

ارزیابی شاخص‌های هوموسی شدن و جوانه‌زنی بذر و غلظت برخی عناصر در کمپوست مشترک کود دامی و مواد آلی جنگلی تحت تأثیر مصرف بیوجار چوبی، لئوناردیت و زغال سنگ

چکیده

در این پژوهش اثر مصرف بیوجار، لئوناردیت و زغال سنگ بر شاخص‌های هوموسی شدن و جوانه‌زنی و غلظت برخی عناصر در کمپوست مشترک کود دامی و مواد آلی جنگلی مطالعه شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. فاکتور اول تیمار (مواد افزودنی) در دو سطح (۲ و ۴ درصد وزنی) با مواد اولیه مخلوط شدند و فاکتور دوم زمان بود. در طول فرایند کمپوست شدن و در هفته‌های اول تا ۱۲ نمونه برداری انجام و دما، EC، نسبت C/N، غلظت نیترات و غلظت کل عناصر P، K، Ca، Mg، Na، Fe، Zn، Cu و Mn، شاخص‌های هوموسی شدن و جوانه‌زنی در کمپوست اندازه‌گیری شدند. بر طبق نتایج، تیمار زغال سنگ در سطح ۲ درصد بالاترین دما و تیمار لئوناردیت ۲ درصد بیشترین طول مدت زمان فاز ترموفیلی را داشتند. تیمار زغال سنگ در سطح ۴ درصد باعث افزایش معنی دار EC و بیوجار باعث افزایش غلظت نیترات و نسبت C/N شد. افزودن لئوناردیت باعث افزایش معنی دار درصد اسید هیومیک و فولویک شد و بالاترین مقادیر شاخص هوموسی شدن و درجه پلیمریزاسیون را ایجاد کرد. برخلاف انتظار مواد افزودنی بر شاخص جوانه‌زنی و نسبت‌های E_3/E_5 و E_4/E_6 اثر معنی داری نداشتند. در مورد غلظت کل عناصر، تیمار شاهد دارای غلظت عناصر بالاتری در مقایسه با سایر تیمارها بود. نتایج این تحقیق نشان داد با توجه به هزینه‌های مواد اولیه، زغال سنگ تیمار مناسبی برای تسریع تولید و بهبود کیفیت کمپوست می‌باشد و از لئوناردیت به دلیل درصد بالای مواد هیومیک می‌توان در انتهای کمپوست شدن به منظور غنی سازی و بهبود کیفیت کمپوست تولید شده استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: بیوجار، زغال سنگ، کمپوست شدن مشترک، کود دامی، لئوناردیت

Evaluation of humification and seed germination indices and concentration of some elements in the co-composting of manure and forest organic materials under the influence of using wood biochar, leonardite, and coal

Abstract

In this study, the effect of biochar, leonardite, and coal was investigated on humification and germination index, and the concentration of some elements in the co-composting of manure and forest organic materials. The experiment was conducted in a factorial design with two factors, namely treatments at two levels (2 and 4% by weight) mixed with the raw materials and time was the second factor. Sampling was carried out during the composting process in the first to 12 weeks, measuring temperature, EC, C/N ratio, nitrate, and total concentrations of P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Cu, and Mn, humification and germination index in the compost. The results showed that the coal (2%) had the highest temperature, while the leonardite (2%) had the longest thermophilic phase period. The coal (4%) led to a significant increase in EC, and biochar increased nitrate concentration and C/N ratio. The addition of leonardite resulted in a significant increase in humic and fulvic acids concentrations, as well as the highest values of humification and of polymerization index. The additives did not have a significant effect on germination index and the E_3/E_5 and E_4/E_6 ratios. The control had higher concentrations of measured elements compared to other treatments. The results of this study suggest that considering the cost of raw materials, coal is a suitable treatment for accelerating the production and improving the quality of compost, and leonardite, due to its high humic substrate, can be used at the end of composting for the enrichment of the produced compost.

Keywords: *Biochar, coal, co-composting, leonardite, manure*

افزایش تقاضا برای مواد غذایی با منشاء حیوانی منجر به افزایش تعداد حیوانات تولید کننده غذا و بنابراین تولید زیاد کود دامی شده است (Zalewska et al., 2024). در واقع، یک گاو شیری می‌تواند ۵۴ کیلوگرم کود مرطوب در روز تولید کند (Giroto and Cossu, 2017)، که معادل ۷ تا ۸ درصد وزن بدن گاو است (Font-Palma, 2019). چنین تولیدی نگرانی‌های زیست‌محیطی را برانگیخته است که تولیدکنندگان حیوانات غذایی را به سمت شناسایی راه‌حل‌های اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست است، زیرا با تجزیه زیستی و کاهش رطوبت، حجم زباله‌های آلی کمپوست کردن عملیات ساده، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست است، زیرا با تجزیه زیستی و کاهش رطوبت، حجم زباله‌های آلی جامد را کاهش، حمل‌ونقل و ذخیره را آسان و در عین حال عوامل بیماری‌زا، باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک و ARGs^۱ را از بین می‌برد (Zalewska et al., 2024; Tasho and Cho, 2016; Gou et al. 2018; Bernal et al., 2009). بنابراین این فناوری به‌طور گسترده‌ای برای استفاده جامع از کود دامی به کار می‌رود.

به‌رغم فواید زیاد کمپوست رسیده و با کیفیت برای بهبود حاصلخیزی خاک و بهبود رشد گیاهان، اما بعضی از تأثیرات منفی در خاک و محیط‌زیست در حین تولید و مصرف کمپوست همچون انتشار گازهای گلخانه‌ای (CH₄, CO₂ and N₂O) و بوی بد، هدررفت کربن و نیتروژن و همچنین آلودگی منابع آب و خاک به فلزات سنگین می‌تواند رخ دهد (Barthod et al., 2018; Chen et al., 2022). لذا مهم است که هدررفت کربن و نیتروژن و سایر عناصر غذایی در طول تولید و استفاده از کمپوست، برای بالا بردن ارزش اقتصادی آن و همچنین کاهش تصاعد گازهای گلخانه‌ای کنترل شود. یکی از رهیافت‌ها در این زمینه فرایند کمپوست‌شدن مشترک یا توأم یا هم‌نوا^۲ است (Sánchez-García et al., 2015). در این فرایند از ابتدا برخی مواد افزودنی به زیست‌توده افزوده شده و باهم فرایند کمپوست‌شدن را طی می‌کنند و این با مخلوط کردن این افزودنی‌ها با کمپوست رسیده متفاوت است. این افزودنی‌ها ممکن است آلی، معدنی، زیستی یا ترکیبی از افزودنی‌های مختلف باشند (Awasthi et al., 2018). افزودن این مواد در هنگام کمپوست‌شدن ممکن است در سه مورد زیر بر پارامترهای کیفی کمپوست مشترک حاصله بیشترین تأثیر را داشته باشند: (۱) بهبود تهویه توده کمپوست، تسریع در تجزیه مواد آلی و کاهش مدت‌زمان کمپوست‌شدن با دخالت در فاز ترموفیلی، (۲) افزایش غلظت عناصر غذایی و کاهش تحرک فلزات، افزایش پایداری کربن و افزایش ارزش زراعی محصولات نهایی و (۳) کاهش آسویی نیترات و انتشار گازهای گلخانه‌ای و بودار (Morales et al., 2016; Sánchez-García et al., 2015).

به‌طور کلی هوموسی‌شدن به فرایند تبدیل مواد آلی به‌آسانی قابل تجزیه به مواد هیومیک کاملاً تثبیت‌شده و مقاوم اطلاق می‌شود. تصور می‌شود که هوموسی‌شدن یک عامل کلیدی در بهبود کیفیت کمپوست باشد. برخی از محققان شاخص‌های بلوغ را بر اساس نظارت بر مواد هیومیک، اسیدهای هیومیک (HA) و اسیدهای فولویک (FA) پیشنهاد کرده‌اند (Wang et al., 2014). طوری که افزایش مقدار مواد هیومیک در طی فرایند کمپوست باعث بهبود کیفیت کمپوست می‌شود. بنابراین به دلیل اهمیت مواد هیومیک برای محیط‌زیست، ساختار خاک و همچنین اثرات مفید آن‌ها بر رشد گیاه (Adani et al., 1999) نظارت بر هوموسی‌شدن ماده آلی برای ارزیابی بلوغ و کیفیت کمپوست ضروری است.

برخی محققان با پژوهش روی افزودنی‌های مختلف همانند زغال بامبو، بیوجار بامبو، بیوجار کلش برنج، کلش جو، خرده چوب بر روی کود دامی به این نتیجه رسیدند که افزودنی‌های مذکور باعث افزایش دما در مرحله ترموفیلیک، افزایش تخریب مواد آلی، افزایش هوموسی‌شدن، کاهش انتشار بو و گازهای گلخانه‌ای، مهار عوامل بیماری‌زا، کاهش تحرک فلزات سنگین و بهبود فرایند کمپوست شده‌اند (Chung et

¹ Antibiotic Resistance Genes

² Co-composting

مطالعات، Hagemann et al. (2018) گزارش کردند که بیوپچار تخریب مواد آلی را در کمپوست مشترک کود دامی را افزایش نداد. اما بر خلاف سایر

با این حال، مواد افزودنی مختلف دارای تأثیرات متضاد هستند و بنابراین باید با شناخت مناسب از آن‌ها استفاده شود. از طرف دیگر کاربرد تنهایی این افزودنی‌ها برای جایگزینی کودهای آلی و معدنی به‌ویژه جایگزینی نیتروژن هزینه‌بر است و حتی ممکن است دارای برخی اثرات منفی نیز باشند. به‌عنوان مثال بیوپچار می‌تواند باعث افزایش pH خاک‌های قلیایی و همچنین تشدید تحرک فلزات سمی یا متالوئیدها (مانند آرسنیک) در خاک شود (Mukherjee & Lal 2014) اما برخی از این اثرات منفی و محدودیت‌ها را در برخی از خاک‌های قلیایی می‌توان با ترکیب بیوپچار در کمپوست برطرف کرد (Agegnehu et al., 2017). استفاده از بیوپچار به دلیل ساختار فیزیکوشیمیایی آن در فرایند کمپوست‌شدن مشترک منجر به بهبود کمپوست، تأثیر بر ساختار جامعه میکروبی، کاهش اتلاف نیتروژن، تخریب مواد آلی و افزایش هوموسی‌شدن، کاهش فراهمی زیستی و تحرک فلزات سنگین شده است (Chen et al., 2022; Cui et al., 2020; Awasthi et al., 2020).

