19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025
نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴
مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran
۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

پویایی فعالیت میکروبی و شاخص‌های زیستی در کمپوست و ورمی‌کمپوست لجن خمیرکاغذ و کود مرغی

شنو کریمی، حسین شریعتمداری*، فرشید نوربخش

گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله shariat@iut.ac.ir

چکیده

کمپوست کردن و ورمی‌کمپوست کردن دو راهکار پایدار برای تبدیل این مواد به اصلاح‌کننده‌های مفید خاک هستند. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات شاخص‌های زیستی در کمپوست کود مرغی (HC)، کمپوست لجن خمیرکاغذ (PC) و ورمی‌کمپوست لجن خمیرکاغذ (PV) انجام شد. تغییرات زیست‌توده نیتروژن میکروب (MBN)، تنفس میکروبی، نرخ خالص معدنی‌شدن یا تثبیت نیتروژن (Nm/i) و تغییرات دما بررسی گردید. علاوه بر این، داده‌های مربوط به تنفس میکروبی با مدل سینتیکی مرتبه اول برازش شدند. نتایج نشان داد که کمپوست کود مرغی (HC) بالاترین فعالیت زیستی را داشت و از نظر MBN، Nm/i و CO_2 تجمعی نسبت به سایر تیمارها برتری آشکاری نشان داد. در تیمار ورمی‌کمپوست لجن (PV)، شاخص‌های زیستی به‌طور معناداری بیشتر از کمپوست لجن (PC) بود که بیانگر نقش مثبت کرم‌های خاکی در افزایش فعالیت میکروبی و معدنی‌شدن ترکیبات آلی است. در مقابل، کمپوست لجن (PC) کمترین فعالیت زیستی را داشت. برازش مدل سینتیکی مرتبه اول نشان داد که ضرایب تعیین ($R^2 > 0.95$) در همه تیمارها بالا بود و بیشترین مقدار کربن بالقوه معدنی‌شدنی (C_0) در کمپوست کود مرغی مشاهده گردید. یافته‌ها نشان دادند که کمپوست کود مرغی به‌دلیل غنای غذایی و فعالیت شدید میکروبی بالاترین کیفیت زیستی را دارد. همچنین فرآیند ورمی‌کمپوست کردن می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود کیفیت زیستی لجن خمیرکاغذ و تولید اصلاح‌کننده آلی پایدار برای خاک مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: کمپوست کود مرغی، لجن خمیرکاغذ، ورمی‌کمپوست کردن، زیست‌توده نیتروژن میکروبی، تنفس میکروبی، معدنی‌شدن نیتروژن

مقدمه

مدیریت ضایعات صنعتی و کشاورزی یکی از مسائل کلیدی برای دستیابی به توسعه پایدار است. لجن خمیرکاغذ به عنوان محصول جانبی صنعت کاغذسازی، حاوی مقادیر بالایی از مواد آلی و سلولز است که در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند به آلودگی خاک و آب منجر شود (Simão et al., 2018). کود مرغی نیز، با وجود دارا بودن نیتروژن و فسفر بالا، به دلیل وجود آمونیاک و پاتوژن‌ها نیازمند پردازش مناسب است (Wang et al., 2025). کمپوست کردن و ورمی‌کمپوست کردن روش‌های زیستی مؤثری برای تبدیل این ضایعات به مواد اصلاح کننده و کودی برای خاک هستند که ضمن کاهش آلودگی محیطی، باروری خاک را بهبود می‌بخشند (Folina et al., 2025; Karimi et al., 2025; Karimi et al., 2024).

