Water and Soil Science, Vol. 34, NO. 3, Autumn 2024, pp. 161-178.

DOI: 10.22034/ws.2023.54488.2552 ISSN:2717-3755 https://water-soil.tabrizu.ac.ir/

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 Raji[2], K Khalkhal[3], A Hemati[4], MR Sarikhani[5]

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 (CH_4, CO_2, and N_2O), 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.

©: The Author(S)
Publisher: University of Tabriz

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

نشریه دانش آب و خاک / جلد ۳۴ شماره ۳ صفحه‌های ۱۶۴ تا ۱۷۸/ سال ۱۴۰۳

مقاله پژوهشی

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

عادل ریحانی‌تبار*[۱]، مریم راجی[۲]، کمال خلخال [۳]، آرش همتی[٤]، محمدرضا ساریخانی[٥]

تاریخ دریافت: ۱٤۰۲/۱۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۳/۰٤/۱٦

تاریخ ویرایش:۱٤۰۳/۰٤/۱۰ تاریخ انتشار انلاین :۱٤۰۳/۰۷/۰۱

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.

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

٥-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 معمولا 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 کاملا تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. فاکتور اول تیمار شامل بیوچار چوبی، لئوناردیت و زغال‌سنگ در دو سطح ۲ و ٤ 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 ٤ درصد بالاترین درصد نیتروژن کل را نشان دادند. در این پژوهش زغال‌سنگ در سطح ٤ درصد باعث افزایش معناداریEC کمپوست شد. بیوچار و زغال‌سنگ باعث افزایش کربن آلی در بسترهای کمپوست شدند. تیمارهای لئوناردیت ۲ و ٤ درصد بالاترین مقادیر شاخص‌های هوموسی‌شدن (HS، DP، HI، HR) را ایجاد ولی تفاوت معناداری با یکدیگر نداشتند. به طورکلی 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 ویژگی های عملیات ساده و سازگار با محیط زیست است. این فناوری به طور گسترده برای استفاده از کود دامی استفاده می‌شود. فرایند تولید کمپوست می تواند مواد آلی موجود در کود دامی را تجزیه و آنها را به مواد هوموسی با ارزش‌تر تبدیل کند (لی وهمکاران 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، اکتینومیست ها 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 هوموسی‌شدن 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 ونسبت 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 کمپوست‌شدن 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 کمپوست‌شدن 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

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 به‌عنوان 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 توام[۱] و کمپوست حاصله کمپوست مشترک یا هم نوا[۲] نامیده می شود. برخی محققان با پژوهش روی افزودنی‌های مختلف همانند زغال بامبو، بیوچار بامبو، بیوچار کلش برنج، کلش جو، خرده چوب برروی 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 بیماری زا، 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 (بهرا و سامال ۲۰۲۲). تاثیر 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 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 می دهد (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 عمدتا شامل کلوئیدهای رسی نظیر ایلایت، موسکوویت، مونتموریلونایت و ترکیبات کائولینایت-آلومینیوم سیلیکات هستند (ساجب و آدهیکاری ، ۲۰۲۰). به طورکلی زغال سنگ‌ها نوعی سنگ رسوبی هستند که که از تجزیه مواد گیاهی مدفون شده در شرایط دما و فشار بالا طی میلیون‌ها سال به‌وجود 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 گلخانه ای و آمونیاک از توده در حال کمپوست شدن، کیفیت کمپوست را بهبود می بخشند. تا زمان انجام این تحقیق

[۱] Co-composting

[۲] Co-compost

در سال ۱٤۰۲مرور 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 کمپوست‌شدن می‌باشد.

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 میتری به مدت ۲٤ ساعت در دمای ٦۰ درجه سلسیوس در آون خشک شده و سپس داخل کوره با غلظت کم اکسیژن گذاشته شده و بعد از حصول دمای ٤۰۰ 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 و٤ درصد با مواد اولیه کمپوست در تل‌هایی 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.

طرح آماری و تیمارهای آزمایشی

این تحقیق به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا 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. به‌طور کلی ۳ تیمار (بیوچار، زغال‌سنگ و لئوناردیت) در دو سطح ۲ و ٤ درصد به اضافه یک تیمار شاهد در سه تکرار بودند که ۲۱ واحد آزمایشی می‌شود.