از افزودنی‌های که تاکنون گزارش منتشر شده‌ای از آن وجود ندارد لئوناردیت می‌باشد. لئوناردیت گونه‌ای از لیگنیت هوادیده شده است که دارای فولویک و هومیک اسید و حاوی مقادیر زیادی از کربن و گروه‌های عاملی (کربوکسیل، هیدروکسیل، فنلی و کربونیل) است که در جذب فلزات سنگین بسیار مؤثر می‌باشند (Olivella et al., 2011). همچنین زیست‌تخریب‌پذیری و سازگاری آن با محیط‌زیست می‌تواند عامل مهم در انتخاب این ماده برای حذف فلزات سنگین باشد. اما به‌رغم ارزان بودن و استخراج در ایران در فرایند کمپوست‌شدن ضایعات استفاده نشده است. زغال‌سنگ‌ها هم نوعی سنگ رسوبی هستند که از تجزیه مواد گیاهی مدفون شده در شرایط دما و فشار بالا در فرایند کربنی‌شدن حاصل شده و این ماده منشأ بسیاری از کودهای حاوی مواد هیومیکی است که در کشاورزی مصرف می‌شود. تأثیر کمپوست‌های مشترک روی گیاهان به‌طور کلی با ارزیابی شاخص جوانه‌زنی که یک شاخص بیولوژیکی برای ارزیابی سمیت و بلوغ کمپوست است مورد آزمایش قرار می‌گیرد (Zucconi et al., 1981). وجود مواد افزودنی ممکن است بر این شاخص جوانه‌زنی تأثیر بگذارد، زیرا مواد افزودنی تأثیر خود را بر فراهمی عناصر غذایی دارند. Chen et al. (2010) نشان دادند که افزودن زغال بامبو و سرکه بامبو در طی کمپوست‌شدن کود حیوانی شاخص جوانه‌زنی را تا ۹۵ درصد افزایش داد و ده سال بعد Li et al. (2020) گزارش کردند که افزودن بیوپچار بامبو به مخلوط کلش ذرت و کود حیوانی در طی فرایند تهیه کمپوست، این شاخص را تا ۱۵۰ درصد افزایش داد که بیانگر این است که بیوپچار و زغال می‌توانند به‌عنوان محرک رشد گیاه در نظر گرفته شوند.

مواد افزودنی برای تولید محصول نهایی کمپوست با کیفیت بالا بایستی ارزان، کارآمد، ماندگاری بالا و فاقد اثرات سوء باشند. با در نظر گرفتن هزینه، فراوانی، قابلیت دسترسی مکانی و زمانی افزودنی و بستر کمپوست، فرایند کمپوست‌شدن با این مواد بایستی متناسب با منطقه و در جهت بومی‌سازی باشد. مطالعات صورت گرفته در مورد بیوپچار در مقادیر و اندازه‌های خاص، شرایط پیرولیز، منبع مواد اولیه، سازگاری با محیط‌زیست و بعد اقتصادی نیاز به بررسی و تأیید دارد. برای همین منظور در مطالعه حاضر از ضایعات هرس درختان به عنوان ماده اولیه ارزان و سازگار با محیط زیست برای تولید بیوپچار استفاده می‌شود. از طرف دیگر به دلیل ارزان بودن و داشتن منابع فراوان لئوناردیت و زغال‌سنگ در ایران، لازم است این دو افزودنی نیز در کنار افزودنی برتری همچون بیوپچار بررسی شوند. مرور تحقیقات منتشر شده پیشین نشان داد که در کشور ما ایران تا زمان انجام تحقیق حاضر در سال ۱۴۰۲ تأثیر بیوپچار چوبی توأم با لئوناردیت و زغال‌سنگ بر شاخص هوموسی‌شدن و شاخص جوانه‌زنی بذر دو شاخص مهم کیفیت کمپوست و غلظت برخی عناصر مطالعه یا گزارش نشده بود و نظر به اهمیت موضوع، این مطالعه انجام شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی بستر کمپوست

در این تحقیق برای تولید کمپوست، مخلوط کود گاوی، کود مرغی و مواد آلی جنگل (چوب و بقایای برگ‌های درختان توسکا، آزاد، نمدار و کلهو) به نسبت وزنی برابر استفاده شدند. برخی از ویژگی‌های مواد افزودنی و مواد خام اولیه مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. بیوجار مورد استفاده در این تحقیق از شرکت دانش‌بنیان فصل پنجم استان فارس تهیه شد. بر طبق اعلام شرکت مذکور بیوجار از هرس درختان آلو و انار در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت در شرایط کم اکسیژن تهیه شده است. لئوناردیت و زغال سنگ نیز از شرکت فیزیل توپراق سهند استان آذربایجان شرقی تهیه شدند. بیوجار، زغال سنگ و لئوناردیت در ابعاد دو میلی‌متری پودر شده و به صورت جداگانه در سه سطح صفر، ۲ و ۴ درصد با مواد اولیه کمپوست در تل‌هایی با اندازه ۱×۱×۳ (ارتفاع×عرض×طول) متر مخلوط شدند. رطوبت تیمارها تا پایان آزمایش به صورت دستی در حدود ۵۵-۵۰ درصد وزنی نگهداری شد. هر سه یا چهار روز یک‌بار توده‌های کمپوستی هم زده شد و کاملاً مخلوط شده و دمای توده با استفاده از دماسنج دیجیتالی روزانه اندازه‌گیری شد.

جدول ۱. آنالیز CHNS، مقادیر pH و EC و غلظت کل عناصر برای مواد افزودنی و مواد خام اولیه

بیوجار	لئوناردیت	زغال سنگ	کود گاوی	کود مرغی	مواد آلی جنگلی
۷/۸	۶/۵	۶/۷	۷/۹	۷/۷	۷/۱
۱/۱	۲/۵	۲/۹	۳/۶	۴/۵	۲/۱
۵۲	۳۳	۵۱	۲۱	۲۲	۲۵
-/۲	-/۲	-/۶	۱/۲	۲/۳	۱/۸
۱/۲	۳/۹	۳/۴	-/۹	۱/۵	-/۹
۱/۶	-	-	-	-	-
۲۵	-	-	-	-	-
۶/۵۷	۱/۰۷۵	۹/۷۵	۱/۸۶	۷/۴۳	۱/۷۸
۵۰/۵۷	۷۲/۵۱	۶۹/۴۸	۳۹/۷	۶۹/۷۵	۲۹/۴
۲۵۱/۶۵	۱۸۱/۹۵	۲۵۰/۵۲	۱۴۸/۹	۲۹۰/۳۲	۹۶/۹
۲/۴۸	۳/۵۱	۴/۲۲	۳/۲۱	۳/۲۵	۲/۸۷
۳۹/۹۱	۲۸/۲۳	۲۶/۷۵	۱۵/۲۱	۲۷/۶۱	۱۳/۸۱
۴/۱۳	۵/۱۸	۸/۱۸	۴/۵۹	۸/۲۵	۳/۳۷

*خط تیره به معنی عدم اندازه‌گیری صفت مورد نظر است.

طرح آماری و تیمارهای آزمایشی

این تحقیق به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سایت تولید کمپوست شهرداری شهر سراب واقع در استان آذربایجان شرقی به مدت سه ماه انجام گرفت. فاکتور اول شامل تیمار در دو سطح و فاکتور دوم زمان بود. آزمایش در سه تکرار انجام شد.

نحوه و زمان نمونه‌برداری از تل‌ها

به هنگام نمونه‌برداری حداقل ۳ نمونه فرعی از اعماق مختلف تل‌ها برداشت و مخلوط شدند و در نهایت یک نمونه مرکب از هر تکرار جهت اندازه‌گیری صفات و تجزیه به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری شاخص‌های مورد نظر در ۹ زمان انجام شد که به ترتیب عبارت‌اند از: زمان ۱ (شروع آزمایش)، زمان ۲ (هفته اول)، زمان ۳ (هفته دوم) تا زمان ۹ (هفته دوازدهم).

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نمونه‌های کمپوست

دمای توده در ۳۰ روز اول هر روز و پس از آن به صورت هفتگی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری دمای داخل توده از دماسنج دیجیتالی استفاده شد که سیم مخصوص آن در داخل لوله‌های مخصوص اندازه‌گیری دما قرار گرفته و دمای توده اندازه‌گیری گردید. سوسپانسیون ۱:۵ آب مقطر: کمپوست تهیه و به مدت نیم ساعت به صورت دورانی و با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه شیک شد و سپس EC محلول روشنوار با استفاده از دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد (Peters, 2003). نیتروژن نیتراتی به روش رنگ‌سنجی با اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد (Cataldo et al., 1975). تعیین غلظت کل عناصر فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سدیم، آهن، روی، مس و منگنز به روش هضم خشک انجام گرفت. پس از خاکستر شدن نمونه‌ها و خارج کردن آن‌ها از کوره، ۱۰ میلی‌لیتر مخلوط دو اسید (۳۰۰ میلی‌لیتر HCl غلیظ و ۱۰۰ میلی‌لیتر HNO₃ غلیظ که مجموعاً با آب مقطر به حجم یک لیتر رسانده شد) به نمونه‌های داخل بوتله‌های چینی اضافه گردید و در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده و از خشک شدن آن جلوگیری شد. پس از سرد شدن، محتویات بوتله چینی با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ به داخل بالن ۱۰۰ میلی‌لیتری صاف گردید و با آب مقطر به حجم رسانده شد (Westerman, 1990). در داخل این عصاره‌ها، غلظت عناصر P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Cu و Mn اندازه‌گیری شد. سپس اندازه‌گیری فسفر کل با استفاده از روش رنگ‌سنجی اسکوریبک اسید و دستگاه اسپکتروفوتومتر، اندازه‌گیری پتاسیم و سدیم با دستگاه فلیومتر (مدل Corning 410) و بقیه عناصر با دستگاه جذب اتمی (مدل Shimadzu, AA-6300) تعیین شدند.

