

Research Article

The Effect of Biochar, Leonardite and Coal on Some Quality Characteristics of Compost Resulting from the Co-composting of Manure and Forest Organic Matter

A Reyhanitabar^{*1}, M Raji², K Khalkhal³, A Hemati⁴, MR Sarikhani⁵

Received: January 18, 2024

Accepted: July 6, 2024

Revised: June 30, 2024

Published online: September 22, 2024

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

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

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

4-Ph.D, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

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

*Corresponding Author, E-mail: areyhani@tabrizu.ac.ir

Abstract

Background and Objectives

Composting is an effective approach for organic waste management, but it also has disadvantages such as greenhouse gases emission (CH₄, CO₂, and N₂O), bad smells, nitrogen loss, and contamination of soil and water resources. Therefore, it is crucial to develop a method to reduce gas emissions and improve the quality of compost at the same time. To overcome these disadvantages, some additives are usually used. The use of additives at the beginning of the composting process to produce valuable compost is known as "co-composting". Various materials can be incorporated into waste during composting. These materials fall into three categories: organic, mineral, biological, or a combination of these. Some of these added materials serve as bulking agents, primarily affecting the physical structure of the compost (such as aeration). However, most of the time, these substrates also have direct or indirect impacts on other composting factors and can be considered as additives. Additives play a role in enhancing the composting process by reducing leaching and gas emissions, improving aeration, accelerating organic matter breakdown, and enhancing nutrient content and availability in the final product. The research published so far showed that the effect of wood biochar along with leonardite and coal on the quality of compost obtained from animal manure and forest organic matter had not been studied in Iran, and considering the importance of the feasibility of improving the quality of compost, this research was conducted.

Methodology

In this research, the effect of wood biochar, leonardite and coal on some characteristics and quality indices of the co-compost of animal manure and forest organic matter was studied. The biochar was produced at 400° C from the pyrolysis of mixed pruning plum and pomegranate brunches. Leonardite and coal were also prepared from companies active in this field. The experiment was conducted as a factorial in a completely random basic design with three replications. The first factor of treatment included wood biochar, leonardite and coal at two levels of 2 and 4% by dry weight and the second factor of time included 12 weeks. During the composting process, temperature, pH, EC, total nitrogen concentration, organic carbon content and some quality indices of composting such as humification index (HR), humification ratio (HI), degree of polymerization (DP) and total materials Humic (HS) were measured.

Findings

According to the results, the treatments were significantly different from the control regarding the temperature of the compost pile, and the coal treatment showed the highest temperature at the level of 2%, and the duration of the thermophilic phase in the leonardite treatment was 2% longer than the other treatments. Among the additives, 2% and 4% leonardite treatments created the highest total nitrogen content in the compost. The additives used in this research did not make a significant difference in compost pH, but coal at the level of 4% caused a significant increase in electrical conductivity (EC). Biochar and coal increased organic carbon concentration in the compost pile. Leonardite treatments of 2% and 4% produced the highest values of humification indices (HS, DP, HI, HR), but they were not significantly different from each other. The biochar used in this research increased the C/N ratio of co-compost.

Conclusion

In general, leonardite treatments were found to be useful in terms of the indicators of final compost and biochar and coal treatments to accelerate composting in the early stages. But the results of this research showed that it can be used at the end of composting processes in order to enrich and improve the quality of the produced compost. The results of this research showed that considering the costs of raw materials, coal is a suitable treatment to accelerate the production and improve the quality of compost. The results obtained about the effect of biochar obviously cannot be generalized to all biochars and different results may be obtained depending on the type of biomass and pyrolysis conditions. Therefore, it is recommended to use the combination of organic and biological or organic and inorganic additives in future research. Other traits such as indices of microbial contamination and abundance of weed seeds should also be measured and the effect of treatments should be studied. Finally, it is recommended to study the effect of final compost on the characteristics of calcareous and acidic soils.

Keywords: Biochar, Coal, Co-composting, Leonardite, Humification

مقاله پژوهشی

تأثیر بیوچار چوب، لئوناردیت و زغال‌سنگ بر برخی ویژگی‌های کیفی کمپوست حاصل از کمپوست شدن مشترک کود دامی و بقایای آلی جنگلی

عادل ریحانی تبار^{۱*}، مریم راجی^۲، کمال خلخال^۳، آرش همتی^۴، محمدرضا ساریخانی^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

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

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

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

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

۵-دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: areyhani@tabrizu.ac.ir

چکیده

کمپوست‌سازی رهیافت موثر مدیریت ضایعات آلی است ولی معایبی همچون تصاعد گازهای خطرناک حین تولید دارد. برای غلبه بر این معایب معمولاً از برخی افزودنی‌های آلی و معدنی در فرایند تولید استفاده می‌شود. در این پژوهش اثر بیوچارچوبی، لئوناردیت و زغال‌سنگ بر برخی ویژگی‌ها و شاخص‌های کیفی کمپوست مشترک مطالعه شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. فاکتور اول تیمار شامل بیوچار چوبی، لئوناردیت و زغال‌سنگ در دو سطح ۲ و ۴ درصد وزنی و فاکتور دوم زمان شامل ۱۲ هفته بود. در طول فرایند کمپوست‌شدن مشترک کود دامی و بقایای آلی جنگلی، دما، pH، EC، غلظت نیتروژن کل، درصد کربن آلی و برخی شاخص‌های کیفی همچون شاخص هوموسی‌شدن (HI)، نسبت هوموسی‌شدن (HR)، درجه پلیمریزاسیون (DP) و مجموع مواد هیومیک (HS) اندازه‌گیری شدند. بر طبق نتایج حاصله، برخلاف pH، در مورد دمای توده کمپوست تیمارها تفاوت معناداری با تیمار شاهد داشتند و تیمار زغال‌سنگ در سطح ۲ درصد بالاترین دما، تیمار لئوناردیت ۲ درصد بیشترین طول مدت زمان فاز ترموفیلی و تیمارهای لئوناردیت ۲ و ۴ درصد بالاترین درصد نیتروژن کل را نشان دادند. در این پژوهش زغال‌سنگ در سطح ۴ درصد باعث افزایش معنادار EC کمپوست شد. بیوچار و زغال‌سنگ باعث افزایش کربن آلی در بسترهای کمپوست شدند. تیمارهای لئوناردیت ۲ و ۴ درصد بالاترین مقادیر شاخص‌های هوموسی‌شدن (HS، DP، HI، HR) را ایجاد ولی تفاوت معناداری با یکدیگر نداشتند. به طور کلی تیمار لئوناردیت از لحاظ شاخص‌های رسیدگی کمپوست نهایی و تیمارهای بیوچار و زغال سنگ برای تسریع کمپوست شدن در مراحل اولیه مفید تشخیص داده شدند.

واژه های کلیدی: بیوچار، زغال‌سنگ، لئوناردیت، کمپوست‌شدن مشترک، هوموسی‌شدن

مقدمه

رکن اصلی کشاورزی پایدار ماده آلی خاک است و به دلیل محدودیت منابع در ایران، لازم است از همه منابع آلی مانند ضایعات کشاورزی، لجن فاضلاب و مواد زائد شهری برای افزایش ماده آلی خاک استفاده شود. یکی از مناسبترین راه‌های مدیریت منابع آلی کمپوست کردن است که دارای ویژگی‌های عملیات ساده و سازگار با محیط زیست است. این فناوری به طور گسترده برای استفاده از کود دامی استفاده می‌شود. فرایند تولید کمپوست می‌تواند مواد آلی موجود در کود دامی را تجزیه و آنها را به مواد هوموسی با ارزش‌تر تبدیل کند (لی و همکاران ۲۰۲۱، کیو و همکاران ۲۰۲۲). طی فرایند تولید کمپوست، تجزیه مواد زائد آلی در حضور اکسیژن رخ می‌دهد که محصولات تولیدی شامل آب، آمونیاک، دی‌اکسید کربن و حرارت است. از طرف دیگر فرایندهای بی‌هوازی تجزیه مواد زائد در محیطی عاری از اکسیژن صورت می‌گیرد که محصول نهایی آن شامل گاز متان، دی‌اکسید کربن، آمونیاک و سایر گازها می‌باشد. کمپوست نهایی شامل سه ماده اصلی، هوموس، توده میکروبی و خاکستر است (اپستاین ۱۹۹۷). تهیه کمپوست معمولاً از چند هفته تا چندین ماه طول می‌کشد و براساس الگوی تجزیه مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها شامل سه مرحله پیش فعال، فعال و بلوغ می‌باشد. مرحله پیش فعال کمپوست منطبق بر فاز دمایی مزوفیلیک است. در این مرحله میکروارگانیسم‌ها با مصرف مواد قندی ساده و برخی از پروتئین‌ها تکثیر می‌شوند که حاصل آن افزایش تدریجی دما است. در مرحله فعال که با فاز ترموفیلیک منطبق است، قسمتی از ترکیبات آلی نظیر قندها و پروتئین‌ها در اثر فعالیت میکروارگانیسم‌ها مصرف و گرمای حاصله موجب افزایش جمعیت میکروارگانیسم‌های ترموفیل (عمدتاً قارچ‌ها، اکتینومیسیت‌ها و گروهی از باکتری‌ها) می‌شود. مدت زمان رسیدن به این مرحله معمولاً ۳ تا ۱۵ روز و دمای بستر ۶۵-۶۰

