



تأثیر اندازه و فعال سازی بیوچار بر غلظت فلزات سنگین در کمپوست مشترک پسماند جامد

شهری

کمال خلخال^{۱*}، عادل ریحانی تبار^۲، شاهین اوستان^۳ و ناصر علی اصغرزاد^۴* دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، k.khalkhal@tabrizu.ac.ir

۱، ۲ و ۳ استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

چکیده:

بیوچار به منظور کاهش اثرات نامطلوب فرایند کمپوست شدن و ارتقای کیفیت کمپوست نهایی مورد استفاده قرار می گیرد. با این وجود، کاربرد بیوچار فعال و تأثیر اندازه ذرات آن کمتر مورد توجه واقع شده است. در این پژوهش بخش آلی پسماند جامد شهری با بیوچار ۲ تا ۴ میلی متر (B_{2-4mm})، بیوچار ۱ تا ۲ میلی متر (B_{1-2mm})، بیوچار ۰/۵ تا ۱ میلی متر ($B_{0.5-1mm}$)، بیوچار فعال شده با H_2SO_4 ($AB_{0.5-1mm}-H_2SO_4$) و $NaOH$ ($AB_{0.5-1mm}-NaOH$) برای تهیه کمپوست مشترک مخلوط و به مدت ۹۰ روز اجرا شد. طرح آماری به صورت سنجه های تکراری با دو فاکتور (انواع بیوچار و زمان) در سه سطح (۰، ۵ و ۱۰ درصد) و دو تکرار اجرا شد. نتایج نشان داد که در کمپوست نهایی تیمار 10% B_{1-2mm} دارای کمترین غلظت Pb و تیمار AB- $NaOH$ 5، 10% دارای کمترین غلظت Cu و Cd بود ($p < 0.05$). بر اساس حد مجاز فلزات سنگین در استاندارد ملی ایران کمپوست های تولید شده کمتر از حد مجاز آلودگی به فلزات سنگین بودند اما تیمار شاهد از نظر غلظت کل فلزات سنگین و عصاره گیری شده با DTPA دارای بیشترین مقدار بود و افزودن بیوچار به ویژه بیوچار فعال شده با $NaOH$ و بیوچار در اندازه کوچک تر (۰/۵ الی ۲ میلی متر) باعث کاهش غلظت کل و زیست فراهمی فلزات سنگین شد.

واژگان کلیدی: بیوچار فعال شده، زیست فراهمی، کمپوست، فلزات سنگین.

مقدمه:

با صنعتی شدن و افزایش جمعیت جهان، تولید پسماند جامد به طور مداوم در حال افزایش است. در میان روش های مختلف مدیریت پسماند، کمپوست کردن به دلیل هزینه های عملیاتی کم و مزایای اجتماعی و زیست محیطی، مورد توجه است. اما برای کاهش اثرات منفی کمپوست و بهبود کمپوست تولیدی، لازم است از یک سری مواد افزودنی مانند بیوچار در ابتدای فرایند کمپوست شدن که به "کمپوست شدن مشترک"^۱ معروف است استفاده شود.

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار ممکن است بر کارایی آن برای بهبود کیفیت کمپوست تأثیر گذارد. یکی از این خصوصیات اندازه فیزیکی ذرات بیوچار است. اندازه ذرات بیوچار بر توزیع منافذ در توده کمپوست و در نتیجه بر ریز محیط های هوایی و قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی با گروه های عاملی روی سطوح بیوچار تأثیر می گذارد. با این حال، مطالعات قبلی بینش