کمپوست کردن از طریق تجزیه هوازی مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها، کمپوست پایداری تولید می‌کند که ارزش غذایی بالایی دارد. ورمی‌کمپوست کردن نیز با بهره‌گیری از کرم‌های خاکی مانند *Eisenia fetida*، این فرآیند را تسریع کرده و کیفیت محصول نهایی را از طریق افزایش فعالیت آنزیمی بهبود می‌بخشد (Ahmed et al., 2025). مطالعات نشان داده‌اند که کمپوست کردن کود مرغی می‌تواند نسبت کربن به نیتروژن (C/N) را کاهش داده و معدنی‌شدن مواد آلی را تسریع کند (Wang et al., 2025). همچنین، ورمی‌کمپوست لجن خمیر کاغذ فعالیت آنزیم‌های خاک مانند دهیدروژناز را افزایش داده و مواد مغذی را غنی می‌سازد (Selvam et al., 2025). با این حال، مقایسه مستقیم کمپوست کود مرغی و ورمی‌کمپوست لجن خمیر کاغذ به‌منظور ارزیابی پویایی فعالیت میکروبی و شاخص‌های زیستی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف این پژوهش، بررسی و مقایسه پویایی فعالیت میکروبی و شاخص‌های زیستی شامل زیست‌توده نیتروژن میکروبی (MBN)، نرخ معدنی‌شدن کربن، و نرخ خالص معدنی‌شدن یا تثبیت نیتروژن (Nm/i) در کمپوست کود مرغی و ورمی‌کمپوست لجن خمیرکاغذ است. این مطالعه با هدف کمک به ارائه راهکاری پایدار برای مدیریت این ضایعات و ارتقای سلامت خاک در شرایط ایران انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از کود مرغی و لجن خمیر کاغذ برای تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست استفاده شد. برای کمپوست‌سازی، ۵ کیلوگرم از بقایای اولیه در جعبه‌های یونیولیتی قرار داده شد تا تبادل حرارتی با محیط کاهش یابد. برای تولید ورمی‌کمپوست از جعبه‌های پلاستیکی استفاده شد و به ازای هر کیلوگرم از بسترهای اولیه، ۲۰ کرم خاکی از گونه *Eisenia fetida* به آن اضافه گردید. بسترها تا ۱۰ ± ۷۰ درصد ظرفیت نگهداری آب (WHC) مرطوب شدند و جعبه‌های کمپوست و ورمی‌کمپوست به مدت ۱۲۰ روز در دمای اتاق (۲ ± ۲۵ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند. دما به صورت هفتگی با دماسنج اندازه‌گیری شد. برای تعیین نرخ معدنی‌شدن کربن، از ظروف دربسته حاوی مواد کمپوست و محلول NaOH برای جذب CO_2 استفاده شد و مقادیر آن در فواصل زمانی مختلف تا ۱۲۰ روز اندازه‌گیری گردید. مقدار کربن تجمعی معدنی‌شده از طریق تیتراسیون تعیین و پارامترهای مربوط به کربن بالقوه معدنی‌شدنی (C_0) و ثابت سرعت (k) با استفاده از مدل سینتیکی مرتبه اول تعریف شدند (Ajwa & Tabatabai, 1994).

$$C_m = C_0 (1 - \exp^{-kt}) \quad (1)$$

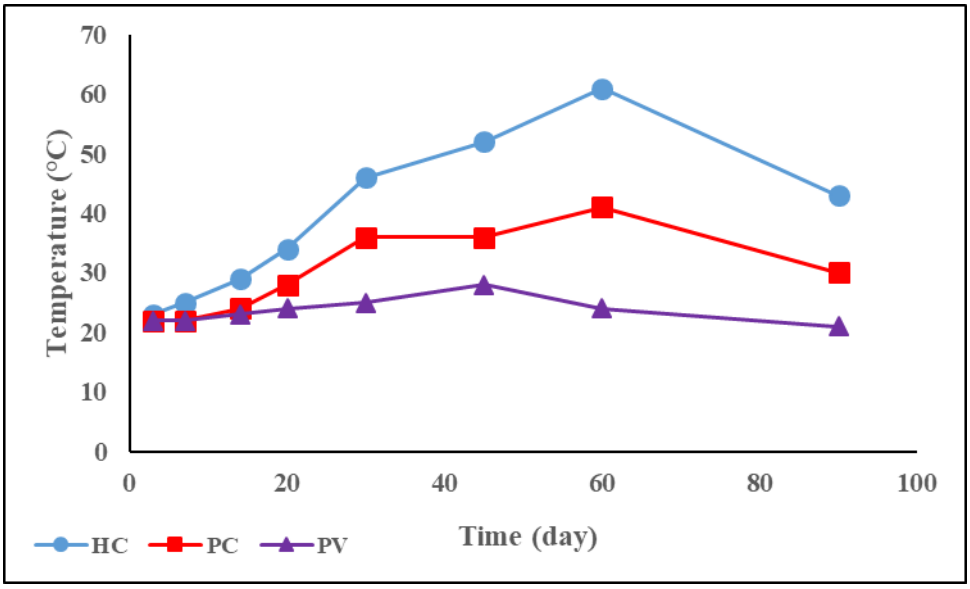
که در آن، Cm کربن تجمعی معدنی‌شده در زمان t (mg C kg^{-1} compost)، C_0 کربن بالقوه معدنی‌شدنی (mg C kg^{-1} compost)، k ثابت سرعت معدنی‌شدن(day^{-1}) ، و t زمان (روز) است. زیست‌توده نیتروژن میکروبی (MBN) با روش فومی–استخراجی تعیین گردید (Cabrera & Beare, 1993). برای این منظور نمونه‌ها تحت تیمار کلروفرم قرار گرفته و پس از استخراج، غلظت نیتروژن قابل‌استحصال اندازه‌گیری شد. نرخ خالص معدنی‌شدن یا تثبیت نیتروژن (Nm/i) بر اساس تغییرات غلظت نیتروژن معدنی (NH^+_4 و NO^-_3) طی دوره ۹۰ روزه انکوباسیون محاسبه گردید (Nahidan & Nourbakhsh, 2010).

