اعمال تیمارها در هر گلدان ۲ عدد نشای کاهو (در اواسط فصل زمستان) کشت شد. مراحل داشت شامل آبیاری، وجین و مبارزه با آفات طبق روش‌های معمول در منطقه صورت گرفت. در طی دوره رشد گیاهان در گلخانه، عملیات آبیاری با آب چاه و وجین علف‌های هرز با دست انجام شد.

همچنین برخی ویژگی‌های شیمیایی کاه برنج، سرشاخه مرکبات، لجن فاضلاب، کمپوست‌ها و بایوچار آنها نیز اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری اسیدیته لجن فاضلاب، کمپوست و بایوچار با نسبت ۱ به ٥ با استفاده از الکترود شیشه‌ای دستگاه pHمتر (٢٤)، هدایت الکتریکی توسط دستگاه EC سنج (۲۸) و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیوم (۳) با دستگاه فلیم‌فتومتر (Sherwood 410, UK)، نیتروژن کاه برنج، سرشاخه مرکبات، لجن فاضلاب، کمپوست و بایوچار بعد از آماده‌سازی نمونه و هضم با اسید سولفوریک (٤٢) با دستگاه کجلتک (Kjeltec 2300, Denmark)، پتاسیم بعد از عصاره‌گیری با HCL 2N (٤۰) به کمک دستگاه فلیم‌فتومتر (Sherwood 410, UK)، فسفر بعد از عصاره‌گیری با HCL 2N، به کمک معرف مولیبدات

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

جدول ۲. برخی خصوصیات شیمیایی لجن فاضلاب، کمپوست‌های لجن فاضلاب و بایوچارهای آن‌ها

مشخصات	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته	ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بار مثبت بر کیلوگرم)	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	مس	منگنز	آهن	روی	سرب	نیکل	کادمیم
				(درصد)			(میلی‌گرم بر کیلوگرم)						
RH	–	–	–	۰/۵۹	۰/۰۶	۰/۸۵	۴/۵۳	۱۶۶	۱۵۷	۹/۰۶	۲/۴۹	۱/۴۷	۰/۲۸
Cit	–	–	–	۲/۸۸	۰/۱۹	۰/۹۶	۱۷/۵	۵۱/۴	۵۴۳	۴۸/۶	۱۳/۲۷	۸/۸۱	۱/۵۵
SS	۲/۴۱	۶/۹۴	۶۹/۵	۲/۸۲	۱/۴۸	۰/۲۱	۱۶۵	۲۰۱	۲۹۵۳	۹۹۲	۶۶/۷	۵۴/۷	۶/۷۶
BSS	۰/۳۹	۷/۹۳	۱۰۴	۲/۲۹	۲/۶۶	۰/۲۶	۲۳۱	۳۳۵	۷۴۷۸	۱۶۴۶	۶۲/۸	۳۲/۸	۴/۹۶
Cr	۴/۵۶	۷/۰۲	۷۸/۲	۲/۲۷	۱/۸۳	۰/۷۴	۱۴۲	۳۴۸	۳۱۸۸	۸۶۶	۶۳	۴۶/۶	۶/۰۲
BCr	۳/۰۶	۸/۲۷	۱۱۳	۱/۹	۲/۶	۱/۱۶	۱۹۶	۴۷۵	۵۶۸۶	۱۲۲۵	۵۸/۶	۳۱/۸	۴/۲۷
Cc	۴/۳۹	۷/۴۴	۷۲/۶	۲/۴۶	۱/۸۷	۰/۷۲	۱۹۳	۱۹۷	۴۴۳۵	۱۰۱۲	۶۵/۲	۵۰/۲	۵/۹۳
BCc	۳/۲۷	۸/۵۳	۱۱۷	۱/۸۹	۲/۶۲	۱/۱۱	۲۸۱	۲۷۴	۷۰۷۳	۱۴۳۳	۶۰/۲	۳۲/۲	۳/۱۷

(**RH**: کاه برنج **Cit** : سرشاخه مرکبات **SS** : لجن فاضلاب **BSS**: بایوچار لجن فاضلاب **Cr**: کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه و کلش برنج **BCr**: بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه و کلش برنج **Cc**: کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات **BCc**: بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات)

وانادات (۴۰) با دستگاه اسپکتروفتومتر (PG Instrument T90+, UK)، عناصر کم‌مصرف (Fe, Mn, Cu, Zn) بعد از عصاره‌گیری با HCL 2N (۳۱) با دستگاه جذب اتمی (Varian SpectrAA-10, Australia) و اندازه‌گیری عناصر سنگین (Cd, Ni, Pb) بعد از عصاره‌گیری با اسید نیتریک غلیظ (۱) با دستگاه جذب اتمی (Varian SpectrAA-10, Australia) انجام شد (جدول ۲).

در مرحله حداکثر رشد رویشی محصول کاهو (حدود دو ماه و نیم پس از کاشت)، وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو پس از قرار دادن به مدت ۳ روز در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، به کمک ترازو تعیین و پس از آماده‌سازی، میزانN نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، مس، روی، کادمیم، نیکل و سرب در ریشه و اندام هوایی گیاه کاهو اندازه‌گیری شد. نیتروژن اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو به روش کجلدال و هضم با اسید سولفوریک (۴۲) با دستگاه کجلتک (Kjeltec 2300, Denmark)، پتاسیم بعد از هضم خشک و عصاره‌گیری با HCL 2N (۴۰) به کمک دستگاه فلیم‌فتومتر (Sherwood 410, UK)، فسفر بعد از عصاره‌گیری با HCL 2N و به کمک معرف مولیبدات وانادات (۴۰) با دستگاه اسپکتروفتومتر (PG Instrument T90+, UK)، عناصر کم‌مصرف (Fe, Mn, Cu, Zn) بعد از هضم خشک و عصاره‌گیری با HCL 2N (۳۱) با دستگاه جذب اتمی (Varian SpectrAA-10, Australia) و عناصر سنگین (Cd, Ni, Pb) در ریشه و اندام هوایی گیاه کاهو بعد از عصاره‌گیری با اسید نیتریک غلیظ (۱) و با دستگاه جذب اتمی (Varian SpectrAA-10, Australia) اندازه‌گیری شدند.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های به‌دست آمده، با استفاده از نرم‌افزار Statistix-8 (نسخه ۸) و مقایسه میانگین‌ها با روش حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد صورت پذیرفت و رسم نمودار توسط نرم افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

وزن خشک اندام هوایی و ریشه کاهو

جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو تحت تأثیر تیمارهای مختلف کودی قرار گرفته و در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد.

طبق نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین میزان وزن خشک در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو به‌ترتیب با میانگین ۳۰/۱

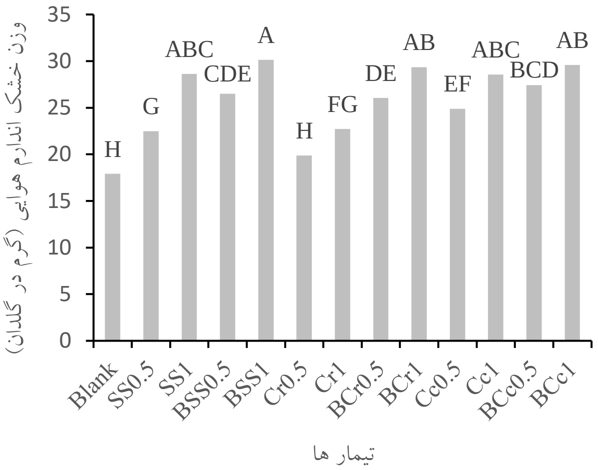
[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

