

The Impact of Various Additives on the Composting Process of Organic Compounds on the Biological Properties and Humification of Compost.

Adel Reyhanitabar^{1*}, Kamal Khalkhal², Maryam Raji³

(Received: May, 2024

Accepted: August, 2024)

Abstracts

This study investigated the effect of biochar, leonardite, and coal on some maturing indices, humification, microbial respiration, and enzymatic activity in a co-compost of manure and forest organic materials. The experiment was conducted in a factorial design with three replications at the compost production site for three months. The first factor included biochar treatment (2 and 4 percent), leonardite (2 and 4 percent), and coal (2 and 4 percent by weight) mixed with the raw materials, and the second factor was time spanning from the first week to week 12. During the composting process, weekly sampling of the compost pile was performed, and some biological and humification indices in the compost were measured. The results showed that the leonardite (2%, w/w) treatment had the highest temperature (61.2 degrees Celsius), the longest duration of the thermophilic phase (18 days), and the highest nitrogen content (2.1%). The coal (4%, w/w) treatment led to a significant increase in electrical conductivity, and the biochar (2%, w/w) treatment increased organic carbon (25.75%) and C/N ratio (15.8%) in the final compost. Adding leonardite increased the humic and fulvic acid percentage and created the highest humification indices. The additives used in this study did not significantly affect the seed germination index. Biochar (2, 4%, w/w) treatments significantly increased urease and phosphatase enzyme activities, but no significant difference was observed in dehydrogenase enzyme activity compared to the control. This study's results demonstrate that biochar and leonardite are more effective than coal in improving enzymatic activities and humification indices in the composting process.

Keywords: Biochar, Compost, Enzyme Activity, Manure, Leonardite

Adel Reyhanitabar, Kamal Khalkhal, Maryam Raji. 2024. The impact of various additives on the composting process of organic compounds on the biological properties and humification of compost. *Appleid Soil Research*. 12(3): 1-15.

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

Researcher expert of Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Kermanshah, Iran.

M.Sc., Graduate, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

* Corresponding Author Email: areyhani@tabrizu.ac.ir

تأثیر افزودنی‌های مختلف در فرایند کمپوست‌شدن ترکیبات آلی بر خصوصیات زیستی و هوموسی‌شدن کمپوست

عادل ریحانی تبار*^۱، کمال خلخال^۲، مریم راجی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴

چکیده

در این پژوهش اثر مصرف بیوچار، لئوناردیت و زغال‌سنگ بر برخی شاخص‌های رسیدگی، هوموسی‌شدن، تنفس میکروبی و فعالیت آنزیمی در کمپوست مشترک کود دامی و مواد آلی جنگلی مطالعه شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به مدت سه ماه در شرکت تولید کمپوست اجرا گردید. عامل اول شامل تیمار بیوچار (۲ و ۴ درصد)، لئوناردیت (۲ و ۴ درصد)، زغال سنگ (۲ و ۴ درصد وزنی) با مواد اولیه مخلوط شدند و عامل دوم زمان شامل هفته اول تا هفته ۱۲ بود. در طول فرایند کمپوست‌شدن بطور هفتگی نمونه‌برداری از توده کمپوست انجام شده و برخی شاخص‌های زیستی و هوموسی‌شدن در کمپوست اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که تیمار لئوناردیت ۲ درصد بالاترین دما (۶۱/۲) درجه سلسیوس) و بیشترین طول مدت زمان فاز ترموفیلی (۱۸ روز) و درصد نیتروژن (۲/۱۱ درصد) را داشت. تیمار زغال‌سنگ در سطح ۴ درصد باعث افزایش معنادار هدایت الکتریکی و تیمار بیوچار ۴ درصد باعث افزایش کربن آلی (۲۵/۷۵ درصد) و نسبت C/N (۱۵/۸) در کمپوست نهایی شد. افزودن لئوناردیت باعث افزایش معنادار درصد اسید هیومیک و فولویک شد و بالاترین مقادیر شاخص هوموسی‌شدن را ایجاد کرد. مواد افزودنی مورد استفاده در این مطالعه بر شاخص جوانه‌زنی بذر تره تیزک اثر معناداری نداشتند. تیمار بیوچار دو و چهار درصد به ترتیب در افزایش فعالیت آنزیم اوره‌آز و فعالیت آنزیم فسفاتاز اثر معنادار داشتند ولی بر فعالیت آنزیم دهیدروژناز تفاوت معناداری با شاهد مشاهده نشد. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از بیوچار و لئوناردیت بهتر از زغال‌سنگ در بهبود فعالیت‌های آنزیمی و شاخص‌های هوموسی‌شدن در فرایند کمپوست‌شدن تأثیرگذار هستند.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، فعالیت آنزیمی، کمپوست، لئوناردیت، کود دامی

ریحانی تبار ع.، خلخال ک.، راجی م. ۱۴۰۳. تأثیر افزودنی‌های مختلف در فرایند کمپوست‌شدن ترکیبات آلی بر خصوصیات زیستی و هوموسی‌شدن کمپوست. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۲، شماره ۳، صفحه: ۱-۱۵.

۱-استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- کارشناس محقق بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

*پست الکترونیک: areyhani@tabrizu.ac.ir

مقدمه

کمپوست و کاهش مدت زمان کمپوست شدن با دخالت در فاز ترموفیلی، (۲) افزایش پایداری کربن و (۳) کاهش آبشویی نیترات و انتشار گازهای گلخانه‌ای و انتشار بوی نامطبوع (Barthod *et al.*, 2018; Sánchez-García *et al.*, 2015). هنگامی که ماده آلی به سطح بالایی از هوموسی شدن برسد، ارزش یک کمپوست افزایش می‌یابد (Wang *et al.*, 2014). برخی محققان گزارش کردند که افزودن بیوجار به مواد در حال کمپوست شدن فرایند هوموسی شدن را بهبود بخشیده است (Dias *et al.*, 2010). با این حال، تعداد گزارشات در مورد تأثیر بیوجار در ترکیب شیمیایی مواد هیومیک، خصوصاً در مورد اسید فولیک محدود است. آنزیم‌ها واسطه اصلی فرایندهای مختلف تجزیه‌کننده در هنگام کمپوست‌سازی هستند. قارچ‌ها به دلیل توانایی تولید آنزیم‌های لیگنوسولولزی برای تجزیه انواع مختلف ترکیبات پلیمری مانند سلولز، لیگنین و مواد آلی مقاوم، در تجزیه کمپوست نقش مهمی دارند (Langarica-Fuentes *et al.*, 2014). عامل محدود کننده رشد و تکثیر، تولید زیست‌توده و محصول‌های آنزیمی مرتبط در قارچ‌ها، منابع کربن و نیتروژن هستند. آنزیم‌های مختلفی همچون بتاگلوکوزیداز (تبدیل واحدهای سلوبیوزی به گلوکز)، اوره‌از (هیدرولیز اوره به CO₂ و NH₄)، دهیدروژناز (شاخص کلی از فعالیت میکروبی)، فسفاتاز (هیدرولیز منواسترهای اسید فسفریک و تبدیل آنها به یون فسفات) در فرایند کمپوست شدن حضور دارند و از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. برخی محققان گزارش کردند که افزودنی‌هایی همچون گچ و بیوجار باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز، بتاگلوکوزیداز، اوره‌از، فسفاتاز و پلی‌فنل‌اکسیداز در فرایند کمپوست شدن مشترک شدند (Jindo *et al.*, 2012; Qu *et al.*, 2020). این محققان دلیل احتمالی را به سطح ویژه بیشتر بیوجار و گچ و در نتیجه تحریک بیشتر فعالیت ریزجانداران هتروتروف و ترشح آنزیم‌ها اعلام کردند. گزارش شده است که بیوجار به دلیل ساختار فیزیکی شیمیایی خود، در فرایند کمپوست شدن مشترک منجر به بهبود کمپوست، تأثیر بر ساختار جامعه میکروبی، کاهش اتلاف نیتروژن، تخریب مواد آلی و افزایش هوموسی شدن می‌شود (Chen *et al.*, 2022; Cui *et al.*, 2020). لیگنیت هوادیده شده است که دارای فولویک و هومیک اسید و حاوی مقادیر زیادی از کربن و گروه‌های عاملی