$$Nm/i = (NH_4^+ + NO_3^-)_f - (NH_4^+ + NO_3^-)_i \quad (2)$$

که در آن، $(NH_4^+ + NO_3^-)_f$ غلظت نهایی و $(NH_4^+ + NO_3^-)i$ غلظت اولیه نیتروژن معدنی (mg N kg^{-1} compost) می‌باشند.

نتایج و بحث

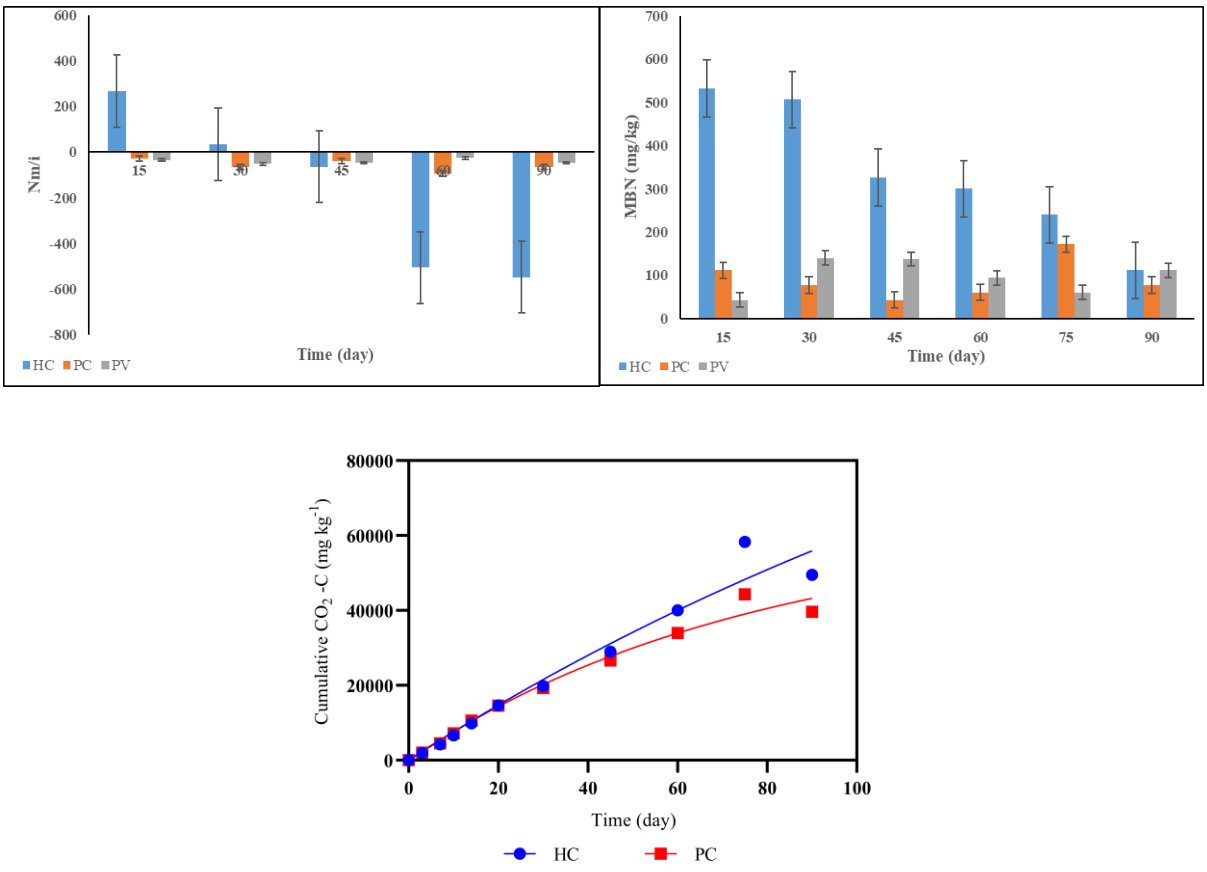
شکل (۱) تغییرات دمایی طی ۱۲۰ روز فرآیند کمپوست کود مرغی، کمپوست لجن خمیرکاغذ و ورمی‌کمپوست لجن خمیرکاغذ را نشان می‌دهد. در فرآیند کمپوست کود مرغی، دما در ۶۰ روز اول به‌سرعت افزایش یافت و در هفته‌های هفتم تا نهم به اوج خود (حدود ۶۵-۶۰ درجه سانتی‌گراد) رسید. این افزایش نشان‌دهنده فاز ترموفیلیک و فعالیت بالای میکروبی در تجزیه مواد آلی است (Wang et al., 2025). پس از این دوره، دما به‌تدریج کاهش یافت و از هفته ۱۲ به حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد رسید، که نشان‌دهنده ورود به فاز بلوغ کمپوست است (Folina et al., 2025). در کمپوست لجن خمیرکاغذ، دما با سرعت کمتری افزایش یافت و در هفته‌های هفتم تا نهم به حداکثر حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد رسید. این دمای پایین‌تر نسبت به کمپوست