Original Article

The effect of the use of organic compounds on the amount of lead, nickel and cadmium in urban sewage sludge (case study: sewage sludge in sari refinery)

Mohammad Ali Bahmanyar,[1*] Seyed Mostafa Emadi,[1] Mehdi Ghajar Sepanlou,[1] Mehdi Hosseini[2]
[1] Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
[2] Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Introduction: Sewage sludge contains significant amounts of degradable organic substances, heavy metals and pathogenic agents that are harmful to the environment and human health. Therefore, the proper disposal of sewage sludge and its use in agriculture is an important global issue. In addition, urban sewage sludge contains significant amounts of essential elements for plant growth, which can be optimally used in the agricultural process. But the presence of heavy elements is one of the main limitations of the direct use of this substance in agricultural lands. Therefore, the general purpose of this study is to investigate the role of using organic modifiers (rice straw and branches from citrus pruning) in urban sewage sludge and converting them into compost and biochar in reducing the amount of heavy elements, and also the partial purpose of this study is to investigate Comparison of the effect of compost and biochar on reducing the amount of heavy elements.

Materials and Methods: This study was conducted in two separate designs in the form of a randomized complete block with 9 treatments and 3 replications in 1401. The first plan includes the production of compost using the combination of urban sewage sludge with rice straw and citrus branches with different ratios (1:1, 3:1, 5:1 and 7:1) and the second plan includes the production of biochar using compost obtained from the first design with rice straw and citrus branches with different ratios (1:1, 3:1, 5:1 and 7:1). Then the amount of total lead, nickel and cadmium (digestion with nitric acid and perchloric acid) and available (extraction with DTPA) were measured in biochar and sewage sludge compost samples.

Results and Discussion: Based on the results, the treatment of compost obtained from the combination of sewage sludge + rice straw in the ratio (1:1) reduced the amount of lead and total cadmium by 37.12 and 69.29%, respectively, compared to the control (sewage sludge). This reduction in the amount of lead and cadmium in the mentioned treatment is due to the high amount of rice straw compared to other treatments of rice straw and the greater degradability of rice straw compared to citrus branch. The amount of available nickel in the treatments of compost + rice straw (1:1), compost + citrus branch (1:1) and (1:3) decreased by 46.12, 48.71 and 25.03%, respectively, compared to the control (sewage sludge). Also, the amount of available cadmium in compost treatments with rice straw (1:1), citrus branch (1:1) and (1:3) decreased by 43.97%, 33.18% and 47.44%, respectively, compared to the control. Biochar

[*] Corresponding Author Email Address: mali.bahmanyar@gmail.com

has a significant effect on the amount of total lead and cadmium, so that the lowest amount of total lead and cadmium was observed in biochar + rice straw with a ratio of 1:1 and the amount of total lead and cadmium in this treatment decreased by 46.99 and 25.26% respectively compared to the control. Production of biochar from sewage sludge compost increased the amount of total lead and cadmium, but none of the methods caused a significant decrease in total nickel in sewage sludge. But the conversion of sewage sludge compost into biochar caused a significant decrease in the amount of available lead, nickel and cadmium. Rice straw and citrus branch in biochar had no significant effect on available nickel.

Conclusion: The production of compost and biochar from sewage sludge had a significant effect on the total and available heavy elements in the sludge. So, in order to reduce the availability of lead, nickel and cadmium, using biochar method is preferable to compost and is prioritized. If the production of biochar is not cost-effective, the plant compounds of rice straw and citrus branches can be used in the production of sewage sludge compost, which have a significant effect on the immobilization of available heavy elements. Sewage sludge compost with rice straw by a ratio of (1:1) which has the lowest amount of pollution and the lowest cost for production was introduced as the optimal treatment.

Keywords: Biochar, Compost, Sewage sludge, Heavy elements

نسخه پیش انتشار

مقاله پژوهشی

تأثیر کاربرد ترکیبات آلی بر میزان سرب، نیکل و کادمیوم لجن فاضلاب شهری

(مطالعه موردی: لجن فاضلاب تصفیه خانه ساری)

محمد علی بهمنیار[1†]، سید مصطفی عمادی[1]، مهدی قاجار سپانلو[1]، مهدی حسینی[2]

[1] گروه علوم خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

[2] گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

سابقه و هدف: لجن فاضلاب حاوی مقادیر قابل‌توجهی مواد آلی تجزیه‌پذیر، فلزات سنگین و عوامل بیماری‌زا است که برای محیط‌زیست و سلامت انسان مضر هستند. بنابراین دفع مناسب لجن فاضلاب و استفاده از آن در کشاورزی یک موضوع مهم جهانی هست. علاوه بر این لجن فاضلاب شهری به دلیل اینکه حاوی مقادیر قابل‌توجهی از عناصر ضروری برای رشد گیاه می‌باشد که قابلیت استفاده بهینه‌ای در فرآیند کشاورزی دارد. اما وجود عناصر سنگین از محدودیت‌های اصلی استفاده مستقیم این ماده در زمین‌های کشاورزی می‌باشد. لذا هدف کلی این مطالعه، شامل بررسی نقش کاربرد اصلاح‌کننده آلی (کاه و کلش برنج و سرشاخه حاصل از هرس مرکبات) در لجن فاضلاب شهری و تبدیل آن‌ها به کمپوست و زغال زیستی در کاهش میزان عناصر سنگین بوده و همچنین هدف جزئی این مطالعه، بررسی مقایسه تاثیر کمپوست و زغال زیستی بر کاهش میزان عناصر سنگین بوده است.

مواد و روش‌ها: این مطالعه به‌صورت دو طرح مجزا در قالب بلوک کامل تصادفی با ۹ تیمار و ۳ تکرار در سال ۱۴۰۱ انجام شد. طرح اول شامل تولید کمپوست با استفاده از ترکیب لجن فاضلاب شهری با کاه و کلش برنج و سرشاخه مرکبات با نسبت‌های مختلف (۱:۱، ۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷) و همچنین طرح دوم شامل تولید زغال زیستی با استفاده از کمپوست لجن فاضلاب حاصل از طرح اول با کاه و کلش برنج و سرشاخه مرکبات با نسبت‌های مختلف (۱:۱، ۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷) بود. سپس میزان سرب، نیکل و کادمیوم کل (روش هضم با اسید نیتریک و اسید پرکلریک) و قابل‌جذب (عصاره گیری با DTPA) در نمونه‌های زغال زیستی و کمپوست لجن فاضلاب اندازه‌گیری شد.

† Corresponding Author Email Address: mali.bahmanyar@gmail.com

نسخه پیش انتشار

نتایج و بحث: براساس نتایج، تیمار کمپوست حاصل از ترکیب لجن فاضلاب+کاه و کلش برنج به نسبت (۱:۱) مقدار سرب و کادمیوم کل را به ترتیب به اندازه ۳۷/۱۲ و ۶۹/۲۹ درصد نسبت به شاهد (لجن فاضلاب) کاهش داد. این کاهش در مقدار سرب و کادمیوم در تیمار فوق الذکر به دلیل مقدار بالای کاه برنج نسبت به سایر تیمارهای کاه برنج و تجزیه‌پذیری بیشتر کاه برنج نسبت به سرشاخه مرکبات است. میزان نیکل قابل‌جذب در تیمارهای کمپوست+ کاه برنج (۱:۱)، کمپوست+ سرشاخه مرکبات (۱:۱) و (۱:۳) به ترتیب به اندازه ۴۶/۱۲، ۴۸/۷۱ و ۲۵/۰۳ درصد نسبت به شاهد (لجن فاضلاب) کاهش یافت. همچنین میزان کادمیوم قابل‌جذب در تیمارهای کمپوست به همراه کاه برنج (۱:۱)، سرشاخه مرکبات (۱:۱) و (۱:۳) به ترتیب به اندازه ۴۳/۹۷، ۳۳/۱۸ و ۴۷/۴۴ درصد نسبت به شاهد (لجن فاضلاب) کاهش یافت. زغال زیستی بر میزان سرب و کادمیوم کل تاثیر معنی‌داری داشته، به‌طوری‌که کمترین میزان سرب و کادمیوم کل در نمونه زغال زیستی+کاه برنج با نسبت ۱:۱ دیده شد و میزان سرب و کادمیوم کل در این تیمار به ترتیب به اندازه ۴۶/۹۹ و ۲۵/۲۶ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. تولید زغال زیستی از کمپوست لجن فاضلاب سبب افزایش میزان سرب و کادمیوم کل شده، اما هیچ‌کدام از روش‌ها سبب کاهش معنی‌داری بر نیکل کل در لجن فاضلاب نگردید. اما تبدیل کمپوست لجن فاضلاب به زغال زیستی سبب کاهش معنی‌دار در مقدار سرب، نیکل و کادمیوم قابل‌جذب شد. کاه برنج و سرشاخه مرکبات در نمونه‌های زغال زیستی تأثیر معنی‌داری بر نیکل قابل‌جذب نداشت.