اندازه‌گیری ویژگی هوموسی‌شدن

اسید هیومیک در تیمارهای آزمایشی با روش Qi et al. (2004) استخراج گردید. برای این منظور نمونه‌های کمپوست با نسبت ۱:۱۰ (مایع/جامد) با سود نیم مولار مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت (زمان استخراج) در اتاق تاریک با شدت ۱۶۰ دور در دقیقه شیک شدند. فاز محلول از فاز رسوب با سانتریفیوژ (۶۰۰۰ rpm) جداسازی و با استفاده از اسید HCl شش مولار pH به کمتر از دو رسانده شده تا اسید هیومیک رسوب کرده از اسید فولویک جداسازی شود. اسید هیومیک جداسازی شده با HCl/HF (با غلظت ۰/۱ مولار HCL و ۰/۳ مولار HF) خالص‌سازی و با آب مقطر تا زمانی که pH به حدود ۴-۵ برسد، شسته شده و در نهایت در فریز درایر یا محفظه گاز نیتروژن خشک گردید. برای تعیین مقدار اسید فولویک در تیمارها از روش قلیایی (Carter & Gregorich, 2007) استفاده شد. شاخص هوموسی‌شدن، به صورت زیر محاسبه گردید:

$$HR = [(CHA + CFA)/TOC] \times 100$$

$$DP = CHA/CFA$$

در این رابطه HR شاخص هوموسی‌شدن، TOC کربن کل آلی (درصد) -CHA درصد کربن آلی اسید هیومیک و CFA درصد کربن آلی اسید فولویک و DP درجه پلیمریزاسیون (بدون واحد) می‌باشد (Jurado et al., 2014).

اندازه‌گیری نسبت‌های E₄/E₆ و E₃/E₅

به منظور برآورد دقیق‌تر درجه پلیمریزاسیون یا به عبارت دیگر درجه تراکم از نسبت‌های اسپکتروفوتومتری استفاده شد. ابتدا سه میلی‌گرم از هر نمونه اسید هیومیک استخراج شده در ۱۰ میلی‌لیتر بافر بی‌کربنات سدیم ۰/۰۵ مولار حل شد و سپس برای تعیین نسبت‌های E₄/E₆، E₃/E₅ میزان جذب نور در طول موج‌های ۳۵۰، ۴۶۵، ۵۵۰ و ۶۶۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل SU6100 ساخت شرکت philler scientific اندازه‌گیری شد (Abbt-Braun & Frimmel, 1999; Chen et al., 1977). برخلاف بقیه شاخص‌ها، نسبت‌های E₃/E₅ و E₄/E₆ تنها در شش زمان اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری شاخص جوانه‌زنی بذر (GI)

از گیاه ترتیزک به منظور بررسی شاخص جوانه زنی بذر در این پژوهش استفاده گردید. درصد جوانه زدن گیاه ترتیزک در محلول با نسبت ۱/۱۰ درصد وزنی کمپوست نسبت به آب مقطر به صورت هفتگی اندازه‌گیری شد. برای این منظور بذور ترتیزک روی کاغذ صافی در پتری دیش قرار داده شد و کاغذ صافی با محلول حاصل خیسانده شد و در نهایت شاخص جوانه‌زنی با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید (Zucconi et al. 1981).

$$GI = 100 \times \frac{[(\text{تعداد بذر جوانه‌زده در تیمار}) \times (\text{طول ریشه در شاهد})]}{[(\text{تعداد بذر جوانه‌زده در تیمار}) \times (\text{طول ریشه در تیمار})]}$$

تحلیل آماری

تجزیه واریانس داده‌ها به روش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی، مقایسه میانگین‌ها به روش LSD (سطح احتمال ۹۵ درصد) و آزمون نرمال بودن با استفاده از نرم‌افزار SPSS 27.0 انجام شد و برای ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد. مقادیر LSD ارائه شده در شکل‌های مربوط به مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار×زمان در سطح احتمال ۵ درصد از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$LSD = t_{0.05, df} \times Sd$$

$$r \text{ تعداد تکرار} - MSE \text{ میانگین مربعات خطا} - Sd \text{ انحراف معیار} (Sd = \sqrt{(2 \times MSE) \div r})$$

نتایج و بحث

تغییرات دما، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، غلظت نیترات، نسبت C/N و شاخص جوانه‌زنی بذر در طول کمپوست‌شدن

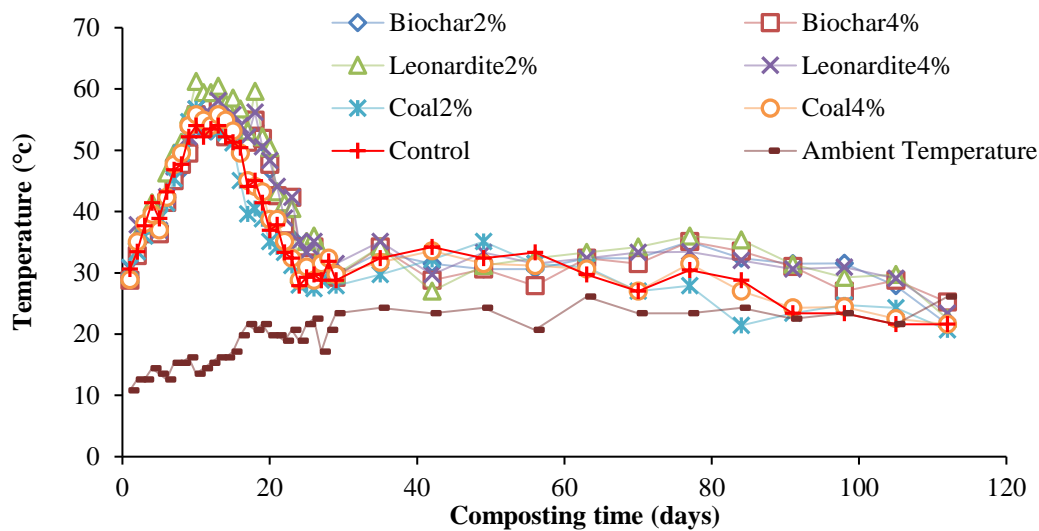
تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی تیمارها و زمان بر دما معنی‌دار ولی اثر متقابل تیمار×زمان غیرمعنی‌دار بود (جدول ۲). در شرایط این پژوهش در تمامی تیمارها بالاترین دما در روز سیزدهم ثبت شد که در بین آنها بالاترین دما (۶۱/۲ درجه سلسیوس) مربوط به تیمار لئوناردیت ۲ درصد بود (شکل ۱). در این پژوهش بیشترین طول دوره ترموفیلی برای تیمار لئوناردیت ۲ درصد به مدت ۱۸ روز و کمترین برای تیمار زغال‌سنگ ۲ درصد به مدت ۱۱ روز بود. در فاز رسیدگی و خنک‌شدن کمپوست نیز تیمار زغال‌سنگ ۲ درصد دارای کمترین دما بود. کمپوست با کمک بیوجار و لئوناردیت دمای بالاتر و دوره ترموفیلی طولانی‌تری را در مقایسه با کمپوست شاهد و تیمار زغال‌سنگ ثبت کرد. حصول دمای بالا ممکن است به طبیعت متخلخل و سطح ویژه بزرگ‌تر بیوجار و لئوناردیت نسبت داده شود که با تحریک فعالیت میکروبی منجر به افزایش دما می‌شوند (Manu et al., 2021; Behera & Samal, 2022). با این حال، بر اساس پژوهش‌های پیشین برخی از افزودنی‌ها مانند بنتونیت (Li et al., 2012)، فسفوژیس و آهک (Gabhane et al., 2012) و همچنین در این پژوهش زغال‌سنگ مشخصات دما را تغییر معنی‌دار نداده و این موضوع نشان می‌دهد که احتمالاً آن‌ها بر فعالیت زیست‌توده میکروبی خیلی تأثیر نمی‌گذارند.

جدول ۲. تجزیه واریانس تأثیر افزودنی‌های مختلف بر دما، EC، نسبت C/N، غلظت نیترات و شاخص جوانه‌زنی در توده در حال کمپوست‌شدن

منبع تغییر	درجه آزادی (df)	دما	درجه آزادی	میانگین مربعات			
				pH	EC	NO ₃ ⁻	C/N
تیمار	۷	۷۵۲۷/۹۴**	۶	۰/۲۳۱**	۲/۸۹**	۳۰۲۱۷/۴۲**	۱۴/۳۰**
زمان	۴۰	۱۴۳۶/۶۳**	۸	۰/۴۸۴**	۵/۴۶**	۱۹۷۸۶۰/۴۸**	۹۴/۶۶**

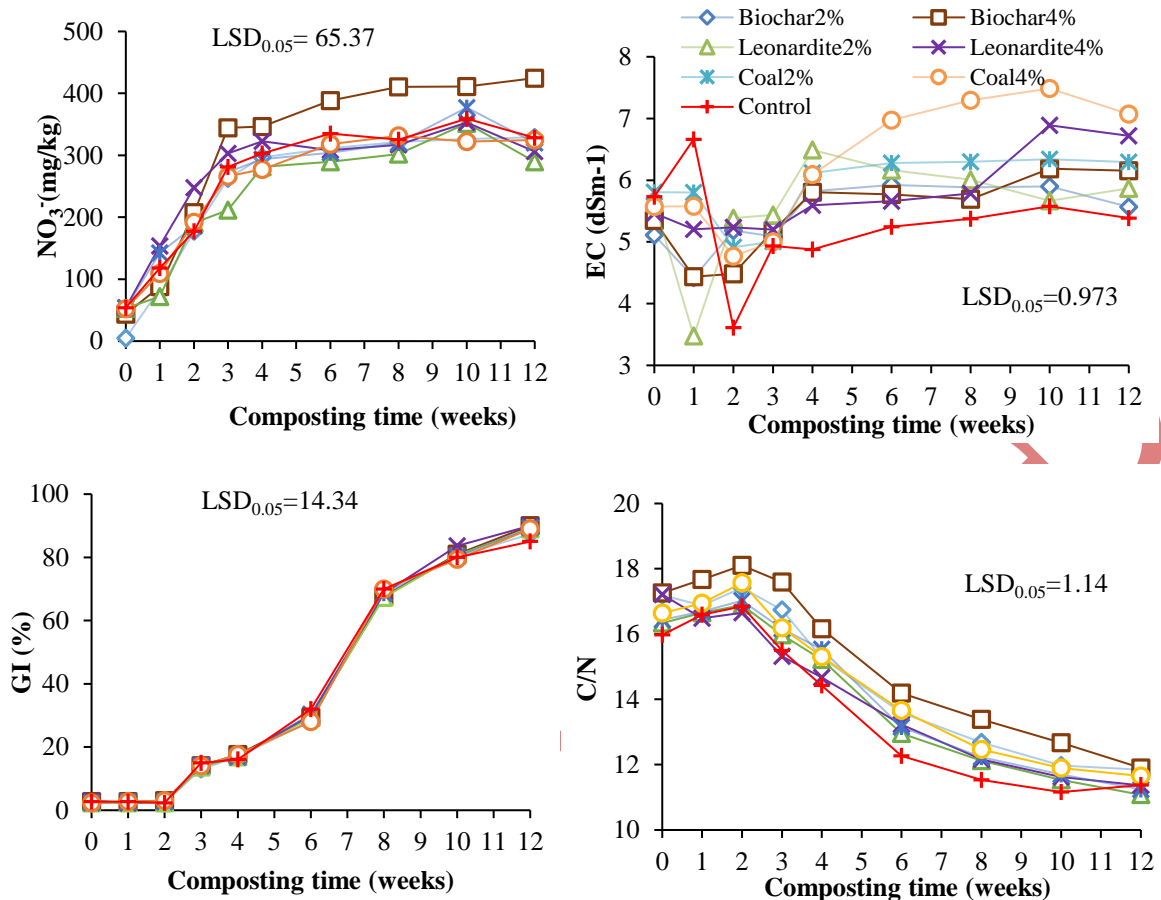
۷۵/۷۳۶ ^{ns}	۰/۸۰۴*	۴۰۵۷/۴۳**	۰/۸۷**	۱/۲۵۶ ^{ns}	۴۸	۸۲/۲۰۵	۲۸۰	تیمار×زمان
۷۸/۷۷۳	۰/۵۰۶	۱۶۳۶/۳۷	۰/۳۶	۰/۰۱۳	۱۲۴	۲/۷۲	۶۵۵	خطای آزمایشی
۶۱/۵	۱۵/۳	۴۰/۸	۱۵/۸	۲/۷		۳۲/۱		ضریب تغییرات(%)

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.