نحوه و زمان نمونه‌برداری از تل‌ها

به هنگام نمونه برداری 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. نمونه برداری و اندازه گیری 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 ٤ (هفته سوم)، زمان ۵ (هفته چهارم)، زمان ٦ (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 ٤۸۰ درجه سلسیوس از رابطه زیر محاسبه شد (ASTM 2007). نیتروژن کل به روش کجلدال اندازه‌گیری (برمنر ۱۹۹٦)، و نسبت بین کربن به نیتروژن در یک ماه اول به صورت هفتگی و تا پایان کمپوست‌شدن (۳ ماه) به صورت دو هفته یکبار محاسبه شد.

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

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 وسپس pH و EC محلول روشناور با

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 اندازه گیری شد. برای اندازه‌گیری دمای داخل توده از ترمومتر دیجیتالی استفاده شد که سیم مخصوص آن در داخل لوله‌های مخصوص اندازه گیری دما قرارگرفته و دمای توده اندازه‌گیری گردید.

اندازه‌گیری ویژگی‌های هوموسی‌شدن

اسید هیومیک در تیمارهای آزمایشی با روش کی و

همکاران (۲۰۰٤)، استخراج گردید. برای این منظور نمونه‌های کمپوست با نسبت ۱:۱۰ (مایع/ جامد) با سود نیم مولار مخلوط و به مدت ۲٤ ساعت (زمان استخراج) در اتاق تاریک با شدت ۱٦۰ دور در دقیقه شیک شدند. فاز محلول از فاز رسوب با سانتریفیوژ (٦۰۰۰ 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 ٥-٤ برسد، شسته شده و در نهایت در فریز درایر یا محفظه گاز نیتروژن خشک گردید. برای تعین مقدار اسید فولویک در تیمارها از روش قلیایی (کارتر و گریگوویچ ۲۰۰۷) استفاده شد. در ادامه شاخص هوموسی شدن، درجه ی پلیمریزاسیون و نسبت هوموسی شدن به صورت زیر محاسبه گردید (امیر و همکاران ۲۰۰۸، سانچز-موندرو و همکاران ۱۹۹۹):

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

HI = (HAC/TOC) × 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 وFAC درصد کربن آلی اسید فولویک می باشد.

تحلیل آماری

تجزیه واریانس داده‌ها به روش فاکتوریل بر پایه طرح کاملا تصادفی، مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن (سطح احتمال ۹٥درصد) و آزمون نرمال بودن با استفاده از نرم‌افزار SPSS 27.0 و برای ترسیم نمودارها از نرم‌افزارExcel استفاده شد. مقادیر LSD ارایه شده در شکل‌های مربوط به مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار×زمان در سطح احتمال ٥ درصد به صورت رابطه زیر محاسبه گردید:

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

S_d – میانگین مربعات خطا MSE – تعداد تکرار r
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 ٥۲ 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.

	بیوچار	لئوناردیت	زغال سنگ	کود گاوی	کود مرغی	مواد آلی جنگلی
pH(۱:۱۰)	۷/۸	٦/٥	٦/۷	۷/۹	۷/۷	۷/۱
EC(۱:۱۰)	۱/۱	۲/٥	۲/۹	۳/٦	٤/٥	۲/۱
C(%)	٥۲	۳۳	٥۱	۲۱	۲۲	۲٥
N(%)	۰/۲	۰/۷	۰/٦	۱/۲	۲/۳	۱/۸
S(%)	۱/۲	۳/۹	۳/٤	۰/۹	۱/٥	۰/۹
H(%)	۱/٦	–	–	–	–	–
Ash(%)	۲٥	–	–	–	–	–
آهن کل ($g\ kg^{-1}$)	٦/٥۷	۱/۰۷٥	۹/۷٥	۱/۸٦	۷/٤۳	۱/۷۸
روی کل ($mg\ kg^{-1}$)	٥۰/٥۷	۷۲/٥۱	٦۹/٤۸	۳۹/۷	٦۹/۷٥	۲۹/٤
منگنز کل ($mg\ kg^{-1}$)	۲٥۱/٦٥	۱۸۱/۹٥	۲٥۰/٥۲	۱٤۸/۹	۲۹۰/۳۲	۹٦/۹
مس کل($mg\ kg^{-1}$)	۲/٤۸	۳/٥۱	٤/۲۲	۳/۲۱	۳/۲٥	۲/۸۷
کلسیم کل ($g\ kg^{-1}$)	۳۹/۹۱	۲۸/۲۳	۲٦/۷٥	۱٥/۲۱	۲۷/٦۱	۱۳/۸۱
منیزیم کل ($g\ kg^{-1}$)	٤/۱۳	٥/۱۸	۸/۱۸	٤/٥۹	۸/۲٥	۳/۳۷