^۱ Co-composting

محدودی در مورد تأثیر اندازه ذرات بیوچار بر فرآیند کمپوست مشترک ارائه داده‌اند. از طرف دیگر فعال‌سازی باعث افزایش سطح ویژه، حجم تخلخل و قطر منافذ، و همچنین بهبود تخلخل می‌شود (Panwar and Pawar, 2020). روش‌های فعال‌سازی فیزیکی و شیمیایی متداول‌ترین فرایندهای مورد استفاده برای تهیه بیوچار فعال هستند. هر دو روش بر ویژگی‌های محصول نهایی، مانند شکل و اندازه آن تأثیر می‌گذارند. اما فعال‌سازی شیمیایی، نسبت به فعال‌سازی فیزیکی کاربرد گسترده‌تری دارد، زیرا (۱) نیاز به زمان فرایند و دمای فعال‌سازی کمتری دارد. (۲) دارای سطح ویژه بزرگ‌تر، (۳) بازده بالاتر و (۴) ساختار میکرومتخلخل توسعه‌یافته و توزیع‌شده است (Panwar and Pawar, 2020). Ye و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که بیوچار فعال شده با HCl باعث افزایش تهویه، افزایش نگهداشت عناصر غذایی، بهبود رشد و فعالیت میکروبی و افزایش دمای فاز ترموفیلی (افزایش شدت تنفس میکروبی) کمپوست شد. اگرچه در چند سال اخیر تحقیقات محدودی در مورد کمپوست مشترک بیوچار صورت گرفته اما درخصوص استفاده از بیوچار فعال‌شده و اندازه ذرات بیوچار در کمپوست‌سازی اطلاعات بسیار محدود است. هدف این پژوهش مطالعه تأثیر اندازه ذرات و فعال‌سازی بیوچار با NaOH و H₂SO₄ بر تحرک فلزات سنگین در کمپوست پسماند شهری با C/N اولیه و پایین بود.

مواد و روش‌ها

پسماند جامد شهری از محل لندفیل شهر تبریز جمع‌آوری و بعد از تفکیک و انتقال به ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز (در طول شرقی ۴۶ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۲۷ دقیقه و عرض شمالی ۳۸ درجه و ۰۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۰۲ دقیقه) به اندازه کمتر از ۵ سانتی‌متر خرد شد.

بیوچار به روش پیرولیز آهسته در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد از زیست‌توده ضایعات حاصل از هرس درخت آلو و انار در شرایط بدون اکسیژن با زمان ماندگاری یک ساعت در آزمایشگاه حاصلخیزی خاک تهیه شد. بیوچار تهیه شده با استفاده از الک در اندازه‌های ۰/۵ تا ۱ (B_{0.5-1mm})، ۱ تا ۲ (B_{1-2mm}) و ۲ تا ۴ میلی‌متر (B_{2-4mm}) تفکیک شد. بیوچار تهیه شده (B_{0.5-1mm}) با محلول NaOH و H₂SO₄ ۲ مولار با نسبت ۲:۱ (بیوچار:۱: محلول ۲) به مدت ۲ ساعت زیر هود مخلوط شد، سپس سوسپانسیون صاف و بیوچار صاف شده چندین بار با آب مقطر شسته شد تا زمانی که pH در حدود ۷ ثابت شد. بیوچار شسته شده به مدت ۱۲ ساعت در آون در دمای ۶۵ درجه سلسیوس قرار داده شد تا خشک شد (اصلاح شده روش Fan et al., 2010).

این آزمایش به صورت طرح آماری اندازه‌گیری‌ها یا سنج‌های تکراری^۲ با دو فاکتور (انواع بیوچار و زمان) در سه سطح مقدار بیوچار (۰، ۵ و ۱۰٪) و دو تکرار به مدت ۳ ماه اجرا شد. بدین منظور پسماند جامد شهری با سه سطح ۰، ۵ و ۱۰ درصد از بیوچار ۲ تا ۴ میلی‌متر (B_{2-4mm})، بیوچار ۱ تا ۲ میلی‌متر (B_{1-2mm})، بیوچار ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر (B_{0.5-1mm})، بیوچار فعال‌شده با اسید سولفوریک (AB_{0.5-1mm}-H₂SO₄) و بیوچار فعال‌شده با سود (AB_{0.5-1mm}-NaOH) مخلوط شد. این مواد در داخل بشکه‌های پلاستیکی ۱۰۰ لیتری با وزن تقریبی ۷۰ کیلوگرم بهم زده و نگهداری شدند. هفته‌ای یک بار توده کمپوست همزده و کاملاً مخلوط شد. رطوبت تیمارها تا پایان آزمایش در محدوده ۶۰-۵۰ درصد وزنی نگهداری شد. نمونه‌برداری در روزهای ۱، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ انجام و هر بار حداقل ۵ نمونه فرعی (حدود ۵۰۰ گرم) از اعماق مختلف بشکه برداشته، مخلوط نموده و یک نمونه مرکب بدست آمد. غلظت Cu، Cd و Pb قابل‌دسترس با روش DTPA (Chen et al, 2010)، غلظت کل Cu، Cd و Pb با هضم خاکستر به وسیله مخلوط دو اسید غلیظ با نسبت ۳:۱ HCl:HNO₃ تعیین شدند (Jones Jr. and Case, 1990).