درجه سلسیوس گزارش شده است. رسیدن به این دمای بالا برای پاستوریزه شدن کمپوست و از بین رفتن بذور علف هرز و تخم انگل‌ها و برخی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا حائز اهمیت است. علاوه بر افزایش سریع دما، تغییرات pH، افزایش تولید CO_2 و کاهش نسبت C/N از مشخصات این مرحله است (اپستاین ۱۹۹۷). مرحله بلوغ کمپوست، طولانی‌ترین مرحله در تهیه کمپوست است، زیرا رسیدن کمپوست و تحولات منجر به هوموسی شدن اتفاق می‌افتد. شروع این مرحله با افت نسبی دما و کاهش فعالیت میکروبی همراه است. البته در این شرایط برخی میکروارگانیسم‌ها قادرند ترکیبات سلولزی و لیگنینی را تجزیه و به فعالیت خود ادامه دهند. کاهش ترکیبات سمی، تثبیت pH و نسبت C/N، و سنتز مواد هیومیکی نیز در این مرحله رخ می‌دهد. فولویک اسید نسبت به هیومیک اسید دارای گروه‌های آمیدی، پلی‌ساکاریدها، قندها و ترکیبات بیشتری می‌باشد که در مراحل نهایی تجزیه مواد آلی برای میکروارگانیسم‌ها قابل استفاده می‌باشد و لذا در مراحل نهایی کمپوست شدن مقدار فولویک اسید کاهش می‌یابد، ولی هیومیک اسید افزایش می‌یابد (امیر و همکاران، ۲۰۰۸؛ بوستامانته و همکاران، ۲۰۰۸). به طور کلی عوامل موثر بر فرایند تولید کمپوست شامل کمیت و کیفیت سوبسترا یا پیش ماده، عوامل محیطی مثل رطوبت، هوادهی و غلظت عناصر مورد نیاز میکروب‌ها مثل کربن، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و عناصر کمیابی همچون آهن، مس و روی می‌باشد (گویال و همکاران ۲۰۰۵).

در کنار مزایای فراوان فرایند کمپوست شدن جنبه‌های منفی همچون هدررفت نیتروژن از طریق تصاعد آمونیاک (NH_3)، انتشار گازهای گلخانه‌ای بد بو [متان (CH_4) و اکسید نیتروژن (N_2O)] و نگرانی‌های مربوط به حضور آلاینده‌های معدنی/آلی از بسترهای کمپوست وجود دارد (نگوین و همکاران ۲۰۲۲، لی و همکاران ۲۰۲۳). تصور برخی پژوهشگران بر این است که می‌توان این جنبه‌های منفی را با افزودن ترکیبات مختلف به مواد اولیه در حال

بیوچار با مواد در حال کمپوست شدن مخلوط شده است، اما لئو و همکاران (۲۰۱۷) حدود ۱۰ درصد وزنی را کمیت مناسب تشخیص داده‌اند.

لئوناردیت شکل اکسید شده‌ی زغال سنگ است که دارای مواد هیومیک می‌باشد و به زغال سنگ رسیده معروف است. در واقع به هر ماده‌ای از زغال سنگ اکسید شده که دارای مقدار قابل توجهی از مواد هیومیک باشد، لئوناردیت گفته می‌شود. گزارش شده است که این ماده حاصلخیزی خاک را بهبود می‌دهد (ندیری و همکاران ۲۰۰۱). تنوع گروه‌های عاملی کربوکسیل و هیدروکسیل موجود در مواد هومیکی و مواد غیر آلی آن می‌تواند ویژگی‌های متفاوتی را ایجاد کند. مواد غیر آلی عمدتاً شامل کلئیدهای رسی نظیر ایلایت، موسکویت، مونتوریلونایت و ترکیبات کائولینایت-آلومینیوم سیلیکات هستند (ساجب و آدهیکاری، ۲۰۲۰). به طور کلی زغال سنگ‌ها نوعی سنگ رسوبی هستند که از تجزیه مواد گیاهی مدفون شده در شرایط دما و فشار بالا طی میلیون‌ها سال به وجود آمده‌اند که به این فرایند کربنی شدن گفته می‌شود. مواد آلی در زغال سنگ حاوی مقدار قابل توجه اکسیژن، سولفور و نیتروژن است که در گروه‌های عاملی مختلفی گنجانده شده‌اند که بسته به شرایط خاص بسترهای زغال سنگ به وفور تغییر می‌کنند (اولیولا و همکاران ۲۰۰۱). افزایش در مقادیر عناصر غذایی با افزودن زغال سنگ، در کمپوست‌سازی پسماندهای آلی مشاهده شده است. زغال سنگ با دارا بودن ماهیت منافذ درشت، باعث بهبود تهویه در کمپوست‌سازی می‌شود (کومار و همکاران ۲۰۰۸).

اندک تحقیقات منتشر شده نشان می‌دهد که برخی انواع بیوچار با کاهش تصاعد گازهای گلخانه‌ای و آمونیاک از توده در حال کمپوست شدن، کیفیت کمپوست را بهبود می‌بخشند. تا زمان انجام این تحقیق

تبدیل به کمپوست محدود کرد (بارتد و همکاران ۲۰۱۸). این افزودنی‌ها ممکن است آلی، معدنی، زیستی یا ترکیبی باشند (آواستی و همکاران ۲۰۱۸). برخی از افزودنی‌ها به عنوان حجم‌دهنده تنها بر فیزیک کمپوست (تهویه) مؤثرند، اگرچه تأثیر مستقیم یا غیرمستقیمی بر سایر پارامترهای کمپوست نیز دارند. هنگامی که این افزودنی‌ها مانند بیوچار یا زغال سنگ از ابتدا با مواد خام اولیه مخلوط شوند و باهمدیگر فرایند کمپوست شدن را طی کنند فرایند مذکور کمپوست شدن توأم^۱ و کمپوست حاصله کمپوست مشترک یا هم نوا^۲ نامیده می‌شود. برخی محققان با پژوهش روی افزودنی‌های مختلف همانند زغال بامبو، بیوچار بامبو، بیوچار کلش برنج، کلش جو، خرده چوب بر روی کود دامی گزارش کردند که افزودنی‌های مذکور باعث افزایش دما در مرحله ترموفیلیک، افزایش تجزیه زیستی مواد آلی، افزایش هوموسی‌شدن، کاهش انتشار بو و گازهای گلخانه‌ای، مهار عوامل بیماری‌زا، کاهش تحرک فلزات سنگین و بهبود فرایند کمپوست شده‌اند (چانگ و همکاران ۲۰۲۱؛ دیاس و همکاران ۲۰۱۰؛ چن و همکاران ۲۰۱۰؛ مائو و همکاران ۲۰۱۸). با این حال، مواد افزودنی مختلف دارای تأثیرات متضاد هستند و بنابراین باید با شناخت مناسب از آن‌ها استفاده شود.