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

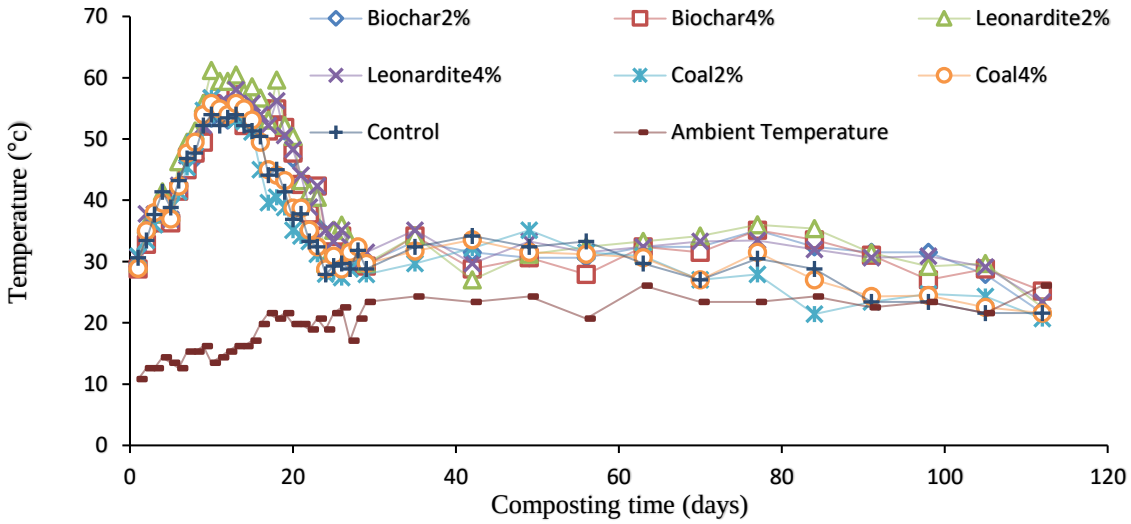
تغییرات دما در طول کمپوست‌شدن

دما مهمترین پارامتر در تولید کمپوست است، چرا که سرعت کمپوست شدن را افزایش و میزان پاتوژن‌ها را کاهش می دهد. 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 می شود (بهرا 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 (^{oC} ٦۱.۲) مربوط به تیمار لئوناردیت ۲ درصد بود (شکل ۱). در این پژوهش بیشترین طول دوره ترموفیلی برای تیمار لئوناردیت ۲درصد 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 ۲درصد دارای کمترین دما بود. کمپوست با کمک بیوچار 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 بیوچار و لئوناردیت نسبت داده شود که با تحریک فعالیت میکروبی منجر به افزایش دما می‌شوند (مانو و همکاران ۲۰۲۱، بهرا و سامال ۲۰۲۲). با این حال، برخی از افزودنی‌ها مانند بنتونیت (لی و همکاران ۲۰۱۲)، فسفوژیپس 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 ٥۰ روز کمپوست شدن در تیمار زغال ۲ درصد و در روز ۳۰ و ٥۰ در زغال ٤ درصد مشاهده شد که دارای بیشترین مقدار دما بود.