نتیجه‌گیری: تهیه کمپوست و زغال زیستی از لجن فاضلاب تأثیر معنی‌داری بر عناصر سنگین کل و قابل‌جذب موجود در لجن داشته است. بنابراین به‌منظور کاهش قابلیت دسترسی سرب، نیکل و کادمیوم، استفاده از روش زغال زیستی نسبت به کمپوست ارجح بوده و در اولویت قرار می‌گیرد. درصورتی‌که تولید زغال زیستی مقرون‌به‌صرفه نباشد می‌توان از ترکیبات گیاهی کاه برنج و سرشاخه مرکبات در تهیه کمپوست لجن فاضلاب استفاده کرد که تأثیر معنی‌داری بر غیر متحرک‌سازی عناصر سنگین قابل‌جذب داشته‌اند. تیمار کمپوست لجن فاضلاب به همراه کاه و کلش برنج با نسبت (۱:۱) که کمترین میزان آلایندگی و پایین‌ترین هزینه برای تولید را داشته، که به‌عنوان تیمار بهینه معرفی گردید.

واژه‌های کلیدی: زغال زیستی، کمپوست، لجن فاضلاب، عناصر سنگین

مقدمه

لجن فاضلاب محصول فرعی فرآیندهای تصفیه فاضلاب شهری است و میزان لجن فاضلاب تولیدشده در جهان در حال افزایش است (Durdevic *et al.*, 2020). توسعه اقتصادی و افزایش آگاهی زیست‌محیطی منجر به ساخت تعداد زیادی تصفیه‌خانه فاضلاب در سراسر جهان شده است و این‌ها مقادیر بسیار زیادی لجن فاضلاب تولید می‌کنند. به‌عنوان‌مثال، بیش از ۴۰ میلیون تن لجن فاضلاب (با محتوای ۸۰ درصد) هرسال در چین تولید می‌شود و تخمین زده می‌شود که این تولید سالانه تا سال ۲۰۲۵ از ۶۰ میلیون تن

نسخه پیش انتشار

فراتر رود (Rao *et al*., 2019). در اروپا، مقدار کل لجن فاضلاب تولیدشده از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ به ۱۳ میلیون تن جرم خشک افزایش یافته است (Wojcik and Stachowicz, 2019). در ایالات متحده، سالانه بیش از ۶/۵ میلیون تن جرم خشک لجن فاضلاب تولید می‌شود (Zhen *et al*., 2017). درنتیجه، دفع لجن فاضلاب به یک مشکل زیست‌محیطی در سراسر جهان تبدیل‌شده است که نمی‌توان آن را نادیده گرفت. علاوه بر این، لجن فاضلاب حاوی مقادیر قابل‌توجهی مواد آلی تجزیه‌پذیر، فلزات سنگین و عوامل بیماری‌زا است که برای محیط‌زیست و سلامت انسان مضر هستند. بنابراین، دفع مناسب لجن فاضلاب و استفاده از آن در کشاورزی یک موضوع مهم جهانی هست (Antonkiewicz *et al*., 2020). به همین دلیل، بسیاری از اپراتورهای تصفیه‌خانه فاضلاب شهری در دنیا به دنبال روش‌های تثبیت جدیدی هستند که امکان استفاده کشاورزی از لجن فاضلاب را با حذف عوامل بیماری‌زا و به حداقل رساندن عناصر سنگین را فراهم نمایند (Mininni *et al*., 2015). در حال حاضر، دانشمندان طیف وسیعی از راه‌حل‌های اکو تکنولوژیکی مانند کمپوست‌سازی و تولید زغال زیستی را پیشنهاد کرده‌اند (Yue *et al*., 2017; Gutierrez *et al*., 2017).

کمپوست لجن فاضلاب دارای مزایای متعددی نسبت به سایر استراتژی‌های دفع لجن است، به‌عنوان‌مثال، غنی از نیتروژن، فسفر و مواد آلی است. استفاده از آن در تولید محصول ممکن است نیاز به کودهای شیمیایی گران‌قیمت نیتروژن و فسفر را کاهش دهد و درعین‌حال از تخریب زمین نیز جلوگیری کند (Casado-Vela *et al*., 2006). علاوه بر این، می‌تواند مجموعه‌ای از عناصر مغذی دیگر را به خاک اضافه کند و ارگانیسم‌های مفید خاک را افزایش دهد، خواص فیزیکی و بیولوژیکی خاک را بهبود بخشد (Filipovic *et al*., 2020; Major *et al*., 2020). علاوه بر این، قابلیت دسترسی مس، روی، سرب و نیکل برای جذب توسط گیاهان در اثر کمپوست سازی کاهش می‌یابد (Amir *et al*., 2005). تبدیل لجن فاضلاب به زغال زیستی یک رویکرد پایدار در مدیریت زباله است که سبب بازیافت عناصر مغذی شده و مهم‌تر از آن، در کنترل انتشار فلزات سنگین بهتر عمل می‌کند (Liu *et al*., 2014). اصلاح خاک با زغال زیستی همچنین باعث بهبود پایداری خاکدانه‌ها، تهویه خاک، ظرفیت نگهداری آب خاک و نفوذپذیری خاک و درعین‌حال کاهش چگالی ظاهری خاک می‌شود (Razzaghi *et al*., 2020). همچنین تولید زغال زیستی یکی از فناوری‌های امکان‌پذیر برای ترسیب کربن خاک و بازیابی فسفر است (Zhao *et al*., 2021; Qian *et al*., 2019). بااین‌حال، تجزیه در اثر حرارت (زغال زیستی) باعث افزایش مقدار مس تا ۸۰ درصد و کادمیوم، سرب، نیکل و روی به میزان ۴۰ درصد در مقایسه با لجن فاضلاب می‌شود، اگرچه کاهش در قابلیت دسترسی مس، نیکل، روی و سرب برای گیاهان و گونه‌های متحرک مس، نیکل، روی، کادمیوم و سرب مشاهده شده‌است(Mendez *et al*., 2012) .

نسخه پیش انتشار

یکی از نگرانی‌های اصلی استفاده از لجن فاضلاب وجود عناصر بالقوه سمی، ازجمله کادمیوم، کروم، مس، جیوه، سرب و روی است که در طول زمان در خاک تجمع می‌یابند (Torri and Lavado, 2008)، درنتیجه از طریق انباشتگی در گیاهی دوباره وارد زنجیره غذایی می‌شوند(Liu and Guo, 2019). دفع لجن حاصل از تصفیه فاضلاب، از ضروریات یک تصفیه‌خانه فاضلاب به‌حساب می‌آید و این بخش، قسمت عمده‌ای از هزینه‌های یک تصفیه‌خانه فاضلاب را در برمی‌گیرد. لذا ارائه راه‌کارهای صحیح مدیریتی جهت استفاده مطلوب از لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری امری ضروری است. استفاده از این لجن‌ها درصورتی‌که حاوی مواد مغذی بوده و ازلحاظ غلظت آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین، پاتوژن‌ها و غیره در حد استاندارد باشند، در زمین‌های کشاورزی امکان‌پذیر است. چنین به نظر می‌رسد که افزودن برخی از اصلاح‌کننده‌ها نظیر کاه و کلش برنج و سرشاخه‌های حاصل از هرس مرکبات به لجن فاضلاب و تبدیل به کمپوست و یا زغال زیستی، موجب کاهش میزان عناصر سنگین کل و قابل‌جذب خواهد شد. لذا هدف کلی این مطالعه، شامل بررسی نقش کاربرد اصلاح‌کننده آلی (کاه و کلش برنج و سرشاخه حاصل از هرس مرکبات) در لجن فاضلاب شهری و تبدیل آن‌ها به کمپوست و زغال زیستی در کاهش میزان عناصر سنگین بوده و همچنین هدف جزئی این مطالعه، بررسی مقایسه تاثیر کمپوست و زغال زیستی بر کاهش میزان عناصر سنگین بوده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت دو طرح بلوک کامل تصادفی مجزا با ۹ تیمار و ۳ تکرار در سال ۱۴۰۱ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. در این تحقیق از لجن خام فاضلاب تصفیه‌خانه شهر ساری استفاده شد. که برخی از مشخصات آن در جدول ۱ آمده است. به‌منظور کمپوست سازی مؤثر و کمک به ایجاد شرایط مناسب برای تولید کمپوست لجن فاضلاب، از کاه و کلش برنج و سرشاخه مرکبات، به‌عنوان عوامل حجیم کننده مقرون‌به‌صرفه (قابل تهیه در منطقه) استفاده گردید. در ارزیابی کیفیت لجن فاضلاب تولیدشده در این تصفیه‌خانه، در طی مدت ۶ ماه بعد از مخلوط کردن با کاه برنج و سرشاخه مرکبات جهت تعیین و ثابت شدن نسبت کربن به نیتروژن نمونه‌برداری و آنالیز صورت گرفت تا C/N ثابت شود.