کمپوست کردن یک روش ساده و کارآمد برای تجزیه و تثبیت ضایعات آلی از جمله کودهای دامی و جامدات زیستی است. این روش نه تنها می‌تواند بازیافت عناصر غذایی را بهبود بخشد، بلکه می‌تواند مشکلات زیست‌محیطی مرتبط با مدیریت پسماندهای آلی را با کاهش آلاینده‌های آلی، اثربخشی در تثبیت مواد آلی و کنترل موجودات بالقوه خطرناک نیز بهبود بخشد (Bernal *et al.*, 2009; Zalewska *et al.*, 2024). ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi *et al.*, 2023) گزارش کردند که فعالیت آنزیم فسفاتاز در خاک با افزایش کودهای آلی و کمپوست حاصل از زباله شهری افزایش معنادار یافت. افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز در خاک سبب آزاد شدن فسفر پیوند خورده با ذرات آلی و معدنی می‌شود و باعث افزایش غلظت فسفر در بخش محلول خاک می‌شود. در نهایت این محققان استفاده از کمپوست زباله شهری به همراه باکتری‌های محرک رشد را برای شرایط استان گیلان توصیه کردند. واحدی و رسولی-صدقیانی (Rasouli-Sadaghiani & Vahedi, 2019) گزارش کردند که در یک خاک آهکی با مصرف کمپوست حاصل از ضایعات هرس درختان سیب و انگور فراهمی عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم افزایش یافت. به گزارش آنان بیشترین درصد کربن آلی خاک در تیمار کمپوست در مقایسه با شاهد و بیوجار حاصل شد. در نهایت این پژوهشگران چنین نتیجه گرفتند که استفاده از مقادیر مناسب کمپوست جذب عناصر پر مصرف را بهبود می‌بخشد. از تأثیرات منفی در حین تولید و مصرف کمپوست می‌توان به انتشار گازهای گلخانه‌ای (CH₄, CO₂ & N₂O)، هدررفت کربن و نیتروژن اشاره کرد (Barthod *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2022). یکی از رهیافت‌ها در زمینه بهبود فرایند تهیه کمپوست، کمپوست شدن مشترک یا کوکمپوستینگ است (Sánchez-García *et al.*, 2015). در این فرایند از ابتدا برخی مواد افزودنی به زیست‌توده افزوده شده و باهم فرایند کمپوست شدن را طی می‌کنند و این عمل با مخلوط کردن این افزودنی‌ها با کمپوست رسیده متفاوت است. این افزودنی‌ها ممکن است آلی، معدنی، زیستی یا ترکیبی باشند. افزودن این مواد در هنگام کمپوست شدن ممکن است با سه سازوکار باعث بهبود کیفیت کمپوست شوند: (۱) بهبود تهویه توده

کود مرغی و مواد آلی جنگل تازه (چوب و بقایای برگ‌های درختان جنگلی) پس از عبور از الک با منافذی به قطر تقریبی ۸ میلی‌متری به نسبت وزنی/وزنی برابر استفاده شدند. بیوچار مورد استفاده در این تحقیق از شرکت دانش‌بنیان فصل پنجم استان فارس تهیه شد. بر طبق اعلام شرکت مذکور بیوچار از هرس درختان آلو و انار در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت در شرایط کم اکسیژن تهیه شده است. لئوناردیت و زغال‌سنگ نیز از شرکت قیزیل توپراق سهند استان آذربایجان شرقی تهیه شدند (جدول ۱). بیوچار، زغال‌سنگ و لئوناردیت در ابعاد دو میلی‌متری پودر شده و به‌صورت جداگانه در سه سطح صفر، ۲ و ۴ درصد با مواد اولیه کمپوست در توده-هایی با اندازه ۱×۱×۳ (ارتفاع×عرض×طول) متر مخلوط شدند. رطوبت تیمارها تا پایان آزمایش به‌صورت دستی در حدود ۵۵-۵۰ درصد وزنی نگهداری شد. هر سه یا چهار روز یک‌بار توده‌های کمپوستی مخلوط شدند و دمای توده با استفاده از دماسنج دیجیتالی روزانه اندازه‌گیری شد. 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 اجرا شد. عامل اول شامل تیمار بیوچار (۲ و ۴ درصد)، لئوناردیت (۲ و ۴ درصد)، زغال سنگ (۲ و ۴ درصد وزنی) با مواد اولیه مخلوط شدند و عامل دوم زمان شامل هفته اول تا هفته ۱۲ بود.

(کربوکسیل، هیدروکسیل، فنلی و کربونیل) است (Olivella *et al.*, 2011). به‌رغم ارزان بودن و استخراج در ایران تأثیر لئوناردیت در فرایند کمپوست‌شدن ضایعات بررسی نشده است. زغال‌سنگ‌ها نیز نوعی سنگ رسوبی هستند که از تجزیه مواد گیاهی مدفون شده در شرایط دما و فشار بالا در فرایند کربنی‌شدن حاصل شده‌اند. این ماده منشأ بسیاری از کودهای حاوی مواد هیومیکی است که در کشاورزی مصرف می‌شود. با توجه به اهمیتی که کمپوست در استفاده از انواع پسماند در محیط زیست و کشاورزی دارد و با در نظر گرفتن قابلیت دسترسی مکانی و زمانی، فرایند کمپوست‌شدن با این مواد بایستی در جهت بومی‌سازی باشد. برای همین منظور برای کاهش هزینه‌ها و رفع معایب کمپوست، در مطالعه حاضر از ضایعات هرس درختان به عنوان ماده اولیه ارزان و سازگار با محیط‌زیست برای تولید بیوچار و همچنین به دلیل ارزان بودن و داشتن منابع فراوان لئوناردیت و زغال‌سنگ در ایران، از این دو افزودنی آزمایش نشده استفاده شد. بنابراین این مطالعه با هدف بررسی افزودنی‌های مختلف (بیوچار، لئوناردیت و زغال‌سنگ) در خصوصیات زیستی و هوموسی شدن کمپوست کود دامی و مواد جنگلی انجام شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی بستر کمپوست

در این تحقیق برای تولید کمپوست، مخلوط کود گاوی،

جدول ۱- برخی خصوصیات برای مواد افزودنی و مواد خام اولیه

Table 1. Some properties of additives and raw materials

Properties	Forest organic matter	Chicken manure	Cow manure	Coal	Leonardite	Biochar
pH (1:10)	7.1	7.7	7.9	6.7	6.5	7.8
EC (dS m ⁻¹) (1:10)	2.1	4.5	3.6	2.9	2.5	1.1
C (%)	25	22	21	51	33	52
N (%)	1.8	2.3	1.2	0.6	0.7	0.2
S (%)	0.9	1.5	0.9	3.4	3.9	1.2
H (%)	-	-	-	-	-	1.6
Ash (%)	-	-	-	-	-	25
Total Fe (g kg ⁻¹)	1.78	7.43	1.86	9.75	1.07	6.57
Total Zn (mg kg ⁻¹)	29.4	69.75	39.7	69.48	72.51	50.57
Total Mn (mg kg ⁻¹)	96.9	290.32	148.9	250.52	181.95	251.65
Total Cu (mg kg ⁻¹)	2.87	3.25	3.21	4.22	3.51	2.48
Total Ca (g kg ⁻¹)	13.81	27.61	15.21	26.75	28.23	39.91
Total Mg (g kg ⁻¹)	3.37	8.25	4.59	8.18	5.18	4.13

*خط تیره به معنی عدم اندازه‌گیری صفت مورد نظر است. *The dash means not measuring the desired properties.

$$HI = (HAC/TOC) \times 100 \quad (۳)$$

$$HS = CHA + CFA \quad (۴)$$

$$DP = HAC/FAC \quad (۵)$$

در این روابط HR شاخص هوموسی شدن، HA اسید هیومیک (درصد) - FA اسید فولویک (درصد) - TOC کربن آلی کل (درصد) EXC کربن استخراج شده - HAC درصد کربن آلی اسید هیومیک - FAC درصد کربن آلی اسید فولویک - HI نسبت هوموسی شدن (درصد) - DP درجه پلیمریزاسیون (بدون واحد) و HS مجموع مواد هیومیک می باشد.

اندازه گیری شاخص های زیستی

فعالیت تنفسی به روش تیتراسیون در یک ماه اول به صورت هفتگی و تا پایان کمپوست شدن (حدوداً ۳ ماه) به صورت دو هفته یکبار براساس زمان بندی فوق الذکر اندازه گیری شد (Schinner *et al.*, 2012). برای اندازه گیری فعالیت آنزیم دهیدروژناز در نمونه های کمپوست از روش (Schinner *et al.*, 2012) استفاده شد. برای سنجش فعالیت آنزیم های فسفاتاز (اسیدی و قلیایی) و فعالیت اوره آز نمونه های کمپوست نیز مطابق روش طباطبایی (Tabatabai, 1994) عمل شد.