شکل ۱. تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر دمای توده در طول کمپوست‌شدن

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تمامی فاکتورها بر قابلیت هدایت الکتریکی (EC) توده در حال کمپوست شدن معنی‌دار بود (جدول ۲). در هفته‌های اول، توده‌های در حال کمپوست شدن دارای کمترین مقادیر EC بودند ولی با گذشت زمان مقادیر EC افزایش یافته و در هفته‌های پایانی بیشترین مقادیر هدایت الکتریکی حاصل شد (شکل ۲). افزایش EC می‌تواند به دلیل تجزیه و معدنی‌شدن مواد آلی و افزایش غلظت عناصر باشد (Campbell et al., 1997). در این پژوهش بالاترین EC متعلق به تیمارهای زغال‌سنگ و پایین‌ترین EC برای شاهد به دست آمد. بالا بودن EC در تیمار زغال‌سنگ می‌تواند به دلیل وجود عناصر در ساختار آن است. به نظر می‌رسد در تیمار شاهد بعد از دوره ترموفیلی و کم شدن منابع غذایی سهل‌الوصول، میکروارگانیسم‌ها اقدام به جذب و غیر متحرک کردن عناصر غذایی از توده کمپوست کرده و لذا EC کاهش یافته است. در شرایط این پژوهش پایین بودن EC در توده دریافت کننده بیوجار می‌تواند به دلیل دمای پایین فرایند پیرولیز در هنگام تولید بیوجار (۴۰۰ درجه سلسیوس)، اثر رقت، نوع ماده اولیه که چوبی بود و جذب عناصر توسط بیوجار باشد (Cui et al., 2020).



شکل ۲. تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر EC، غلظت نیترات، نسبت C/N و شاخص جوانه‌زنی توده در طول کمپوست‌شدن

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تمامی فاکتورها بر غلظت نیترات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در هفته اول فرایند کمپوست شدن مشترک، غلظت نیترات پایین بود و تغییرات آن چنانی در روند نیترات مشاهده نشد، چرا که دما و pH آن قدر بالا بودند که از فعالیت و رشد باکتری‌های نیترات‌ساز جلوگیری کنند و این با نتایج Ren et al. (2019) و Wang et al. (2023) مطابق بود. پس از کاهش دمای کمپوست به تدریج روند افزایشی غلظت نیترات شروع و پس یک ماه، غلظت نیترات به دلیل نیترات‌سازی به سرعت افزایش یافت و بعد به یک سطح نسبتاً ثابتی رسید (شکل ۲). Awasthi et al. (2017b) نیز نتیجه مشابهی گزارش کردند. نیترات‌سازی به سستی در فاز ترموفیلی (هفته دوم و سوم) اتفاق می‌افتد، زیرا دمای بالا و تجمع بیش از حد NH_3 باعث مهار فعالیت و رشد باکتری‌های نیتریفیکاتور می‌شود (Wang et al., 2023). تیمار بیوپچار ۴ درصد دارای بالاترین درصد نیترات بود (شکل ۲). بنابراین می‌توان گفت که بیوپچار آمونیوم را در سطوح متخلخل خودش نگه داشته و در مراحل پایانی تولید کمپوست که شرایط برای نیتریفیکاسیون مساعد بوده بیشتر آمونیوم موجود در سطح بیوپچار به نیترات تبدیل می‌شود.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی تیمار و زمان و اثر متقابل تیمارها در سطح احتمال یک درصد بر نسبت C/N کل توده معنی‌دار بود (جدول ۲). در این پژوهش توده کمپوست دریافت کننده بیوپچار ۴ درصد، دارای بالاترین نسبت C/N بود (۱۱/۹). توده در حال کمپوست شدن در هفته دوم دارای بالاترین و در هفته ۱۲ دارای کمترین نسبت C/N بود. افزایش نسبت C/N در هفته دوم (دوره ترموفیلی) می‌تواند به دلایل بالا بودن دما، افزایش pH، افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها و در نتیجه افزایش تصاعد آمونیاک و در نتیجه کاهش

غلظت نیتروژن مرتبط باشد (شکل ۴). این نتایج با نتایج Malinowski et al. (2019) مطابقت داشت. در کمپوست نهایی نسبت C/N تمام تیمارها به کمتر از ۲۰ کاهش یافت. نسبت C/N در توده بدون توجه به تکنیک مورد استفاده، در هنگام کمپوست شدن کاهش می‌یابد و معمولاً نسبت C/N کمتر از ۲۰ به عنوان شاخص پایداری در نظر گرفته می‌شود (Bernal et al., 2009). نسبت C/N کاملاً متأثر از فعالیت میکروبی است و با افزایش فعالیت و مصرف میکروبی مقدار کربن و مواد غیر نیتروژنی مثل کربوهیدرات‌ها کاهش می‌یابد. ولی در هفته‌های پایانی به دلیل کاهش مواد قابل تجزیه، جمعیت میکروبی نیز کاهش یافته و به دنبال آن تجزیه کربن نیز کاهش می‌یابد (Rasapoor et al., 2009). همچنین گزارش شده است در مراحل پایانی فرایند کمپوستینگ مواد سهل‌الوصول برای میکروارگانیسم‌ها کاهش می‌یابند، بنابراین در این مراحل گروه‌های آمین و ترکیبات قندی موادی مثل اسید فولویک استفاده می‌شوند که موجب کاهش کیفیت کمپوست تولیدی خواهد شد (Veeken et al., 2000).

نسبت بالای C/N باعث کندی فرایند کمپوست شدن می‌شود، زیرا بستر قابل تجزیه زیادی برای میکروارگانیسم‌ها وجود دارد. اما با نسبت C/N کم همانند تحقیق حاضر، نیتروژن معدنی بیش‌ازحد تولید و می‌تواند توسط تصاعد آمونیاک یا با آبشویی از توده کمپوست هدر رود (Bernal et al., 2009). بنابراین می‌توان نسبت‌های C/N کم را با افزودن ماده افزودنی با کربن بالا مانند بیوجار جهت تأمین کربن آلی قابل تجزیه اصلاح کرد. اما نکته‌ای که در اینجا حائز اهمیت است این است که بیوجار با اینکه دارای کربن بالایی می‌باشد و در روزهای اولیه، توده در حال کمپوست شدن بیشترین نسبت C/N را داشت، اما استفاده از آن در سطح ۲ و ۴ درصد کافی نبوده و نتوانسته که نسبت C/N اولیه مناسب که بین ۲۰ تا ۳۰ می‌باشد را فراهم کند. به عبارت دیگر در هنگام انتخاب افزودنی، باید به درصد مواد افزودنی و نسبت C/N مخلوط‌های اولیه توجه شود تا از تخریب ماده آلی اطمینان حاصل شود و از هدر رفت نیتروژن نیز در طول کمپوست شدن جلوگیری شود (Doublet et al., 2011). در تحقیق حاضر نسبت C/N کمپوست نهایی تمام تیمارها کمتر از ۱۴ بود که یک دلیل آن غیر از رسیدگی کامل می‌تواند نسبت C/N پایین بستر اولیه (کود دامی) باشد.

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که شاخص جوانه‌زنی در فاکتورهای تیمار و زمان معنی‌دار ولی اثر متقابل تیمار×زمان غیر معنی‌دار بود (جدول ۲). مطابق انتظار در دو هفته اول فرایند کمپوستینگ، شاخص جوانه‌زنی کمینه بود ولی بعد از آن افزایش یافت و هفته ۱۲ به بیشینه رقم خود رسید که این یافته با نتایج Wang et al. (2023) مطابقت داشت. در تیمارها شاخص جوانه‌زنی بذر ترتیزک در هفته ۸ به حد استاندارد (۷۰ درصد) رسید. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود شاخص جوانه‌زنی در این تحقیق برای همه تیمارها برای کمپوست نهایی بالای ۸۵ درصد بود. Li et al. (2020) گزارش کردند که افزودن بیوجار بامبو به مخلوط کلش ذرت و کود خوکی در طی فرایند تهیه کمپوست، این شاخص را تا ۱۵۰ درصد افزایش داد. افزایش شاخص جوانه‌زنی در کمپوست‌های مشترک بیوجار ممکن است به دلیل جذب سموم بر روی بیوجار، فراهمی عناصر غذایی، کاهش تحرک فلزات سنگین و هدررفت نیتروژن کل باشد. به نظر می‌رسد به دلیل پایین بودن EC تیمار شاهد نهایی (شکل ۲) و پایین بودن مواد قابل تجزیه در این تیمار، توده شاهد زودتر به حالت رسیدگی رسیده و باعث افزایش شاخص جوانه‌زنی بذر شده است. کمپوست نابالغ حاوی موادی نظیر متان، آمونیاک و یا استیک اسید است که به شدت برای رشد گیاهان مضر می‌باشند. این مواد در طول کمپوست شدن تولید شده و در مرحله تکمیل کمپوست به مواد دیگری تبدیل می‌شوند. البته کمپوست رسیده نیز ممکن است حاوی موادی نظیر فلزات سنگین، انواع نمک‌ها و سایر ترکیبات سمی باشد که بر روی رشد گیاه تأثیر سویی می‌گذارند.