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

	میانگین مربعات								
منبع تغییر	درجه آزادی (df)	دما	درجه آزادی	pH	EC	کربن‌آلی	خاکستر	نیتروژن	C/N
تیمار	۷	۷۵۲۷/۹٤**	٦	۰/۲۳۱**	۲/۸۹**	٤/۱۹**	٤۱/۱۷**	۰/۱۰٦**	۱٤/۳۰**
زمان	٤۰	۱٤۳٦/٦۳**	۸	۰/٤۸٤**	٥/٤٦**	۲۹/٦۸**	۳۱۷/٦۷**	۰/۷٤۰**	۹٤/٦٦**
تیمار×زمان	۲۸۰	۸۲/۲۰٥	٤۸	۱/۲٥٦ns	۰/۸۷**	۰/۱٥ns	۱/٤۸**	۰/۰۰٦ns	۰/۸۰٤*
خطای آزمایشی	٦٥٥	۲/۷۲	۱۲٤	۰/۰۱۳	۰/۳٦	۰/۱۱	۰/۷۱	۰/۰۰٥	۰/٥۰٦
ضریب تغییرات(٪)		۳۲/۱		۲/۷	۱٥/۸	٤/۹	۸/۲	۱۱/٤	۱٥/۳

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

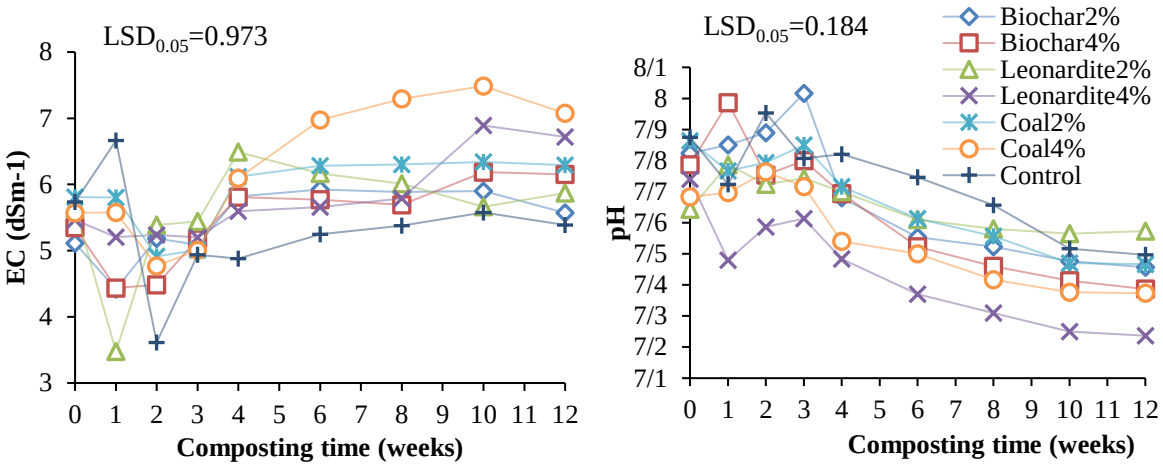


شکل ۱- تاثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر دمای توده در طول کمپوست‌شدن. تیمارهای مورد بررسی شامل بیوچار (Biochar)، لئوناردیت (Leonardite)، زغال‌سنگ (Coal) در سطح ۲ و ٤ درصد، شاهد (Control) و دمای محیط (Ambient Temperature) می‌باشند.

تغییرات pH و قابلیت هدایت الکتریکی(EC) در طول کمپوست‌شدن

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 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 پروتئین ها توسط میکروارگانیسم‌ها، 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 بین۷/۳ 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 نیترات‌سازی 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

کمپوست شدن و هم در کمپوست نهایی در تیمار لئوناردیت ٤ 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 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.**