تحلیل آماری

مطالعه حاضر به روش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. آزمون نرمال بودن، تجزیه واریانس داده ها و مقایسه میانگین به روش دانکن (سطح ۵ درصد) با استفاده از نرم افزار SPSS 27.0 انجام شد و برای ترسیم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده گردید.

نتایج و بحث

تغییرات دما، EC، pH، کربن آلی، نسبت C/N و شاخص

جوانه زنی بذر در طول کمپوست شدن

دما یک پارامتر مهم در کمپوست سازی است چرا که دما سرعت کمپوست سازی این فرایند را افزایش و میزان عوامل بیماری زا را کاهش می دهد (Bao *et al.*, 2024). تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی تیمارها و زمان بر دما معنی دار بود (جدول ۲). در شرایط این پژوهش، بالاترین دما در تمامی تیمارها در روز سیزدهم ثبت شد که در این بین بالاترین دما (۶۱/۲ درجه سلسیوس)

نحوه و زمان نمونه برداری از توده های در حال کمپوست

شدن و ارزیابی خصوصیات نمونه ها

به هنگام نمونه برداری حداقل ۳ نمونه فرعی از اعماق مختلف توده ها برداشت و مخلوط شدند و در نهایت یک نمونه مرکب از هر تکرار جهت تجزیه به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه برداری و اندازه گیری شاخص های مورد نظر در ۹ زمان انجام شد. دمای توده در ۳۰ روز اول روزانه و پس از آن به صورت هفتگی اندازه گیری شد. برای اندازه گیری دمای داخل توده از دماسنج دیجیتالی سیمی استفاده شد. 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 pH و EC محلول رویی با استفاده از دستگاه pH متر و EC متر اندازه گیری شد (Awasthi *et al.*, 2017a). غلظت کربن آلی و خاکستر از طریق احتراق به مدت ۸ ساعت در دمای ۴۸۰ درجه سلسیوس اندازه گیری شد (ASTM, 2007). نیتروژن کل به روش کج لال اندازه گیری (Bremner, 1996)، و نسبت کربن به نیتروژن در یک ماه اول به صورت هفتگی و تا پایان کمپوست شدن (۳ ماه) به صورت دو هفته یکبار محاسبه شد. از گیاه تره تیزک (*Lepidium sativum* L.) به منظور بررسی شاخص جوانه زنی بذر استفاده گردید. شاخص جوانه زنی گیاه تره تیزک در محلول با نسبت ۱:۱۰ درصد وزنی کمپوست به آب مقطر به صورت هفتگی اندازه گیری شد و در نهایت شاخص جوانه زنی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (Zucconi *et al.*, 1981).

$$GI = \frac{\text{تعداد بذر جوانه زده} \times (\text{طول ریشه در تیمار})}{\text{تعداد بذر جوانه زده} \times (\text{طول ریشه در شاهد})} / [(\text{تیمار}) \times 100] \quad (۱)$$

اندازه گیری ویژگی هوموسی شدن

اسید هیومیک در تیمارهای آزمایشی با روش کی و همکاران (Qi *et al.*, 2004) استخراج گردید و برای تعیین مقدار اسید فولویک در تیمارها از روش قلیایی (Carter & Gregorich, 2007) استفاده شد. پارامترهای هوموسی - شدن، به صورت رابطه (۲) الی (۵) محاسبه گردید (Amir *et al.*, 2008; Sánchez-Monedero *et al.*, 1999).

$$HR = (EXC/TOC) \times 100; \text{ یا } HR = [(CHA + CFA)/TOC] \times 100 \quad (۲)$$

دمای بالاتر و دوره ترموفیلی طولانی‌تری را در مقایسه با کمپوست شاهد و تیمار زغال‌سنگ نشان داد. 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 (Behera & Samal, 2022).

مربوط به تیمار لئوناردیت ۲ درصد بود (شکل ۱a). بیشترین و کمترین طول دوره ترموفیلی به ترتیب در تیمارهای لئوناردیت ۲ درصد (۱۸ روز) و تیمار زغال سنگ ۲ درصد (۱۱ روز) مشاهده شد. در فاز رسیدگی و خنک‌شدن کمپوست نیز تیمار زغال‌سنگ ۲ درصد دارای کمترین دما بود. کمپوست با کمک بیوجار و لئوناردیت

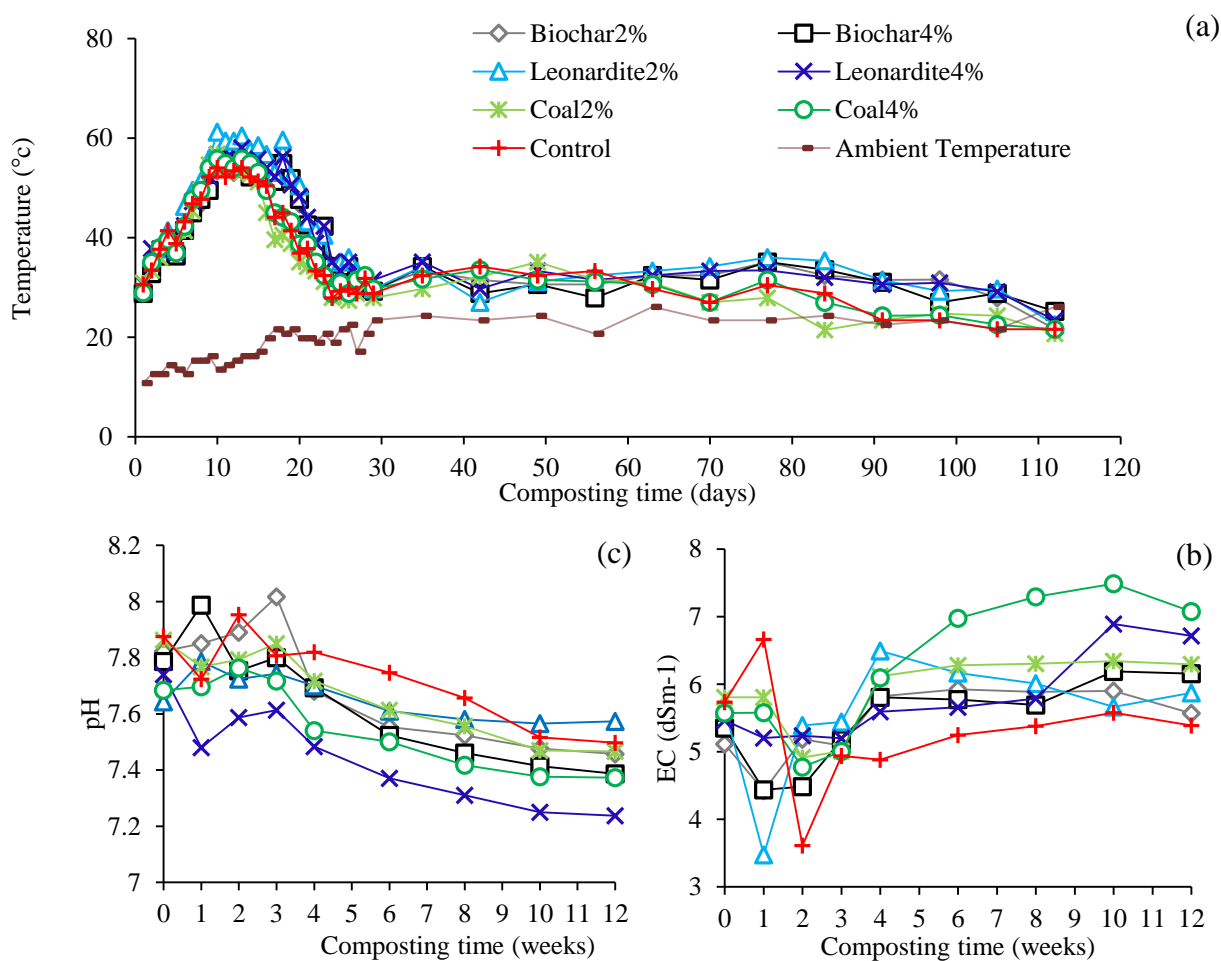
جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر افزودنی‌های مختلف بر دما، pH، EC، غلظت کربن آلی، غلظت نیتروژن کل و نسبت C/N