شاخص هوموسی شدن

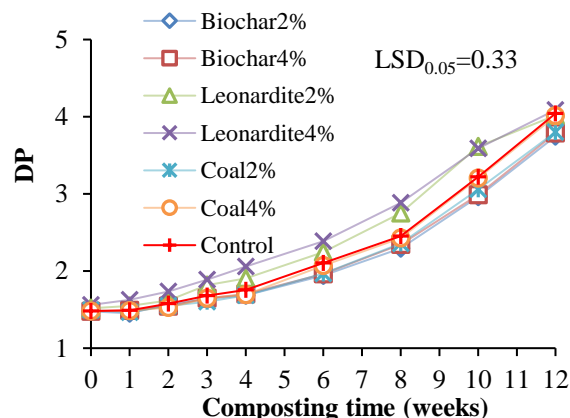
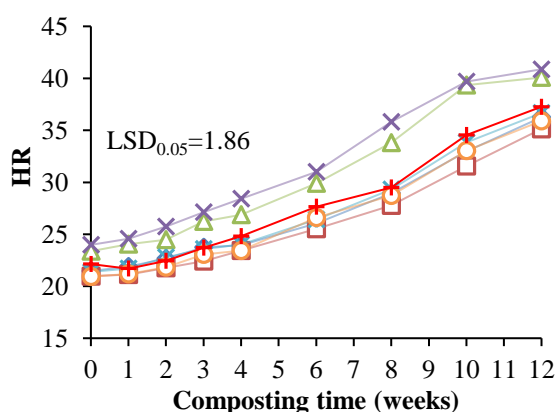
تجزیه واریانس نشان داد که در شرایط این پژوهش شاخص هوموسی شدن در تمامی فاکتورها معنی‌دار بود (جدول ۳). شاخص هوموسی شدن در طول فرایند کمپوست شدن در تمامی تیمارها افزایش یافت (شکل ۳) و در تمامی شاخص‌ها هفته ۱۲ بالاترین مقدار و هفته‌های نخستین کمترین مقادیر را دارا بود. این نتایج مطابق با نتایج Sánchez-Monedero et al. (1999) و Dias et al. (2010) است. همان‌طور که در

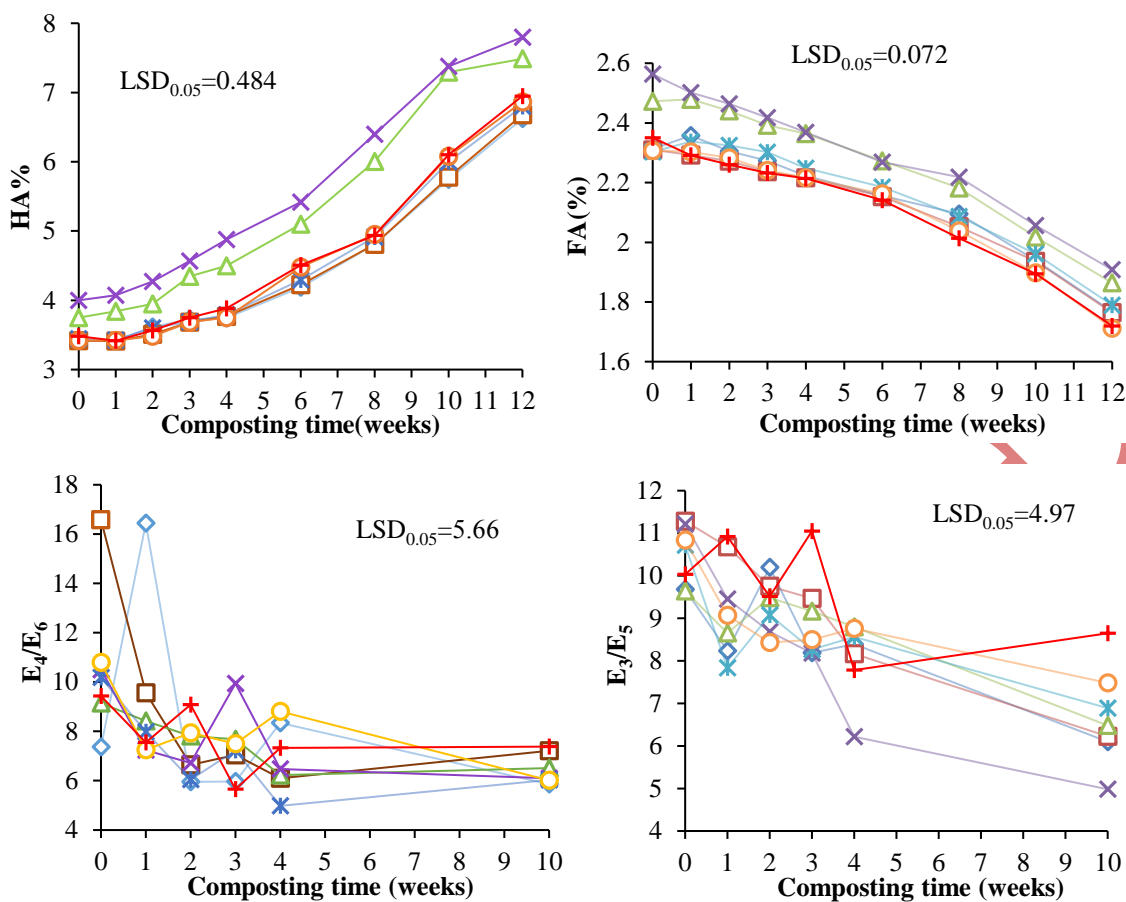
شکل ۳ مشاهده می‌شود تیمار لئوناردیت ۲ درصد و لئوناردیت ۴ درصد دارای بالاترین مقادیر DP و HR بودند ولی این دو تیمار اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. مقدار HR بین صفر و صد بوده و هرچه به ۱۰۰ نزدیک باشد، کمپوست کیفیت بهتری دارد. شاخص HR در طول کمپوست شدن افزایش یافته که این افزایش در تیمارهای لئوناردیت (۲ و ۴ درصد) بیشتر است و منعکس‌کننده هوموسی شدن شدید به دلیل ماهیت لئوناردیت می‌باشد. افزایش DP در تیمارهای لئوناردیت به دلیل افزایش درصد کربن آلی اسید هیومیک است.

جدول ۳. تجزیه واریانس تأثیر افزودنی‌های مختلف بر شاخص و نسبت هوموسی شدن، درجه پلیمریزاسیون و مجموع مواد هیومیک در توده در حال کمپوست شدن

میانگین مربعات								
E_4/E_6	E_3/E_5	درجه آزادی	غلظت اسید فولویک	غلظت اسید هیومیک	درجه پلیمریزاسیون (DP)	شاخص هوموسی شدن (HR)	درجه آزادی (df)	منبع تغییر
۹/۳۴ ^{ns}	۱۱/۳۸ ^{ns}	۶	۰/۲۲**	۷/۵۱**	۰/۹۲۹**	۱۵۴/۵۲**	۶	تیمار
۵۷/۰۸**	۱۱۱/۵۳**	۶	۰/۷۴**	۲۹/۱۸**	۱۳/۷۲**	۵۸۶/۱۹**	۸	زمان
۱۰/۱۱ ^{ns}	۸/۱۰ ^{ns}	۳۶	۰/۰۰۶**	۰/۱۱ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۲/۵۳**	۴۸	تیمار×زمان
۱۲/۱۱	۹/۳۲	۷۴	۰/۰۰۲	۰/۰۹	۰/۰۴۲	۱/۳۲	۱۲۵	خطای آزمایشی
۲۳	۲۲		۲۴	۲۶/۸	۳۴/۷	۲۰/۴		ضریب تغییرات (%)

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.





شکل ۳. تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر شاخص‌های هوموسی شدن، غلظت هیومیک و فولویک اسید و نسبت‌های E₃/E₅ و E₄/E₆ توده در طول کمپوست‌شدن

تجزیه واریانس نشان داد که به غیر از اثر متقابل تیمار×زمان بقیه فاکتورها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۳). با گذشت زمان کمپوست‌شدن، درصد اسید هیومیک در تمام تیمارها افزایش یافت و در هفته ۱۲ بالاترین درصد اسید هیومیک اندازه‌گیری شد (شکل ۳). (Awasthi et al. (2017a) نیز نتیجه مشابهی گزارش کردند. در شرایط این پژوهش تیمارهای لئوناردیت ۴ درصد و لئوناردیت ۲ درصد بالاترین درصد اسید هیومیک را دارا بودند. در این میان تیمار بیوجار ۲ درصد استفاده شده در این پژوهش پایین‌ترین درصد اسید هیومیک را داشت. از ابتدای کمپوست‌شدن تیمار لئوناردیت ۴ درصد بالاترین درصد اسید هیومیک را دارا بود که به دلیل بیشتر بودن غلظت اسید هیومیک در ساختار لئوناردیت است که همین روال تا آخر فرایند نیز ادامه داشت و بیشترین شیب افزایشی آن در هفته‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده شد (شکل ۳). افزایش نسبی درصد اسید هیومیک می‌تواند به دلیل کاهش ماده آلی اولیه باشد که با ثابت بودن مقدار اسید هیومیک درصد بیشتری اندازه‌گیری شود و هم می‌تواند به علت تشکیل مواد هیومیک پایدار طی کمپوست‌شدن باشد (همتی، ۱۳۹۷).

تجزیه واریانس نشان داد که اثر تمام فاکتورها در سطح احتمال یک درصد بر غلظت اسید فولویک معنی‌دار بود (جدول ۳). در دو هفته اول بیشترین و در هفته ۱۲ کمترین مقدار اسید فولویک در توده اندازه‌گیری شد (شکل ۳). درصد اسید فولویک با افزایش زمان کمپوست‌شدن کاهش یافت که با نتایج Awasthi et al. (2017a) مطابقت داشت. تیمارهای لئوناردیت ۲ و ۴ درصد بیشترین درصد اسید فولویک را داشتند که به دلیل بیشتر بودن اسید فولویک در ساختار آن‌ها می‌باشد ولی بین این دو تیمار اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. اسید فولویک

دارای ترکیبات آمینی و قندی می‌باشد که نسبت به اسید هیومیک تجزیه‌پذیرتر است. در هفته‌های پایانی و کاهش مواد آلی قابل تجزیه، اسید فولویک می‌تواند منبع قوی و مناسب برای استفاده میکروارگانیسم‌ها باشد و این عامل به احتمال زیاد دلیل کاهش غلظت اسید فولویک در هفته‌های پایانی است (Amir et al., 2008). تعداد گزارش‌های منتشر شده در مورد تأثیر بیوجار و لئوناردیت در ترکیب شیمیایی مواد هیومیک، به‌ویژه در مورد فولویک اسید، بسیار محدود است. در طول کمپوست‌شدن، مواد هیومیک تولید و غلظت اسیدهای هیومیک افزایش می‌یابد، درحالی‌که غلظت اسید فولویک، کربن آلی کل و کربن آلی محلول (DOC) به دلیل تجزیه زیستی توسط ریز جانداران کاهش می‌یابد (Wang et al., 2014).