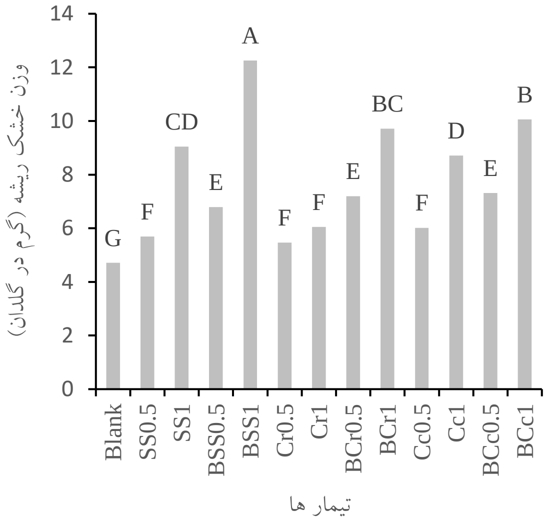
[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای مختلف کودی بر وزن خشک گیاه کاهو

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن خشک	
		اندام هوایی	ریشه
بلوک	۲	۵/۲٤	۰/۰۱
تیمار	۱۲	**٤۵/۸	**۱٤/٤
خطای آزمایشی	۲٤	۱/۹٤	۰/۱۷
ضریب تغییرات (٪)	-	۵/٤۳	۵/۵۵

** بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد می‌باشد.





شکل ۳. مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف کودی بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو.

ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD ندارند.

(Blank: شاهد SS: لجن فاضلاب در دو سطح نیم و یک درصد BSS: بایوچار لجن فاضلاب در دو سطح نیم و یک درصد Cr: کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه و کلش برنج در دو سطح نیم و یک درصد BCr: بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه و کلش برنج در دو سطح نیم و یک درصد Cc: کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات در دو سطح نیم و یک درصد BCc: بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات در دو سطح نیم و یک درصد)

۱۲/۲ گرم در گلدان در تیمار بایوچار لجن فاضلاب یک درصد (BSS_1) حاصل شد که نسبت به کمترین میزان در تیمار شاهد (Blank) (۱۷/۹ و ٤/۷۱ گرم در گلدان) به‌ترتیب ٦۸ درصد و ۱/٦ برابر افزایش نشان داد. همچنین از نظر وزن خشک اندام هوایی گیاه کاهو پس از تیمار بایوچار لجن فاضلاب یک درصد (BSS_1) با بیشترین میزان وزن خشک اندام هوایی کاهو، تیمارهای بایوچار کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات یک درصد (BCc_1) و همچنین بایوچار کمپوست لجن حاوی کاه برنج یک درصد (BCr_1) نیز بیشترین میزان وزن خشک اندام هوایی را نسبت به سایر تیمارها داشتند که بین این دو تیمار باهم و همچنین بین تیمار شاهد و تیمار کمپوست لجن حاوی کاه برنج نیم درصد ($Cr_{0.5}$) **نیز** تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۳). در واقع نتایج نشان داد که با کاربرد بایوچارها علی‌الخصوص بایوچار لجن فاضلاب و همچنین با افزایش سطح کاربرد آن‌ها وزن

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

جدول ٤. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای مختلف کودی بر غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم گیاه کاهو

منابع تغییرات	درجه آزادی	نیتروژن		فسفر		پتاسیم	
		اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه
بلوک	۲	۰/۰۰٤	۰/۰۰٤	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۱٤	۰/۰۰۲
تیمار	۱۲	**۱/۳۸	**۱/٤۸	**۰/۰۰۱	**۰/۰۰۱	**۰/۳۳	**۰/۲۹
خطای آزمایشی	۲٤	۰/۰۵	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۰٤	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰٤
ضریب تغییرات (٪)		۵/۸۸	٤/۰٤	۱/۹۰	۳/۵٦	۲/۳۲	٤/۸۲

** بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد می‌باشد.

خشک اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو افزایش یافتند. کاربرد لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی اثرات مثبتی بر فعالیت بیولوژیکی، خواص شیمیایی و فیزیکی خاک دارد که درنتیجه سبب بهبود رشد و عملکرد گیاه می‌شود (٢٦). لجن فاضلاب با بهبود ساختار و توانایی نگهداری آب، کاهش چگالی ظاهری، افزایش تخلخل و بهبود پایداری ساختاری خاک سبب افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (۵) و بایوچار لجن فاضلاب نیز با pH ۷/۹۳ و سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی که دارد، باعث بهبود pH و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شده و با جذب و حفظ آب و عناصر غذایی روی سطوح خاک سبب حاصلخیزی خاک شده و درنهایت شرایط را برای رشد گیاه بهتر کرده و منجر به افزایش عملکرد و وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه می‌شود (۲۱ و ٤۱). قربانی و امیر احمدی (۱۰) در پژوهشی نتیجه گرفتند که افزودن بایوچار سبب بهبود برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل و محتوای آب در دسترس خاک و همچنین هدایت هیدرولیکی اشباع می‌شود. همچنین افزایش سطح کاربرد بایوچار از ۲ به ٤ درصد، دارای اثرات مثبت به مراتب قوی‌تری در خاک و همچنین افزایش وزن خشک اندام هوایی گیاه نسبت به شاهد خواهد بود. فروهر و همکاران (۸) در پژوهشی با عنوان اثر کاربرد بایوچارهای مختلف و مواد اولیه آن‌ها بر رشد گیاه ذرت و فراهمی پتاسیم در یک خاک آهکی دریافتند که بیشترین وزن خشک اندام هوایی از مصرف بایوچار لجن فاضلاب به‌دست آمد و بین بایوچار لجن فاضلاب با مواد اولیه آن تفاوت معنی‌داری از لحاظ تأثیر بر وزن خشک گیاه وجود نداشت. همچنین بایوچار کمپوست به‌طور معنی‌داری وزن خشک گیاه را نسبت به شاهد افزایش داد. سوزا و فیگوئریدو (۳۸) در پژوهشی با عنوان بایوچار لجن فاضلاب: اثرات بر حاصلخیزی خاک و رشد تربچه، دریافتند که وزن خشک اندام هوایی گیاه تربچه پاسخ مثبتی به کاربرد ۱۰ الی ۳۰ گرم در کیلوگرم بایوچار لجن فاضلاب نشان داد و با افزایش سطح بایوچار، وزن خشک نیز افزایش پیدا کرد. به‌علاوه، دادبو و همکاران (٤) بیان کردند که وزن خشک اندام هوایی و ریشه کاهو با افزودن ۵ درصد بایوچار لجن فاضلاب به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. بایوچار تولید شده از لجن فاضلاب حاوی چندین ماده مغذی (N، P، K) ضروری برای رشد کاهو در خاک بود که بهبود وزن خشک کاهو و عملکرد زراعی پس از کاربرد بایوچار می‌تواند به جذب مواد غذایی موجود در بایوچار و مواد اولیه آن توسط گیاه اختصاص یابد. علاوه بر این، بایوچار مشتق شده از لجن غنی از کربن آلی بود، که می‌تواند کربن آلی خاک، ترسیب کربن و فعالیت میکروبی خاک را افزایش دهد و منجر به بهبود عملکرد گیاه شود.

غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، نیتروژن، فسفر و پتاسیم اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو تحت تأثیر تیمارهای مختلف کودی، در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شدند (جدول ٤).