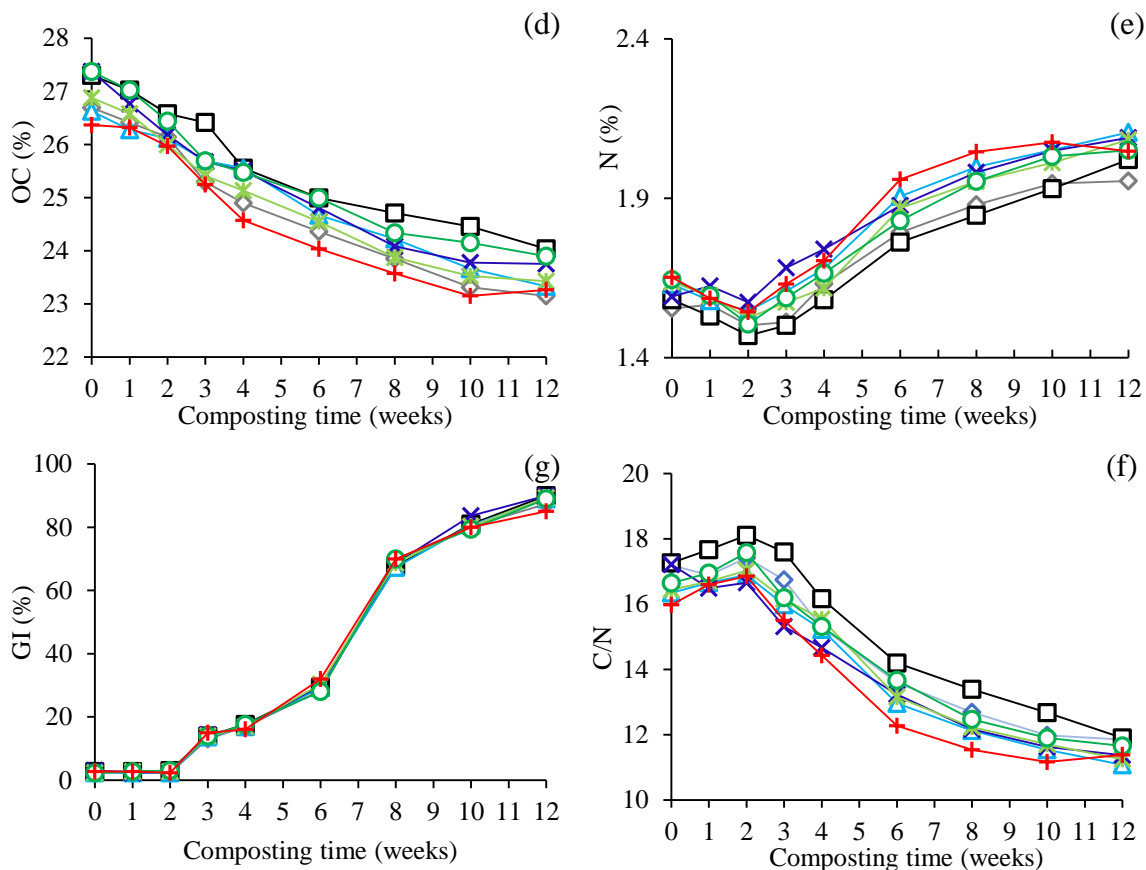
Table 2. Variance analysis of the effect of different additives on temperature, pH, EC, OC, N and C/N ratio.

Source of variation	df	Temperature	df	pH	EC	OC	N	C/N	GI
mean squares									
Treatment	7	7527/94**	6	0.23**	2.89**	4.19**	0.106**	14.3**	223.54*
Time	40	1436.63**	8	0.48**	5.46**	29.68**	0.74**	94.66**	22357**
Treatment×Time	280	82.2 ^{ns}	48	1.26 ^{ns}	0.87**	0.15 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.8*	75.74 ^{ns}
Error	655	2.72	124	0.01	0.36	0.11	0.01	0.5	87.77
CV (%)		32.1		2.7	15.8	4.9	11.4	15.3	61.5

*significant at 0.05 level **significant at 0.01 level ns: non-significant

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.





شکل ۱- تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر دما (a)، EC (b)، pH (c)، کربن آلی (d)، نیتروژن (e)، نسبت C/N (f) و شاخص جوانه‌زنی (g) توده در طول کمپوست‌شدن

Figure 1. The effect of additives used in this research on temperature (a), EC (b), pH (c), organic carbon (d), nitrogen (e), C/N ratio (f) and germination index (g) during composting

ترکیبات مختلف در کمپوست شده و در نتیجه افزایش EC می‌شود. لئوناردیت ۴ درصد بعد از زغال سنگ ۴ درصد دارای بیشترین مقدار EC بود که حضور قابل توجه مواد هیومیک، می‌تواند دلیل اصلی این نتیجه باشد. 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، اثر رقت، نوع ماده اولیه که چوبی بود و جذب عناصر توسط بیوجار باشد (Cui *et al.*, 2020).

تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی تیمار و زمان بر pH توده در طول فرایند کمپوست‌شدن معنادار ولی اثر متقابل این دو غیرمعنادار بود (جدول ۲). همان‌طور که در شکل 1c مشاهده می‌شود در مرحله اولیه فرایند کمپوست شدن، pH کمپوست به دلیل آزاد شدن اسیدهای آلی

تجزیه واریانس نشان داد که اثر تمامی عوامل آزمایش بر قابلیت هدایت الکتریکی (EC) توده در حال کمپوست شدن معنادار 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 1b). افزایش EC می‌تواند به دلیل تجزیه و معدنی‌شدن مواد آلی و افزایش غلظت عناصر غذایی باشد (Campbell *et al.*, 1997). در این پژوهش بالاترین EC متعلق به تیمارهای زغال‌سنگ و پایین‌ترین EC برای شاهد به دست آمد. با توجه به بالا بودن شوری زغال سنگ نسبت به دیگر افزودنی‌ها، بالا بودن EC تیمار زغال سنگ قابل توجیه است (جدول ۱). از دلایل کمتر بودن EC تیمار شاهد نسبت به تیمارهای لئوناردیت و زغال‌سنگ می‌توان به pH کمتر تیمارهای لئوناردیت و زغال‌سنگ اشاره کرد. چرا که کاهش pH، باعث افزایش EC می‌شود. همچنین کاهش pH باعث حل‌پذیری بیشتر

وزن توده کاهش یافته و در ادامه اسیدهای آلی تجزیه شده و به دلیل تجزیه پروتئین‌ها توسط میکروارگانیسم‌ها، آمونیاک تولید و pH افزایش یافته است (Wang *et al.*, 2023). در مرحله آخر، pH به دلیل فرایند نیترات‌سازی دوباره کاهش (Akdeniz, 2019) و در مقادیر بین ۷/۳ تا ۷/۷ تثبیت شد. چن و همکاران (Chen *et al.*, 2010) نیز نتایج مشابهی گزارش کردند. علت پایین بودن pH هم در طول کمپوست شدن و هم در کمپوست نهایی در تیمار لئوناردیت ۴ درصد را می‌توان به pH اولیه خود لئوناردیت نیز ربط داد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی تیمارهای مورد بررسی بر غلظت کربن آلی توده در طول فرایند کمپوست‌شدن در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۲). در این پژوهش تیمارهای بیوجار ۲درصد و زغال‌سنگ ۴درصد بدون اختلاف معنادار دارای بیشترین غلظت کربن آلی بودند که دلیل این امر بالا بودن درصد کربن در ساختار بیوجار و زغال‌سنگ و مقاومت شیمیایی ساختار آروماتیک آنها در طول کمپوست‌شدن می‌باشد (Behera & Samal, 2022). هفته‌های نخستین بیشترین و هفته‌ی ۱۲ کمترین درصد کربن آلی در توده‌ها اندازه‌گیری شد. در شرایط این پژوهش و با گذشت زمان در فرایند کمپوست شدن، غلظت کل کربن آلی در کلیه تیمارها به دلیل افزایش فعالیت میکروبی ناشی از حضور این افزودنی‌ها و فروپاشی ترکیبات کربنی بیشتر از تیمار شاهد کاهش یافت (شکل Id) که با نتایج وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2023) مطابقت داشت. کاهش کربن آلی در فرایند کمپوست شدن علاوه بر تجزیه میکروبی ترکیبات کربنی و تبدیل آن به گاز CO₂ می‌تواند نشان‌دهنده‌ی هوموسی‌شدن و پایدار شدن مواد آلی در کمپوست با گذشت زمان باشد. تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی تیمار و زمان در سطح احتمال یک درصد بر غلظت نیتروژن کل توده معنادار ولی اثر متقابل تیمار×زمان غیر معنادار بود (جدول ۲). همانند نتایج وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2023) در تمامی تیمارها مقادیر نیتروژن کل در ابتدا به دلیل مصرف آن توسط میکروارگانیسم‌ها، وجود کربن سهل الوصول در ابتدای کمپوست‌شدن و در نتیجه افزایش جمعیت میکروبی و دمای توده کمپوست، کاهش یافت و سپس به دلیل معدنی‌شدن ترکیبات آلی نیتروژن افزایش یافت (شکل 1e). با گذشت روند کمپوست‌شدن اسکلت‌های کربنی تجزیه شده در نتیجه