کود مرغی به دلیل محتوای بالای سلولز و کربن کمتر قابل تجزیه در لجن خمیرکاغذ است که فعالیت میکروبی را محدودتر می‌کند (Selvam et al., 2025). پس از فاز ترموفیلیک، دما به‌تدریج کاهش یافت و از هفته ۱۲ به حدود ۳۰-۲۸ درجه سانتی‌گراد رسید، که نشان‌دهنده تکمیل فرآیند بلوغ است. در مقایسه، کمپوست کود مرغی به دلیل محتوای نیتروژن بیشتر و مواد آلی قابل تجزیه، دمای بالاتری در فاز ترموفیلیک ایجاد کرد و فرآیند تجزیه سریع‌تری داشت. در مقابل، کمپوست لجن خمیرکاغذ به دلیل ترکیبات مقاوم‌تر مانند سلولز، دمای پایین‌تری داشت و فرآیند تجزیه کندتر پیش رفت. این تفاوت‌ها با مطالعات (Wang et al., 2025)همخوانی دارد که نشان می‌دهد ترکیبات اولیه بر دینامیک دمایی تأثیر می‌گذارند. در ورمی‌کمپوست لجن خمیرکاغذ، دما بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد ثابت ماند، به دلیل فعالیت کرم‌های خاکی (*Eisenia fetida*)که دما را تنظیم می‌کنند (Selvam et al., 2025). این شرایط برای فعالیت کرم‌ها و میکروب‌های همزیست مناسب بوده و به تولید ورمی‌کمپوست پایدار کمک می‌کند (Ahmed et al., 2025).