نتایج این پژوهش نشان داد که با کاربرد بایوچار لجن فاضلاب، بایوچار کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات و

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

بایوچار کمپوست لجن حاوی کاه برنج و همچنین افزایش سطح کاربرد آن‌ها، غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو افزایش پیدا کرد. بیشترین میزان نیتروژن در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو به‌ترتیب با میانگین ۵/۰۲ و ۳/۰۴ درصد در تیمار بایوچار لجن فاضلاب یک درصد (BSS_1) حاصل شد که نسبت به کمترین میزان در تیمار شاهد (Blank)، به‌ترتیب به میزان ٦٣ درصد و ۲/۱ برابر افزایش یافت و همچنین از نظر میزان نیتروژن اندام هوایی، بین تیمارهای بایوچار لجن فاضلاب یک درصد (BSS_1)، لجن فاضلاب یک درصد (SS_1) و بایوچار کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات یک درصد (BCc_1) تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و در نیتروژن ریشه کاهو نیز بین تیمارهای بایوچار یک درصد (BCc_1، BSS_1، BCr_1) اختلاف معنی‌داری نبود. کمترین میزان فسفر در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو در تیمار شاهد (Blank) مشاهده شد که به‌ترتیب با کاربرد بایوچار لجن فاضلاب یک درصد (BSS_1) (که تفاوت معنی‌داری با تیمار BCc_1 نداشت) و بایوچار کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات یک درصد (BCc_1)، فسفر اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو به میزان ۲۳ و ٦٦ درصد افزایش پیدا کردند. همچنین بیشترین میزان پتاسیم در اندام هوایی کاهو با میانگین ۵/۵۲ درصد به تیمار بایوچار کمپوست لجن حاوی کاه برنج یک درصد (BCr_1) و بیشترین میزان پتاسیم در ریشه کاهو با میانگین ۱/۸۰ درصد به تیمار بایوچار کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات یک درصد (BCc_1) اختصاص یافت که تفاوت معنی‌داری بین این دو تیمار در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو وجود نداشت و در مقایسه با کمترین میزان پتاسیم در تیمار شاهد (Blank)، به‌ترتیب به میزان ۲۷ درصد و ۱/۱٤ برابر افزایش یافتند که تفاوت معنی‌داری از لحاظ پتاسیم ریشه بین تیمارهای شاهد و لجن فاضلاب نیم درصد ($SS_{0.5}$) مشاهده نشد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان به تأثیر بیشتر بایوچار لجن فاضلاب و بایوچار کمپوست‌های لجن فاضلاب در سطح یک درصد نسبت به سطح نیم درصد و سایر تیمارها در افزایش نیتروژن، فسفر و پتاسیم اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو پی برد، بدین صورت که هر چه سطح بایوچارها افزایش پیدا کرد غلظت این عناصر غذایی نیز دچار افزایش شد که نسبت به لجن فاضلاب و کمپوست‌های آن، این افزایش بیشتر بود (جدول ۵). با تبدیل لجن فاضلاب و کمپوست‌های آن به بایوچار ممکن است غلظت برخی عناصر از جمله نیتروژن کاهش یابد ولی بایوچارها با سایر تأثیرات مثبتی که دارند (با CEC بالای خود سبب جذب و فراهمی عناصر برای گیاه شده و شرایط خاک را بهبود می‌بخشند)، سبب افزایش غلظت عناصر غذایی مانند نیتروژن در گیاه می‌شوند. لجن فاضلاب و کمپوست‌های آن دارای غلظت بالایی از عناصر پرمصرف هستند (۲۳)، مخصوصاً بایوچار آنها که غنی از نیتروژن، فسفر و پتاسیم است بنابراین علت نتایج به‌دست آمده را می‌توان تأثیر مستقیم این سه نوع بایوچار در تأمین عناصر ضروری گیاه دانست همچنین بایوچار به‌دلیل گروه‌های عاملی کربوکسیل، هیدروکسیل و ... که دارد، دارای بار سطحی منفی بوده و عناصر غذایی را جذب و از اتلاف آن‌ها جلوگیری می‌کند و با فراهمی این عناصر منجر به افزایش جذب مواد مغذی توسط گیاه می‌شوند و درنتیجه به‌صورت غیرمستقیم نیز عناصر را در اختیار گیاه قرار می‌دهند (۱۸ و ٤۱). نتایج بدست آمده از مطالعهٔ حاضر با نتایج مطالعهٔ لال عرب و همکاران (۱۹) در خصوص افزایش معنی‌دار غلظت نیتروژن در اندام هوایی گیاه با کاربرد بایوچار مطابقت داشت. سوزا و فیگوئریدو (۳۸) اثرات بایوچار لجن فاضلاب بر حاصلخیزی خاک و رشد تربچه را مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه گرفتند که غلظت نیتروژن در برگ تربچه با افزایش سطح بایوچار لجن فاضلاب تا ٤۰ گرم در کیلوگرم، افزایش یافت. این افزایش غلظت نیتروژن به‌دلیل سطوح بالای نیتروژن در بایوچار بود. غلظت فسفر برگ تربچه نیز با افزایش سطح کاربرد بایوچار لجن فاضلاب افزایش یافته و با کاربرد ۲۰ گرم در کیلوگرم بایوچار، غلظت فسفر سه برابر بیشتر از شاهد شد. فروهر و همکاران (۸) در پژوهشی با عنوان اثر کاربرد بایوچارهای مختلف و مواد اولیه آن‌ها بر رشد گیاه ذرت و فراهمی پتاسیم در یک خاک آهکی دریافتند که کاربرد بایوچار لجن فاضلاب و همچنین بایوچار کمپوست سبب افزایش غلظت پتاسیم اندام هوایی گیاه ذرت

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

جدول ٥. مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف کودی بر غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم گیاه کاهو (درصد)

تیمارها	نیتروژن		فسفر		پتاسیم	
	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه
Blank	٣/٠٨^{f}	٠/٩٨^{g}	٠/٣٠^{g}	٠/١٢١^{i}	٤/٣٥^{j}	٠/٨٤^{f}
$SS_{0.5}$	٣/٦٨^{cd}	٢/١٠^{e}	٠/٣٣^{de}	٠/١٢٣^{hi}	٤/٦١^{i}	٠/٩٥^{f}
SS_{1}	٤/٩٦^{a}	٢/٨٠^{b}	٠/٣٤^{d}	٠/١٣٦^{g}	٤/٩١^{efg}	١/٣٤^{d}
$BSS_{0.5}$	٤/٠١^{bc}	٢/٤٨^{c}	٠/٣٥^{bc}	٠/١٥٥^{de}	٤/٧٢^{hi}	١/١٧^{e}
BSS_{1}	٥/٠٢^{a}	٣/٠٤^{a}	٠/٣٧^{a}	٠/١٧٤^{b}	٥/٠٧^{def}	١/٤٨^{c}
$Cr_{0.5}$	٣/١٣^{ef}	١/١٠^{fg}	٠/٣١^{fg}	٠/١٣٥^{g}	٤/٨٣^{gh}	١/٢٧^{de}
Cr_{1}	٣/٩٥^{bc}	٢/٣٦^{cd}	٠/٣٤^{d}	٠/١٤٦^{f}	٥/٠٩^{de}	١/٦٧^{b}
$BCr_{0.5}$	٣/٤٨^{de}	٢/٤٦^{c}	٠/٣٥^{c}	٠/١٥٠^{ef}	٥/٢٩^{bc}	١/٦٦^{b}
BCr_{1}	٤/٢٣^{b}	٢/٩٣^{ab}	٠/٣٦^{b}	٠/١٧٢^{bc}	٥/٥٢^{a}	١/٨٠^{a}
$Cc_{0.5}$	٣/١٤^{ef}	١/٢٢^{f}	٠/٣٢^{ef}	٠/١٣٢^{gh}	٤/٨٨^{fgh}	١/٢٧^{de}
Cc_{1}	٤/٠١^{bc}	٢/٢٧^{d}	٠/٣٥^{bc}	٠/١٤٩^{ef}	٥/١٧^{cd}	١/٧٠^{ab}
$BCc_{0.5}$	٣/٥٣^{d}	٢/٢٤^{de}	٠/٣٦^{bc}	٠/١٦٣^{cd}	٥/٢٥^{bcd}	١/٤٩^{c}
BCc_{1}	٤/٨١^{a}	٢/٩٠^{ab}	٠/٣٧^{a}	٠/٢٠١^{a}	٥/٤٠^{ab}	١/٨٠^{a}

میانگین‌هایی که در هر تیمار حداقل یک حرف مشترک داشته باشند تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ٥ درصد بر اساس آزمون LSD ندارند.
(Blank: شاهد SS: لجن فاضلاب در دو سطح نیم و یک درصد BSS: بایوچار لجن فاضلاب در دو سطح نیم و یک درصد Cr: کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه و کلش برنج در دو سطح نیم و یک درصد BCr: بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه و کلش برنج در دو سطح نیم و یک درصد Cc: کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات در دو سطح نیم و یک درصد BCc: بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات در دو سطح نیم و یک درصد.

نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین دادبو و همکاران (٤) بیان کردند بایوچار تولید شده از لجن فاضلاب حاوی چندین ماده مغذی (N، P، K) ضروری برای رشد کاهو در خاک بوده و کاربرد بایوچار می‌تواند منجر به جذب مواد غذایی موجود در بایوچار و مواد اولیه آن توسط گیاه شود. در راستای این پژوهش تعداد دیگری از مطالعات نیز نتایجی نسبتاً مشابه را بیان کردند. حبیبی و همکاران (١١) دریافتند که در مجموع با کاربرد بایوچار غلظت عناصر اندازه‌گیری شده گیاه افزایش یافت و بیشترین غلظت عنصر پتاسیم در بالاترین سطوح بایوچار گزارش شد که بیانگر غنی بودن بایوچار از عناصر غذایی مخصوصاً پتاسیم بوده که از عناصر پرمصرف به‌شمار می‌رود. بولحسنی و همکاران (٢) در پژوهشی نتیجه گرفتند که استفاده از بایوچار به‌عنوان یک ماده اصلاح‌کننده خاک و منبع غنی از عناصر غذایی، می‌تواند تا حد زیادی سبب افزایش فراهمی پتاسیم و نیتروژن در گیاه اسفناج شود.

غلظت مس و منگنز اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو

با توجه به جدول تجزیه واریانس داده‌ها، اثر تیمارهای مختلف کودی بر میزان مس اندام هوایی در سطح احتمال ٥ درصد و بر میزان مس ریشه و منگنز اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو در سطح احتمال ١ درصد تأثیر معنی‌داری داشتند (جدول ٦).

بیشترین میزان مس در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو در تیمار بایوچار کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات یک درصد (BCc_{1}) به‌دست آمد و نسبت به تیمار شاهد (Blank)، به‌ترتیب

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

جدول ٦. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای مختلف کودی بر غلظت عناصر مس، منگنز، آهن و روی گیاه کاهو

منابع تغییرات	درجه آزادی	مس		منگنز		آهن		روی	
		اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه
بلوک	٢	١/٤٧	٠/٠٠١	٠/٣٤	٠/٧٥	٥٠/٣	٣٢٠	١/٦٧	١/٢٦
تیمار	١٢	٧/٦٢*	٦٤/٥**	١٠/٣**	٧٩٠**	٣٤٣٢**	٩٩٨٧٠٨**	١٠٩**	٥٥/٧**
خطای آزمایشی	٢٤	٣/٣٩	٠/٣٥	٠/٧٦	٩/٠١	٢٦٩	٥٨٦	٠/٤٧	٠/٤٠
ضریب تغییرات (٪)		١٠/٠٢	٣/٨١	٢/٢٧	٣/١١	٧/٦٢	٠/٨٩	١/٣٩	١/٩٧

** و * به ترتیب بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ١ و ٥ درصد می‌باشد.

به میزان ٣٥ درصد و ١/٦٦ برابر افزایش داشتند که برای بیشترین میزان مس در اندام هوایی کاهو بین تیمارهای بایوچار یک درصد (BCr_1، BSS_1، BCc_1) تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و تا حدودی نزدیک بهم بودند. طبق نتایج مقایسه میانگین، تیمار بایوچار کمپوست لجن حاوی کاه برنج یک درصد (BCr_1) با میانگین ٤٣/٢ و ١٣٥ میلی‌گرم بر کیلوگرم، به‌ترتیب بیشترین میزان منگنز در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو را دارا بود که در مقایسه با تیمار شاهد (Blank) حاوی کمترین میزان، منگنز اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو به ترتیب به میزان ١٩ و ٧٦ درصد افزایش یافتند که تفاوت معنی‌داری از لحاظ منگنز ریشه بین تیمار شاهد و تیمار لجن فاضلاب نیم درصد ($SS_{0.5}$) وجود نداشت و پس از تیمار شاهد، کمترین میزان منگنز در ریشه به تیمار لجن فاضلاب نیم درصد ($SS_{0.5}$) تعلق داشت. درکل از آنجایی‌که خود لجن فاضلاب و همچنین کمپوست‌های آن غنی از عناصر غذایی بوده و با تبدیل به بایوچار غلظت عناصر غذایی آن‌ها نیز افزایش می‌یابد می‌توان دریافت که بایوچار لجن فاضلاب و بایوچار کمپوست‌های لجن فاضلاب باعث افزایش غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو شده که این افزایش با بالا رفتن سطوح کاربرد و در سطح یک درصد بیشتر از بقیه بوده است (جدول ٧). از آنجایی‌که محدوده نرمال عنصر مس در ریشه و اندام هوایی کاهو به‌ترتیب ١٠–٥ و ٥–٢ میلی‌گرم بر کیلوگرم و محدوده نرمال عنصر منگنز نیز در ریشه و اندام هوایی کاهو به ترتیب ١٠٠–٥٠ و ٤٠–٢٠ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (٢٥) می‌توان مشاهده کرد که افزایش غلظت عنصر مس از حد نرمال فراتر رفته ولی در مورد منگنز همه داده‌ها تا حدودی در محدوده نرمال بودند. با توجه به اینکه لجن فاضلاب و کمپوست‌های لجن فاضلاب سرشار از ریزمغذی‌های ضروری برای رشد گیاه هستند (٥ و ١٣) با تبدیل آن‌ها به بایوچار، غلظت این عناصر نیز در بایوچار افزایش یافته و بعلاوه با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و ایجاد کمپلکس‌های آلی در افزایش فراهمی عناصر غذایی در خاک و جذب آن‌ها در گیاه مؤثر است که می‌تواند دلیل محکمی برای تأثیر بهتر بایوچار در افزایش غلظت این عناصر باشد (٣٩). سوزا و فیگوئریدو (٣٨) اثرات بایوچار لجن فاضلاب بر حاصلخیزی خاک و رشد تربچه را مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه گرفتند که غلظت مس در برگ تربچه با افزودن ١٠ گرم در کیلوگرم بایوچار لجن فاضلاب به خاک، افزایش یافت. به‌طور کلی، بایوچار توانست در مدت کوتاهی مواد مغذی را به گیاهان برساند که درنتیجه باعث افزایش بهره‌وری تربچه شد. زی و همکاران (٤٣) در پژوهش خود نتیجه گرفتند که غلظت مس در ریشه در پاسخ به افزایش سطح کاربرد بایوچار لجن فاضلاب، افزایش یافت. همچنین نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های زی و همکاران (٤٤) و فاریا و همکاران (٧) در مورد تأثیر کاربرد بایوچار لجن فاضلاب بر رشد و تولید ذرت، تطبیق داشت که افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف از جمله مس و منگنز با کاربرد بایوچار لجن فاضلاب را نشان دادند. درکل کاربرد بایوچار لجن فاضلاب به‌دلیل غلظت بالایی که از عناصری همچون مس و منگنز دارد، می‌تواند جایگزین کودهای معدنی (از جمله عناصر کم‌مصرف) برای تولید ذرت شود.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

جدول ۷. مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف کودی بر غلظت عناصر مس، منگنز، آهن و روی کاهو (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