بیوچار فراورده جامد متخلخل و غنی از کربن است که در فرایند پیرولیز (گرماکافت) در نبود یا غلظت پایین اکسیژن تولید می‌شود (لهمان و همکاران ۲۰۱۱). بیوچار به عنوان یک منبع بالقوه برای سرعت بخشیدن به چرخه کمپوست و افزایش کیفیت نهایی کمپوست شناخته شده است (بهره و سامال ۲۰۲۲). تأثیر بیوچار بر فرایند کمپوست‌شدن تابع خصوصیات بیوچار است که آن‌هم تابع نوع زیست توده (چوبی یا علفی)، نوع پیرولیز و دمای پیرولیز می‌باشد. البته ناگفته پیداست که کمیت بیوچار مصرفی هم مهم است. در منابع از ۳ تا ۵۰ درصد

^۱Co-compost^۲Co-composting

طرح آماری و تیمارهای آزمایشی

این تحقیق به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سایت تولید کمپوست شهرداری سراب واقع در استان آذربایجان شرقی به مدت سه ماه انجام گرفت. فاکتور اول شامل تیمار و فاکتور دوم شامل زمان بود. به طور کلی ۳ تیمار (بیوچار، زغال سنگ و لئوناردیت) در دو سطح ۲ و ۴ درصد به اضافه یک تیمار شاهد در سه تکرار بودند که ۲۱ واحد آزمایشی می شود.

نحوه و زمان نمونه برداری از تله‌ها

به هنگام نمونه برداری حداقل ۳ نمونه فرعی از اعماق مختلف تله‌ها برداشت و مخلوط شدند و در نهایت یک نمونه مرکب از هر تکرار جهت اندازه‌گیری صفات و تجزیه به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه برداری 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)، زمان ۴ (هفته سوم)، زمان ۵ (هفته چهارم)، زمان ۶ (هفته ششم)، زمان ۷ (هفته هشتم)، زمان ۸ (هفته دهم) و زمان ۹ (هفته دوازدهم).

اندازه‌گیری نسبت C/N و غلظت خاکستر

غلظت کربن آلی و خاکستر از طریق احتراق به مدت ۸ ساعت در دمای ۴۸۰ درجه سلسیوس از رابطه زیر محاسبه شد (ASTM 2007). نیتروژن کل به روش کجلدال اندازه‌گیری (برمنر ۱۹۹۶)، و نسبت بین کربن به نیتروژن در یک ماه اول به صورت هفتگی و تا پایان کمپوست شدن (۳ ماه) به صورت دو هفته یکبار محاسبه شد.

$$\% C = \frac{(100 - \% \text{ ash})}{1.8} \times 100$$

اندازه‌گیری pH و EC

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 روشن‌آور با

در سال ۱۴۰۲ مرور تحقیقات منتشر شده نشان داد که تاثیر بیوچار چوبی همراه با لئوناردیت و زغال سنگ بر کیفیت کمپوست حاصل از کود دامی و مواد آلی جنگلی در ایران مطالعه نشده است. هدف از این تحقیق بررسی اثرات زغال سنگ، بیوچار و لئوناردیت بر برخی خصوصیات کیفی کمپوست مشترک در طول کمپوست شدن می باشد.

مواد و روش‌ها

آماده سازی 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. بیوچار مورد استفاده در این تحقیق از شرکت دانش بنیان فصل پنجم استان فارس تهیه شد. بر طبق اعلام شرکت مذکور ابتدا زیست توده حاصل از هرس درختان آلو و انار به قطعات ریز خرد و بعد از عبور از الک ۲ میلی متری به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس در آون خشک شده و سپس داخل کوره با غلظت کم اکسیژن گذاشته شده و بعد از حصول دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت نگهداری شده است. لئوناردیت و زغال سنگ نیز از شرکت طب یاران آذین مهر سراب استان آذربایجان شرقی تهیه شدند. بیوچار، زغال سنگ و لئوناردیت در ابعاد دو میلی متری پودر شده و به صورت جداگانه در سه سطح صفر، ۲ و ۴ درصد با مواد اولیه کمپوست در تله‌هایی با اندازه‌ی ۱×۱/۵×۳ (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 همزده شد و کاملاً مخلوط شده و دمای توده با استفاده از ترمومتر دیجیتالی روزانه اندازه‌گیری شد.

استفاده از دستگاه pH متر و EC متر اندازه‌گیری شد

(پترز ۲۰۰۳).

اندازه‌گیری دمای توده کمپوست

دمای توده در ۳۰ روز اول روزانه و پس از آن به صورت هفتگی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری دمای داخل توده از ترمومتر دیجیتالی استفاده شد که سیم مخصوص آن در داخل لوله‌های مخصوص اندازه‌گیری دما قرار گرفته و دمای توده اندازه‌گیری گردید.

اندازه‌گیری ویژگی‌های هوموسی‌شدن

اسید هیومیک در تیمارهای آزمایشی با روش کی و همکاران (۲۰۰۴)، 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 (کارتر و گریگوییچ ۲۰۰۷) استفاده شد. در ادامه شاخص هوموسی‌شدن، درجه ی پلیمریزاسیون و نسبت هوموسی‌شدن به صورت زیر محاسبه گردید (امیر و همکاران ۲۰۰۸، سانچز-موندرو و همکاران ۱۹۹۹):

یا $HR = (EXC/TOC) \times 100$; نسبت هوموسی‌شدن
 $HR = [(CHA + CFA)/TOC] \times 100$

$HI = (HAC/TOC) \times 100$; شاخص هوموسی‌شدن

$HS = CHA + CFA$ مجموع مواد هیومیک

$DP = HAC/FAC$ درجه پلیمریزاسیون

در این روابط HA اسید هیومیک (درصد) - FA اسید فولویک (درصد) - EXC کربن استخراج شده - TOC کربن کل آلی (درصد) - HAC درصد کربن آلی اسید هیومیک و FAC درصد کربن آلی اسید فولویک می باشد.

تحلیل آماری

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

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

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

نتایج و بحث

ویژگی‌های مواد افزودنی و مواد خام اولیه

برخی از ویژگی‌های مواد افزودنی و مواد خام اولیه مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارایه شده است. مطابق انتظار درصد نیتروژن و قابلیت هدایت الکتریکی کود مرغی بیشتر از بقیه مواد بود. بیوچار مورد استفاده ۵۲ درصد کربن داشت و نسبت مولار H/C کمتر از ۰/۷ بود که یکی از شرایط تعریف بیوچار توسط انجمن بین المللی بیوچار (IBI) می باشد.

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

بیوپچار	لئوناردیت	زغال سنگ	کود گاوی	کود مرغی	مواد آلی جنگلی	
۷/۸	۶/۵	۶/۷	۷/۹	۷/۷	۷/۱	pH(۱:۱۰)
۱/۱	۲/۵	۲/۹	۳/۶	۴/۵	۲/۱	EC(۱:۱۰)
۵۲	۳۳	۵۱	۲۱	۲۲	۲۵	C(%)
۰/۲	۰/۷	۰/۶	۱/۲	۲/۳	۱/۸	N(%)
۱/۲	۳/۹	۳/۴	۰/۹	۱/۵	۰/۹	S(%)
۱/۶	-	-	-	-	-	H(%)
۲۵	-	-	-	-	-	Ash(%)
۶/۵۷	۱/۰۷۵	۹/۷۵	۱/۸۶	۷/۴۳	۱/۷۸	آهن کل (g kg^{-1})
۵۰/۵۷	۷۲/۵۱	۶۹/۴۸	۳۹/۷	۶۹/۷۵	۲۹/۴	روی کل (mg kg^{-1})
۲۵۱/۶۵	۱۸۱/۹۵	۲۵۰/۵۲	۱۴۸/۹	۲۹۰/۳۲	۹۶/۹	منگنز کل (mg kg^{-1})
۲/۴۸	۳/۵۱	۴/۲۲	۳/۲۱	۳/۲۵	۲/۸۷	مس کل (mg kg^{-1})
۳۹/۹۱	۲۸/۲۳	۲۶/۷۵	۱۵/۲۱	۲۷/۶۱	۱۳/۸۱	کلسیم کل (g kg^{-1})
۴/۱۳	۵/۱۸	۸/۱۸	۴/۵۹	۸/۲۵	۳/۳۷	منیزیم کل (g kg^{-1})