نتایج و بحث:

تغییرات غلظت کل عناصر در طول کمپوست‌شدن

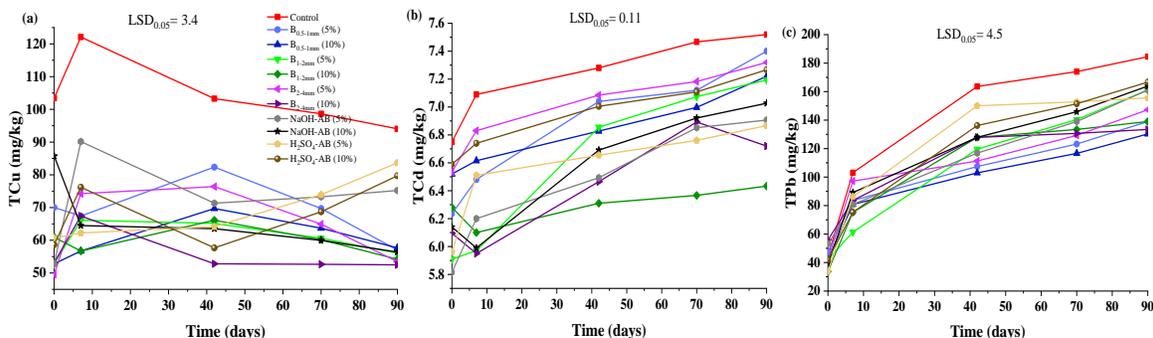
^۲ Repeated Measures

تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی فاکتورهای تیمار، زمان و اثر متقابل تیمار×زمان برای غلظت کل عناصر (Cu, Cd) و (Pb) معنادار بودند ($p < 0.01$) (جدول ۱). همانند با نتایج Awasthi et al. (2017) غلظت کل فلزات سنگین نیز در طول کمپوست شدن افزایشی بود (شکل ۱). دلیل افزایش غلظت کل عناصر در طول کمپوست شدن می تواند کاهش رطوبت، کاهش وزن و حجم محصول نهایی در اثر تجزیه باشد. در این پژوهش در کمپوست نهایی، غلظت عناصر کل Cu، Cd و Pb در تیمار شاهد به طور معنادار ($p < 0.05$) بیشتر از بقیه تیمارها بود. بنابراین تمام تیمارهای بیوچار باعث کاهش غلظت فلزات سنگین به دلیل اثر رقت یا کاهش فراهمی عناصر غذایی به دلیل جذب سطحی بر روی بیوچار، شدند (Banegas et al, 2007). تیمار (10%) B_{1-2mm} در کمپوست نهایی دارای کمترین غلظت کل Cd و تیمار (10%) B_{0.5-1mm} دارای کمترین غلظت سرب بود. بر اساس حد مجاز فلزات سنگین در استاندارد ملی ایران کمپوست های تولید در این پژوهش کمتر از حد مجاز آلودگی به فلزات سنگین و کمپوست درجه یک می باشد.

جدول ۱. تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر غلظت کل فلزات سنگین در طول کمپوست شدن مشترک

منبع	درجه آزادی	Cu	Pb	درجه آزادی	Cd
تیمار	۱۰	۱۶۸۸/۲۳**	۱۰۷۰/۸۹**	۱۰	۰/۸۱**
خطا (تیمار)	۴	۲/۳۳	۲۱/۷	۱۱	۰/۰۰
زمان	۱	۳۱۰/۲۸**	۴۵۰۱۴/۴**	۳/۱۱	۳/۶**
تیمار× زمان	۴۰	۱۶۷/۰۴**	۲۴۲/۹۱**	۳۱/۰۶	۰/۰۷**
خطا (زمان)	۵۴	۲/۵۸	۵/۰۴	۳۴/۱۶	۰/۰۰
ضریب تغییرات (%)		۲۲/۲	۳۹/۳	۱۸/۹	۶/۷

* معنی دار در سطح احتمال ۹۹٪، ** معنی دار در سطح احتمال ۹۵٪ و NS غیر معنی دار



شکل ۱. تغییرات غلظت کل فلزات سنگین در طول کمپوست شدن مشترک: (a) مس، (b) کادمیوم و (c) سرب.