وزن توده کاهش یافته و درصد نیتروژن افزایش می‌یابد. در شرایط این پژوهش تیمارهای بیوجار ۲ و ۴ درصد کمترین غلظت نیتروژن را چه در طول دوره و چه در انتهای فرایند کمپوست‌شدن دارا بودند که دلیل آن به درصد پایین نیتروژن بیوجار نسبت به دیگر افزودنی‌ها برمی‌گردد (جدول ۱). همان طور که در شکل 1e هم مشاهده می‌شود غلظت نیتروژن توده در هفته اول و دوم در کمترین مقدار خود بود و می‌توان چنین توجیه کرد که این ناحیه منطبق بر افزایش دما و pH در مرحله ترموفیلی و بیشترین تصاعد آمونیاک و هدررفت نیتروژن بود. در این پژوهش تیمار بیوجار ۴ درصد دارای بالاترین نسبت C/N بود. توده در حال کمپوست شدن در هفته دوم دارای بالاترین و در هفته ۱۲ دارای کمترین نسبت C/N بود. دلیل افزایش نسبت C/N در هفته دوم (دوره ترموفیلی) بالا بودن دما، افزایش pH، افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها، افزایش تصاعد آمونیاک و در نتیجه کاهش نیتروژن می‌باشد (شکل 1f). این نتایج با نتایج مالینووسکی و همکاران (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، در هنگام کمپوست‌شدن کاهش می‌یابد و معمولاً نسبت C/N کمتر از ۲۰ به‌عنوان شاخص پایداری در نظر گرفته می‌شود (Bernal *et al.*, 2009). 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 کمپوست‌شدن 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). تجزیه واریانس نشان داد که شاخص جوانه‌زنی بذر تره تیزک در فاکتورهای تیمار و زمان معنادار بود (جدول ۲). در دو هفته اول، شاخص جوانه‌زنی در حداقل مقدار قرار داشت و بعد از آن افزایش یافت و هفته ۱۲ به بالاترین مقدار خود رسید (شکل 1g). این یافته با نتایج مطالعات وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2023) مطابقت دارد. در تیمارها شاخص جوانه‌زنی بذر تره تیزک بعد از ۸ هفته به حد استاندارد رسید (۸۰درصد). همان طور که در شکل 1g مشاهده می‌شود شاخص جوانه‌زنی در این تحقیق برای همه تیمارها برای کمپوست نهایی بالای ۸۵ درصد بود. کمپوست

در تیمارهای لئوناردیت می‌تواند دلیل اصلی افزایش این شاخص‌ها در تیمارهای لئوناردیت ۲ و ۴ درصد باشد. در مطالعه حاضر همانند نتایج امیر و همکاران (Amir *et al.*, 2008) و دیاس و همکاران (Dias *et al.*, 2010) مقادیر HI و HR در طول کمپوست‌شدن افزایش یافت. این افزایش نشان‌دهنده هوموسی‌شدن ساختارهای آلی است که مقادیر زیادی مواد مشابه هیومیک را در جریان کمپوست‌سازی تولید می‌کنند. مقدار HI و HR بین صفر و صد بوده و هرچه به ۱۰۰ نزدیک باشد، کمپوست کیفیت بهتری دارد (Sánchez-Monedero *et al.*, 1999). افزایش نسبت HA/FA که به عنوان درجه پلیمریزاسیون (DP) شناخته می‌شود، نشان‌دهنده تشکیل مولکول‌های پیچیده (HA) از مولکول‌های ساده‌تر (FA) و کاهش اجزای غیرهومیکی بخش فولویک اسید است که به آسانی تجزیه می‌شوند. افزایش DP در تیمارهای لئوناردیت به دلیل افزایش درصد کربن آلی اسید هیومیک (HAC) است. لئوناردیت حاوی محتوای بالایی از گروه‌های عاملی اکسید شده مانند کربوکسیل است که می‌تواند با کربن آلی محلول بسیار واکنش‌پذیر باشد. افزایش در گروه‌های کربوکسیلیک لئوناردیت ممکن است در اثر اکسیداسیون شیمیایی لئوناردیت و وجود مواد هیومیک موجود در ساختار لئوناردیت ایجاد شود که منجر به شکل‌گیری سریع‌تر پلیمرهای آروماتیک در کمپوست مشترک می‌شود. اما دیاس و همکاران (Dias *et al.*, 2010) گزارش کردند که افزودنی‌هایی همچون بیوجا با شکسته شدن لیگنین آن به مواد سازنده‌اش و تولید رادیکال‌های آزاد در طول تشکیل بیوجا می‌تواند دوباره گروه‌بندی و سازماندهی شود و محصول نهایی حاوی بسیار آروماتیک را تشکیل دهد و منجر به افزایش شاخص‌های هوموسی‌شدن در کمپوست مشترک شود.

نابالغ حاوی موادی نظیر متان، آمونیاک و یا استیک اسید است که به شدت برای رشد گیاهان مضر می‌باشند. این مواد در طول کمپوست‌شدن تولید شده و در طول مرحله تکمیل کمپوست به مواد دیگری تبدیل می‌شوند (Bernal *et al.*, 2009). لی و همکاران (Li *et al.*, 2020) گزارش کردند که افزودن بیوجا 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 بیوجا ممکن است به دلیل جذب سموم توسط بیوجا، فراهمی عناصر غذایی و هدررفت نیتروژن کل باشد (Wang *et al.*, 2017). به نظر می‌رسد به دلیل پایین بودن EC تیمار شاهد نهایی (شکل 1b) و پایین بودن مواد قابل تجزیه در این تیمار، توده شاهد زودتر به حالت بلوغ رسیده و باعث افزایش شاخص جوانه‌زنی بذر شده است.

شاخص هوموسی‌شدن

تجزیه واریانس شاخص‌های هوموسی‌شدن نشان داد که اثرات اصلی تیمارهای مورد بررسی برای درجه پلیمریزاسیون، معنادار بودند (جدول ۳). شاخص هوموسی‌شدن در طول فرایند کمپوست‌شدن در تمامی تیمارها افزایش یافت (شکل 2a,b,c,d) و در تمامی شاخص‌ها هفته ۱۲ بالاترین مقدار و هفته‌های نخستین کمترین مقادیر را دارا بود. این نتایج مطابق با نتایج سانچز-موندرو و همکاران (Sánchez-Monedero *et al.*, 1999) و دیاز و همکاران (Dias *et al.*, 2010) است. همان‌طور که در شکل 2a,b,c,d مشاهده می‌شود شاخص‌های درجه پلیمریزاسیون (DP)، نسبت هوموسی‌شدن (HR) و شاخص هوموسی‌شدن (HI) در تیمار لئوناردیت ۲ و ۴ درصد دارای بالاترین مقادیر بودند. تیمار لئوناردیت ۴ درصد دارای بالاترین مقدار شاخص مجموع مواد هیومیک (HS) نیز بود. بالا بودن مواد هیومیک