جدول ۱. مقدار عناصر سنگین کل و قابل‌جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک) در نمونه اولیه لجن فاضلاب

Table 1. Amount of total and available heavy elements (mg kg^{-1}) in sewage sludge prototype

عناصر سنگین قابل‌جذب available heavy elements			عناصر سنگین کل total heavy elements		
Pb	Cd	Ni	Pb	Cd	Ni
5.25	0.72	8.05	64	5.35	44.75

نسخه پیش انتشار

در اولین طرح از لجن فاضلاب به همراه کاه و کلش برنج و سرشاخه مرکبات برای تهیه کمپوست استفاده شد که شامل ۹ تیمار در جدول ۲ ارائه شده‌است.

جدول ۲. تیمارهای حاصل از کمپوست لجن فاضلاب

Table 2. Treatments from sewage sludge compost

۱	شاهد (لجن فاضلاب، بدون استفاده از مواد اصلاح‌کننده)	(blank)
۲	لجن فاضلاب و کاه و کلش برنج با نسبت یک‌به‌یک	(R 1:1)
۳	لجن فاضلاب و کاه و کلش برنج با نسبت ۳ به ۱	(R 1:3)
۴	لجن فاضلاب و کاه و کلش برنج با نسبت ۵ به ۱	(R 1:5)
۵	لجن فاضلاب و کاه و کلش برنج با نسبت ۷ به ۱	(R 1:7)
۶	لجن فاضلاب و سرشاخه مرکبات با نسبت ۱ به ۱	(C 1:1)
۷	لجن فاضلاب و سرشاخه مرکبات با نسبت ۳ به ۱	(C 1:3)
۸	لجن فاضلاب و سرشاخه مرکبات با نسبت ۵ به ۱	(C 1:5)
۹	لجن فاضلاب و سرشاخه مرکبات با نسبت ۷ به ۱	(C 1:7)

در ادامه بعد از مرحله کمپوست سازی، از کمپوست‌های حاصله در دمای ۳۵۰ درجه درون کوره الکتریکی (Naber therm) تحت شرایط عدم وجود اکسیژن یا اکسیژن محدود، زغال زیستی تهیه شد. تیمارهای کمپوست که به زغال زیستی تبدیل شدند در ۹ تیمار در جدول ۳ ارائه شده‌است.

جدول ۳. تیمارهای حاصل از زغال زیستی کمپوست

Table 3. Treatments from composted biochar

۱	شاهد (زغال زیستی، بدون استفاده از مواد اصلاح‌کننده)	(B blank)
۲	زغال زیستی حاصل از کمپوست و کاه و کلش برنج با نسبت یک‌به‌یک	(BR 1:1)
۳	زغال زیستی و کاه و کلش برنج با نسبت ۳ به ۱	(BR 1:3)
۴	زغال زیستی و کاه و کلش برنج با نسبت ۵ به ۱	(BR 1:5)
۵	زغال زیستی و کاه و کلش برنج با نسبت ۷ به ۱	(BR 1:7)
۶	زغال زیستی و سرشاخه مرکبات با نسبت ۱ به ۱	(BC 1:1)
۷	زغال زیستی و سرشاخه مرکبات با نسبت ۳ به ۱	(BC 1:3)
۸	زغال زیستی و سرشاخه مرکبات با نسبت ۵ به ۱	(BC 1:5)
۹	زغال زیستی و سرشاخه مرکبات با نسبت ۷ به ۱	(BC 1:7)

سپس میزان سرب، نیکل و کادمیوم کل (روش هضم با اسید نیتریک و اسید پرکلریک) و قابل‌جذب (عصاره گیری با DTPA) در نمونه‌های زغال زیستی و کمپوست لجن فاضلاب با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عناصر سنگین کل ۰/۵گرم نمونه را با ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک (۱:۱) به مدت یک ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده و بعد ۲/۵ میلی‌لیتر اسید پرکلریدریک (۷۰-۷۴ درصد) افزوده و در ادامه به مدت ۲/۵ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده و

نسخه پیش انتشار

سپس به حجم ۲۵ میلی لیتر رسانده و در آخر صاف شده‌است. برای تعیین عناصر سنگین قابل جذب از نسبت ۱ به ۲ نمونه‌ها و عصاره DTPA استفاده شد (Lindsay and Norvell, 1978; Baker and Amacher., 1982). تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام‌شده و شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسل ترسیم‌شده است. تجزیه‌وتحلیل آماری برای مقایسه مقدار سرب، نیکل و کادمیوم کل و قابل‌جذب در نمونه‌های کمپوست لجن فاضلاب شهری و زغال زیستی با استفاده از آزمون T (T-test) انجام شد.

نتایج و بحث

مقدار سرب، نیکل و کادمیوم کل در کمپوست تولیدشده از لجن فاضلاب شهری و ترکیبات آلی

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که کمپوست لجن فاضلاب تنها بر مقدار سرب کل در سطح یک درصد تأثیر معنی‌داری داشته اما بر مقدار نیکل و کادمیوم کل تأثیر معنی‌داری نداشته است(جدول ۴).

جدول ۴. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) سرب، نیکل و کادمیوم کل در کمپوست تولیدشده از لجن فاضلاب و ترکیبات آلی

Table 4. Variance analysis (mean square) of total lead (Pb), nickel (Ni), and cadmium (Cd) in compost produced from sewage sludge and organic compounds

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی DF	سرب Pb	نیکل Ni	کادمیوم Cd
بلوک Block	2	17.81 ns	149.14 ns	3.92 ns
تیمار Treatment	8	141.31**	61.21 ns	3.76 ns

**: معنی‌داری در سطح یک درصد
**: significant difference at 1%

ns:عدم معنی داری
ns: No significant difference

لجن فاضلاب از جمله ترکیبات آلی است که غلظت‌های متفاوت از فلزات سنگین در آن دیده شد (Lu *et al*., 2016). مقایسه میانگین تیمارهای مختلف لجن فاضلاب و ترکیبات آلی نشان داد که بیشترین میزان سرب کل در نمونه‌های کمپوست مربوط به شاهد بوده که به ترتیب اختلاف معنی‌داری با تیمارهای کمپوست+سرشاخه مرکبات با نسبت‌های (۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷) ندارند. در نمونه‌های کمپوست، مقدار سرب کل در سرشاخه مرکبات با نسبت (۱:۱)، کاه برنج با نسبت‌های (۱:۱)، (۱:۳)، (۱:۵) و (۱:۷) به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد کمتر بود. مقدار سرب کل در کمپوست لجن فاضلاب+کاه برنج (۱:۱)، (۱:۳)، (۱:۵) و (۱:۷) به ترتیب به اندازه ۳۷/۱۳، ۱۸/۴۲، ۲۰/۳۲ و ۱۶/۲۶ درصد نسبت به شاهد کاهش و همچنین در کمپوست لجن فاضلاب+ سرشاخه مرکبات (۱:۱) به اندازه ۲۲/۲۳ درصد نسبت به شاهد کاهش‌یافته است (جدول ۵).

نسخه پیش انتشار

با افزایش مقدار کاه برنج و سرشاخه مرکبات، میزان سرب کل به‌طور معنی‌داری کاهش یافت که بیشترین کاهش مربوط به نسبت ۱:۱ کاه برنج و سرشاخه مرکبات با کمپوست لجن فاضلاب بود، زیرا در این تیمارها، کمپوست به همراه کاه برنج و سرشاخه مرکبات به نسبت یک‌به‌یک باهم مخلوط شده‌اند و نسبت به سایر تیمار (۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷) مقادیر بیشتری از بقایای گیاهی را در اختیار دارند و درنتیجه مقدار کمتری از سرب کل را نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد تأثیر کاه و کلش برنج نسبت به سرشاخه مرکبات بیشتر می‌باشد چون تیمار حاصل از کاه برنج نسبت به سرشاخه مرکبات به‌طور معنی‌داری مقدار کمتری از سرب را نشان می‌دهد که می‌توانیم به تجزیه بیشتر کاه برنج نسبت به سرشاخه مرکبات نسبت بدهیم (جدول ۵). نگهداشت عناصر فلزی توسط ماده آلی به عوامل متفاوتی از جمله pH خاک و درجه هوموسی شدن ماده آلی بستگی دارد. اسیدهای آلی با حلالیت کم و دارای وزن مولکولی زیاد در مقابل اسیدهای آلی با حلالیت زیاد دارای وزن مولکولی کم قرار دارند. مواد آلی تازه در خاک معمولاً دارای میزان کمی از مواد هومیک بوده و بیشتر موجب تحرک تا تثبیت و نگهداشت عناصر می‌گردد. مطالعات نشان دادند که کاربرد سبوس برنج در کاهش سرب مؤثر بوده و سبب کاهش میزان سرب کل نسبت به شاهد شده‌است (Karimi *et al*., 2019). محققان گزارش کردند که ماده آلی اثرات منفی عناصر سنگین را کاهش می‌دهد و مانع از خطر زیست‌محیطی می‌شود(Stefanowicz *et al*., 2020). در کمپوست لجن فاضلاب تولیدشده، مقدار کادمیوم کل در تیمار کاه برنج (۱:۱) به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد کمتر بود که می‌توانیم به نسبت بالای کاه برنج نسب به سایر تیمارهای کاه برنج و تجزیه پذیری بیشتر کاه برنج به سرشاخه مرکبات نسبت دهیم. مقدار کادمیوم کل در کاه برنج (۱:۱) نسبت به شاهد ۶۹/۲۹ درصد کاهش یافت. نتایج مقایسه میانگین نیکل کل نشان می‌دهد که سرشاخه مرکبات و کاه برنج تأثیر معنی‌داری روی کاهش این عنصر سنگین نداشته است. بیشترین میزان سرب و کادمیوم کل در تیمار شاهد (لجن فاضلاب بدون بقایای گیاهی) دیده شد(جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه میانگین سرب، نیکل و کادمیوم کل (میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک) در کمپوست تولیدشده از لجن فاضلاب و ترکیبات آلی