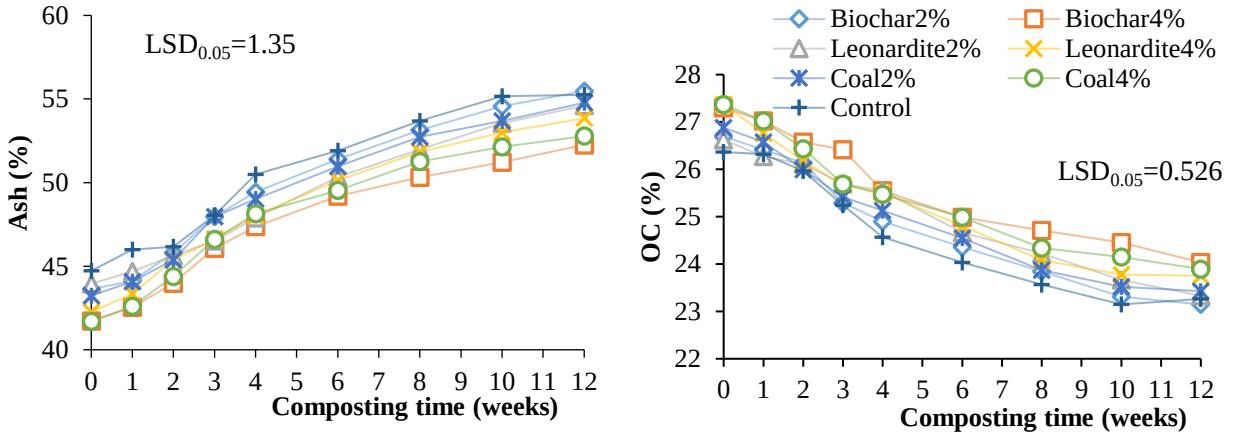
تجزیه واریانس نشان داد که اثر تمامی فاکتورها بر قابلیت هدایت الکتریکی (EC) توده در حال کمپوست شدن معنادار بود (جدول ۲). در هفته‌های اول، توده های در حال کمپوست شدن دارای کمترین مقادیر EC بودند ولی با گذشت زمان مقادیر EC افزایش یافته و در هفته‌های پایانی بیشترین مقادیر هدایت الکتریکی حاصل شد (شکل ۲). افزایش EC می‌تواند به دلیل تجزیه و معدنی شدن موادآلی و افزایش غلظت عناصر باشد (کمپل و همکاران ۱۹۹۷). در این پژوهش بالاترین EC متعلق به تیمارهای زغال‌سنگ 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 کمپوست‌شدن نیز بیشترین EC را داشته باشد که چنین نبود. 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 با کاهش pH، فعالیت پروتون (H^+) افزایش و چون H^+ اندازه 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 زغال‌سنگ به دلیل وجود عناصر در ساختار آن می‌تواند باشد. لئوناردیت ٤ درصد بعد از زغال سنگ ٤ درصد دارای بیشترین مقدار EC بود که حضور قابل توجه مواد هیومیک، می‌تواند دلیل اصلی این افزایش باشد. به‌نظر 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 (٤۰۰ درجه سلسیوس)، اثر رقت، نوع

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

تغییرات درصد کربن آلی و خاکستر توده در طول کمپوست‌شدن

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 کمپوست‌شدن معنادار بودند (جدول ۲). در این پژوهش تیمارهای بیوچار ٤درصد و زغال‌سنگ ٤درصد دارای بیشترین غلظت کربن آلی بودند ولی اختلاف معناداری با یکدیگر نداشتند که دلیل این امر بالا بودن درصد کربن در ساختار بیوچار و زغال‌سنگ است. از طرفی دیگر بیوچار و زغال سنگ به دلیل مقاومت شیمیایی ساختار آروماتیک آن در طول کمپوست‌شدن دچار تخریب شدید نمی‌شوند (بهرا و سامال ۲۰۲۲). پایین‌ترین درصد کربن آلی نیز متعلق به تیمار شاهد بود. هفته‌های نخستین بیشترین و هفته‌ی ۱۲ کمترین درصد کربن آلی را در توده‌ها داشت. در شرایط این پژوهش و با گذشت زمان در فرایند کمپوست شدن، غلظت کل کربن آلی در کلیه‌ی تیمارها به دلیل ارتقاء فعالیت میکروبی توسط این افزودنی‌ها و فروپاشی ترکیبات کربنی بیشتر از تیمار شاهد کاهش یافت (شکل۳) که با نتایج وانگ و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت داشت. کاهش کربن آلی در فرایند کمپوست شدن ناشی از افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها و افزایش تنفس می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی هوموسی شدن و پایدار شدن مواد آلی در کمپوست با گذشت زمان است (بوزاتو و همکاران ۲۰۱۲).