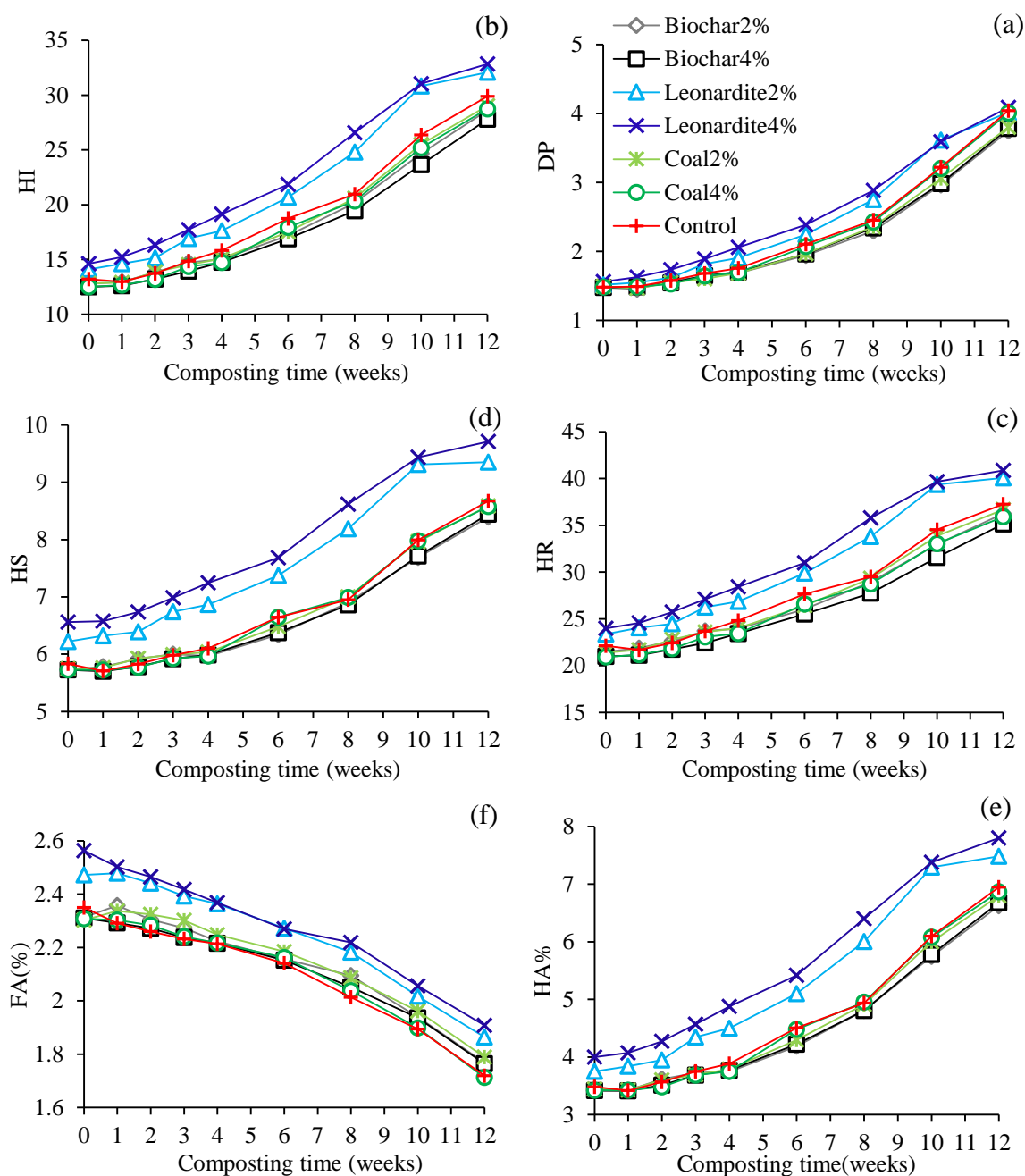
جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر افزودنی‌ها بر شاخص‌های مختلف هوموسی‌شدن

Table 3. Variance analysis of the effect of additives on humification indices

Source of variation	df	HR	HI	DP	HS	HA	FA
mean squares							
Treatment	6	154.52**	135.35**	0.93**	7.86**	7.51**	0.22**
Time	8	586.19**	676.53**	13.72**	20.8**	29.18**	0.74**
Treatment×Time	48	2.53**	2.39*	0.04 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.01**
Error	125	1.32	1.5	0.04	0.08	0.09	0.00
CV (%)		20.4	31.3	34.7	16.1	26.8	24

*significant at 0.05 level **significant at 0.01 level ns: non-significant

ns * و ** به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪.



شکل ۲- تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر شاخص‌های DP (a)، HI (b)، HR (c)، HS (d)، HA (e) و FA (f) توده در طول کمپوست‌شدن

Figure 2. The effect of additives used in this research on DP (a), HI (b), HR (c), HS (d), HA (e) and FA (f) indexes during composting.

تیمارهای لئوناردیت ۴ درصد و لئوناردیت ۲ درصد بالاترین درصد اسید هیومیک را دارا بودند. در این میان تیمار بیوچار ۲ درصد پایین‌ترین درصد اسید هیومیک را داشت. از ابتدای کمپوست‌شدن تیمار لئوناردیت ۴ درصد بالاترین درصد اسید هیومیک را دارا بود که به دلیل بالابودن اسید هیومیک در ساختار لئوناردیت است که همین روال تا آخر فرایند نیز ادامه داشت و بیشترین شیب

تجزیه واریانس برای اسید هیومیک (HA) نشان داد اثرات اصلی تیمارهای مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنادار بودند (جدول ۳). با گذشت زمان کمپوست‌شدن، درصد اسید هیومیک در تمام تیمارها افزایش یافت و در هفته‌ی ۱۲ بالاترین درصد اسید هیومیک اندازه‌گیری شد (شکل 2e). آواستی و همکاران (Awasthi *et al.*, 2017b) نیز نتیجه مشابهی گزارش کردند. در شرایط این تحقیق

محدود است. در طول کمپوست شدن، مواد هیومیک تولید و اسیدهای هیومیک افزایش می یابد، در حالی که اسیدهای فولویک و کربن آلی کل و کربن آلی محلول به دلیل تجزیه زیستی توسط ریزجانداران کاهش می یابند (Wang *et al.*, 2014).

شاخص های زیستی

تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر تیمار و زمان بر فعالیت تنفسی در سطح احتمال یک درصد معنادار بود. هفته اول بالاترین فعالیت تنفسی را دارا بود. هم در طول کمپوست شدن و هم در کمپوست نهایی، به دلیل فراهمی منبع غذایی برای میکروارگانیسم ها، تیمار زغال سنگ بالاترین فعالیت تنفسی را نشان داد و در تیمار شاهد کمبود مواد غذایی باعث کاهش فعالیت تنفسی شد. افزایش فعالیت میکروبی باعث افزایش دما شده و با افزایش دما در مرحله ترموفیلی اکثر میکروارگانیسم های مزوفیل از بین رفته و موجب افت شدید تنفس بعد از هفته چهارم شد (شکل ۳a). احتمالاً دلیل عدم افزایش جمعیت میکروبی با روند قبلی بعد از هفته چهارم، محدودیت در کربن آلی بستر و کمبود مواد غذایی می باشد. همچنین گزارش شده که بعد از این مرحله به دلیل کمبود منابع تغذیه، جمعیت باکتریایی کاهش و وارد دوره استراحت می شوند (Tiwari & Mishra, 1993).

افزایشی آن در هفته های ۸ تا ۱۰ مشاهده شد (شکل 2e). افزایش نسبی درصد اسید هیومیک می تواند به دلیل کاهش ماده آلی اولیه باشد و هم می تواند به علت تشکیل مواد هیومیک پایدار طی کمپوست شدن باشد. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2024) گزارش کردند که افزودن لیگنیت می تواند پیچیدگی ساختار HA را در طول کمپوست سازی از طریق مسیرهای زیستی بهبود بخشد. تجزیه واریانس نشان داد که اثر تمام فاکتورها در سطح احتمال یک درصد بر غلظت اسید فولویک (FA) معنادار بود (جدول ۳). دو هفته ای اول بالاترین و هفته ای ۱۲ کمترین مقدار اسید فولویک اندازه گیری شد (شکل 2f). درصد اسید فولویک با افزایش زمان کمپوست شدن کاهش یافت که با نتایج آواستی و همکاران (2017b) (Awasthi *et al.*, ۲۰۱۷) مطابقت داشت. تیمارهای لئوناردیت ۲ و ۴ درصد بالاترین درصد اسید فولویک را داشتند. اسید فولویک دارای ترکیبات آمینی و قندی می باشد که نسبت به اسید هیومیک تجزیه پذیرتر است، در هفته های پایانی کاهش مواد آلی قابل تجزیه، اسید فولویک می تواند منبع قوی و مناسب برای استفاده میکروارگانیسم ها باشد و این عامل به احتمال زیاد دلیل کاهش اسید فولویک در هفته های پایانی بوده است (Amir *et al.*, 2008). تعداد گزارشات در مورد تأثیر بیوچار و لئوناردیت در ترکیب شیمیایی مواد هیومیک، به ویژه در مورد فولویک اسید،