Table 5. Mean comparison of total lead (Pb), nickel (Ni), and cadmium (Cd) (mg kg^{-1}) in compost produced from sewage sludge and organic compounds

تیمار Treatment	سرب Pb	نیکل Ni	کادمیوم Cd
rice 1:1	38.67 ^{d}	28.13 ^{a}	1.52 ^{b}
rice 1:3	50.17 ^{bc}	39.22 ^{a}	2.93 ^{ab}
rice 1:5	49 ^{bc}	41.75 ^{a}	2.77 ^{ab}
rice1:7	51.5 ^{bc}	31.58 ^{a}	3.48 ^{ab}
citrus 1:1	47.83 ^{c}	35.97 ^{a}	3.75 ^{ab}
citrus 1:3	59.67 ^{a}	41.75 ^{a}	1.9 ^{ab}
citrus 1:5	55.33 ^{ab}	35.7 ^{a}	1.8 ^{ab}
citrus 1:7	55 ^{ab}	36.6 ^{a}	2.05 ^{ab}
blank	61.5 ^{a}	39.42 ^{a}	4.95 ^{a}

نسخه پیش انتشار

* مقادیر دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD می‌باشند

*Values in each column followed by similar letters are not significantly different at 5% probability level, using LSD Test.

مقدار سرب، نیکل و کادمیوم قابل‌جذب در کمپوست تولیدشده از لجن فاضلاب و ترکیبات آلی

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که تیمارها تأثیر معنی‌داری بر سرب و کادمیوم در سطح پنج درصد و بر نیکل در سطح یک درصد داشته است(جدول ۶).

جدول ۶. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) سرب، نیکل و کادمیوم قابل‌جذب در کمپوست تولیدشده از لجن فاضلاب و ترکیبات آلی

Table 6. Variance analysis of (mean square) of available lead (Pb), nickel (Ni), and cadmium (Cd) in compost produced from sewage sludge and organic compounds

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی DF	سرب Pb	نیکل Ni	کادمیوم Cd
بلوک Block	2	0.249 ns	0.099 ns	0.017 ns
تیمار Treatment	8	6.57 *	7.101 **	0.038*

ns:عدم معنی داری — ns: No significant difference

*: معنی داری در سطح پنج درصد — *: significant difference at 5%

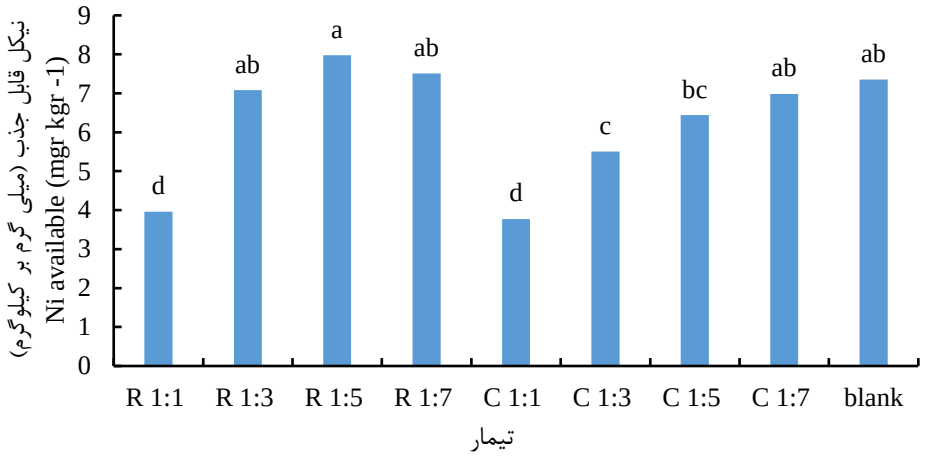
**: معنی داری در سطح یک درصد — **: significant difference at 1%

این دو ترکیب گیاهی در کمپوست حاصل از لجن فاضلاب تأثیر معنی‌داری روی نیکل داشته‌اند. به‌طوری‌که مقدار نیکل قابل‌جذب در تیمارهای کاه برنج (۱:۱) و سرشاخه مرکبات (۱:۱ و ۱:۳) به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد (لجن فاضلاب) کمتر بود و میزان نیکل قابل‌جذب در کاه برنج (۱:۱) و سرشاخه مرکبات (۱:۱) به ترتیب به اندازه ۴۶/۱۲ و ۴۸/۶۷ درصد نسبت به شاهد (لجن فاضلاب) کاهش یافت. بیشترین مقدار نیکل قابل‌جذب در تیمار کمپوست لجن فاضلاب+ کاه برنج (۱:۵) دیده شد که اختلاف معنی داری با تیمار شاهد نداشته است (شکل ۱).

ترکیبات کاه برنج و سرشاخه مرکبات در کمپوست لجن فاضلاب بر کادمیوم هم تأثیر معنی‌داری داشته به‌طوری‌که مقدار این عنصر سنگین در کاه برنج (۱:۱، ۱:۳ و ۱:۷) و سرشاخه مرکبات (۱:۱ و ۱:۳) به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش نشان داد. میزان کاهش کادمیوم در کاه برنج (۱:۱) و سرشاخه مرکبات (۱:۳) نسبت به شاهد به ترتیب به اندازه ۴۴/۰۱ و ۴۷/۴۷ درصد بود، همچنین بیشترین میزان کادمیوم قابل‌جذب در تیمار شاهد دیده شد(شکل ۲). بخشی از کمپوست لجن فاضلاب توسط بقایای گیاهی اشغال‌شده است که سبب کاهش میزان نیکل و کادمیوم قابل عصاره‌گیری توسط DTPA شده درنتیجه مقادیر کمتری از نیکل و کادمیوم را نشان می‌دهد. اما کاه برنج و سرشاخه مرکبات در کمپوست لجن فاضلاب بر کاهش سرب قابل‌جذب تأثیری نداشته زیرا

نسخه پیش انتشار

تیمارهای کاه برنج اختلاف معنی‌داری با شاهد(لجن فاضلاب) نداشته و تیمار حاصل از سرشاخه مرکبات (۱:۱) به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد (لجن فاضلاب) بیشتر بود (شکل ۳). محققان بیان داشتند مواد هومیک حاصل از مواد آلی، ظرفیت جذب سطحی زیادی برای عناصر سنگین دارند. مواد آلی به دلیل داشتن گروه‌های عامل دارای بار منفی (کربوکسیلیک، فنلیک، هیدروکسیل) می‌توانند یون فلزات سنگین را از محلول خاک جذب سطحی کنند(Matos and Arruda, 2003). تحقیقات نشان داد که کمپوست لجن فاضلاب بهترین روش و استراتژی برای غیرفعال کردن عناصر سنگین و بهبود عناصر غذایی قابل‌دسترس برای گیاه است (Dede *et al*., 2023). Zhang *et al*. (2017) بیان کردند که در طی فرآیند کمپوست کردن لجن فاضلاب، تثبیت فلزات سنگین عمدتاً با معدنی شدن ترکیبات آلی، جذب میکروبی و کمپلکس کردن مواد هیومیک به دست آمد.

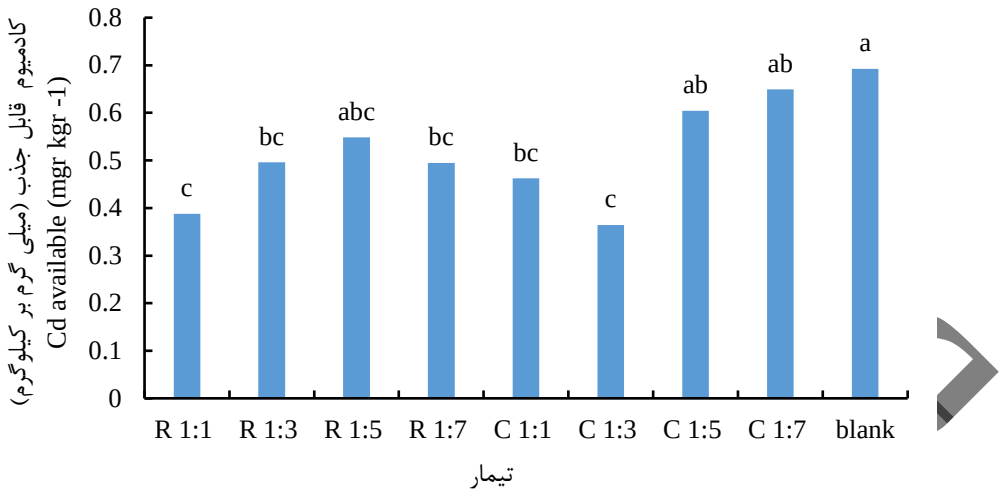


شکل ۱. مقایسه میانگین نیکل قابل‌جذب (میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک) در کمپوست حاصل از لجن فاضلاب شهری

Figure 1. Mean comparison of available nickel (Ni) (mg Kg $^{-1}$) in compost obtained from sewage sludge

* مقادیر دارای حروف مشترک در شکل فاقد تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD می‌باشند

*Values in figure followed by similar letters are not significantly different at 5% probability level, using LSD Test.