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

تغییرات دما در طول کمپوست‌شدن

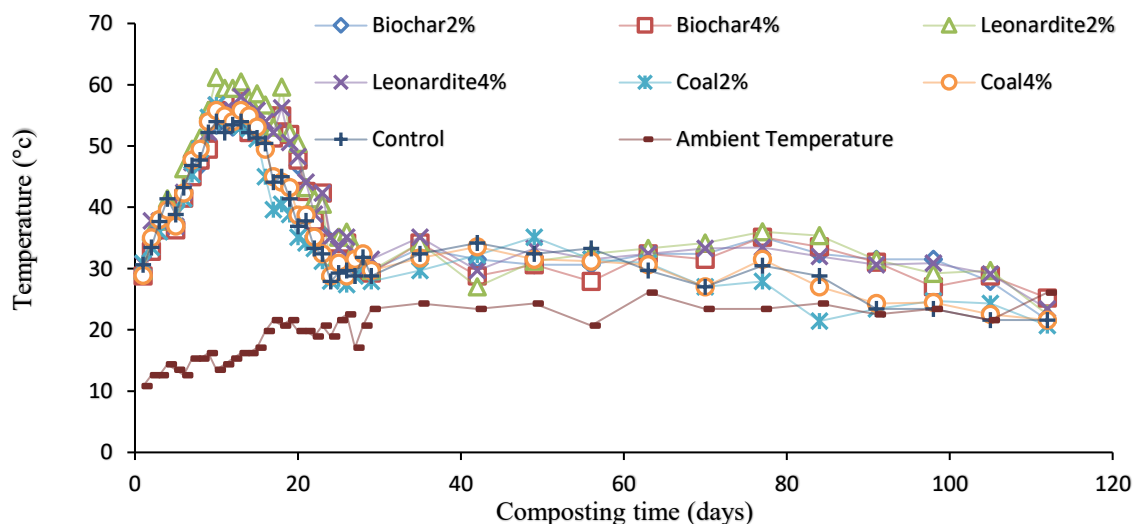
دما مهمترین پارامتر در تولید کمپوست است، چرا که سرعت کمپوست شدن را افزایش و میزان پاتوژن‌ها را کاهش می‌دهد. دوره ترموفیلیک یا گرمادوستی در کمپوست سازی بیشترین تأثیر را در تبدیل محتوای آلی به کمپوست دارد و بیشترین فعالیت میکروبی در این دوره مشاهده می‌شود (بهره و سامال ۲۰۲۲). تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی تیمارها و زمان بر دما معنادار ولی اثر متقابل تیمار × زمان غیرمعنادار بود (جدول ۲). در شرایط این پژوهش در تمامی تیمارها بالاترین دما در روز سیزدهم ثبت شد و بالاترین دما ($^{\circ}\text{C}$) ۶۱.۲ 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 زغال سنگ ۲ درصد به مدت ۱۱ روز بود. در فاز رسیدگی و خنک‌شدن کمپوست نیز تیمار زغال سنگ ۲ درصد

دارای کمترین دما بود. کمپوست با کمک بیوپچار و لئوناردیت دمای بالاتر و دوره گرما دوستی طولانی تری را در مقایسه با کمپوست شاهد و تیمار زغال سنگ ثبت کرد. حصول دمای بالا ممکن است به طبیعت متخلخل و سطح ویژه بزرگتر بیوپچار و لئوناردیت نسبت داده شود که با تحریک فعالیت میکروبی منجر به افزایش دما می‌شوند (مانو و همکاران ۲۰۲۱، بهره و سامال ۲۰۲۲). با این حال، برخی از افزودنی‌ها مانند بنتونیت (لی و همکاران ۲۰۱۲)، فسفوژن و آهک (گابهان و همکاران ۲۰۱۲) و در این پژوهش زغال سنگ دما را تغییر معنادار نداده و این موضوع نشان می‌دهد که آنها بر فعالیت زیست توده میکروبی خیلی تأثیر نمی‌گذارند. شاید به دلیل ساختار زغال سنگ مدت زمان بیشتری برای تجزیه و قابل استفاده شده کربن این ماده نیاز باشد که این مورد در زمان ۵۰ روز کمپوست شدن در تیمار زغال ۲ درصد و در روز ۳۰ و ۵۰ در زغال ۴ درصد مشاهده شد که دارای بیشترین مقدار دما بود.

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر افزودنی‌های مختلف بر دما، pH، EC، غلظت کربن آلی، غلظت نیتروژن کل و نسبت C/N در توده در حال کمپوست شدن.

منبع تغییر	درجه آزادی (df)	دما	درجه آزادی	pH	EC	کربن آلی	خاکستر	نیتروژن	C/N
تیمار	۷	۷۵۲۷/۹۴**	۶	۰/۲۳۱**	۲/۸۹**	۴/۱۹**	۴۱/۱۷**	۰/۱۰۶**	۱۴/۳۰**
زمان	۴۰	۱۴۳۶/۶۳**	۸	۰/۴۸۴**	۵/۴۶**	۲۹/۶۸**	۳۱۷/۶۷**	۰/۷۴۰**	۹۴/۶۶**
تیمار×زمان	۲۸۰	۸۲/۲۰۵	۴۸	۱/۲۵۶ ^{ns}	۰/۸۷**	۰/۱۵ ^{ns}	۱/۴۸**	۰/۰۰۶ ^{ns}	۰/۸۰۴*
خطای آزمایشی	۶۵۵	۲/۷۲	۱۲۴	۰/۰۱۳	۰/۳۶	۰/۱۱	۰/۷۱	۰/۰۰۵	۰/۵۰۶
ضریب تغییرات (%)		۳۲/۱		۲/۷	۱۵/۸	۴/۹	۸/۲	۱۱/۴	۱۵/۳

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪. دمای توده در ۳۰ روز اول روزانه و بعداً به صورت هفتگی اندازه گیری شده است.



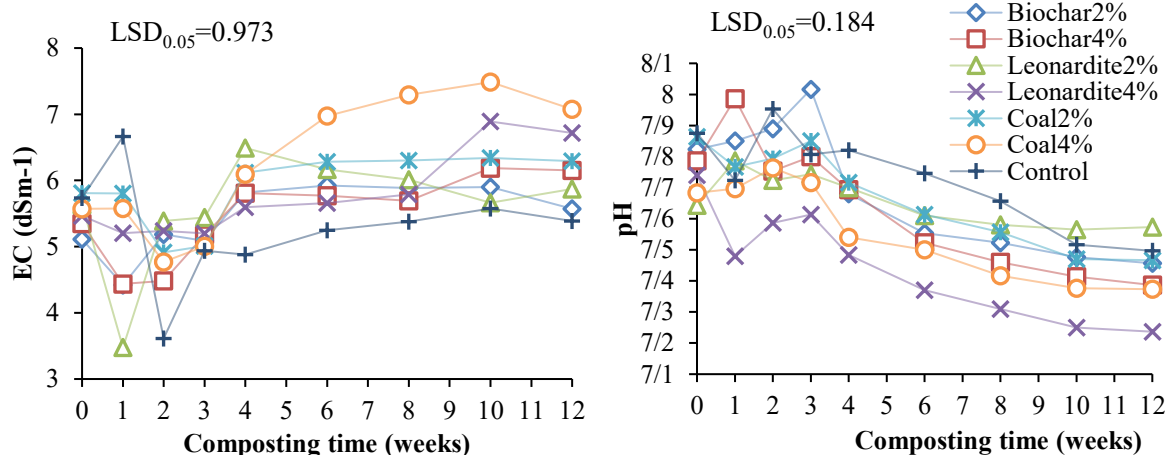
شکل ۱- تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر دمای توده در طول کمپوست شدن. تیمارهای مورد بررسی شامل بیوچار (Biochar)، لئوناردیت (Leonardite)، زغال سنگ (Coal) در سطح ۲ و ۴ درصد، شاهد (Control) و دمای محیط (Ambient Temperature) می‌باشند.

آمونیاک تولید و pH افزایش یافته است (وانگ و همکاران ۲۰۲۳). در مرحله آخر، pH به دلیل فرایند نیترات سازی دوباره کاهش (آکدنیز ۲۰۱۹) و در مقادیر بین ۷/۳ تا ۷/۷ تثبیت شد. چن و همکاران (۲۰۱۰) نیز نتایج مشابهی گزارش کردند. در تمام تیمارها علت کاهش pH بعد از افزایش می‌تواند به دلیل نیترات سازی و تولید پروتون توسط میکروارگانیسم‌های فعال در این زمینه باشد که موجب کاهش pH در ماه‌های پایانی می‌شود (رساپور و همکاران ۲۰۰۹). علت پایین بودن pH هم در طول

تغییرات pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در طول کمپوست شدن

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

کمپوست شدن و هم در کمپوست نهایی در تیمار لئوناردیت ۴ درصد را می‌توان به pH اولیه خود لئوناردیت نیز ربط داد (همتی ۱۳۹۷).