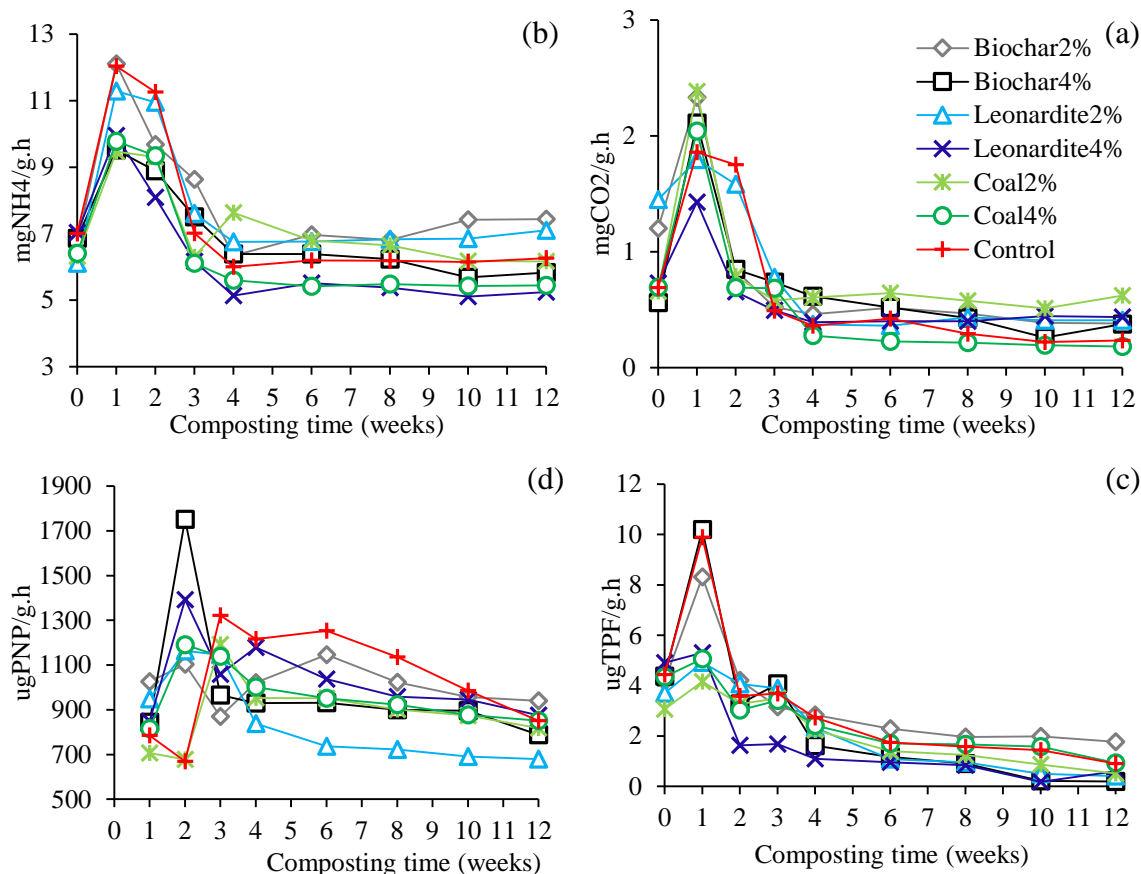
جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر افزودنی های مختلف بر شاخص های زیستی

Table 4. Variance analysis of the effect of different additives on biological indices

Source of variation	df	Dehydrogenase	Phosphatase	Urease	Respiration
mean squares					
Treatment	6	8.05**	249036.02**	14.23**	0.6**
Time	8	53.58**	233367.32**	49.56**	4.85**
Treatment×Time	48	1.41**	243125.65**	1.51 ^{ns}	0.13 ^{ns}
Error	118	0.67	64218.43	1.53	0.13
CV (%)		56	36.9	27.6	58.3

*significant at 0.05 level **significant at 0.01 level ns: non-significant

^{ns}, * و ** به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪



شکل ۳- تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر فعالیت تنفسی توده (a)، فعالیت آنزیم‌های اورآز (b)، دهیدروژناز (c) و فسفومونواسترزاز قلیایی (d) در طول کمپوست‌شدن

Figure 3. The effect of the additives used in this research on the respiration (a), urease (b), dehydrogenase (c) and alkaline phosphomonoesterase enzymes activity (d) during composting.

صورت آنزیم درون سلولی عمل می‌کند. بنابراین اندازه گیری فعالیت این آنزیم در خاک‌ها همبستگی خوبی بین فعالیت زیستی خاک و جمعیت میکروبی خاک (بیوماس میکروبی) برقرار می‌کند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تمامی فاکتورها در سطح احتمال یک درصد بر این صفت معنادار بود (جدول ۴). هفته اول بالاترین فعالیت آنزیمی را داشت و رفته رفته این فعالیت کاهش پیدا کرد و هفته ۱۲ پایین‌ترین فعالیت آنزیم اندازه‌گیری شد (شکل 4c). این نتایج مشابه با نتایج جیندو و همکاران (Jindo *et al.*, 2012) بود. تیمارهای بیوچار ۲ درصد و زغال سنگ ۴ درصد دارای بالاترین فعالیت این آنزیم بودند در کمپوست نهایی نیز بالاترین فعالیت متعلق به تیمار بیوچار ۲ درصد بود (شکل 4c). بیوچار و زغال سنگ از طریق بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی (تهویه، رطوبت و سطح ویژه) و افزایش دسترسی به عناصر غذایی باعث افزایش فعالیت میکروبی کمپوست می‌شوند.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فاکتور تیمار و زمان بر فعالیت آنزیم اوره‌آز معنادار بود (جدول ۴). در هفته اول و دوم بالاترین فعالیت آنزیم اوره‌آز اندازه‌گیری شد و بعد از آن فعالیت کاهش یافت (شکل 3b) که با نتایج جیندو و همکاران (Jindo *et al.*, 2012) مطابقت داشت. به نظر می‌رسد کاهش منبع غذایی کربنی بعد از مرحله ترموفیلی و دلیل این کاهش است. تیمار بیوچار ۲ درصد دارای بالاترین فعالیت این آنزیم در بین تیمارها بود. آمونیاک می‌تواند به عنوان مهارکننده فعالیت اوره‌آز باشد (Ros *et al.*, 2006). کاهش غلظت آمونیاک در مرحله ترموفیل و همچنین حضور غلظت زیاد نیتروژن می‌تواند باعث افزایش فعالیت آنزیم اوره‌آز در مرحله ترموفیلیک و فاز خنک‌شدن شود.

دهیدروژنازها محدوده وسیعی از واکنش‌های اکسایشی را شامل می‌شوند آنزیم دهیدروژناز فعال، فقط در سلول‌های زنده و سالمی که در خاک حضور دارند وجود داشته و به