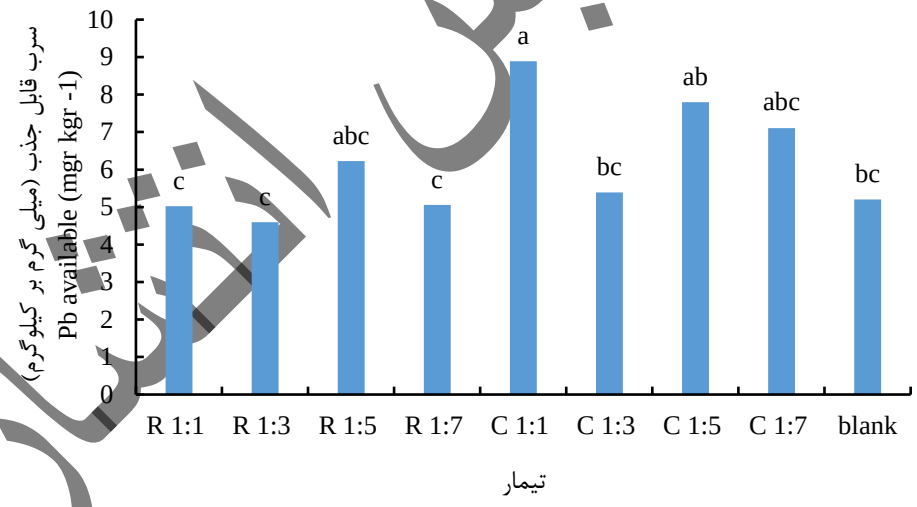


شکل ۲. مقایسه میانگین کادمیوم قابل‌جذب (میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک) در کمپوست حاصل از لجن فاضلاب شهری

Figure 2. Mean comparison of available cadmium(Cd) (mg Kg^{-1}) in compost obtained from sewage sludge

* مقادیر دارای حروف مشترک در شکل فاقد تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD می‌باشند

*Values in figure followed by similar letters are not significantly different at 5% probability level, using LSD Test.



شکل ۳. مقایسه میانگین سرب قابل‌جذب (میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک) در کمپوست لجن فاضلاب شهری

Figure 3. Mean comparison of available Lead (Pb) (mg Kg^{-1}) in compost of sewage sludge

* مقادیر دارای حروف مشترک در شکل فاقد تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD می‌باشند

*Values in figure followed by similar letters are not significantly different at 5% probability level, using LSD Test.

مقدار سرب، نیکل و کادمیوم کل در زغال زیستی حاصل از کمپوست

نسخه پیش انتشار

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که زغال زیستی لجن فاضلاب تأثیر معنی‌داری بر سرب کل در سطح یک درصد و بر کادمیوم در سطح پنج درصد داشته اما بر نیکل تأثیر معنی‌داری نداشته است (جدول ۷).

جدول ۷. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) سرب، نیکل و کادمیوم کل در زغال زیستی تولیدشده از کمپوست لجن فاضلاب
Table 7. variance analysis (Mean square) of total lead (Pb), nickel (Ni), and cadmium (Cd) in biochar produced from sewage sludge compost

منابع تغییرات Source	درجه آزادی DF	سرب Pb	نیکل Ni	کادمیوم Cd
بلوک Block	2	26.33 ns	1116 ns	0.146 ns
تیمار Treatment	8	687**	1666.87 ns	1.11*

ns:عدم معنی داری　　*: معنی داری در سطح پنج درصد　　**: معنی داری در سطح یک درصد
ns: No significant difference　　*: significant difference at 5%　　**: significant difference at 1%

روند تأثیر سرشاخه مرکبات و کاه برنج در سرب کل در زغال زیستی مشابه کمپوست لجن فاضلاب بوده به این صورت که با افزایش مقدار سرشاخه مرکبات و کاه برنج نسبت به لجن فاضلاب، مقدار سرب کل به‌طور معنی‌داری کاهش‌یافته است. کمترین میزان سرب کل در کاه برنج (۱:۱) و سرشاخه مرکبات (۱:۱) دیده شد که به‌طور معنی‌داری نسبت به سایر تیمارها کاهش یافت و تیمارهای سرشاخه مرکبات و کاه برنج در یک گروه آماری قرار می‌گرفتند زیرا در این تیمارها قبل از تولید زغال زیستی، مقدار لجن فاضلاب و بقایای گیاهی با نسبت یک‌به‌یک باهم مخلوط شده‌اند و نسبت به سایر بقایای گیاهی مقدار بیشتری از کاه برنج و سرشاخه مرکبات داشته و درنتیجه مقدار کمتری از سرب کل را نشان می‌دهند(جدول ۸).

در نمونه‌های زغال زیستی، شدت تأثیر بقایای گیاهی در قبال کادمیوم کل مشابه سرب کل نبوده و از بین بقایایی گیاهی فقط کاه و کلش برنج در نسبت‌های بالا (۱:۳) و (۱:۱) تأثیر معنی‌داری در کاهش کادمیوم کل داشته که کمترین مقدار کادمیوم کل در تیمار کاه برنج (۱:۱) دیده شد. مقدار کادمیوم کل در کاه برنج با نسبت‌های (۱:۱) و (۱:۳) به ترتیب به اندازه ۲۵/۲۶ و ۱۴/۴۷ درصد نسبت به شاهد کاهش‌یافته است (جدول ۸). بقایای گیاهی (کاه برنج و سرشاخه مرکبات) در زغال زیستی تأثیر معنی‌داری بر کاهش نیکل کل نداشته و رفتار این عنصر سنگین در تیمارهای مطالعه شده مشابه هم بوده به‌طوری‌که بیشترین مقدار این عنصر سنگین مربوط به سرشاخه مرکبات (۱:۳) بوده است. میزان نیکل کل در این تیمار نسبت به شاهد (زغال زیستی) به اندازه ۲/۱۹ برابر بیشتر بود (جدول ۸). محققان گزارش کردند که کمپوست لجن فاضلاب و زغال زیستی حاصل از آن تأثیر معنی‌داری روی میزان نیکل نداشته‌است (Cerne *et al*., 2021). محققان دیگر نشان دادند که زغال زیستی حاصل از لجن فاضلاب نسبت به لجن فاضلاب مقدار سرب، نیکل و کادمیوم کل بیشتری داشته است (Lu *et al*., 2016; Zhang *et al*., 2022; Karimi *et al*., 2019).

نسخه پیش انتشار

جدول ۸. مقایسه میانگین سرب، نیکل و کادمیوم کل (میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک) در زغال زیستی حاصل از کمپوست

Table 8. Mean comparison of total lead, nickel, and cadmium (mg kg^{-1}) in biochar obtained from compost

تیمار treatment	سرب Pb	نیکل Ni	کادمیوم Cd
rice 1:1	49.83 ^{d}	32.83 ^{b}	5.68 ^{d}
rice 1:3	71 ^{c}	59.83 ^{b}	6.50 ^{cd}
rice 1:5	86.17 ^{ab}	69.02 ^{ab}	6.80 ^{abc}
rice1:7	85.67 ^{ab}	51.45 ^{b}	7.32 ^{abc}
citrus 1:1	57.5 ^{d}	34.33 ^{b}	6.68 ^{bc}
citrus 1:3	81.67 ^{b}	112.67 ^{a}	7.07 ^{abc}
citrus 1:5	82.83 ^{b}	59.70 ^{b}	7.62 ^{a}
citrus 1:7	90.33 ^{ab}	66.87 ^{ab}	7.18 ^{abc}
blank	94 ^{a}	51.45 ^{b}	7.60 ^{ab}

* مقادیر دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد تفاوت معنی دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD می‌باشند

*Values in each column followed by similar letters are not significantly different at 5% probability level, using LSD Test.

مقدار سرب، نیکل و کادمیوم قابل‌جذب در زغال زیستی حاصل از کمپوست لجن فاضلاب شهری

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که زغال زیستی تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر سرب و کادمیوم قابل‌جذب داشته اما بر نیکل قابل‌جذب تأثیر معنی‌داری نداشته است (جدول ۹).