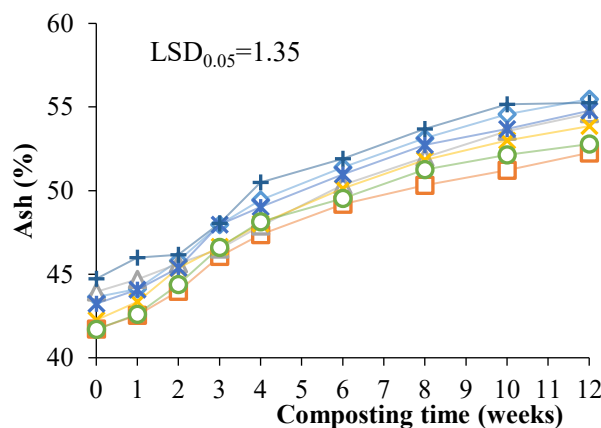


شکل ۲- تاثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر EC و pH در طول کمپوست شدن. تیمارهای مورد بررسی شامل بیوچار (Biochar)، لئوناردیت (Leonardite)، زغال سنگ (Coal) در سطح ۲ و ۴ درصد و شاهد (Control) می‌باشد. $LSD_{0.05}$ مقایسه میانگین در سطح احتمال ۹۵ درصد می‌باشد.

کوچکتری و سرعت بیشتری دارد، در نتیجه بیشترین هدایت اکی‌والانی را داشته که باعث افزایش EC می‌شود. دلیل دیگر می‌تواند این باشد که با کاهش pH و افزایش پروتون باعث حل‌پذیری بیشتر ترکیبات مختلف در کمپوست شده که این امر موجب آزادسازی انواع یونها و در نتیجه افزایش EC می‌شود. بالا بودن EC در تیمار زغال سنگ به دلیل وجود عناصر در ساختار آن می‌تواند باشد. لئوناردیت ۴ درصد بعد از زغال سنگ ۴ درصد دارای بیشترین مقدار EC بود که حضور قابل توجه مواد هیومیک، می‌تواند دلیل اصلی این افزایش 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 بیوچار می‌تواند به دلیل دمای پایین فرایند پیرولیز در هنگام تولید بیوچار (۴۰۰ درجه سلسیوس)، اثر رقت، نوع

تجزیه واریانس نشان داد که اثر تمامی فاکتورها 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 ۲). افزایش EC می‌تواند به دلیل تجزیه و معدنی شدن مواد آلی و افزایش غلظت عناصر باشد (کمپل و همکاران ۱۹۹۷). در این پژوهش بالاترین EC متعلق به تیمارهای زغال سنگ و برخلاف انتظار پایین‌ترین EC برای شاهد به دست آمد. از آنجاییکه مواد اولیه در شاهد (جدول ۱) بالاترین EC را داشتند انتظار می‌رفت که در طول کمپوست شدن نیز بیشترین EC را داشته باشد که چنین نبود. از دلایل کمتر بودن EC تیمار شاهد نسبت به تیمارهای لئوناردیت و زغال سنگ می‌توان به pH کمتر تیمارهای لئوناردیت و زغال سنگ اشاره کرد. چرا که با کاهش pH، فعالیت پروتون (H^+) افزایش و چون H^+ اندازه

آروماتیک آن در طول کمپوست شدن دچار تخریب شدید نمی شوند (بهره و سامال ۲۰۲۲). پایین ترین درصد کربن آلی نیز متعلق به تیمار شاهد بود. هفته های نخستین بیشترین و هفته ی ۱۲ کمترین درصد کربن آلی را در توده ها داشت. در شرایط این پژوهش و با گذشت زمان در فرایند کمپوست شدن، غلظت کل کربن آلی در کلیه تیمارها به دلیل ارتقاء فعالیت میکروبی توسط این افزودنی ها و فروپاشی ترکیبات کربنی بیشتر از تیمار شاهد کاهش یافت (شکل ۳) که با نتایج وانگ و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت داشت. کاهش کربن آلی در فرایند کمپوست شدن ناشی از افزایش فعالیت میکروارگانیسم ها و افزایش تنفس می باشد که نشان دهنده ی هوموسی شدن و پایدار شدن مواد آلی در کمپوست با گذشت زمان است (بوزاتو و همکاران ۲۰۱۲).



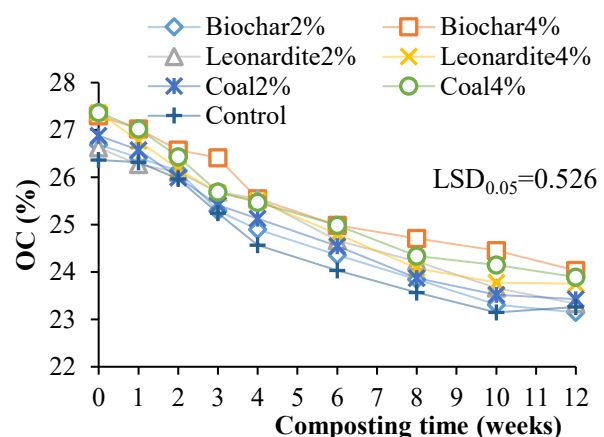
شکل ۳- تأثیر افزودنی های مورد استفاده در این تحقیق بر درصد کربن آلی و خاکستر توده در طول کمپوست شدن. تیمارهای مورد بررسی شامل بیوچار (Biochar)، لئوناردیت (Leonardite)، زغال سنگ (Coal) در سطح ۲ و ۴ درصد و شاهد (Control) می باشد. $LSD_{0.05}$ مقایسه میانگین در سطح احتمال ۹۵ درصد می باشد.

دارای بالاترین درصد خاکستر و تیمار بیوچار ۴ درصد پایین ترین درصد را داشت. کاهش ماده آلی می تواند دلیل اصلی افزایش درصد خاکستر باشد که بیوچار و زغال سنگ ۴ درصد بالاترین مقدار ماده آلی و تیمار شاهد پایین ترین مقدار را دارا بودند. افزایش EC می تواند به دلیل تجزیه و معدنی شدن مواد آلی و افزایش غلظت عناصر باشد (کمپبل و همکاران ۱۹۹۷).

ماده اولیه که چوبی بود و جذب عناصر توسط بیوچار باشد (کیو و همکاران ۲۰۲۰).

تغییرات درصد کربن آلی و خاکستر توده در طول کمپوست شدن

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که به غیر از اثر متقابل تیمار×زمان بقیه فاکتورها در سطح احتمال یک درصد بر غلظت کربن آلی توده در طول کمپوست شدن معنادار بودند (جدول ۲). در این پژوهش تیمارهای بیوچار ۴درصد و زغال سنگ ۴درصد دارای بیشترین غلظت کربن آلی بودند ولی اختلاف معناداری با یکدیگر نداشتند که دلیل این امر بالا بودن درصد کربن در ساختار بیوچار و زغال سنگ است. از طرفی دیگر بیوچار و زغال سنگ به دلیل مقاومت شیمیایی ساختار



تجزیه واریانس شاخص خاکستر نشان داد که اثر تمام فاکتورها در سطح احتمال یک درصد بر این صفت معنادار بود (جدول ۲). با افزایش زمان کمپوست شدن، درصد خاکستر توده در حال کمپوست شدن، در تیمار شاهد و هم تحت تأثیر تمام افزودنی ها افزایش یافت (شکل ۳) که با نتایج جلیلی و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت داشت. تیمار شاهد با اختلاف معنادار با بقیه تیمارها

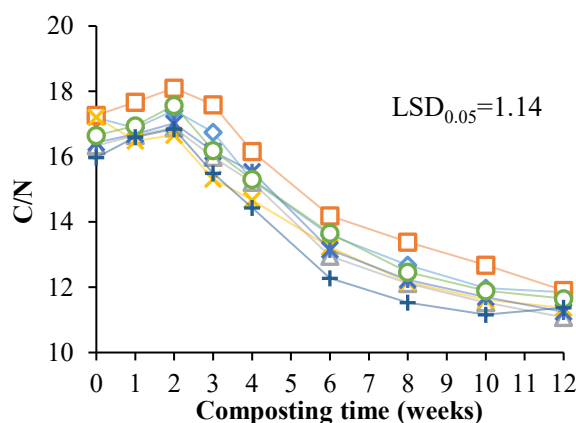
تغییرات غلظت نیتروژن کل و نسبت C/N توده در