زیست فراهمی عناصر غذایی و فلزات سنگین در طول کمپوست شدن

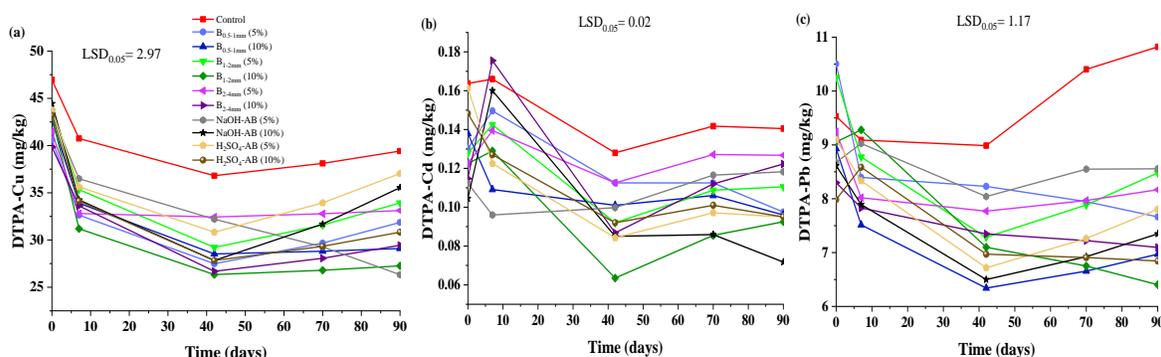
تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی فاکتورهای تیمار، زمان و برهمکنش تیمار× زمان برای غلظت عناصر Cu، Cd و Pb در سطح احتمال ۹۹٪ معنادار بودند (جدول ۲). روند تغییرات غلظت عناصر Cu، Pb و Cd کاهش می یابد (شکل ۲). در کمپوست نهایی تیمار شاهد برای عناصر Pb ($p < 0.05$) و Cu ($p > 0.05$) دارای بیشترین غلظت قابل دسترس بود که می تواند منجر به آلودگی منابع آب و خاک شود. همانند نتایج Awasthi و همکاران (۲۰۱۷) زیست فراهمی فلزات سنگین عصاره گیری شده با DTPA در تیمارهای بیوچار نسبت به شاهد کمتر است (شکل ۲). در کمپوست نهایی تیمار 10% B_{1-2mm} دارای کمترین غلظت Pb و تیمار 10% AB-NaOH دارای کمترین غلظت Cd بود ($p < 0.05$). از جمله خواص بیوچار می توان به افزایش گروه

های عاملی، CEC، pH، فعالیت میکروبی و مواد هیومیکی اشاره کرد که فراهمی فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی را کاهش می‌دهد (Chen et al., 2022).

جدول ۲. تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بیوجار بر غلظت فلزات سنگین عصاره‌گیری با DTPA که در طول کمپوست مشترک

منبع	درجه آزادی	Cu	Cd	Pb
تیمار	۱۰	۳۵/۵۸**	۰/۰۰۲*	۶/۷۹**
خطا (تیمار)	۱۱	۱۱/۱۲	۰/۰۰	۱/۰۵
زمان	۴	۱۰۹۹/۷**	۰/۰۲**	۲۶/۷۶**
تیمار × زمان	۴۰	۵/۴۸**	۰/۰۰**	۰/۷۹**
خطا (زمان)	۴۴	۲/۱۷	۰/۰۰	۰/۳۴
ضریب تغییرات (%)		۲۶/۷	۳۵	۲۱/۱

* معنی‌دار در سطح احتمال ۹۹٪، ** معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵٪ و NS غیر معنی‌دار



شکل ۲. تغییرات غلظت فلزات سنگین (عصاره‌گیری شده با DTPA) در طول کمپوست شدن مشترک: مس (a)، کادمیوم (b) و سرب (c).