جدول ۹. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) سرب، نیکل و کادمیوم قابل‌جذب در زغال زیستی تولیدشده از کمپوست لجن فاضلاب شهری

Table 9. variance analysis of (Mean square) of available lead (Pb), nickel (Ni), and cadmium (Cd) in biochar produced from municipal sewage sludge compost

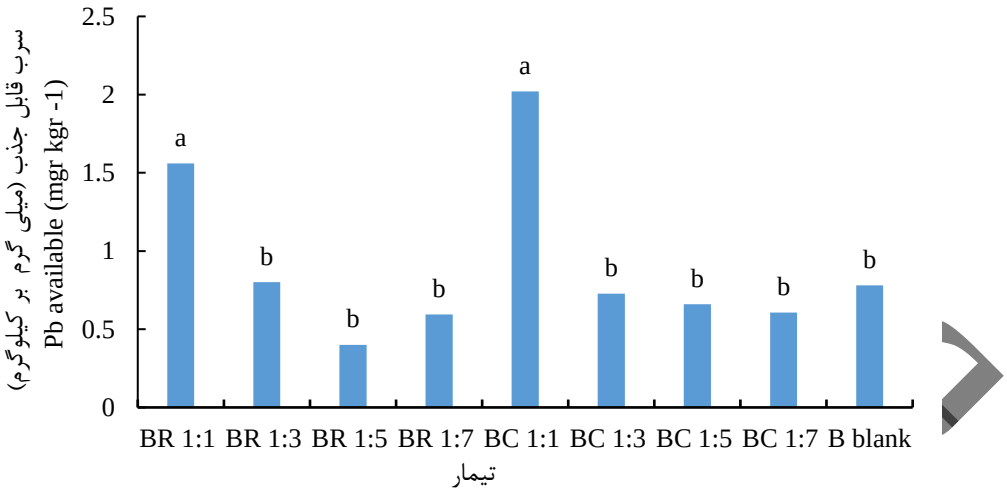
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی DF	سرب Pb	نیکل Ni	کادمیوم Cd
بلوک Block	2	0.346 ^{ns}	0.774 ^{ns}	0.0005 ^{ns}
تیمار Treatment	8	0.837 **	0.37 ^{ns}	0.004**

**: معنی داری در سطح یک درصد
**: significant difference at 1%

ns:عدم معنی داری
ns: No significant difference

زمانی که میزان کادمیوم و سرب را در تیمارهای مختلف حاصل از زغال زیستی با کاه برنج و سرشاخه مرکبات مقایسه می‌کنیم، رفتار کادمیوم و سرب مشابه هم بوده به‌طوری‌که بیشترین مقدار این دو عنصر سنگین در تیمارهای کاه برنج (۱:۱) و سرشاخه مرکبات (۱:۱) دیده شده که در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند و به‌طور معنی‌داری نسبت به سایر تیمارها بیشتر بودند. به نظر می‌رسد کاه برنج و سرشاخه مرکبات حاوی مقدار سرب و کادمیوم بوده که در نسبت‌های بالای لجن فاضلاب + کاه برنج (۱:۱) و لجن فاضلاب+سرشاخه مرکبات (۱:۱) تأثیر خود را نشان داده و سبب افزایش معنی‌دار این دو عنصر سنگین در تیمارهای نامبرده شده است(شکل‌های ۴ و ۵).

نسخه پیش انتشار

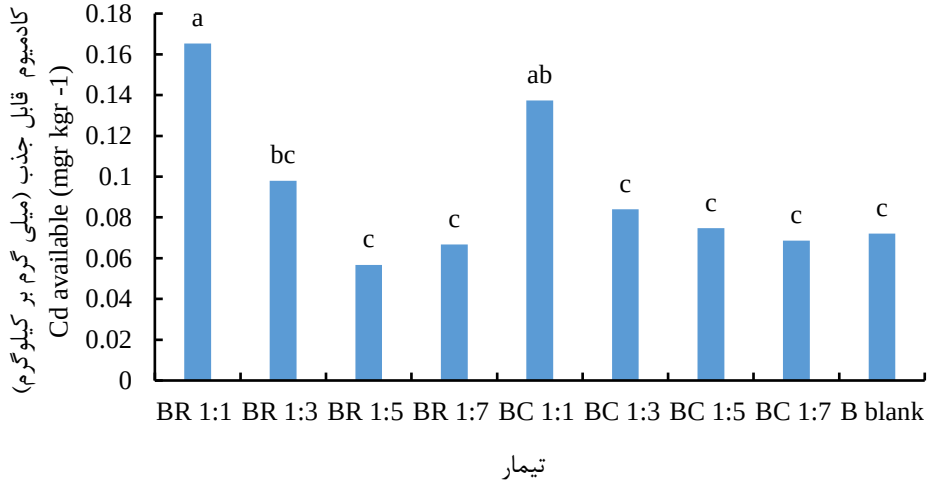


شکل ۴. مقایسه میانگین سرب قابل‌جذب (میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک) در زغال زیستی حاصل از کمپوست

Figure 4. Mean comparison of available Lead (Pb) (mg Kg $^{-1}$) in biochar obtained from compost

* مقادیر دارای حروف مشترک در شکل فاقد تفاوت معنی دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD می باشند

*Values in figure followed by similar letters are not significantly different at 5% probability level, using LSD Test.



شکل ۵. مقایسه میانگین کادمیوم قابل‌جذب (میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک) در زغال زیستی حاصل از کمپوست

Figure 5. Mean comparison of available cadmium(Cd) (mg Kg^{-1}) in biochar obtained from compost

* مقادیر دارای حروف مشترک در شکل فاقد تفاوت معنی دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD می باشند

*Values in figure followed by similar letters are not significantly different at 5% probability level, using LSD Test.

مقایسه سرب، نیکل و کادمیوم کل در تیمارهای کمپوست لجن فاضلاب شهری و زغال زیستی

اختلاف مقدار سرب، نیکل و کادمیوم کل در نمونه‌های کمپوست و زغال زیستی در همه‌ی بقایای گیاهی منفی بود این نشان می‌دهد که مقدار سرب، نیکل و کادمیوم کل در نمونه‌های زغال زیستی نسبت به نمونه‌های کمپوست در هر دو بقایای کاه برنج و سرشاخه مرکبات بیشتر بود (جدول ۱۰) زیرا در طی گرماکافت به دلیل کمتر بودن کاهش وزن فلزات سنگین نسبت به کاهش وزن ترکیبات آلی، غلظت فلزات سنگین در زغال زیستی افزایش می‌یابد. احتمالاً جدا شدن ترکیبات آلی و برخی از مواد معدنی، مانند کربنات با افزایش دمای گرماکافت در غنی شدن فلزات سنگین مشارکت دارند (Jin *et al*., 2016; Khanmohammadi *et al*., 2015; Černe *et al*., 2021). در لجن فاضلاب، فلزات سنگین بیشتر به‌صورت نمک‌های معدنی، سولفیدها، اکسیدها، هیدروکسیدها حضور دارند و در اثر گرماکافت به‌طور عمده نمک‌های معدنی و هیدروکسیدها به اکسیدها و سولفیدها که پایداری حرارتی بیشتری دارند تبدیل می‌شوند (Yuan *et al*., 2015).

اختلاف سرب کل در نمونه‌های کمپوست و زغال زیستی در همه تیمارهای کاه و کلش برنج در سطح یک درصد، در تیمارهای سرشاخه مرکبات با نسبت‌های ۱:۱، ۱:۷ و شاهد در سطح یک درصد و سرشاخه مرکبات با نسبت‌های ۱:۳ و ۱:۵ در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. در مورد نیکل کل، فقط در تیمار شاهد اختلاف کمپوست و زغال زیستی در سطح پنج درصد معنی‌دار بوده اما در سایر تیمارهای سرشاخه مرکبات و کاه برنج معنی‌دار نبوده است. اختلاف کادمیوم کل در نمونه‌های کمپوست و زغال زیستی در تیمارهای کاه برنج با نسبت ۱:۳ و سرشاخه مرکبات با نسبت ۱:۱ معنی‌دار نبوده ولی در سایر تیمارهای بقایای گیاهی در سطح یک درصد و پنج درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۱۰). نتایج نشان می‌دهد که روش کمپوست تولیدشده از لجن فاضلاب به همراه ترکیبات آلی تأثیر بیشتری روی کاهش کادمیوم و مخصوصاً سرب نسبت به روش تبدیل کمپوست به زغال زیستی داشته ولی تفاوت معنی‌داری بین این دو روش بر نیکل کل دیده نشد. با توجه به هزینه بالای انرژی برای تولید زغال زیستی و همچنین غلظت بالای سرب و کادمیوم کل در نمونه‌های زغال زیستی نسبت به کمپوست، استفاده از کمپوست لجن فاضلاب نسبت به زغال زیستی برای کاهش مقدار کل عناصر سنگین ارجحیت دارد.