شکل ۱- پایش دما در طول فرآیند کمپوست شدن کود مرغی و لجن خمیر کاغذ

مقدار MBN در همه تیمارها طی فرآیند افزایش یافت (شکل ۲)، اما شدت آن بین تیمارها متفاوت بود. بیشترین مقدار مربوط به کمپوست کود مرغی (HC) بود که محتوای بالای نیتروژن و کربن قابل‌تجزیه، موجب افزایش فعالیت و رشد جمعیت میکروبی شد. ورمی‌کمپوست لجن خمیرکاغذ (PV) نیز مقادیر بالاتری نسبت به کمپوست لجن خمیر کاغذ (PC) نشان داد که نقش کرم‌های خاکی در افزایش زیست‌توده میکروبی و بهبود شرایط بستر را تأیید می‌کند (Ahmed et al., 2025). این یافته‌ها با گزارش (Selvam et al., 2025) همخوانی دارد که ورمی‌کمپوست را عاملی مؤثر بر افزایش فعالیت زیستی معرفی کرده‌اند. تغییرات Nm/i نشان داد که کمپوست کود مرغی (HC) بالاترین نرخ معدنی‌شدن N را داشت و به‌تدریج تا روز ۹۰ تثبیت شد.

این موضوع بیانگر آزادسازی سریع نیتروژن معدنی در مراحل اولیه و سپس ورود به فاز پایدار است. در تیمار ورمی‌کمپوست لجن (PV)، نرخ Nm/i نسبت به کمپوست لجن (PC) بیشتر بود، که نشان‌دهنده کارایی بالاتر فرآیند ورمی در معدنی‌سازی نیتروژن است. در مقابل، کمپوست لجن (PC) به دلیل ترکیبات مقاوم‌تر و نیتروژن محدود، کمترین مقدار Nm/i را داشت. این نتایج با مطالعات Nahidan و Nourbakhsh, (2010) سازگار است. تنفس میکروبی به‌عنوان شاخص مهمی از فعالیت میکروبی، در تمامی تیمارها روند افزایشی داشت (شکل ۲). کمپوست کود مرغی (HC) بیشترین مقدار CO_2 تجمعی را تولید کرد که نشان‌دهنده فعالیت میکروبی شدید و تجزیه سریع مواد آلی بود. ورمی‌کمپوست لجن (PV) در رتبه دوم قرار گرفت که تأیید می‌کند حضور کرم‌های خاکی سبب تحریک فعالیت میکروبی و افزایش معدنی‌شدن کربن می‌شود (Gómez et al., 2006). کمپوست لجن (PC) کمترین مقدار تنفس را داشت، که ناشی از محدودیت مواد غذایی و وجود لیگنین و سلولز مقاوم است. براساس نتایج، مدل سینتیکی مرتبه اول توانست تغییرات تنفس میکروبی را به‌خوبی توصیف کند (جدول ۱). ضرایب تعیین (R^2) در همه تیمارها بالا بود (۰/۹۶–۰/۹۸)، که نشان‌دهنده انطباق بالای مدل با داده‌های تجربی است (Aguilar-Paredes et al., 2023). بیشترین مقدار C_0 در کمپوست کود مرغی (۱۵۲۹۳۷ mg C kg^{-1}) ثبت شد که حاکی از پتانسیل بالای این تیمار برای معدنی‌سازی کربن است. در مقابل، کمپوست لجن (PC) مقدار کمتری داشت (۶۲۸۶۴ mg C kg^{-1})، اما ضریب k در آن بالاتر بود (۰/۰۱۲۹ day^{-1})، که نشان‌دهنده سرعت نسبی بیشتر فرآیند در مراحل اولیه است. ورمی‌کمپوست لجن مقادیر میانی داشت، که بیانگر بهبود کارایی آن نسبت به کمپوست لجن و در عین حال پایین‌تر بودن از کود مرغی بود (Azeem et al., 2020). به طور کلی، نتایج نشان دادند که کمپوست کود مرغی (HC) بالاترین عملکرد زیستی را از نظر MBN، Nm/i و تنفس میکروبی داشت (شکل ۲ و جدول ۱). ورمی‌کمپوست لجن خمیرکاغذ (PV) به‌طور معناداری شاخص‌های زیستی بهتری نسبت به کمپوست لجن (PC) نشان داد، که نشان‌دهنده نقش مثبت کرم‌های خاکی در بهبود کیفیت زیستی بستر است.



شکل ۲- تغییرات MBN، Nm/i و تنفس میکروبی در طول فرآیند کمپوست و ورمی کمپوست کود مرغی و لجن خمیر کاغذ

جدول ۱- ضرایب تنفس میکروبی در معادله‌ی سینتیکی مرتبه اول

کمپوست	C_0	k	kC_0	R^2	SE
HC	۱۵۲۹۳۷^a	۰/۰۰۵۰^a	۷۷۳/۰۹^a	۰/۹۶	۴۱۱۵
PC	۶۲۸۶۴^b	۰/۰۱۲۹^b	۸۱۲/۲۰^b	۰/۹۸	۲۲۱۹