نتیجه‌گیری:

این پژوهش تأثیر مثبت استفاده از بیوجار فعال شده و اندازه ذرات آن را بر فرایند کمپوست‌سازی پسماندهای شهری نشان می‌دهد. تیمار شاهد بالاترین میزان فلزات سنگین کل و عصاره‌گیری شده با DTPA را نشان داد. تیمارهای AB-NaOH (10%)، AB-H₂SO₄ (10%)، B_{0.5-1mm} (10%) و B_{1-2mm} (10%) بیشترین تأثیر را در کاهش زیست‌فراهمی فلزات سنگین Cu، Cd و Pb داشتند.

منابع

- Awasthi, M. K., Wang, Q., Chen, H., Wang, M., Ren, X., Zhao, J., Li, J., Guo, D., Li, D., & Zhang, Z. (2017). Evaluation of biochar amended biosolids co-composting to improve the nutrient transformation and its correlation as a function for the production of nutrient-rich compost. *Bioresource Technology*, 237, 156–166.
- Banegas, V., Moreno, J. L., Moreno, J. I., García, C., León, G., & Hernández, T. (2007). Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust. *Waste Management*, 27(10), 1317–1327.
- Chen, X., Du, Z., Liu, D., Wang, L., Pan, C., Wei, Z., Jia, L., & Zhao, R. (2022). Biochar mitigates the biotoxicity of heavy metals in livestock manure during composting. *Biochar*, 4(1), 48.
- Chen, Y. X., Huang, X. D., Han, Z. Y., Huang, X., Hu, B., Shi, D. Z., & Wu, W. X. (2010). Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting. *Chemosphere*, 78(9), 1177–1181.
- Fan, Y., Wang, B., Yuan, S., et al. (2010). Adsorptive removal of chloramphenicol from wastewater by NaOH modified bamboo charcoal. *Bioresource Technology*, 101, 7661–7664.
- Jones Jr., J. B., & Case, V. W. (1990). Sampling, handling, and analyzing plant tissue samples. In R. L. Westerman (Ed.), *Soil testing and plant analysis* (pp. 389–427). SSSA Inc.

- Panwar, N. L., & Pawar, A. (2020). Influence of activation conditions on the physicochemical properties of activated biochar: A review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(3), 1–23.
- Ye, S., Zeng, G., Wu, H., Liang, J., Zhang, C., Dai, J., Xiong, W., Song, B., Wu, S., & Yu, J. (2019). The effects of activated biochar addition on remediation efficiency of co-composting with contaminated wetland soil. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 278–285.

The effect of biochar particle size and activation on the bioavailability of heavy metals in municipal solid waste co-composting

Kamal Khalkhal*¹, Adel Reyhanitabar², Shahin Oustan³ and Naser Aliasgharzad⁴

1. PhD Student, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
k.khalkhal@tabrizu.ac.ir

2, 3, 4. Prof, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

Biochar is used to lessen the adverse consequences of the composting process and improves the final co-compost quality. However, less attention has been given to using activated biochar and its particle size. In this research, the municipal solid wastes were mixed thoroughly with different-sized biochars (B_{2-4mm}, B_{1-2mm} and B_{0.5-1mm}) and activated biochars (H₂SO₄-AB_{0.5-1mm} and NaOH-AB_{0.5-1mm}) and co-composted for 90 days until compost maturity. The results showed that in the final compost, the B1-2mm 10% treatment had the lowest Pb concentration, while the AB-NaOH 5% and 10% treatments had the lowest Cu and Cd concentrations ($p < 0.05$). Based on the permissible limits for heavy metals in the national standard of Iran, the composts produced in this study contained heavy metal concentrations below the allowable level. However, the control treatment exhibited the highest total and DTPA-extractable heavy metal concentrations. The addition of biochar, especially activated biochar (NaOH-AB) and biochar with smaller particle sizes (0.5 to 2 mm), led to a reduction in both the total concentration and mobility of heavy metals.

Keywords: bioavailability, biochar, co-composting, heavy metals