طول کمپوست شدن

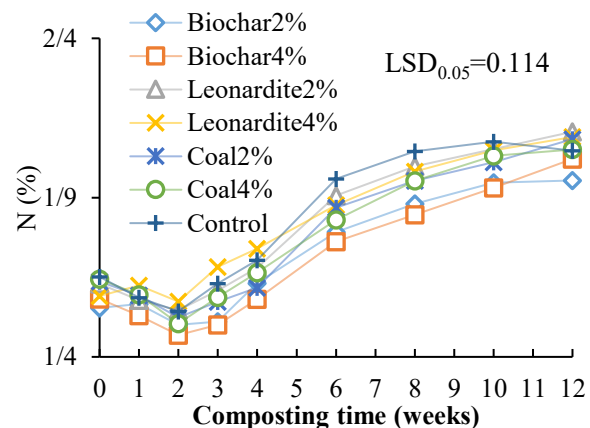
تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی تیمار و زمان در سطح احتمال یک درصد بر غلظت نیتروژن کل توده معنادار ولی اثر متقابل تیمار×زمان غیر معنادار بود (جدول ۲). همانند نتایج وانگ و همکاران (۲۰۲۳) در تمامی تیمارها مقادیر نیتروژن کل ابتدا به دلیل تجزیه نیتروژن آلی و آزادسازی آمونیاک کاهش و سپس افزایش یافت (شکل ۴). در این راستا گزارش شده است که با گذشت زمان کمپوست شدن ترکیباتی در مواد هیومیک ایجاد می‌شوند که موجب افزایش نیتروژن در ساختار این مواد می‌شود (ادانی و همکاران ۲۰۰۶). همچنین در روند کمپوست شدن اسکلت های کربنی تجزیه، وزن توده کاهش و درصد نیتروژن افزایش می‌یابد. در شرایط این پژوهش تیمارهای بیوچار ۲ و ۴ درصد کمترین غلظت نیتروژن را چه در طول دوره و چه

در انتهای فرایند کمپوست شدن دارا بودند که دلیل آن به درصد پایین نیتروژن بیوچار نسبت به دیگر افزودنی‌ها برمی‌گردد (جدول ۱). همان طور که در شکل ۴ 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 (شکل ۱) و pH در مرحله ترموفیلی و بیشترین تصاعد آمونیاک و هدررفت نیتروژن و همچنین بیشترین ذخیره نیتروژنی در پیکر میکروبی بود.

تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی تیمار و زمان و اثر متقابل آن دو در سطح احتمال یک درصد بر نسبت C/N کل توده معنادار بود (جدول ۲). 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 پایداری در نظر گرفته می‌شود (برنال و همکاران ۲۰۰۹).



شکل ۴- تاثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر غلظت نیتروژن کل و نسبت C/N توده در طول کمپوست شدن. تیمارهای مورد بررسی شامل بیوچار (Biochar)، لئوناردیت (Leonardite)، زغال سنگ (Coal) در سطح ۲ و ۴ درصد و شاهد (Control) می‌باشد. LSD0.05 مقایسه میانگین در سطح احتمال ۹۵ درصد می‌باشد.



میکروارگانیزم‌ها و در نتیجه افزایش تصاعد آمونیاک (کاهش نیتروژن) می‌باشد (شکل ۴). این نتایج با نتایج مالینوسکی و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت داشت. نسبت C/N کاملاً متأثر از فعالیت میکروبی است و با افزایش فعالیت و مصرف میکروبی مقدار کربن و مواد غیر نیتروژنی

در این پژوهش تیمار بیوچار 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

شاخص‌های هوموسی‌شدن

هوموسی‌شدن به طور کلی به عنوان فرایند تبدیل

مواد آلی آسان تجزیه شونده به مواد هیومیک کاملاً تثبیت شده و مقاوم تعریف می‌شود (وانگ و همکاران ۲۰۱۴). تصور می‌شود که این یک عامل کلیدی در بهبود کیفیت کمپوست باشد، به دلیل اهمیت مواد هیومیک برای محیط زیست و ساختار خاک و همچنین اثرات مفید آنها بر رشد گیاه (ادانی و همکاران ۱۹۹۹) نظارت بر هوموسی‌شدن ماده آلی برای ارزیابی بلوغ و کیفیت کمپوست ضروری است. تجزیه واریانس نشان داد که شاخص‌های هوموسی‌شدن در تمامی فاکتورها به جز اثر متقابل تیمار×زمان برای درجه پلیمریزاسیون، معنادار بودند (جدول ۳). شاخص‌های هوموسی‌شدن در طول فرایند کمپوست‌شدن در تمامی تیمارها افزایش یافت (شکل ۵) و در تمامی شاخص‌ها هفته ۱۲ بالاترین مقدار و هفته‌های نخستین کمترین مقادیر را دارا بودند. این نتایج مطابق با نتایج موندرو و همکاران (۱۹۹۹) و دیاز و همکاران (۲۰۱۰) است. در شاخص‌های HR، DP و HI تیمار لئوناردیت ۲ درصد و لئوناردیت ۴ درصد دارای بالاترین مقادیر بودند ولی این دو تیمار اختلاف معناداری با یکدیگر نداشتند ولی در شاخص HS تیمار لئوناردیت ۴ درصد دارای بالاترین مقدار بود. بالا بودن مواد هیومیک در تیمارهای لئوناردیت و ارتباط مستقیم شاخص‌های مورد اندازه‌گیری با مواد هیومیک می‌تواند دلیل اصلی افزایش این شاخص‌ها در تیمارهای لئوناردیت ۲ و ۴ درصد باشد. همانند نتایج امیر و همکاران (۲۰۰۸) و دیاس و همکاران (۲۰۱۰) 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. در این تحقیق افزایش شاخص HR و HI در طول کمپوست‌شدن در تیمارهای لئوناردیت (۲ و ۴ درصد) بیشتر است که منعکس‌کننده

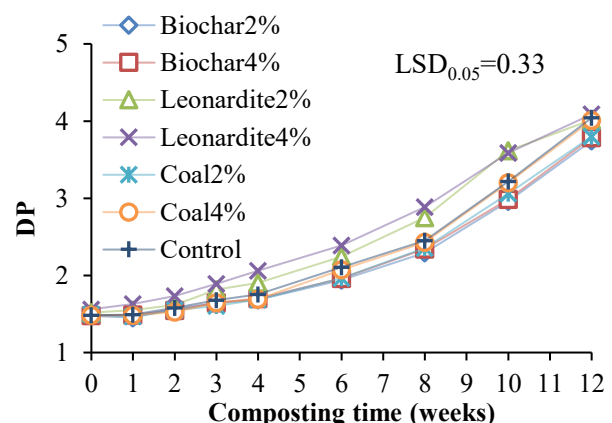
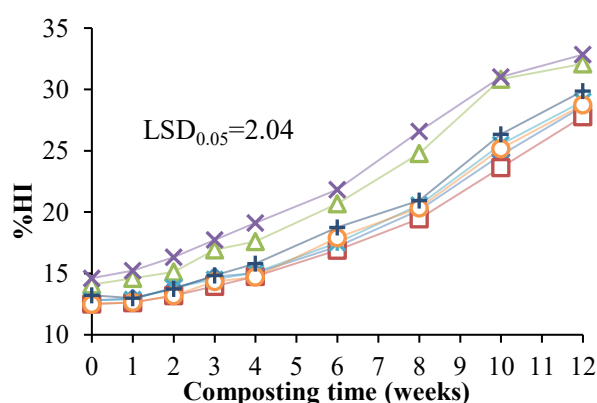
مثل کربوهیدرات‌ها کاهش می‌یابد. ولی در هفته‌های پایانی به دلیل کاهش مواد قابل تجزیه، جمعیت میکروبی نیز کاهش یافته و به دنبال آن تجزیه کربن نیز کاهش می‌یابد (رساپور و همکاران ۲۰۰۹). همچنین گزارش شده است در مراحل پایانی فرایند کمپوستینگ مواد سهل‌الوصول برای میکروارگانیسم‌ها کاهش می‌یابند، بنابراین در این مراحل گروه‌های آمین و ترکیبات قندی موادی مثل اسید فولویک استفاده می‌شوند که موجب کاهش کیفیت کمپوست تولیدی خواهد شد (ویکن و همکاران ۲۰۰۰). نسبت بالای C/N باعث کندی فرایند کمپوست‌شدن می‌شود؛ زیرا بستر قابل تجزیه زیادی برای میکروارگانیسم‌ها وجود دارد. اما با نسبت C/N کم همانند تحقیق حاضر، نیتروژن معدنی بیش از حد تولید و می‌تواند توسط تصاعد آمونیاک یا با آبشویی از توده کمپوست هدر رود (برنال و همکاران ۲۰۰۹). بنابراین می‌توان نسبت‌های C/N کم را با افزودن ماده افزودنی با کربن بالا جهت تأمین کربن آلی قابل تجزیه اصلاح کرد. اما نکته ای که در اینجا حائز اهمیت است این است که بیوچار با اینکه دارای کربن بالایی می‌باشد و در روزهای اولیه، توده در حال کمپوست‌شدن 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 کمپوست‌شدن جلوگیری شود (دابلت و همکاران ۲۰۱۱). بحثی که در مورد بیوچار وجود دارد ماهیت کربن است. کربن بیوچار غیر قابل استفاده میکروبی و آروماتیک است. بنابراین درصد کربن و نسبت C/N در بیوچار به لحاظ ماهیت با بقیه مواد فرق می‌کند. در تحقیق حاضر نسبت C/N کمپوست نهایی تمام تیمارها کمتر از ۱۴ بود که یک دلیل آن غیر از رسیدگی می‌تواند نسبت C/N پایین بستر اولیه (کود دامی) باشد.