تیمارها	مس		منگنز		آهن		روی	
	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه
Blank	۱۵/۷^{d}	۹/۵۷^{i}	۳۶/۳^{g}	۷۶/۷^{g}	۱۶۴^{f}	۱۹۱۵^{j}	۳۹/۹^{i}	۲۵/۵^{h}
SS$_{0.5}$	۱۶/۸^{cd}	۱۱/۷^{h}	۳۶/۸^{fg}	۷۸/۷^{g}	۱۸۱^{ef}	۲۰۴۳^{i}	۴۴/۵^{fg}	۲۶/۶^{g}
SS$_{1}$	۱۷/۹^{bcd}	۱۵/۹^{e}	۳۸/۶^{cde}	۹۳/۵^{e}	۲۰۴^{de}	۲۴۹۹^{f}	۵۴/۶^{b}	۳۶/۱^{b}
BSS$_{0.5}$	۱۸/۵^{abcd}	۱۲/۸^{fg}	۳۷/۸^{def}	۸۸/۲^{f}	۲۳۶^{bc}	۲۹۳۴^{e}	۴۷/۷^{e}	۳۴/۰^{c}
BSS$_{1}$	۲۰/۲^{ab}	۲۲/۲^{b}	۳۹/۵^{bc}	۱۱۲^{b}	۲۷۸^{a}	۳۶۹۹^{a}	۵۸/۵^{a}	۳۷/۳^{a}
Cr$_{0.5}$	۱۶/۸^{cd}	۱۱/۷^{h}	۳۷/۷^{defg}	۸۸/۴^{f}	۱۸۴^{ef}	۲۰۲۷^{i}	۴۲/۶^{h}	۲۶/۶^{g}
Cr$_{1}$	۱۷/۲^{bcd}	۱۳/۸^{f}	۴۰/۴^{b}	۱۰۹^{bc}	۲۰۴^{de}	۲۹۱۲^{e}	۵۳/۰^{c}	۳۲/۹^{d}
BCr$_{0.5}$	۱۸/۳^{abcd}	۱۱/۷^{h}	۳۹/۱^{bcd}	۱۰۷^{c}	۱۹۵^{e}	۲۳۸۵^{g}	۴۵/۷^{f}	۲۹/۸^{ef}
BCr$_{1}$	۱۹/۹^{ab}	۱۸/۰^{c}	۴۳/۲^{a}	۱۳۵^{a}	۲۴۵^{bc}	۳۳۱۸^{c}	۵۳/۸^{bc}	۳۷/۲^{a}
Cc$_{0.5}$	۱۷/۳^{bcd}	۱۲/۷^{g}	۳۶/۴^{fg}	۸۷/۲^{f}	۱۸۶^{ef}	۲۲۶۹^{h}	۴۴/۱^{g}	۲۹/۷^{f}
Cc$_{1}$	۱۹/۵^{abc}	۱۸/۰^{c}	۳۸/۸^{cde}	۸۹/۶^{ef}	۲۳۶^{bc}	۳۰۰۷^{d}	۵۳/۱^{c}	۳۶/۱^{b}
BCc$_{0.5}$	۱۸/۹^{abc}	۱۷/۰^{d}	۳۷/۵^{efg}	۸۷/۲^{f}	۲۲۸^{cd}	۲۹۹۸^{d}	۵۱/۳^{d}	۳۰/۸^{e}
BCc$_{1}$	۲۱/۲^{a}	۲۵/۵^{a}	۳۹/۱^{bcd}	۱۰۰^{d}	۲۵۶^{ab}	۳۴۱۵^{b}	۵۸/۱^{a}	۳۶/۱^{b}

میانگین‌هایی که در هر تیمار حداقل یک حرف مشترک داشته باشند تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون **LSD** ندارند.
(**Blank**: شاهد **SS**: لجن فاضلاب در دو سطح نیم و یک درصد **BSS**: بایوچار لجن فاضلاب در دو سطح نیم و یک درصد **Cr**: کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه و کلش برنج در دو سطح نیم و یک درصد **BCr**: بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه و کلش برنج در دو سطح نیم و یک درصد **Cc**: کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات در دو سطح نیم و یک درصد **BCc**: بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات در دو سطح نیم و یک درصد)

غلظت آهن و روی اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو

براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۶، اثر تیمارهای مختلف کودی بر میزان آهن و روی اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر معنی‌داری داشتند. با مشاهده نتایج مقایسه میانگین می‌توان دریافت که تیمار بایوچار لجن فاضلاب یک درصد (BSS$_{1}$) دارای بیشترین میزان آهن در اندام هوایی (۲۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و ریشه گیاه کاهو (۳۶۹۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود، که در قیاس با تیمار شاهد (Blank) حاوی کمترین غلظت آهن، میزان آهن اندام هوایی و ریشه به ترتیب ۶۹ و ۹۳ درصد افزایش پیدا کردند و از لحاظ آهن اندام هوایی، دو تیمار بایوچار لجن فاضلاب یک درصد (BSS$_{1}$) و بایوچار کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات یک درصد (BCc$_{1}$) اختلاف و تفاوت معنی‌داری باهم نداشتند. همچنین کمترین میزان روی در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو، در تیمار شاهد (Blank) مشاهده شد که با کاربرد و افزایش سطح بایوچار لجن فاضلاب به یک درصد (BSS$_{1}$)، میزان روی در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو ۴۶ درصد افزایش پیدا کردند و از لحاظ میزان روی اندام هوایی، دو تیمار بایوچار لجن فاضلاب یک درصد (BSS$_{1}$) و بایوچار کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات یک درصد (BCc$_{1}$) و همچنین از لحاظ میزان روی ریشه، دو تیمار بایوچار لجن فاضلاب یک درصد (BSS$_{1}$) و بایوچار کمپوست لجن حاوی کاه برنج یک درصد (BCr$_{1}$) اختلاف و تفاوت معنی‌داری باهم نداشتند. طبق نتایج به‌دست آمده می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که با تبدیل لجن فاضلاب به بایوچار میزان غلظت

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

جدول ۸. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای مختلف کودی بر غلظت عناصر سنگین گیاه کاهو

منابع تغییرات	درجه آزادی	سرب		نیکل		کادمیم	
		اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه
بلوک	۲	۰/۰۰۶	۰/۳۲	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۰۰۴	۰/۰۳
تیمار	۱۲	**۳۲/۱	**۴۲/۶	**۱/۵۱	**۲۰/۲	**۰/۵۸	**۰/۸۷
خطای آزمایشی	۲۴	۰/۸۹	۰/۸۲	۰/۰۸	۰/۸۴	۰/۰۱۰	۰/۰۱
ضریب تغییرات (٪)		۸/۴۲	۵/۰۱	۹/۸۳	۷/۰۷	۶/۲۳	۴/۸۸

** بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد می‌باشد.

عناصر غذایی آن از جمله آهن و روی نیز افزایش یافته و کاربرد بایوچار لجن فاضلاب مخصوصاً در سطح یک درصد نسبت به سایر تیمارها در افزایش غلظت عناصر آهن و روی اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو موثرتر بود (جدول ۷). به‌علاوه، محدوده نرمال عنصر آهن در ریشه و اندام هوایی کاهو به‌ترتیب ۲۰۰–۱۰۰ و ۵۰–۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و محدوده نرمال عنصر روی نیز در ریشه و اندام هوایی کاهو به ترتیب ۵۰–۲۰ و ۲۰–۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (۲۵) می‌توان مشاهده کرد که افزایش غلظت عنصر آهن در ریشه و اندام هوایی و افزایش غلظت عنصر روی در اندام هوایی از حد نرمال فراتر رفته ولی در مورد غلظت عنصر روی در ریشه همه داده‌ها تا حدودی در محدوده نرمال بودند. بایوچار علاوه بر دارا بودن غلظت بالایی از عناصر کم‌مصرف و تأمین مستقیم عناصری نظیر آهن و روی گیاه، همانند یک کود آلی عمل کرده و با بهبود pH، عناصر کم‌مصرف همچون آهن و روی را به فرم قابل جذب درآورده و علاوه بر نگهداری این عناصر روی سطوح خود با توجه به سطح ویژه بالایی که دارد، از اتلاف آن جلوگیری و در اختیار گیاه قرار می‌دهد درنتیجه به‌صورت غیرمستقیم نیز باعث افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف در ریشه و اندام هوایی گیاه می‌شود (۲ و ٦). زی و همکاران (٤٤) در پژوهشی با عنوان تأثیر کاربرد بایوچار لجن فاضلاب در خاک قلیایی بر رشد ذرت دریافتند که کاربرد ۱/۵ تن بایوچار لجن فاضلاب در هکتار سبب افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف در گیاه ذرت شد. در مطالعه‌ای مشابه، فلاح طوله‌کلایی و همکاران (٦) نیز دریافتند که با افزایش سطح بایوچار نسبت به کمپوست، میزان روی برگ برنج افزایش یافت. فاریا و همکاران (۷) در یک آزمایش میدانی دو ساله، جایگزینی بایوچار لجن فاضلاب با کودهای معدنی برای تولید ذرت را بررسی کردند، آن‌ها دریافتند بایوچار منجر به جذب بیشتر مواد مغذی کم‌مصرف توسط گیاهان و عملکرد بالاتر ذرت شد. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج پژوهش صفرزاده شیرازی و همکاران (۳۲) در بحث افزایش معنی‌دار غلظت آهن اندام هوایی گیاه ریحان با کاربرد بایوچار، منطبق بود که غلظت بالای آهن در بایوچار لجن فاضلاب می‌تواند دلیل مناسبی برای آن باشد.

غلظت سرب، نیکل و کادمیم اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو

بر اساس جدول تجزیه واریانس داده‌ها، سرب، نیکل و کادمیم اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو تحت تأثیر تیمارهای مختلف کودی قرار گفته و در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شدند (جدول ۸).

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد بایوچارهای لجن فاضلاب، کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات و کمپوست لجن حاوی کاه برنج سبب کاهش غلظت عناصر سنگین در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو نسبت به کاربرد لجن فاضلاب خام شد. بیشترین میزان سرب، نیکل و کادمیم در اندام هوایی به‌ترتیب با میانگین ۱۹/۳، ٤/۲ و ۲/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در ریشه گیاه کاهو به‌ترتیب با میانگین ۲۳/٤، ۱٦/٥٤ و ۲/۸۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم همگی در تیمار لجن فاضلاب یک درصد (SS_1) حاصل شد که نسبت به تیمار شاهد (Blank)، غلظت عناصر سنگین در

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]
[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

جدول ۹. مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف کودی بر غلظت عناصر سرب، نیکل و کادمیم گیاه کاهو (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

تیمارها	سرب		نیکل		کادمیم	
	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه
Blank	۸/۱۸^{g}	۱۱/۷^{g}	۲/۲۲^{e}	۹/۵۷^{f}	۰/۴۷^{e}	۰/۷۴^{h}
SS0.5	۱۳/۱^{c}	۲۰/۷^{b}	۳/۰۷^{b}	۱۵/۶^{ab}	۱/۹۱^{b}	۲/۶۶^{ab}
SS1	۱۹/۳^{a}	۲۳/۴^{a}	۴/۲۰^{a}	۱۶/۵^{a}	۲/۲۰^{a}	۲/۸۲^{a}
BSS0.5	۹/۷۲^{defg}	۱۸/۱^{c}	۲/۶۶^{bcde}	۱۲/۴^{d}	۱/۶۰^{c}	۲/۲۸^{de}
BSS1	۱۰/۳^{def}	۱۸/۶^{c}	۲/۹۳^{bc}	۱۴/۰^{bc}	۱/۶۵^{c}	۲/۲۹^{de}
Cr0.5	۱۱/۰^{d}	۱۸/۶^{c}	۳/۰۵^{b}	۱۲/۹^{cd}	۱/۸۴^{b}	۲/۶۰^{bc}
Cr1	۱۶/۴^{b}	۲۲/۸^{a}	۴/۰۱^{a}	۱۵/۹^{a}	۱/۹۸^{b}	۲/۶۶^{ab}
BCr0.5	۸/۹۲^{fg}	۱۴/۳^{ef}	۲/۴۱^{de}	۹/۶۳^{f}	۱/۳۰^{d}	۱/۹۱^{g}
BCr1	۹/۳۵^{efg}	۱۵/۹^{d}	۲/۴۲^{de}	۱۰/۶^{ef}	۱/۵۸^{c}	۲/۱۲^{ef}
Cc0.5	۱۰/۷^{de}	۲۰/۲^{b}	۲/۷۳^{bcd}	۱۵/۰^{ab}	۱/۸۹^{b}	۲/۴۴^{cd}
Cc1	۱۱/۱^{d}	۲۲/۳^{a}	۴/۱۵^{a}	۱۵/۵^{ab}	۱/۹۷^{b}	۲/۷۶^{ab}
BCc0.5	۸/۶۷^{g}	۱۳/۳^{f}	۲/۲۴^{de}	۹/۷۸^{f}	۱/۲۹^{d}	۲/۲۳^{ef}
BCc1	۸/۹۴^{fg}	۱۵/۴^{de}	۲/۵۲^{cde}	۱۱/۵^{de}	۱/۵۶^{c}	۲/۰۷^{fg}

میانگین‌هایی که در هر تیمار حداقل یک حرف مشترک داشته باشند تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD ندارند. (Blank: شاهد SS: لجن فاضلاب در دو سطح نیم و یک درصد BSS: بایوچار لجن فاضلاب در دو سطح نیم و یک درصد Cr: کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه و کلش برنج در دو سطح نیم و یک درصد BCr: بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با کاه و کلش برنج در دو سطح نیم و یک درصد Cc: کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات در دو سطح نیم و یک درصد BCc: بایوچار کمپوست لجن فاضلاب اصلاح شده با سرشاخه مرکبات در دو سطح نیم و یک درصد)

اندام هوایی به‌ترتیب به میزان ۱/۳۵ برابر، ۸۹ درصد و ۳/۶۵ برابر و در ریشه نیز به‌ترتیب به میزان ۱۰۰ و ۷۲ درصد و ۲/۸ برابر افزایش یافتند. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان به تأثیر بیشتر لجن فاضلاب مخصوصاً در سطح یک درصد نسبت به سطح نیم درصد و سایر تیمارها در افزایش سرب، نیکل و کادمیم اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو پی برد، که با تبدیل لجن فاضلاب به کمپوست و همچنین بایوچار، غلظت عناصر سنگین مخصوصاً در بایوچارها کاهش یافت (جدول ۹). همچنین محدوده نرمال عنصر سرب در ریشه و اندام هوایی کاهو به‌ترتیب ۵۰–۲۰ و ۱۰–۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، محدوده نرمال عنصر نیکل در ریشه و اندام هوایی کاهو به‌ترتیب ۵۰–۲۰ و ۳–۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و محدوده نرمال عنصر کادمیم نیز در ریشه و اندام هوایی کاهو به ترتیب ۵–۱ و ۰/۵–۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (۲۵) بنابراین می‌توان مشاهده کرد که افزایش غلظت عنصر سرب درمورد اکثر داده‌ها در محدوده نرمال بوده بجز تیمار لجن فاضلاب که تا حدودی از حد نرمال فراتر رفته، در مورد عنصر نیکل هم بیشتر داده‌ها تا حدودی در محدوده نرمال بودند و درنهایت برای افزایش غلظت عنصر کادمیم نیز داده‌های ریشه کاهو در محدوده نرمال بودند ولی در مورد غلظت کادمیم در اندام هوایی کاهو، داده‌ها فراتر از حد نرمال بودند. با تبدیل لجن فاضلاب به کمپوست و همچنین تبدیل آن‌ها به بایوچار، عناصر سنگین لجن فاضلاب ناپویا و تثبیت شده و غلظت عناصر سنگین در گیاه کاهش می‌یابد (۳۰). در راستای این پژوهش تعداد دیگری از مطالعات نیز نتایجی نسبتاً مشابه را بیان کردند. نهار و حوسن (۲۶) در مطالعه‌ی خود با عنوان تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر خواص خاک، رشد هویج و جذب فلزات سنگین نشان دادند که