مقایسه مقدار سرب، نیکل و کادمیوم قابل‌جذب در نمونه‌های کمپوست لجن فاضلاب شهری و زغال زیستی

زغال زیستی بر غیرفعال سازی عناصر سنگین مؤثر هست (Zhou *et al*., 2019). زغال زیستی حاصل از لجن فاضلاب به دلیل تخریب کند و آهسته در خاک، به‌ویژه آن‌هایی که در دمای بالاتر پیرولیز می‌شوند، پتانسیل این رادارند که عناصر سنگین را در ساختار خود برای مدت طولانی غیرمتحرک کنند(Figueiredo *et al*., 2019). اختلاف مقادیر سرب، نیکل و کادمیوم قابل‌جذب در نمونه‌های کمپوست و زغال زیستی در تیمارهای سرشاخه مرکبات و کاه برنج مثبت و معنی‌دار بود، درنتیجه تبدیل کمپوست لجن فاضلاب به زغال زیستی سبب کاهش مقدار سرب، نیکل و کادمیوم قابل‌جذب در زغال زیستی تولیدشده از ترکیبات آلی نسبت

نسخه پیش انتشار

به تیمارهای کمپوست با کاه برنج و سرشاخه مرکبات شد (جدول ۱۰) زیرا زغال زیستی دارای سطح ویژه، تخلخل و اسیدیته بالایی می‌باشد که به غیرمتحرک شدن عناصر سنگین کمک می‌کند(He *et al*., 2019) . زغال‌های زیستی به دلیل افزایش اسیدیته، سطح ویژه، ظرفیت تبادل کاتیونی، تغییر در گروه‌های عاملی سـطحی و برخی مواد محلول باعـث کاهش معنی‌داری در حلالیت و قابلیت استفاده عناصر سنگین در خاک از طریق جذب سطحی و رسوب می‌شوند (Khaefi *et al*., 2021; Zhang *et al*., 2013). مطالعات دیگر هم نشان داد که زغال زیستی میزان کادمیوم و سرب قابل‌جذب را کاهش داد (Rizwan *et al*., 2018; Lahori *et al*., 2020). این یافته‌ها نشان می‌دهند که به‌منظور کاهش قابلیت دسترسی عناصر سنگین مذکور، استفاده از روش زغال زیستی نسبت به کمپوست ارجح بوده و در اولویت قرار می‌گیرد.

جدول ۱۰. بررسی اختلاف مقادیر سرب، نیکل و کادمیوم کل و قابل‌جذب در نمونه‌های کمپوست و زغال زیستی

Table 10. investigation of the differences in total and available lead (Pb), nickel (Ni) and cadmium (Cd) values in compost and biochar samples

تیمار treatment	اختلاف کمپوست و زغال زیستی (کل) The difference between compost and biochar (total)			اختلاف کمپوست و زغال زیستی (قابل‌جذب) The difference between compost and biochar (available)		
	سرب Pb	نیکل Ni	کادمیوم Cd	سرب Pb	نیکل Ni	کادمیوم Cd
rice 1:1	-11.16 **	-4.7 ^{ns}	-4.16 *	3.47 *	3.04*	0.223**
rice 1:3	-20.83 **	-20.61 ^{ns}	-3.57 ^{ns}	3.8 *	6.93**	0.398 *
rice 1:5	-37.17 **	-27.27 ^{ns}	-4.03 *	5.83 **	7.82**	0.492**
rice1:7	-34.17 **	-19.87 ^{ns}	-3.84 **	4.46 *	7.35 **	0.428**
citrus 1:1	-9.67 **	1.64 ^{ns}	-2.93 ^{ns}	6.87 **	2.75*	0.325**
citrus 1:3	-22 *	-70.92 ^{ns}	-5.17 **	4.66 **	5.28**	0.28**
citrus 1:5	-27.5 *	-24 ^{ns}	-5.82 **	7.14 **	6.25**	0.529**
citrus 1:7	-35.33 **	-30.27 ^{ns}	-5.13 **	6.51 **	6.79**	0.581**
blank	-32.5 **	-12.03 *	-2.65 **	4.42 **	7.17**	0.62**

ns:عدم معنی‌داری ⁎: معنی‌داری در سطح پنج درصد ⁎⁎: معنی‌داری در سطح یک درصد

ns: No significant difference *: significant difference at 5% **: significant difference at 1%

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نسخه پیش انتشار

به منظور بررسی نقش کاربرد کاه و کلش برنج و سرشاخه حاصل از هرس مرکبات در لجن فاضلاب شهری و تبدیل آن‌ها به کمپوست و زغال زیستی در کاهش میزان عناصر سنگین، به‌صورت دو طرح مجزا در قالب بلوک کامل تصادفی با ۹ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. طرح اول شامل تولید کمپوست با استفاده از ترکیب لجن فاضلاب شهری با کاه و کلش برنج و سرشاخه مرکبات با نسبت‌های مختلف (۱:۱، ۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷) و همچنین طرح دوم شامل تولید زغال زیستی با استفاده از کمپوست لجن فاضلاب حاصل از طرح اول با کاه و کلش برنج و سرشاخه مرکبات با نسبت‌های مختلف (۱:۱، ۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷) بود. تولید کمپوست از لجن فاضلاب به همراه کاه و کلش برنج با نسبت ۱:۱ سبب کاهش معنی‌داری در مقادیر سرب و کادمیوم کل نسبت به شاهد (لجن فاضلاب) شد. تبدیل کمپوست به زغال زیستی سبب افزایش میزان عناصر سنگین کل مخصوصاً سرب و کادمیوم شد. زغال زیستی حاصل از کمپوست لجن فاضلاب به دلیل تخریب کند و آهسته در خاک پتانسیل این را دارد که عناصر سنگین را در ساختار خود برای مدت طولانی غیرمتحرک کنند درنتیجه، تبدیل کمپوست لجن فاضلاب به زغال زیستی سبب کاهش معنی‌دار در مقدار سرب، نیکل و کادمیوم قابل‌جذب شد. درنتیجه، به‌منظور کاهش قابلیت دسترسی سرب، نیکل و کادمیوم، استفاده از روش زغال زیستی نسبت به کمپوست ارجح بوده و در اولویت قرار می‌گیرد. مقدار کادمیوم و سرب قابل‌جذب در تیمارهای سرشاخه مرکبات (۱:۱) و کاه برنج (۱:۱) به‌طور معنی‌داری نسبت به دیگر تیمارهای زغال زیستی بیشتر بود. تیمار زغال زیستی به همراه کاه برنج با نسبت ۱:۳ به‌عنوان بهترین تیمار زغال زیستی برای کاهش عناصر سنگین کل و قابل‌جذب شناخته شد. درصورتی‌که تولید زغال زیستی ازنظر میزان مصرف انرژی محدودیت ایجاد کند می‌توان از دو ترکیب گیاهی (کاه برنج و سرشاخه مرکبات) روی کمپوست حاصل از لجن فاضلاب استفاده کرد که تأثیر معنی‌داری بر مقدار عناصر سنگین قابل‌جذب داشته‌اند، به‌طوری‌که مقدار نیکل قابل‌جذب در تیمارهای کاه برنج (۱:۱) و سرشاخه مرکبات (۱:۱ و ۱:۳) به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد (لجن فاضلاب) کمتر بود. ترکیبات کاه برنج و سرشاخه مرکبات در کمپوست لجن فاضلاب بر کادمیوم قابل‌جذب هم تأثیر معنی‌داری داشته به‌طوری‌که مقدار این عنصر سنگین در کاه برنج در همه نسبت‌ها (به‌جز ۱:۵) و سرشاخه مرکبات (۱:۱ و ۱:۳) به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش‌یافته است. تیمار کمپوست لجن فاضلاب به همراه کاه و کلش برنج (۱:۱) که کمترین میزان آلایندگی و هزینه برای تولید را داشته که به‌عنوان تیمار بهینه در این مطالعه معرفی شد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، دیگر بقایای گیاهی موجود در منطقه را با لجن فاضلاب ترکیب کرده و تحت شرایط متفاوت فیزیکی و شیمیایی قرار داده و در بازه‌های زمانی مختلف (یک ماه و یا سه ماه) عناصر سنگین اندازه‌گیری شود، و یا در مطالعه دیگر می توان بهترین تیمار این مطالعه را به خاک‌های با pH و یا Eh و یا بافت‌های مختلف تحت کشت گیاه قرار داد و میزان جذب عناصر سنگین توسط گیاه را اندازه‌گیری کرد.

نسخه پیش انتشار

قدردانی

نویسندگان این مطالعه از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری بابت حمایت‌هایی که در اجرای این پژوهش انجام داده‌اند، قدردانی می‌کنند. این مقاله از طرح با شماره ۱۲-۱۴۰۱-۰۱ حاصل‌شده است.

References

Amir, S., Hafidi, M., Merlina, G. and Revel, J.C., 2005. Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge. Chemosphere. 59, 801–810. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.11.016.

Antonkiewicz, J., Popławska, A., Kołodziej, B., Ciarkowska, K., Gambu´s, F., Bryk, M. and Babula, J., 2020. Application of ash and municipal sewage sludge as macronutrient sources in sustainable plant biomass production. Journal of Environmental Management. 264, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110450.

Baker, D.E. and Amacher, M.C., 1982. Nickel, copper, zinc and cadmium. In: Page, AL, Miller R.H. and Keeney, D.R. (eds). Methods of soil analysis, Part 2: chemical and microbiological properties. 2nd edn. ASA, SSSA, Madison, WI, Pp: 323-334.