تجزیه واریانس نشان داد که به غیر از فاکتور زمان، اثر بقیه فاکتورها بر نسبت‌های E_3/E_5 و E_4/E_6 غیر معنی‌دار بود (جدول ۳). همانند نتایج Manu et al. (۲۰۲۱) هفته اول بالاترین و هفته ۱۲ پایین‌ترین ارقام نسبت‌های E_3/E_5 و E_4/E_6 ثبت شدند (شکل ۳). برای هر دو نسبت، هم در طول کمپوست‌شدن و هم در کمپوست نهایی، مواد افزودنی اختلاف معنی‌داری با شاهد ایجاد نکردند. نسبت E_3/E_5 اندازه مولکولی را نشان می‌دهد و با افزایش این نسبت اندازه مولکولی کاهش می‌یابد (Helal et al., 2011). یکی از بررسی‌های طیف‌سنجی مواد هیومیکی برآورد نسبت E_4/E_6 است. این نسبت دانسیته نوری در طول موج ۴۶۵ nm به ۶۶۵ nm است و بیانگر درجه تراکم ترکیبات آلیفاتیکی و آروماتیکی مواد هیومیک است (Martin et al., 1995). این دو نسبت بین ۲ تا ۱۰ تغییر می‌کنند و هرچه به عدد ۲ نزدیک باشند بیانگر رسیده بودن کمپوست است ولی هرچه به ۱۰ نزدیک باشد بیانگر نارس بودن آن می‌باشد. افزایش E_4/E_6 درجه تراکم کم ترکیبات آروماتیکی را نشان می‌دهد و برعکس کاهش آن دلالت بر تراکم بالای حلقه‌های آروماتیکی در مولکول اسید هیومیک دارد. این نسبت با تغییر pH، وزن مولکولی و ویسکوزیته ترکیبات هیومیک تغییر می‌کند (Chen et al., 1977). با افزایش روند کمپوست‌شدن، مقدار ترکیبات آروماتیک به‌شدت افزایش یافته و مواد هیومیک پایدارتر می‌شوند (Amir et al., 2008). همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود نسبت‌های E_3/E_5 و E_4/E_6 در کمپوست نهایی تیمار شاهد بالاترین می‌باشند که نشان‌دهنده درجه هوموسی پایین‌تر شاهد نسبت به بقیه تیمارها می‌باشد. گزارش شده است که بیوجار باعث تخریب مواد آلی و افزایش درجه هوموسی شدن می‌شود (Sánchez-García et al., 2010; 2015). با افزودن بیوجار و لئوناردیت نسبت‌های E_3/E_5 و E_4/E_6 کاهش پیدا کردند؛ زیرا افزودن بیوجار و لئوناردیت باعث می‌شود که مواد آلی کمپوست توسط ریز جانداران به‌سرعت تجزیه و این به معنی بالا بودن درجه‌ی تراکم ترکیبات آلیفاتیکی و آروماتیکی مواد هیومیک و در نتیجه افزایش درجه هوموسی شدن و کاهش نسبت‌های E_3/E_5 و E_4/E_6 می‌باشد.

غلظت کل عناصر

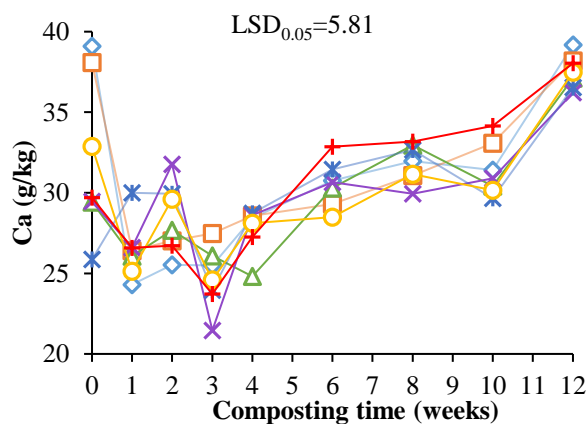
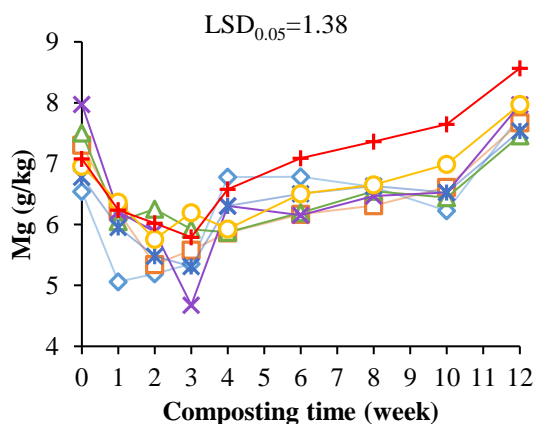
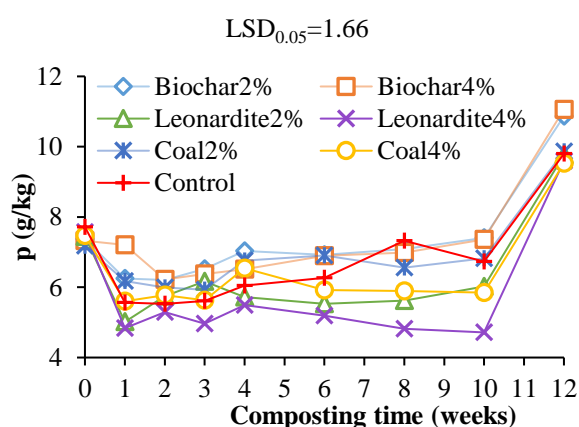
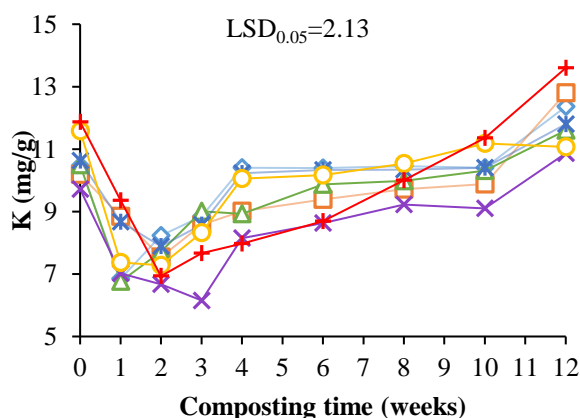
نتایج تجزیه واریانس نشان دادند که برای تمامی عناصر اثر زمان معنی‌دار و اثر متقابل تیمار×زمان غیر معنی‌دار بود (جدول ۴). برای عناصر فسفر (P)، پتاسیم (K)، آهن (Fe)، روی (Zn) و منگنز (Mn)، اثر تیمار معنی‌دار ولی برای کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، سدیم (Na) و مس (Cu) غیر معنی‌دار بود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود صرف‌نظر از روند کاهشی یا افزایشی، غلظت عناصر در تیمار شاهد بیشتر از بقیه تیمارها بود. قبلاً هم برخی محققان گزارش کرده بودند که مواد افزودنی در کمپوست مشترک باعث کاهش غلظت برخی عناصر نسبت به شاهد به دلیل اثر رقت یا به دلیل جذب سطحی عناصر بر روی این مواد افزودنی می‌شوند (Zhang et al., 2014). روند تغییرات غلظت عناصر کاتیونی مانند پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سدیم و منگنز در طول فرایند کمپوست شدن افزایشی بود که این امر باعث افزایش EC (شکل ۲) هم شده است. دلیل افزایش غلظت این عناصر ناشی از تجزیه زیستی مواد آلی در طول کمپوست شدن و در نتیجه کاهش وزن و حجم محصول نهایی است (Zhang et al., 2014). برخلاف عناصر ذکر شده روند غلظت فلزات سنگین مانند Zn، Fe و Cu کاهشی بود که با نتایج Awasthi et al. (2017b) مطابقت دارد. معمولاً غلظت فلزات سنگین در کمپوست‌هایی که از کود حیوانی یا لجن فاضلاب نشأت می‌گیرند زیاد گزارش شده است (Barthod et al., 2018). تیمار بیوجار در سطح ۲ و ۴ درصد بیشترین تأثیر را بر کاهش غلظت آهن گذاشت که ناشی از غلظت کمتر آهن در افزودنی بیوجار نسبت به بقیه افزودنی‌ها می‌باشد (جدول ۱). برخی محققان گزارش کرده‌اند که کمپوست‌های حاصل از کود دامی ممکن است حاوی مقادیر زیادی روی، سرب، کادمیوم و مس باشند و کاربرد آن‌ها در خاک زراعی ممکن