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702] [Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

کاربرد لجن فاضلاب سبب افزایش میزان فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم، نیکل و کروم در خاک و گیاه شد. کاربرد لجن فاضلاب در خاک، تولید کمپلکس‌های آلی محلول با فلزات می‌کند که این کمپلکس‌ها بسیار متحرک بوده و در مقایسه با یون‌های فلزی آزاد به سهولت به‌وسیله‌ی گیاهان جذب می‌شوند، همچنین علت افزایش جذب عناصر فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی با کاربرد لجن، ممکن است افزایش غلظت عناصر مذکور در خاک با کاربرد لجن فاضلاب باشد که باعث جذب بیشتر این عناصر به وسیله گیاه می‌شود و طبق نتایج، غلظت فلزات سنگین در ریشه گیاه کاهو بیشتر از اندام هوایی بود، این مؤید عدم قابلیت تحرک بالای عناصر سنگین در گیاه و انتقال به اندام هوایی بود (۳۶). پیروتی و افیونی (۳۰) در پژوهشی با عنوان تأثیر لجن فاضلاب و بایوچار حاصل از آن بر جذب کادمیم توسط گیاه ذرت و اسفناج نشان دادند که افزودن بایوچار و لجن فاضلاب باعث کاهش معنی‌دار جذب فلزات سنگین در گیاه و خاک می‌شود به‌دلیل اینکه این مواد باعث غیر پویایی شدن کادمیم در خاک می‌شوند به‌طوری‌که استفاده از بایوچار و لجن غلظت Cd-DTPA را در خاک کاهش داد. با توجه به نتایج این پژوهش میتوان از بایوچار به‌عنوان تثبیت کننده عناصرسنگین در خاک استفاده کرد. خان محمدی و همکاران (۱۶) اثر لجن فاضلاب و بایوچار آن بر خواص شیمیایی دو خاک آهکی و عملکرد ساقه ذرت را بررسی کردند، آنها دریافتند که کاربرد بایوچار لجن فاضلاب باعث کاهش جذب سرب توسط اندام هوایی ذرت شد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که اگر چه کاربرد لجن فاضلاب و کمپوست‌های کاه برنج و سرشاخه مرکبات، منجر به بهبود عملکرد و افزایش غلظت عناصر غذایی در کاهو شد، ولی کاربرد بایوچار لجن فاضلاب، بایوچار کمپوست لجن حاوی کاه برنج و بایوچار کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات مخصوصاً در سطح یک درصد، بیشترین میزان وزن خشک را در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو نشان داد و همچنین باعث افزایش غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، مس، منگنز، آهن و روی هم در اندام هوایی و هم در ریشه گیاه کاهو شده‌است که می‌تواند به‌دلیل غنی‌تر بودن بایوچارها از عناصر غذایی نسبت به لجن فاضلاب و بهبود شرایط خاک و رشد گیاه با خصوصیات منحصر به فردی که دارد باشد. همچنین کاربرد بایوچارهای لجن فاضلاب و کمپوست‌ها سبب کاهش غلظت سرب، نیکل و کادمیم در اندام هوایی و ریشه گیاه کاهو در مقایسه با لجن فاضلاب شده است که با کاربرد لجن فاضلاب حداکثر غلظت عناصر سنگین در گیاه به‌دست آمد. با تبدیل لجن فاضلاب به کمپوست و مخصوصاً بایوچار آن‌ها عناصر سنگین موجود در لجن فاضلاب تثبیت شده و به فرم غیرقابل جذب تبدیل و توسط گیاه جذب نمی‌شوند. تولید و استفاده از بایوچار لجن فاضلاب با توجه به تولید قابل–توجه لجن فاضلاب و در دسترس بودن آن کاملاً مقرون به‌صرفه بوده و علاوه بر برطرف کردن عناصر سنگین و عوامل بیماری‌زا، مشکل دفع آن‌را نیز برطرف و ظرفیت افزایش حاصلخیزی خاک و درنتیجه افزایش عملکرد محصول را دارد و می‌توان به‌همراه کودهای شیمیایی استفاده شده و مصرف کودهای شیمیایی و هزینه آن‌را کاهش داد. درنتیجه کودهای آلی اقتصادی و سازگار با محیط زیست تولید خواهند شد. بنابراین با توجه به پژوهش انجام شده بایوچار لجن فاضلاب و بایوچارهای کمپوست‌ها تأثیر بهتری نسبت به ماده خام خود یعنی لجن فاضلاب، کمپوست لجن حاوی کاه برنج و کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات داشته و کاربرد سطح یک درصد بایوچارهای لجن فاضلاب، کمپوست لجن حاوی کاه برنج و کمپوست لجن حاوی سرشاخه مرکبات جهت دستیابی به حداکثر عملکرد و وزن خشک و حداکثر غلظت عناصر پرمصرف و کم‌مصرف و کاهش جذب عناصر سنگین توسط گیاه کاهو توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله از طرح پژوهشی با کد ۱۶–۱۴۰۲–۰۱ مصوب در جلسه ۲۳۴ شورای پژوهشی و فناوری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری استخراج شده است. بدینوسیله نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه به عمل آورند.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