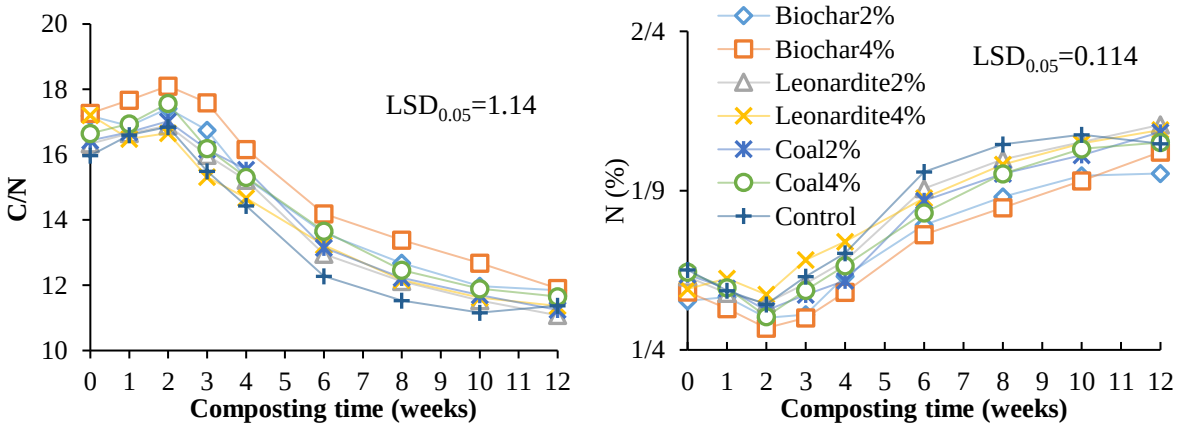
شکل ۳- تاثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر درصد کربن آلی و خاکستر توده در طول کمپوست‌شدن. تیمارهای مورد بررسی شامل بیوچار (Biochar)، لئوناردیت (Leonardite)، زغال‌سنگ (Coal) در سطح ۲ و ۴ درصد و شاهد (Control) می‌باشد. LSD0.05 مقایسه میانگین در سطح احتمال ۹۵ درصد می‌باشد.

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 تاثیر تمام افزودنی‌ها افزایش یافت (شکل۳) که با نتایج جلیلی و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت داشت. تیمار شاهد با اختلاف معنادار با بقیه تیمارها دارای بالاترین درصد خاکستر و تیمار بیوچار ٤ درصد پایین ترین درصد را داشت. کاهش ماده آلی می‌تواند دلیل اصلی افزایش درصد خاکستر باشد که بیوچار و زغال سنگ ٤ درصد بالاترین مقدار ماده آلی و تیمار شاهد پایین‌ترین مقدار را دارا بودند. افزایش EC می‌تواند به دلیل تجزیه و معدنی‌شدن موادآلی و افزایش غلظت عناصر باشد (کمپبل و همکاران ۱۹۹۷).

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 ٤). 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 ۲۰۰٦). 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 ٤ درصد کمترین غلظت نیتروژن را چه در طول دوره و چه در انتهای فرایند کمپوست‌شدن دارا بودند که دلیل آن به درصد پایین نیتروژن بیوچار نسبت به دیگر افزودنی‌ها برمی‌گردد (جدول ۱). همان طور که در شکل ٤ هم مشاهده می‌شود غلظت نیتروژن توده در هفته اول و دوم در کمترین مقدار خود بود و می توان 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 معمولا 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 کمپوست‌شدن. تیمارهای مورد بررسی شامل بیوچار (Biochar)، لئوناردیت (Leonardite)، زغال‌سنگ (Coal) در سطح ۲ و ۴ درصد و شاهد (Control) می‌باشد. LSD0.05 مقایسه میانگین در سطح احتمال ۹۵ درصد می‌باشد.

در این پژوهش تیمار بیوچار ٤درصد 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 و در نتیجه افزایش تصاعد آمونیاک (کاهش نیتروژن) می باشد (شکل ٤). این نتایج با نتایج مالینوسکی و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت داشت. نسبت C/N کاملا متاثر از فعالیت میکروبی است و با افزایش فعالیت و مصرف میکروبی مقدار کربن و مواد غیر نیتروژنی