کل در تیمارهای لئوناردیت مشاهده شد. نتایج این تحقیق نشان داد تیمارهای بیوچار و زغال سنگ مشابه هم بودند و هر دو برای تولید و تسریع کمپوست شدن، می‌توانند مفید باشند. بالاترین فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز و فسفاتاز و بالاترین نسبت C/N در تیمار بیوچار ۴ درصد و بالاترین تنفس میکروبی و EC در تیمار زغال سنگ ۲ درصد به دست آمد. بالاترین درصد کربن آلی در تیمارهای بیوچار و زغال سنگ ۴ درصد دیده شد. در مورد شاخص جوانه-زنی بذر تره تیزک، بیوچار بالاترین مقدار را داشت ولی تفاوت معناداری با شاهد وجود نداشت. لئوناردیت استفاده شده برای چندین سال اکسید شده و قابلیت تجزیه توسط میکروارگانیسم‌ها را نداشت و به‌نوعی باعث کند شدن روند کمپوست شدن شد. این تحقیق نشان داد که استفاده از بیوچار و لئوناردیت باعث افزایش فعالیت‌های آنزیمی و شاخص‌های هوموسی شدن در کمپوست مشترک شد. بنابراین تیمار ۴ درصد بیوچار افزودنی مناسبتری برای کمپوست مخلوط کود گاوی، کود مرغی و مواد آلی جنگل است. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده از این افزودنی‌ها با درصد بیشتر (۵ و ۱۰ درصد) و همچنین مخلوط افزودنی‌ها باهم روی پسماندهای آلی مختلف نیز استفاده شود.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر فاکتور تیمار و زمان در سطح احتمال یک درصد بر فعالیت آنزیم فسفومونواستراز قلیایی معنادار بود (جدول ۴). در بین تیمارها، بیوچار ۴ درصد دارای بالاترین فعالیت این آنزیم بود (شکل ۳d). در هفته دوم بالاترین فعالیت و در هفته ۱۲ پایین‌ترین فعالیت این آنزیم مشاهده شد (شکل ۳d). آنزیم فسفومونواستراز قلیایی برای ارزیابی فرایند کمپوست شدن مناسب است، زیرا این آنزیم تنها توسط میکروارگانیسم‌ها سنتز می‌شود و از گیاهان تولید نمی‌شود (Burns et al., 1982). روند فعالیت این آنزیم بستگی به مواد اولیه و نوع فرایند کمپوست‌سازی دارد. چندین محقق روند کاهشی در فعالیت این آنزیم پس از دوره ترموفیلی را گزارش کرده‌اند (Jindo et al., 2012). فعالیت فسفاتاز قلیایی به وجود سوبسترای مناسب نظیر فیتات‌ها، DNA، RNA و فسفولیپیدها وابسته است. به نظر می‌رسد که در تیمار بیوچار سوبسترای بیشتری در مقایسه با سایر تیمارها وجود داشته است.

نتیجه‌گیری کلی

در کمپوست نهایی بالاترین غلظت اسیدهیومیک، اسیدفولویک، شاخص‌های هوموسی شدن و درصد نیتروژن

Reference

- Akdeniz N. 2019. A systematic review of biochar use in animal waste composting. *Waste Management*, 88: 291–300.
- Amir S., Benlboukht F., Cancian N., Winterton P., and 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.
- ASTM, 2007. D1762-84: Standard Method for Chemical Analysis of Wool Charcoal. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, USA.
- Awasthi M. K., Wang Q., Chen H., Wang M., Ren X., Zhao J., and Zhang Z. 2017a. 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.
- Awasthi M. K., Wang M., Chen H., Wang Q., Zhao J., Ren X., and Zhang Z. 2017b. 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.
- Bao J., Li S., Qv M., Wang W., Wu Q., Nugroho Y. K., and Zhu L. 2024. Urea addition as an enhanced strategy for degradation of petroleum contaminants during co-composting of straw and pig manure: Evidences from microbial community and enzyme activity evaluation. *Bioresource Technology*, 393: 130135.
- Barthod J., Rumpel C., and Dignac M. F. 2018. Composting with additives to improve organic amendments. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2): 17.
- Behera S., and Samal, K. 2022. Sustainable approach to manage solid waste through biochar assisted composting. *Energy Nexus*, 100121.
- Bernal M. P., Alburquerque J. A., and Moral R. 2009. Composting of animal manures and chemical

- criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource technology*, 100(22): 5444-5453.
- Bremner JM, 1996. Nitrogen-total. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3- Chemical Methods. Soil Science Society of America, Madison*, pp. 1085–1121.
- Burns, R. G. 1982. Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology. *Soil biology and biochemistry*, 14(5), 423-427.
- Campbell Jr A. G., Folk R. L., and Tripepi R. R. 1997. Wood ash as an amendment in municipal sludge and yard waste composting processes. *Compost Science & Utilization*, 5(1): 62-73.
- Carter M. R., and Gregorich E. G. 2007. *Soil sampling and methods of analysis. (2ndEd.)*. CRC press. 708p.
- Chen X., Du Z., Liu D., Wang L., Pan C., Wei Z., and 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., and 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.
- Cui H., Ou Y., Wang L., Yan B., Li Y., and Ding D. 2020. The passivation effect of heavy metals during biochar-amended composting: emphasize on bacterial communities. *Waste Management*, 118: 360-368.
- Dias B. O., Silva C. A., Higashikawa F. S., Roig A., and 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.
- Ebrahimi E., Sourati Zanjani R., Hassani Kumleh H, Rezadoost M R., Kamran E., Khirkhah Rahim Abadi U., Nematollahian Sh. 2023. Evaluation of the effect of plant growth promoting bacteria and municipal waste compost on enzyme changes in mulberry leaf. *Applied Soil Research*, 11(1):73-86.
- Jindo K., Suto K., Matsumoto K., García C., Sonoki T., and Sanchez-Monedero M. A. 2012. Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure. *Bioresource Technology*, 110: 396–404.
- Langarica-Fuentes A., Handley P. S., Houlden A., Fox G., and Robson G. D. 2014. An investigation of the biodiversity of thermophilic and thermotolerant fungal species in composts using culture-based and molecular techniques. *Fungal Ecology*, 11: 132-144.
- Li H., Zhang T., Tsang D. C., and Li G. 2020. Effects of external additives: Biochar, bentonite, phosphate, on co-composting for swine manure and corn straw. *Chemosphere*, 248: 125927.
- Malinowski M., Wolny-Koładka K., and Vaverková M. D. 2019. Effect of biochar addition on the OFMSW composting process under real conditions. *Waste Management*, 84: 364-372.
- Olivella M. A., Sole M., Gorchs R., Lao C., and De Las Heras F. X. C. 2011. Geochemical characterization of a Spanish leonardite coal. *Archives of Mining Sciences*, 56(4): 789-804.
- Qi B. C., Aldrich C., and 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.
- Qu J., Zhang L., Zhang X., Gao L., and Tian Y. 2020. Biochar combined with gypsum reduces both nitrogen and carbon losses during agricultural waste composting and enhances overall compost quality by regulating microbial activities and functions. *Bioresource technology*, 314: 123781.
- Rasapoor M., Nasrabadi T., Kamali M., and Hoveidi H. 2009. The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Management*, 29(2): 570-573.
- Ros M., Garcia C., and Hernández T. 2006. A full-scale study of treatment of pig slurry by composting: Kinetic changes in chemical and microbial properties. *Waste Management*, 26(10): 1108-1118.
- Sánchez-García M., Albuquerque J. A., Sánchez-Monedero M. A., Roig A., and 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.
- Sánchez-Monedero M. A., Roig A., Cegarra J., and 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.
- Schinner F., Öhlinger R., Kandeler E., and Margesin R. (Ed.). 2012. *Methods in soil biology*. Springer

- Science & business media.
- Tabatabai M. 1994. Soil enzymes. In: R. W. Weaver, S. Angel, P. Bottomlet, D. Bezdicsek, S. Smith, A. Tabatabai and A. Wollum (Eds.), *Methods of soil Analysis*, 2nd ed., *Soil Science Society of America*, Inc, Madison Wisconsin, USA. pp 775-833.
- Tiwari S. C., and Mishra R. R. 1993. Fungal abundance and diversity in earthworm casts and in uningested soil. *Biology and Fertility of Soils*, 16: 131-134.
- Veeken A., Nierop K., de Wilde V., and Hamelers B. 2000. Characterisation of NaOH-extracted humic acids during composting of a biowaste. *Bioresource Technology*, 72(1): 33-41.
- Vahedi R. and Rasouli-Sadaghiani M.H. 2019. The effect of application of biochar and pruning waste compost with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on availability of macronutrient in wheat rhizosphere. *Applied Soil Research*, 6(4): 16-30
- Wang C., Tu Q., Dong D., Strong P. J., Wang H., Sun B., and Wu W. 2014. Spectroscopic evidence for biochar amendment promoting humic acid synthesis and intensifying humification during composting. *Journal of hazardous materials*, 280: 409-416.
- Wang Y., Han Z., Liu J., Song C., and Wei Z. 2024. The biotic effects of lignite on humic acid components conversion during chicken manure composting. *Bioresource Technology*, 130503.
- Wang Z., Xu Y., Yang T., Liu Y., Zheng T., and 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.
- Wang, X., Zhao, Y., Wang, H., Zhao, X., Cui, H. and Wei, Z. 2017. Reducing nitrogen loss and phytotoxicity during beer vinasse composting with biochar addition. *Waste management*, 61: 150-156.
- Zalewska M., Błażejewska A., Szadziul M., Ciuchciński K., and 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.
- Zucconi F., Pera A., Forte M., and De Bertoldi M. 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle*, 22: 54-57.