منابع مورد استفاده

1. Benton, J. and V. W. Case. 1990. Sampling, handling and analyzing plant tissue samples. In: R. L. Westerman (ed.), Soil Testing and Plant Analysis. Soil Science Society of America, Inc. Madison.
2. Bolhasani, Z., A. M. Ronaghi, R. Ghasemi and M. Zarei. 2019. Influence of rice-husk derived biochar and growth promoting rhizobacteria on the yield and chemical composition of spinach in soil under salinity stress. *Journal of Soil Research* 33 (3): 335-348. (In Farsi).
3. Bower, C. A., R. Reitemeier and M. Fireman. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science* 73 (4): 251-262.
4. Dadebo, D. M., G. Ibrahim, M. Fujii and M. Nasr. 2024. Biochar production from wastewater sludge for application in sustainable lettuce plant cultivation and climate change mitigation. *Biology and Life Sciences Forum* 30 (10): 1-7.
5. Eid, E. M., A. F. El-Bebani, S. A. Alrumman, A. E. Hesham, M. A. Taher and K. F. Fawy. 2017. Effects of different sewage sludge applications on heavy metal accumulation, growth and yield of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *International Journal of Phytoremediation* 19 (4): 340-347.
6. Fallah Tolekolai, S., M. A. Bahmanyar, F. Sadeghzadeh and S. M. Emadi. 2016. Effects of municipal solid waste compost and two biochar type's application on the concentration of some macro nutrients in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Soil Management and Sustainable* 6 (1): 145-159. (In Farsi).
7. Faria, W. M., C. C. De Figueiredo, T. R. Coser, A. T. Vale and B. G. Schneider. 2018. Is sewage sludge biochar capable of replacing inorganic fertilizers for corn production? evidence from a two-year field experiment. *Archives of Agronomy and Soil Science* 64 (4): 505-519.
8. Forouhar, M., R. Khorasani, A. Fotovat, H. Shariatmadari and K. Khavazi. 2020. The effects of biochars and their feedstock and corn growth and availability of potassium in a calcareous soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 9 (4): 89-107. (In Farsi).
9. Gee, G. W. and J. Bauder. 1986. Particle size analysis. pp. 384-412, In: A. Klute (ed.), Method of Soil Analysis. Madison, Wisconsin.
10. Ghorbani, M. and E. Amirahmadi. 2018. Effect of rice husk biochar on some physical characteristics of soil and corn growth in a loamy soil. *Journal of Soil Research* 32 (3): 305-318. (In Farsi).
11. Habibi, H., B. Motesharezadeh and H. A. Alikhani. 2017. Effect of biochar and biological treatments on nutrient elements content (P, K, Ca, Mg, Fe and Mn) of Amaranthus in oil polluted soil. *Iran Water and Soil Research* 48 (2): 369-384. (In Farsi).
12. Jakubus, M. and E. Bakinowska. 2018. Visualization of long-term quantitative changes of microelements in soils amended with sewage sludge compost evaluated with two extraction solutions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 49 (11): 1355-1369.
13. Jayasinghe, G. Y. 2012. Composted sewage sludge as an alternative potting media for lettuce cultivation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 43: 2878-2887.
14. Joseph, S. D., M. Camps-Arbestation, Y. Lin, P. Munroe, C. H. Chia, J. Hook, L. Van Zwieten, S. Kimber, A. Cowie, B. P. Singh, J. Lehman, N. Foidl, R. J. Smernik and J. F. Amnnetie. 2010. An investigation the reactions of biochar in soil. *Australian Journal of Soil Research* 48: 501-515.
15. Karami, M., M. Afyuni, Y. Rezaee nejad and A. H. Khosh goftarmanesh. 2009.Cumulative and residual effects of sewage sludge on zinc and copper concentration in soil and wheat. *Journal of Crop Production and Processing* 12(46): 639-654. (In Farsi).
16. Khanmohammadi, Z., M. Afyuni and M. R. Mosaddeghi. 2017. Effect of sewage sludge and its biochar on chemical properties of two calcareous soils and maize shoot yield. *Archives of Agronomy and Soil Science* 63 (2): 198-212.
17. Lag-Brotons, A., I. Gómez, J. Navarro-Pedreño and J. Bartual-Martos. 2014. Effects of sewage sludge compost on *cynara cardunculus* L. cultivation in a mediterranean soil. *Compost Science and Utilization* 22 (1): 33-39.
18. Lai, L., M. R. Ismail, F. M. Muharam, M. M. Yusof, R. Ismail and N. M. Jaafar. 2017. Effects of rice straw biochar and nitrogen fertilizer on rice growth and yield. *Asian Journal of Crop Science* 9 (4): 159-166.
19. Lalarab, M., A. R. Astaraei and A. Lakzian. 2015. The effect of biochar on soybean plant growth characteristics and soil chemical properties. In Proceeding of 1st International Conference and the 4th National Conference on Environmental and Agricultural Research. Hamedan, Iran. pp. 1-9. (In Farsi).
20. Lindsay, W. and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of American Journal* 42: 421-428.
21. Mahmoud Soltani, Sh. and A. Abbasian. 2021. Simultaneous application effect of rice husk biochare and zinc sulfate fertilizer on yield, yield components of rice (*Oryza sativa* L.) hashemi cultivar and some soil chemical properties. *Iran Water and Soil Research* 52 (3): 707-719. (In Farsi).

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]

22. Malakouti, M. J., A. Bybordi and S. J. Tabatabaei. 2004. Balanced Fertilization of Vegetable Crops: An Approach to Enhance the Yield and Quality of Vegetables, Reduce Contaminants and Improve Human Health. Ministry of Jihad-e-Agriculture Press, Tehran. (In Farsi).
23. Manirakiza, N. and C. Şeker. 2020. Effects of compost and biochar amendments on soil fertility and crop growth in a calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition* 43 (20): 3002-3019.
24. McLean, E. O. 1982. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
25. Mensah, E., N. Kyei-baffour, E. Ofori and G. Obeng. 2009. Influence of human activities and land use on heavy metal concentrations in irrigated vegetables in ghana and their health implications. pp. 9-14, In: E. K. Yanful (ed.). Appropriate Technologies for Environmental Protection in the Developing world. Springer.
26. Nahar, N. and Sh. Hossen. 2021. Influence of sewage sludge application on soil properties, carrot growth and heavy metal uptake. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 52 (1): 1-10.
27. Nelson, R. E. 1982. Carbonate and gypsum. In method of soil analysis. pp. 181-198, In: R. H. miller and D. R. Keeney. (eds), Chemical and Microbiological Properties. Madison, Wisconsin.
28. Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp. 539-579, In: D. R. Keeney, A. L. Miller and A. L. Page (eds), Method of Soil Analysis. Chimical and Microbiological Propertir, Second edition. American Society of Agronomy, Madison.
29. Olsen, S. R. and L. E. Sommers. 1990. Phosphorus. Madison, Wisconsin.
30. Pirooti, M. 2016. The Effect of sewage sludge and it's biochar on cadmium uptake by corn and spinach MSc thesis. Isfahan University of Technology, Isfahan. (In Farsi).
31. Planc, O. C. 1992. Plant Analysis Reference Procedures for the Southern Region of the United States. Southern Cooperative Series Bulletin 368. The University of Georgia, Athens, Georgia.
32. Safarzadeh Shirazi, S., Z. Zibaei and P. Ostovar. 2019. The effect of rice husk biochar on the growth and concentration of micronutrients in Holy Basil plant (*Ocimum sanctum* L.) under water stress. *Plant Production Research Journal* 26 (2): 101-114. (In Farsi).
33. Salimi, E. 2016. Vermicomposting of activated sludge from milk factory wastewater and municipal activated sludge by eisenia fetida. MSc thesis. Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman. (In Farsi).
34. Shinogi, Y., H. Yoshida, T. Koizumi, M. Yamakoa and T. Satio. 2003. Basic characteristics of low-temperature carbon products from waste sludge. *Advances in Environmental Research* 7 (3): 661-665.
35. Sohi, S. P., E. Krull, E. Lopez-Capel and R. Bol. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105 (1): 47-82.
36. Sohrabi, N., A. Alinejadian Bidabadi, M. Feizian and A. Maleki. 2017. A Comparative Study of the effects of sewage sludge on heavy metals concentrations and some morphological characteristics of lettuce. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)* 31 (2): 291-303. (In Farsi).
37. Sohrabi, N. 2016. Evaluation of some soil and plant properties in treated soils with sewage sludge under growing Lettuce. MSc thesis. Lorestan University, Lorestan. (In Farsi).
38. Sousa, A. A. T. C. and C. C. Figueiredo. 2016. Sewage sludge biochar: effects on soil fertility and growth of radish. *Biological Agriculture and Horticulture* 32 (2): 127-138.
39. Steiner, C., B. Glaser, W. G. Teixeira, J. Lehmann, W. E. H. Blum and W. Zech. 2008. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171 (6): 893-899.
40. Tavaloli, H. and A. Semnani. 2002. Analysis Methods of Soils, Plants, Water and Fertilizers. Shahid Chamran University, Ahvaz. (In Farsi).
41. Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph and A. Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil* 327: 235-246.
42. Westerman, R. L. 1990. Soil Testing and Plant Analysis. Soil Science Society of America Book Series, Madison.
43. Xie, S., G. Yu, J. Ma, G. Wang, Q. Wang, F. You, J. Li, Y. Wang and C. Li. 2020. Chemical speciation and distribution of potentially toxic elements in soilless cultivation of cucumber with sewage sludge biochar addition. *Environmental Research* 191: 110188.
44. Xie, Sh., G. Yu, R. Jiang, J. Ma, X. Shang, G. Wang, Y. Wang, Y. Yang and Ch. Li. 2021. Moderate sewage sludge biochar application on alkaline soil for corn growth: a feld study. *Biochar* 3: 135-147.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/jcpp.15.1.37702]