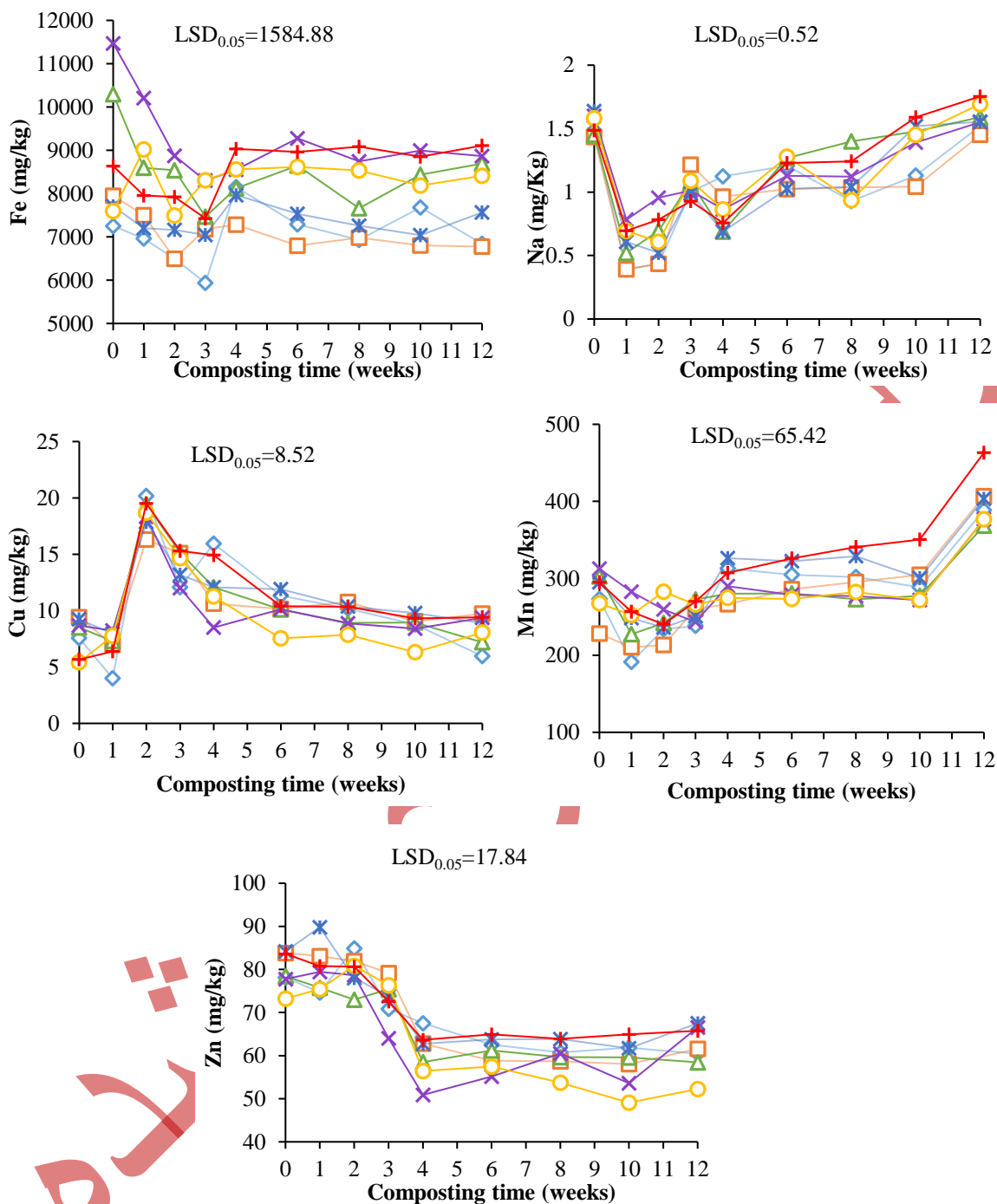
است منجر به ورود بیش از حد فلزات سنگین به خاک و گیاه شود (Barthod et al., 2018; Chen et al., 2010). بنابراین استفاده از مواد افزودنی موجود در این تحقیق در هنگام کمپوست شدن می تواند راهی برای کاهش غلظت فلزات شود.

جدول ۴. تجزیه واریانس تأثیر افزودنی های مختلف بر غلظت کل برخی عناصر اندازه گیری شده در توده در حال کمپوست شدن

میانگین مربعات											
منبع تغییر	درجه آزادی	کلسیم	منیزیم	فسفر	سدیم	پتاسیم	درجه آزادی	آهن	روی	منگنز	مس
تیمار	۶	۱۴/۳۳ ^{ns}	۱/۴۶ ^{ns}	۱۹/۵۹ ^{**}	۰/۰۸ ^{ns}	۷/۲۷ ^{**}	۶	۱۹۴۱۹۳۵۱/۲۶ ^{**}	۲۶۵/۱۰*	۴۲۸۷/۷۱*	۲۶/۴۴ ^{ns}
زمان	۸	۳۴۰/۸۸ ^{**}	۹/۳۱ ^{**}	۲۴/۹۸ ^{**}	۱/۹۶ ^{**}	۴۱/۷۸ ^{**}	۸	۳۱۴۱۸۶۹/۶۱ ^{**}	۱۷۹۸/۳۵ ^{**}	۳۵۴۴۴/۶۹ ^{**}	۷۶۵/۱۴ ^{**}
تیمار×زمان	۴۸	۱۱/۰۴ ^{ns}	۰/۵۲ ^{ns}	۱/۱۴ ^{ns}	۰/۰۷ ^{ns}	۱/۴۶ ^{ns}	۴۸	۹۶۳۵۸۷/۵۳ ^{ns}	۴۲/۳ ^{ns}	۱۵۸۳/۰۳ ^{ns}	۲۱/۶۰ ^{ns}
خطای آزمایشی	۱۲۲	۱۲/۹۰	۰/۷۳	۱/۰۶	۰/۱۰	۱/۷۴	۱۲۲	۹۶۲۰۴۰/۷۷	۱۲۱/۸۴	۱۶۳۹/۰۲	۲۷/۷۴
ضریب تغییرات (%)		۱۷/۴	۱۶/۲	۲۴/۹	۳۸/۰	۱۹/۷		۱۶	۱۹/۷	۱۹/۴	۵۴/۱

ns و * و ** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪





شکل ۴. تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر غلظت کل فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سدیم، آهن، منگنز، مس و روی توده در طول کمپوست‌شدن

نتیجه‌گیری کلی

در کمپوست نهایی بالاترین غلظت اسید هیومیک، اسید فولویک و شاخص‌های هوموسی‌شدن در تیمارهای لئوناردیت مشاهده شد. بالاترین غلظت نیترات و نسبت C/N در تیمار بیوجار ۴ درصد و بالاترین EC در تیمار زغال‌سنگ ۲ درصد دیده شد. در مورد شاخص جوانه‌زنی بذر

گیاه ترتیزک، بیوچار بالاترین مقدار را داشت ولی تفاوت معنی داری با شاهد وجود نداشت. تیمار شاهد از لحاظ غلظت فلزات سنگین Mn، Cu و Fe دارای بیشترین مقدار بود ولی در مورد Zn اثر مثبت مواد افزودنی دیده نشد. لئوناردیت استفاده شده برای چندین سال اکسید شده و قابلیت تجزیه توسط میکروارگانیزمها را نداشت و به نوعی باعث کند شدن روند کمپوست شدن شد. تیمارهای لئوناردیت از لحاظ شاخص های رسیدگی کمپوست بیشترین مقدار را داشتند. نتایج این تحقیق نشان داد که تیمارهای بیوچار و زغال سنگ مشابه هم بودند و هر دو برای تولید و تسریع کمپوست شدن، می توانند مفید باشند. لئوناردیت با وجود ویژگی های شناخته شده و غلظت بالای مواد هیومیک، به عنوان ماده اولیه در شروع کمپوست شدن نتایج مناسبی نداشت ولی می توان در انتهای کمپوست شدن به منظور غنی سازی و بهبود کیفیت کمپوست تولید شده از آن استفاده نمود.

منابع

همتی آرش، ۱۳۹۷. جداسازی میکروارگانیزم های گرمادوست تجزیه کننده لیگنین برای تسریع تولید و بهبود کیفیت کمپوست. رساله دکتری. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تبریز.

- Abbt-Braun, G., & Frimmel, F. H. (1999). Basic characterization of Norwegian NOM samples - Similarities and differences. *Environment International*, 25(2-3), 161-180. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(98\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(98)00118-4)
- Adani, F., Genevini, P.L., Gasperi, F., & Tambone, F. (1999). Composting and humification. *Compost Science & Utilization* 7(7):24-33. <https://doi.org/10.1080/1065657X.1999.10701949>
- Agegehu, G., Srivastava, A. K., & Bird, M. I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology*, 119, 156-170. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.008>
- Amir, S., Benboukht, F., Cancian, N., Winterton, P., & Hafidi, M. (2008). Physico-chemical analysis of tannery solid waste and structural characterization of its isolated humic acids after composting. *Journal of Hazardous Materials*, 160(2-3), 448-455. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.017>
- Awasthi, M. K., Duan, Y., Liu, T., Awasthi, S. K., & Zhang, Z. (2020). Relevance of biochar to influence the bacterial succession during pig manure composting. *Bioresource Technology*, 304, 122962. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122962>
- Awasthi, M. K., Wang, M., Chen, H., Wang, Q., Zhao, J., Ren, X., & Zhang, Z. (2017a). Heterogeneity of biochar amendment to improve the carbon and nitrogen sequestration through reduce the greenhouse gases emissions during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 224, 428-438. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.014>
- Awasthi, M. K., Wang, Q., Chen, H., Awasthi, S. K., Wang, M., Ren, X., & Zhang, Z. (2018). Beneficial effect of mixture of additives amendment on enzymatic activities, organic matter degradation and humification during biosolids co-composting. *Bioresource Technology*, 247, 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.061>
- Awasthi, M. K., Wang, Q., Chen, H., Wang, M., Ren, X., Zhao, J., & Zhang, Z. (2017b). 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. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.044>
- Barthod, J., Rumpel, C., & Dignac, M. F. (2018). Composting with additives to improve organic amendments. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2), 17. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0491-9>
- Behera, S., & Samal, K. (2022). Sustainable approach to manage solid waste through biochar assisted composting. *Energy Nexus*, 100121. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100121>
- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444-5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Campbell Jr, A. G., Folk, R. L., & Tripepi, R. R. (1997). Wood ash as an amendment in municipal sludge and yard waste composting processes. *Compost Science & Utilization*, 5(1), 62-73. <https://doi.org/10.1080/1065657X.1997.10701864>
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (Eds.). (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.
- Cataldo, D. A., Maroon, M., Schrader, L. E., & Youngs, V. L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6(1), 71-80. <https://doi.org/10.1080/00103627509366547>