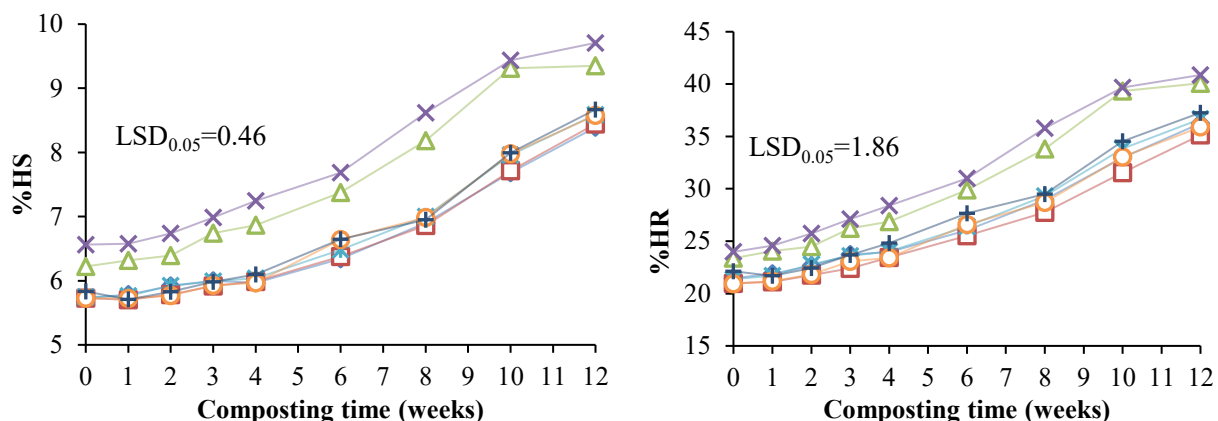
هوموسی شدن شدید به دلیل ماهیت لئوناردیت می باشد. مقدار HI و HR بین صفر و صد بوده و هرچه به ۱۰۰ نزدیک باشد، کمپوست کیفیت بهتری دارد (سانچز- موندرو و همکاران ۱۹۹۹، هلال و همکاران ۲۰۱۱). افزایش نسبت HA/FA که به عنوان درجه پلیمریزاسیون (DP) شناخته می شود، نشان دهنده تشکیل مولکول های پیچیده (HA) از مولکول های ساده تر (FA) و کاهش اجزای غیر هومیکی بخش فولویک اسید است که به آسانی تجزیه می شوند. افزایش DP در تیمارهای لئوناردیت به دلیل افزایش درصد کربن آلی اسید هیومیک (HAC) است. در مورد کمپوست مشترک لئوناردیت، سهم قابل توجهی در مسیرهای هوموسی شدن ممکن است مربوط به ترکیب شیمیایی لئوناردیت باشد. افزایش قابل توجهی مواد هیومیکی مخصوصاً در بخش درصد کربن آلی اسید هیومیک در طول فرآیند است. لئوناردیت حاوی

محتوای بالایی از گروه های عاملی اکسید شده مانند کربوکسیل است که می تواند با کربن آلی محلول بسیار واکنش پذیر باشد. افزایش در گروه های کربوکسیلیک لئوناردیت ممکن است در اثر اکسیداسیون شیمیایی لئوناردیت و وجود مواد هیومیک موجود در ساختار لئوناردیت ایجاد شود، که منجر به شکل گیری سریعتر پلیمرهای آروماتیک در کمپوست مشترک می شود. اما برای بیوپچار، دیاس و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که افزودنی های همچون بیوپچار با شکسته شدن لیگنین آن به مواد سازنده اش و تولید رادیکال های آزاد در طول تشکیل بیوپچار می تواند دوباره گروه بندی و سازماندهی شود و محصول نهایی بسیار آروماتیکی را تشکیل دهد و منجر به افزایش شاخص های هوموسی شدن در کمپوست مشترک شود.

جدول ۳- تجزیه واریانس تاثیر افزودنی های مختلف بر شاخص هوموسی شدن، نسبت هوموسی شدن، درجه پلیمریزاسیون و مجموع مواد هیومیک.

میانگین مربعات					
منبع تغییر	درجه آزادی (df)	شاخص هوموسی شدن (HR)	نسبت هوموسی شدن (HI)	درجه پلیمریزاسیون (DP)	مجموع مواد هیومیک (HS)
تیمار	۶	۱۵۴/۵۲**	۱۳۵/۳۵**	۰/۹۲۹**	۷/۸۶**
زمان	۸	۵۸۶/۱۹**	۶۷۶/۵۳**	۱۳/۷۲**	۲۰/۸۰**
تیمار×زمان	۴۸	۲/۵۳**	۲/۳۹*	۰/۰۴۰ ^{ns}	۰/۱۱۲ ^{ns}
خطای آزمایشی	۱۲۵	۱/۳۲	۱/۵۰	۰/۰۴۲	۰/۰۸۲
ضریب تغییرات (%)		۲۰/۴	۳۱/۳	۳۴/۷	۱۶/۱





شکل ۵- تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر درجه پلیمریزاسیون، نسبت هوموسی‌شدن، شاخص هوموسی‌شدن و مجموع مواد هیومیک توده در طول کمپوست‌شدن. تیمارهای مورد بررسی شامل بیوچار (Biochar)، لئوناردیت (Leonardite)، زغال‌سنگ (Coal) در سطح ۲ و ۴ درصد و شاهد (Control) می‌باشد. $LSD_{0.05}$ مقایسه میانگین در سطح احتمال ۹۵ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

قابل تعمیم به تمام بیوچارها نیست و بسته به نوع زیست توده و شرایط پیرولیز ممکن است نتایج متفاوتی حاصل شود. لذا توصیه می‌شود در تحقیقات آینده تکرار پذیری این تحقیق در دماهای مختلف و فصول مختلف سال مطالعه شود. همچنین ترکیب افزودنی‌های آلی و زیستی یا آلی و معدنی همچون ژئولیت هم استفاده شود. صفات دیگری همچون شاخص‌های آلودگی میکروبی و فراوانی بذور علف‌های هرز هم اندازه‌گیری و اثر تیمارها مطالعه شود. در نهایت مطالعه تأثیر کمپوست نهایی بر ویژگی‌های خاک‌های آهکی و اسیدی ایران توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه تبریز به دلیل تأمین امکانات تحقیق تشکر می‌گردد. همچنین از شرکت طب یاران آذین مهر سراب به دلیل کمک به انجام تحقیق تشکر می‌گردد.