مثل کربوهیدارت‌ها 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 کمپوست شدن می شود؛ زیرا بستر قابل تجزیه زیادی برای میکروارگانیسم ها وجود دارد. اما با نسبت C/N کم همانند تحقیق حاضر، نیتروژن معدنی بیش از حد تولید و می تواند توسط تصاعد آمونیاک یا با آبشویی از توده کمپوست هدر رود (برنال و همکاران ۲۰۰۹). بنابراین می توان 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 می باشد و در روزهای اولیه، توده در حال کمپوست شدن بیشترین نسبت C/N را داشت، اما استفاده از آن در سطح ۲و ٤ درصد کافی نبوده و نتوانسته که نسبت C/N اولیه مناسب که بین ۲۰ تا ۳۰ می باشد را فراهم کند. به عبارت دیگر در هنگام انتخاب افزودنی، باید به درصد مواد افزودنی و نسبت C/N مخلوط های اولیه توجه شود تا از تخریب ماده آلی اطمینان حاصل شود و از هدر رفت نیتروژن نیز در طول کمپوست شدن 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. بنابرین 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 ١٤ بود که یک دلیل آن غیر از رسیدگی می تواند نسبت C/N پایین بستر اولیه(کود دامی) باشد.

شاخص‌های هوموسی‌شدن

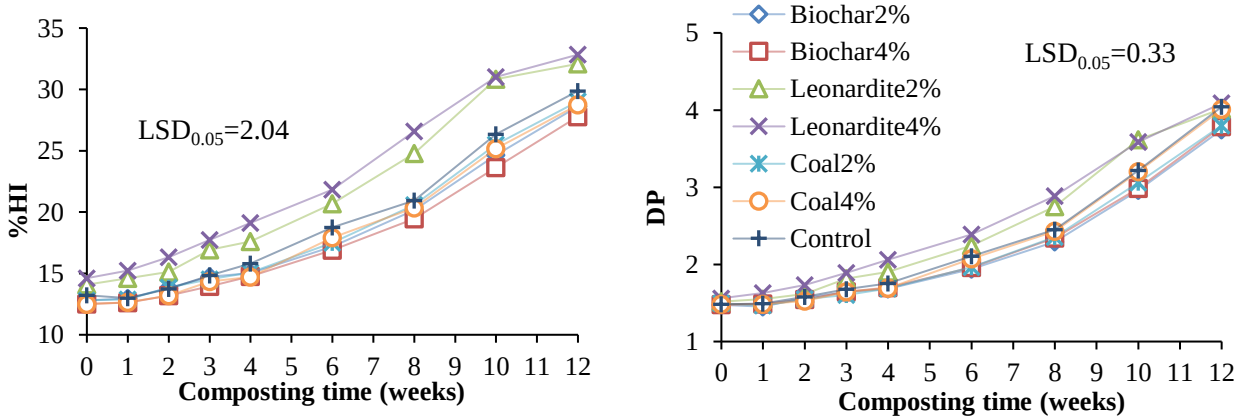
هوموسی شدن به طور کلی به عنوان فرایند تبدیل

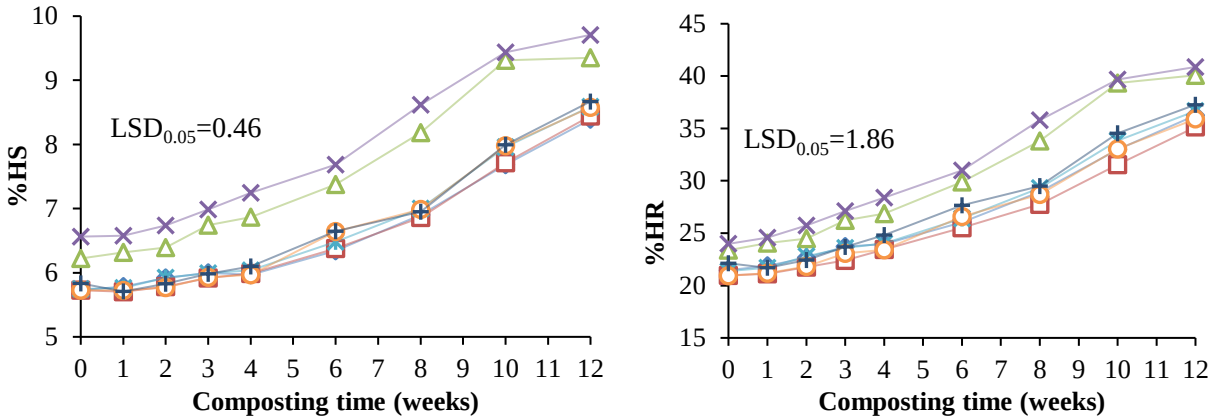
مواد آلی آسان تجزیه شونده به مواد هیومیک کاملاً تثبیت شده و مقاوم تعریف می شود (وانگ و همکاران ۲۰۱٤). تصور می شود که این یک عامل کلیدی در بهبود کیفیت کمپوست باشد، به دلیل اهمیت مواد هیومیک برای محیط زیست و ساختار خاک و همچنین اثرات مفید آنها بر رشد گیاه (ادانی و همکاران ۱۹۹۹) نظارت بر هوموسی‌شدن ماده آلی برای ارزیابی بلوغ و کیفیت کمپوست ضروری است. تجزیه واریانس نشان داد که شاخص‌های هوموسی شدن در تمامی فاکتورها به جز اثر متقابل تیمار×زمان برای درجه پلیمریزاسیون، معنادار بودند (جدول۳). شاخص‌های هوموسی شدن در طول فرایند کمپوست شدن در تمامی تیمارها افزایش یافت (شکل ٥) 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 DP، HR و HI تیمار لئوناردیت ۲درصد و لئوناردیت ٤درصد دارای بالاترین مقادیر بودند ولی این دو تیمار اختلاف معناداری با یکدیگر نداشتند ولی در شاخص HS تیمار لئوناردیت ٤ 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 ٤ 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 ٤ درصد) بیشتر است که منعکس‌کننده