Casado-Vela, J., Selles, S., Navarro, J., Bustamante, M.A., Mataix, J., Guerrero, C. and Gomez, I., 2006. Evaluation of composted sewage sludge as nutritional source for horticultural soils. Waste Management. 26, 946–952. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.016.

Cerne, M., Palčić, I., Major, N., Pasković, I., Perković, J., Užila, Z. ... and Ban, D., 2021. Effect of sewage sludge derived compost or biochar amendment on the phytoaccumulation of potentially toxic elements and radionuclides by Chinese cabbage. Journal of Environmental Management. 293, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112955.

Dede, G., Sasmaz, Z.B., Ozdemir, S., Caner, C. and Dede, C., 2023. Investigation of heavy metal and micro-macro element speciation in biomass ash enriched sewage sludge compost. Journal of Environmental Management. 344, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118330.

Durdevic, D., Trstenjak, M. and Hulenic, I., 2020. Sewage sludge thermal treatment technology selection by utilizing the analytical hierarchy process. Water. 12, 1-16. https://doi.org/10.3390/w12051255.

Figueiredo, C.C., Coser, T.R., Moreira, T.N., Leao, T.P., Vale, A.T. and Paz-Ferreiro, J., 2019. Carbon mineralization in a soil amended with sewage sludge-derived biochar. Applied Sciences. 9, 1-14. https://doi.org/10.3390/app9214481.

Filipovic, V., Cerne, M., Simůnek, J., Filipovic, L., Romic, M., Ondrasek, G., Bogunovic, I., Mustac, I., Krevh, V., Ferencevic, A., Robinson, D., Palcic, I., Paskovic, I., Goreta Ban, S., Uzila, Z. and Ban, D., 2020. Modeling water flow and phosphorus sorption in a soil amended with sewage sludge and olive pomace as compost or biochar. Agronomy. 10, 1-20. https://doi.org/10.3390/agronomy10081163.

Gutierrez, M.C., Serrano, A., Siles, J.A., Chica, A.F. and Martín, M.A., 2017. Centralised management of sewage sludge and agro-industrial waste through co-composting. Journal of Environmental Management. 196, 387–393. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.042.

He, L., Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P.C. and Xu, J., 2019. Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: mechanisms, potential risks and applications in China. Environmental Pollution. 252, 846–855. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.151.

Jin, J., Lia, Y., Zhang, J., Wu, S., Cao, Y., Liang, P., Zhang, J., Hung, M., Wang, M., Shand, S. and Christie, K., 2016. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. Journal of Hazardous Materials. 320, 417-426. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.050.

Karimi, F., Rahimi, Gh. and Khademi Jolgeh Nezhad, A., 2019. Application of biochar derived sewage sludge on fractionation of copper and zinc in the presence of earthworms in calcareous contaminated soils. J. of Soil Management and Sustainable Production. 9, 1-21. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/ejsms.2019.15244.1823.

Khaefi, F., Hosseinpur, A. and Motaghian, H., 2021. Short-Term Effect of Sewage Sludge Biochar on Availability and Fractionation of Pb in a Contaminated Calcareous Soil. Journal of Soil Research. 4, 514-501. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/ijsr.2021.352675.570.

Khanmohammadi, Z., Afyuni, M. and Mosaddeghi, M.R., 2015. Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar. Waste Management & Research. 33, 275-283. https://doi.org/10.1177/0734242X14565210.

Lahori, A.H., Mierzwa-Hersztek, M., Rashid, M., Kalhoro, S.A., Memon, M., Naheed, Z., Ahmed, M. and Zhang, Z., 2020. Residual effects of tobacco biochar along with different fixing agents on stabilization of trace elements in multi-metal contaminated soils. Journal of Environmental Sciences. 87, 299–309. https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.07.003.

Lindsay, W.L. 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. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x.

Liu, H.T. and Guo, X.X., 2019. Hydroxyapatite reduces potential Cadmium risk by amendment of sludge compost to turfgrass grown soil in a consecutive two-year study. Science of The Total Environment. 661, 48–54. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.053.

Liu, T., Liu, B. and Zhang, W., 2014. Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: its application in soil amendment. Polish Journal of Environmental Studies. 23, 271–275. https://doi.org/WOS:000331987200032.

Lu, T., Yuan, H., Wang, Y., Huang, H. and Chen, Y., 2016. Characteristic of heavy metals in biochar derived from sewage sludge. Journal of Material Cycles and Waste Management. 18, 725-733. https://doi.org/10.1007/s10163-015-0366-y.

Major, N., Schierstaedt, J., Jechalke, S., Nesme, J., Goreta Ban, S., Cerne, M., Sørensen, S.J., Ban, D. and Schikora, A., 2020. Composted sewage sludge influences the microbiome and persistence of human pathogens in Soil. Microorganisms. 8, 1-14. https://doi.org/10.3390/microorganisms8071020.

Matos, G.D. and Arruda, M.A.Z., 2003. Vermicompost as natural adsorbent for removing metal ions from laboratory effluents. Process Biochemistry. 39, 81-88. https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00315-1.

Mendez, A., Gomez, A., Paz-Ferreiro, J. and Gasco, G., 2012. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. Chemosphere. 89, 1354–1359. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.092.

Mininni, G., Blanch, A.R., Lucena, F. and Berselli, S., 2015. EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. Environmental Science and Pollution Research. 22, 7361–7374. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3132-0.

Qian, T., Yang, Q., Jun, D.C.F., Dong, F. and Zhou, Y., 2019. Transformation of phosphorus in sewage sludge biochar mediated by a phosphate-solubilising microorganism. Chemical Engineering Journal. 359, 1573–1580. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.015.

Rao, B., Zhu, Y., Yu, M., Lu, X., Wan, Y., Huang, G. and Liu, X., 2019. High-dry dewatering of sludge based on different pretreatment conditions. Process Safety and Environmental Protection. 122, 288-297. https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.12.018.

Razzaghi, F., Obour, P.B. and Arthur, E., 2020. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and metaanalysis. Geoderma. 361, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055.

Rizwan, M., Ali, S., Abbas, T., Adrees, M., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Qayyum, M.F. and Nawaz, R., 2018. Residual effects of biochar on growth, photosynthesis and cadmium uptake in rice (Oryza sativa L.) under Cd stress with different water conditions. Journal of Environmental Management. 206, 676–683. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.035.

Stefanowicz, A.M., Kapusta, P., Zubek, S., Stanek, M. and Woch, M.W. 2020. Soil organic matter prevails over heavy metal pollution and vegetation as a factor shaping soil microbial communities at historical Zn–Pb mining sites. Chemosphere. 240, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124922.

Torri, S.I. and Lavado, R.S., 2008. Dynamics of Cd, Cu and Pb added to soil through different kinds of sewage sludge. Waste Management. 28, 821–832. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.020.

Wójcik, M. and Stachowicz, F., 2019. Influence of physical, chemical and dual sewage sludge conditioning methods on the dewatering efficiency. Powder technology. 344, 96-102. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.001.

Yuan, X., Leng, L., Huang, H., Chen, X., Wang, H., Xiao, Z., Zhai, Y., Chen, H. and Zeng. G., 2015. Speciation and environmental risk assessment of heavy metal in bio-oil from liquefaction/pyrolysis of sewage sludge. Chemosphere. 120, 645-652. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.010.

Yue, Y., Cui, L., Lin, Q., Li, G. and Zhao, X., 2017. Efficiency of sewage sludge biochar in improving urban soil properties and promoting grass growth. Chemosphere. 173, 551–556. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.096.

Zhang, X., Wang, H., He, L., Lu, K., Sarmah, A., Li, J., Bolan, N.S., Pei, J. and Huang, H., 2013. Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants. Environmental Science Pollution Research. 20, 8472–8483. https://doi.org/ 10.1007/s11356-013-1659-0.

Zhang, X., Wang, X.Q. and Wang, D.F., 2017. Immobilization of heavy metals in sewage sludge during land application process in China: A review. Sustainability, 9, 1-19. https://doi.org/10.3390/su9112020.

Zhang, X., Zhao, B., Liu, H., Zhao, Y. and Li, L., 2022. Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. Environmental Technology & Innovation. 26, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102288.

Zhao, Y., Chen, Y., Dai, H., Cui, J., Wang, L. and Sui, P., 2021. Effects of organic amendments on the improvement of soil nutrients and crop yield in sandy soils during a 4-year field experiment in Huang-Huai-Hai plain, northern China. Agronomy. 11, 1-15. https://doi.org/10.3390/agronomy11010157.

Zhen, G., Lu, X., Kato, H., Zhao, Y. and Li, Y.Y., 2017. Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 69, 559-577. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.187.

Zhou, J., Yu, Y.W., Jiang, Y., Yang, Y.H. and Zhang, C., 2019. Effect of biochar on available heavy metals during sewage sludge composting and land application of compost. Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue, 40, 987-993. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.201804184.

نسخه پیش انتشار