در شرایط این پژوهش و با استفاده از مواد اولیه کود دامی و مواد آلی جنگلی و در کمپوست نهایی بالاترین شاخص‌های هوموسی‌شدن و درصد نیتروژن کل در تیمارهای لئوناردیت مشاهده شد. بالاترین نسبت C/N در تیمار بیوچار ۴ درصد و بالاترین EC در تیمار زغال سنگ ۲ درصد به دست آمد. لئوناردیت با وجود خصوصیات شناخته شده و درصد بالای مواد هیومیک، به عنوان ماده اولیه در طول کمپوست‌شدن به ویژه نتایج خوبی داشت و می‌توان در انتهای کمپوست‌شدن به منظور غنی‌سازی و بهبود کیفیت کمپوست تولید شده، از این ماده استفاده نمود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد با توجه به هزینه‌های مواد اولیه و همچنین وجود معادن متعدد زغال سنگ در شمال غرب کشور، زغال سنگ تیمار مناسبی برای تسریع تولید و بهبود کیفیت کمپوست و همچنین افزایش کربن آلی خاک می‌تواند باشد. نتایج حاصله در مورد اثر بیوچار بدیهی است که

منابع مورد استفاده

- Adani F, Genevini P, Tambone F and Montoneri E, 2006. Compost effect on soil humic acid: a NMR study. *Chemosphere* 65: 1414–1418.
- Adani F, Genevini PL, Gasperi F and Tambone F, 1999. Composting and humification. *Compost Science & Utilization* 7(7): 24–33.
- 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. Standard Method for Chemical Analysis of Wool Charcoal. D1762-84, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- Awasthi MK, Wang Q, Chen H, Awasthi SK, Wang M, Ren X and 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.
- Barthod J, Rumpel C and Dignac MF, 2018. Composting with additives to improve organic amendments. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 38(2): 1–23.
- Behera S and Samal K, 2022. Sustainable approach to manage solid waste through biochar assisted composting. *Energy Nexus* 7: 100121.
- Bernal MP, Paredes C, Monedero MA and Cegarra J, 1998. Maturity and stability parameters of compost prepared with a wide range of organic waste. *Bioresource Technology* 63: 91-99.
- Bremner JM, 1996. Nitrogen-total. Pp. 1085–1121. In: Sparks DL, (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, USA.
- Busato JG, Lima LS, Aguiar NO, Canellas LP and Olivares FL, 2012. Changes in labile phosphorus forms during maturation of vermicompost enriched with phosphorus-solubilizing and diazotrophic bacteria. *Bioresource Technology* 110: 390–395.
- Bustamante MA, Paredes C, Marhuenda-Egea FC, Pérez-Espinosa A, Bernal MP and Moral R, 2008. Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere* 72: 551–557.
- Campbell AG, Flok RL and Tripcpi R, 1997. Wood ash as an amendment in municipalsludge and yard waste composting process. *Compost Science & Utilization* 5(1): 62–73.
- Carter MR and Gregorich EG, 2007. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC press.
- Chen YX, Huang XD, Han ZY, Huang X, Hu B, Shi DZ, and Wu WX, 2010. Effects of bamboo charcoal, and bamboo vinegar on nitrogen conservation, and heavy metals immobility during pig manure composting. *Chemosphere* 78(9): 1177-1181.
- Chung WJ, Chang S, Chaudhary DK, Shin J, Kim H, Karmegam N and 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.
- Dias BO, Silva CA, Higashikawa FS, Roig A and Sánchez-Monedero MA, 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.
- Doublet J, Francou C, Poitrenaud M and 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.
- Epstein E, 1997. *The Science of Composting*. Technomic Publishing Company, Lancaster.UK.
- Gabhane J, William SP, Bidyadhar R, Bhilawe P, Anand D, Vaidya AN and Wate SR, 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.
- Goyal S, Dhull SK and Kapoor KK, 2005. Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity. *Bioresource Technology* 96(14): 1584–1591.

- Helal AA, Murad GA and Helal AA, 2011. Characterization of different humic materials by various analytical techniques. *Arabian Journal of Chemistry* 4: 51–54.
- Hemati A, 2017. Isolation of thermophile ligninolytic microorganisms for acceleration of compost production and its quality improvement. Doctoral Thesis. Faculty of Agriculture, Tabriz University. (in Persian with English abstract)
- Jalili M, Mokhtari M, Eslami H, Abbasi F, Ghanbari R and Ebrahimi AA, 2019. Toxicity evaluation and management of co-composting pistachio wastes combined with cattle manure and municipal sewage sludge. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 171: 798-804.
- Jiang JS, Kang K, Wang CJ, Sun XJ, Dang S, Wang N, Wang Y, Zhang CY, Yan GX and Li YB, 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.
- Kumar R, Singh S and Singh OV, 2008. Bioconversion of lignocellulosic biomass: biochemical and molecular perspectives. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 35(5): 377–391.
- Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC and Crowley D, 2011. Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology and Biochemistry* 43(9): 1812–1836.
- Li D, Manu MK, Varjani S and Wong JW, 2023. Role of tobacco, and bamboo biochar on food waste digestate co-composting: Nitrogen conservation, greenhouse gas emissions, and compost quality. *Waste Management* 156: 44-54.
- Li G, Zhu QH, Niu QQ, Meng QR, Yan HL, Wang SS and Li QL, 2021. The degradation of organic matter coupled with the functional characteristics of microbial community during composting with different surfactants. *Bioresource Technology* 321: 124446.
- Li R, Wang JJ, Zhang Z, Shen F, Zhang G, Qin R, Li X and Xiao R, 2012. Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite. *Bioresource Technology* 121: 362–368.
- Liu Z, Wang D, Ning T, Zhang S, Yang Y, He Z and Li Z, 2017. Sustainability assessment of straw utilization circulation modes based on the emergent ecological footprint. *Ecological Indicators* 75: 1–7.
- Machovic V, Mizera J, Sykorova I and Borecká L, 2000. Ion-exchange properties of Czech oxidized coals. *Acta Montana* 117: 15–26.
- Malińska K, Zabochnicka-Świątek M and Dach J, 2014. Effects of biochar amendment on ammonia emission during composting of sewage sludge. *Ecological Engineering* 71: 474–478.
- Manu MK, Wang C, Li D, Varjani S, Xu Y, Ladumor N, Lui M, Zhou J and Wong JW, 2021. Biodegradation kinetics of ammonium enriched food waste digestate compost with biochar amendment. *Bioresource Technology* 341: 125871.
- Mao H, Lv Z, Sun H, Li R, Zhai B, Wang Z and 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.
- Nadiri AA, Gharekhani M, Khatibi R, Sadeghfam S and Moghaddam AA, 2017. Groundwater vulnerability indices conditioned by supervised intelligence committee machine (SICM). *Science of the Total Environment* 574: 691–706.
- Nguyen MK, Lin C, Hoang HG, Sanderson P, Dang BT, Bui XT, Nguyen NSH, Vo DVN and Tran HT, 2022. Evaluate the role of biochar during the organic waste composting process: A critical review. *Chemosphere* 299: 134488.
- Olivella MA, Del Rio JC and Palacios J, 2001. Characterization of humic acid from leonardite coal: an integrated study of PY-GC-MS, XPS and XANES techniques. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 63(2002): 59-68.
- Peters J, 2003. Recommended Methods of Manure Analysis. Cooperative Extension publishing, University of Wisconsin.
- Qi BC, 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: 153-163.
- Qu FT, Wu D, Li D, Zhao Y, Zhang RJ, Qi HS and Chen XM, 2022. Effect of Fenton pretreatment combined with bacterial inoculation on dissolved organic matter concentration during rice straw composting. *Bioresource Technology* 344: 126198

- 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: 570–573.
- Sajib SK and Adhikari S, 2020. Effect of pyrolysis method on physical properties of activated biochar and its application as cathode material for lithium-sulfur battery. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 63(2): 485-493.
- Sanchez-Monedero MA, Roig A, Cegarra J and Bernal MP, 1999. Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of different organic wastes during composting. *Bioresource Technology* 70: 193–201.
- Veeken A, Nierop K, Wilde VD and Hamelers B, 2000. Characterisation of NaOH-extracted humic acids during composting of a biowaste. *Bioresource Technology* 72: 33-41.
- Wang C, Tu QQ, Dong D, Strong PJ, Wang HL, Sun B and Wu WX, 2014. Spectroscopic evidence for biochar amendment promoting humic acid synthesis and intensifying humification during composting. *Journal of Hazardous Materials* 280: 409–416
- 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): 1-17. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00202-w>