- Chen, X., Du, Z., Liu, D., Wang, L., Pan, C., Wei, Z., & Zhao, R. (2022). Biochar mitigates the biotoxicity of heavy metals in livestock manure during composting. *Biochar*, 4(1), 48. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00174-x>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.029>
- Chen, Y., Senesi, N., & Schnitzer, M. (1977). Information provided on humic substances by E4/E6 ratios. *Soil Science Society of America Journal*, 41(2), 352-358. <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100020037x>
- Chowdhury, M. A., de Neergaard, A., & Jensen, L. S. (2014). Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during manure composting. *Chemosphere*, 97, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.030>
- Chung, W. J., Chang, S. W., Chaudhary, D. K., Shin, J., Kim, H., Karmegam, N., ... & Ravindran, B. (2021). Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction during in-vessel composting of chicken manure. *Chemosphere*, 283, 131129. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131129>
- Cui, H., Ou, Y., Wang, L., Yan, B., Li, Y., & Ding, D. (2020). The passivation effect of heavy metals during biochar-amended composting: emphasize on bacterial communities. *Waste Management*, 118, 360-368. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.043>
- Dias, B. O., Silva, C. A., Higashikawa, F. S., Roig, A., & Sánchez-Monedero, M. A. (2010). Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: effect on organic matter degradation and humification. *Bioresource Technology*, 101(4), 1239-1246. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.024>
- Doublet, J., Francou, C., Poitrenaud, M., & Houot, S. (2011). Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting; consequences on compost organic matter stability and N availability. *Bioresource Technology*, 102(2), 1298-1307. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.065>
- Font-Palma, C. (2019). Methods for the treatment of cattle manure—a review. *C — Journal of Carbon Research*, 5(2), 27. <https://doi.org/10.3390/c5020027>
- Gabhane, J., William, S. P., Bidyadhar, R., Bhilawe, P., Anand, D., Vaidya, A. N., & Wate, S. R. (2012). Additives aided composting of green waste: Effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost. *Bioresource Technology*, 114, 382-388. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.040>
- Giroto, F., & Cossu, R. (2017). Animal waste: Opportunities and challenges. *Sustainable Agriculture Reviews*, 1-13. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48006-0_1
- Gou, M., Hu, H. W., Zhang, Y. J., Wang, J. T., Hayden, H., Tang, Y. Q., & He, J. Z. (2018). Aerobic composting reduces antibiotic resistance genes in cattle manure and the resistome dissemination in agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 612, 1300-1310. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.028>
- Hagemann, N., Subdiaga, E., Orsetti, S., de la Rosa, J. M., Knicker, H., Schmidt, H. P., ... & Behrens, S. (2018). Effect of biochar amendment on compost organic matter composition following aerobic composting of manure. *Science of The Total Environment*, 613, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.161>
- He, X., Chen, L., Han, L., Liu, N., Cui, R., Yin, H., & Huang, G. (2017). Evaluation of biochar powder on oxygen supply efficiency and global warming potential during mainstream large-scale aerobic composting. *Bioresource Technology*, 245, 309-317. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.076>
- Helal, A. A., Murad, G. A., & Helal, A. A. (2011). Characterization of different humic materials by various analytical techniques. *Arabian Journal of Chemistry*, 4(1), 51-54. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.06.018>
- Hemati A, 2017. Isolation of the thermophile ligninolytic microorganisms for acceleration of compost production and its quality improvement. PH.D Thesis. Faculty of Agriculture, University of Tabriz. (in Persian)
- Jiang, J., Kang, K., Wang, C., Sun, X., Dang, S., Wang, N., & Li, Y. (2018). Evaluation of total greenhouse gas emissions during sewage sludge composting by the different dicyandiamide added forms: Mixing, surface broadcasting, and their combination. *Waste Management*, 81, 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.003>
- Jurado, M. M., Suárez-Estrella, F., Vargas-García, M. C., López, M. J., López-González, J. A., & Moreno, J. (2014). Evolution of enzymatic activities and carbon fractions throughout composting of plant waste. *Journal of Environmental Management*, 133, 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.020>
- Li, H., Zhang, T., Tsang, D. C., & Li, G. (2020). Effects of external additives: Biochar, bentonite, phosphate, on co-composting for swine manure and corn straw. *Chemosphere*, 248, 125927. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125927>
- Li, R., Wang, J. J., Zhang, Z., Shen, F., Zhang, G., Qin, R., & Xiao, R. (2012). Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite. *Bioresource Technology*, 121, 362-368. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.065>
- Malinowski, M., Wolny-Kołodka, K., & Vaverková, M. D. (2019). Effect of biochar addition on the OFMSW composting process under real conditions. *Waste Management*, 84, 364-372. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.011>

- Manu, M. K., Wang, C., Li, D., Varjani, S., Xu, Y., Ladumor, N., & Wong, J. W. (2021). Biodegradation kinetics of ammonium enriched food waste digestate compost with biochar amendment. *Bioresource Technology*, 341, 125871. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125871>
- Mao, H., Lv, Z., Sun, H., Li, R., Zhai, B., Wang, Z., ... & Zhou, L. (2018). Improvement of biochar and bacterial powder addition on gaseous emission and bacterial community in pig manure compost. *Bioresource Technology*, 258, 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.082>.
- Martin, J. M., Dai, M. H., & Cauwet, G. (1995). Significance of colloids in the biogeochemical cycling of organic carbon and trace metals in the Venice Lagoon (Italy). *Limnology and Oceanography*, 40(1), 119-131. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.1.0119>
- Morales, A. B., Bustamante, M. A., Marhuenda-Egea, F. C., Moral, R., Ros, M., & Pascual, J. A. (2016). Agri-food sludge management using different co-composting strategies: study of the added value of the composts obtained. *Journal of Cleaner Production*, 121, 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.012>
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2014). The biochar dilemma. *Soil Research*, 52(3), 217-230. <https://doi.org/10.1071/SR13359>
- Olivella, M. A., Sole, M., Gorchs, R., Lao, C., & De Las Heras, F. X. C. (2011). Geochemical characterization of a Spanish leonardite coal. *Archives of Mining Sciences*, 56(4), 789-804.
- Peters, J., Combs, S., Hoskins, B., Jarman, J., Kovar, J., Watson, M., & Wolf, N. (2003). Recommended methods of manure analysis. *University of Wisconsin Cooperative Extension Publishing: Madison, WI*.
- Qi, B. C., Aldrich, C., & Lorenzen, L. (2004). Effect of ultrasonication on the humic acids extracted from lignocellulose substrate decomposed by anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal*, 98(1-2), 153-163. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2003.07.002>
- Rasapoor, M., Nasrabadi, T., Kamali, M., & Hoveidi, H. (2009). The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Management*, 29(2), 570-573. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.04.012>
- Ren, X., Wang, Q., Awasthi, M. K., Zhao, J., Wang, J., Liu, T., & Zhang, Z. (2019). Improvement of cleaner composting production by adding Diatomite: From the nitrogen conservation and greenhouse gas emission. *Bioresource Technology*, 286, 121377. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121377>
- Sánchez-García, M., Alburquerque, J. A., Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., & Cayuela, M. L. (2015). Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralisation during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions. *Bioresource Technology*, 192, 272-279. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.003>
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Cegarra, J., & Bernal, M. P. (1999). Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of different organic wastes during composting. *Bioresource Technology*, 70(2), 193-201. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00018-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00018-8)
- Tasho, R. P., & Cho, J. Y. (2016). Veterinary antibiotics in animal waste, its distribution in soil and uptake by plants: A review. *Science of The Total Environment*, 563, 366-376. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.140>
- Veeken, A., Nierop, K., de Wilde, V., & Hamelers, B. (2000). Characterisation of NaOH-extracted humic acids during composting of a biowaste. *Bioresource Technology*, 72(1), 33-41. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)90096-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)90096-2)
- Wang, C., Tu, Q., Dong, D., Strong, P. J., Wang, H., Sun, B., & Wu, W. (2014). Spectroscopic evidence for biochar amendment promoting humic acid synthesis and intensifying humification during composting. *Journal of Hazardous Materials*, 280, 409-416. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.08.030>
- Wang, Z., Xu, Y., Yang, T., Liu, Y., Zheng, T., & Zheng, C. (2023). Effects of biochar carried microbial agent on compost quality, greenhouse gas emission and bacterial community during sheep manure composting. *Biochar*, 5(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00202-w>
- Westerman RL (1990) Soil Testing and Plant Analysis. 3. In: The Soil Science Society of America Book Series. Third Edition, Soil Science Society of American, Inc., Madison, Wisconsin, USA, pp 389-427.
- Zalewska, M., Błażejewska, A., Szadziul, M., Ciuchciński, K., & Popowska, M. (2024). Effect of composting and storage on the microbiome and resistome of cattle manure from a commercial dairy farm in Poland. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33276-z>
- Zhang, J., Lü, F., Shao, L., & He, P. (2014). The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge. *Bioresource Technology*, 168, 252-258. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.080>
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., & De Bertoldi, M. (1981). Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle*, 22: 54-57.

Evaluation of humification and seed germination indices and concentration of some elements in the co-compost of manure and forest organic materials under the influence of using woody biochar, leonardite, and coal

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

How to accelerate the optimal utilization of livestock manure is a problem that must be solved. Composting is the primary treatment means of livestock manure. Composting has the characteristics of simple operation and is environmentally friendly, so the technology is widely applied to the comprehensive utilization of livestock manure. However, composting has some disadvantages. Some additives are usually used to overcome composting disadvantages (such as greenhouse gas emissions, bad smells, nitrogen loss, and contamination of soil and water resources). Various materials can be incorporated into waste during composting. Some of these added materials serve as bulking agents, primarily affecting the physical structure of the compost (such as aeration). However, they have direct or indirect impacts on other composting factors and can be considered additives. Additives enhance the composting process by reducing leaching and gas emissions, improving aeration, accelerating organic matter degradation, and enhancing nutrient content and availability in the final product. The research published so far showed that the effect of woody biochar, along with leonardite and coal, on the quality of co-compost obtained from manure and forest organic matter had not been studied in Iran, and this research was conducted considering the importance of the feasibility of improving the quality of compost.

Methods

This study investigated the effect of biochar, leonardite, and coal on humification index, germination index, and the concentration of some elements in the co-compost of manure and forest organic materials during 12 weeks. The biochar was produced at 400° C from the pyrolysis of mixed pruning plum and pomegranate branches. Leonardite and coal were also prepared from companies active in this field. The experiment was conducted in a factorial design with two factors, namely treatment (biochar, leonardite, and coal) at two levels (2 and 4% by weight) mixed with the initial materials and time as a second factor. Sampling was carried out during the composting process in the first to 12 weeks, measuring temperature, electrical conductivity (EC), C/N ratio, nitrate concentration, total concentrations of P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Cu, and Mn, humification indices, and germination index in the compost.

Results and Discussion

The results showed that the coal (2%) treatment had the highest temperature, while the leonardite (2%) treatment had the longest thermophilic phase duration. The coal (4%) treatment significantly increased EC, and biochar increased nitrate concentration and C/N ratio. The addition of leonardite resulted in a significant increase in the percentage of humic and fulvic acids, as well as the highest values of humification index and degree of polymerization. Contrary to expectations, the additives did not significantly affect the germination index and the E₃/E₅ and E₄/E₆ ratios. Regarding total element concentrations, the control had higher concentrations compared to other treatments.

Conclusions

In general, leonardite treatments had the highest values regarding compost mature indicators. Biochar and coal treatments are similar and can be useful for producing and accelerating composting processes. But the results of this study suggest that, considering the cost of raw materials, coal is a suitable treatment for accelerating the production and improving the quality of compost, and leonardite, due to its high humic substrate, can be used at the end of composting for the enrichment and enhancing the quality of the produced compost.

ویژگی‌های استثنای نقشه