هوموسی‌شدن شدید به دلیل ماهیت لئوناردیت می‌باشد. مقدار HI و HR بین صفر و صد بوده و هرچه به ۱۰۰ نزدیک باشد، کمپوست کیفیت بهتری دارد (سانچز-موندرو و همکاران۱۹۹۹، هلال و همکاران ۲۰۱۱). 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. در مورد کمپوست مشترک لئوناردیت، سهم قابل‌توجهی 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 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 شکل گیری سریعتر پلیمرهای آروماتیک در کمپوست مشترک می‌شود. اما برای بیوچار، دیاس و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که افزودنی‌های همچون بیوچار با شکسته شدن لیگنین آن به مواد سازنده‌اش و تولید رادیکال‌های آزاد در طول تشکیل بیوچار می‌تواند دوباره گروه‌بندی و سازمندهی شود و محصول نهایی بسیار آروماتیکی را تشکیل دهد و منجر به افزایش شاخص‌های هوموسی شدن در کمپوست مشترک شود.

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

منبع تغییر	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات			
		شاخص هوموسی شدن (HR)	نسبت هوموسی شدن (HI)	درجه پلیمریزاسیون (DP)	مجموع مواد هیومیک (HS)
تیمار	٦	١٥٤/٥٢**	١٣٥/٣٥**	٠/٩٢٩**	٧/٨٦**
زمان	٨	٥٨٦/١٩**	٦٧٦/٥٣**	١٣/٧٢**	٢٠/٨٠**
تیمار×زمان	٤٨	٢/٥٣**	٢/٣٩*	٠/٠٤٠ns	٠/١١٢ns
خطای آزمایشی	١٢٥	١/٣٢	١/٥٠	٠/٠٤٢	٠/٠٨٢
ضریب تغییرات(٪)		٢٠/٤	٣١/٣	٣٤/٧	١٦/١





شکل ۵- تاثیر افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق بر درجه پلیمریزاسیون، نسبت هوموسی‌شدن، شاخص هوموسی شدن 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 کلّی

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 ٤ 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 کمپوست شدن به ویژه نتایج خوبی داشت و می توان در انتهای کمپوست شدن به منظور غنی سازی و بهبود کیفیت کمپوست تولید شده، از این ماده استفاده نمود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد با توجه به هزینه های 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 قابل تعمیم به تمام بیوچارها نیست و بسته به نوع زیست توده و شرایط پیرولیز ممکن است نتایج متفاوتی حاصل شود. لذا توصیه می شود 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 زئولیت هم استفاده شود. صفات دیگری همچون شاخص های آلودگی میکروبی و فراوانی بذور علف های هرز هم اندازه گیری و اثر تیمارها مطالعه شود. در نهایت مطالعه تاثیر کمپوست نهایی بر ویژگی‌های خاک‌های آهکی و اسیدی ایران توصیه می شود.

سپاسگزاری

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

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 stabili 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 emergetic 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 leonarditecoal: an integrated study of PY-GC-MS, XPS and XANES techniques. Journal of Anaiytical 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