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که فرآیند کمپوست کردن و ورمی‌کمپوست کردن لجن خمیرکاغذ و کود مرغی اثرات متفاوتی بر شاخص‌های زیستی داشت. در میان تیمارها، کمپوست کود مرغی (HC) بالاترین مقادیر زیست‌توده نیتروژن میکروبی، تنفس و نرخ معدنی‌شدن نیتروژن (Nm/i) را نشان داد که بیانگر غنای بالای این منبع آلی و فعالیت شدید میکروبی آن است. ورمی‌کمپوست لجن خمیرکاغذ (PV) نسبت به کمپوست لجن (PC) بهبود معناداری در شاخص‌های زیستی داشت. این امر تأیید می‌کند که حضور کرم‌های خاکی و تعامل آن‌ها با میکروارگانیسم‌ها باعث تحریک فعالیت زیستی و تسریع معدنی‌شدن ترکیبات آلی می‌شود. کمپوست لجن (PC) کمترین عملکرد را داشت که ناشی از ترکیبات مقاوم مانند لیگنین و دسترسی محدود نیتروژن است. برازش مدل سینتیکی مرتبه اول نشان داد که داده‌های تنفس میکروبی در همه تیمارها به‌خوبی با مدل تطبیق یافتند ($R^2 > 0.95$). بیشترین مقدار C_0 در کمپوست کود مرغی مشاهده شد، در حالی‌که ورمی‌کمپوست لجن عملکردی بینابین کمپوست کود مرغی و کمپوست لجن داشت. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق بیانگر آن است که کمپوست کود مرغی به دلیل فعالیت میکروبی بالا و توانایی بالای معدنی‌شدن کربن و نیتروژن، یک منبع آلی غنی برای خاک محسوب می‌شود. در عین حال، فرآیند ورمی‌کمپوست می‌تواند به‌عنوان روشی پایدار برای بهبود کیفیت زیستی لجن خمیرکاغذ و تبدیل آن به اصلاح‌کننده‌ای مناسب برای خاک‌های کشاورزی مورد توجه قرار گیرد.

فهرست منابع

Aguilar-Paredes, A., Valdés, G., Araneda, N., Valdebenito, E., Hansen, F., & Nuti, M. (2023). Microbial community in the composting process and its positive impact on the soil biota in sustainable agriculture. *Agronomy*, *13*(2), 542 .

Ahmed, R., Sonowal, S ,.Bora, B., Chikkaputtaiah, C., & Velmurugan, N. (2025). Enhanced Production of High Quality Vermicompost Using Traditional Microbial Consortium and Eisenia fetida. *Compost Science & Utilization*, 1-19 .

Ajwa, H. A., & Tabatabai, M. A. (1994). Decomposition of different organic materials in soils. *Biology and Fertility of Soils*, *18*(3), 175-182. https://doi.org/10.1007/BF00647664

Azeem, M., Hale, L., Montgomery, J., Crowley, D., & McGiffen Jr, M. E. (2020). Biochar and compost effects on soil microbial communities and nitrogen induced respiration in turfgrass soils. *Plos one*, *15*(11), e0242209 .

Cabrera, M., & Beare, M. (1993). Alkaline persulfate oxidation for determining total nitrogen in microbial biomass extracts. *Soil Science Society of America Journal* 1012-1007, (4)57 .

Folina, A., Kakabouki, I., Baginetas, K., & Bilalis, D. (2025). Integration of Bioresources for Sustainable Development in Organic Farming: A Comprehensive Review. *Resources*, *14*(7), 102 .

Gómez, R. B., Lima, F. V., & Ferrer, A. S. (2006).The use of respiration indices in the composting process: a review. *Waste management & research*, *24*(1), 37-47 .

Karimi, S., Kolahchi, Z., Zarrabi, M., Nahidan, S., & Raza, T. (2025). From invasive species to agricultural resource: evaluation of Phragmites australis from Zarivar Lake as an organic amendment for the release of phosphorus, potassium, micronutrients and toxic metals. *Discover Applied Sciences*, *7*(2), 100. https://doi.org/10.1007/s42452-025-06525-0

Karimi, S., Raza, T., & Mechri, M. (2024 .(Composting and Vermitechnology in Organic Waste Management. In V. Kumar, S. A. Bhat, S. Kumar, & P. Verma (Eds.), *Environmental Engineering and Waste Management: Recent Trends and Perspectives* (pp. 449-470). Springer Nature Switzerland.

Nahidan, S., & Nourbakhsh, F. (2010). Microbial indices related to soil carbon as affected by management practices in arid forest and agricultural ecosystems. *Communications in soil science and plant analysis*, *41*(15), 1863-1, 872.

Selvam, R., Ramesh, P., Pitchaimani, J., Gilbert Ross Rex, K., Santhamoorthy, M., & Sadasivam, S. K. (2025). Biotransformation of Textile Industry Sludge Through Vermicomposting with the Earthworm Eudrilus eugeniae: Investigation of GCMS and Genotoxic Assessment. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 1-26 .

Simão, L., Hotza, D., Raupp-Pereira, F., Labrincha, J., & Montedo, O. (2018). Wastes from pulp and paper mills-a review of generation and recycling alternatives. *Cerâmica*, *64*, 453-443, (371).

Wang, W., Zhang, P., He, H., Liu, H., Yan, J., He, H., Wen, B., Cui, Z., & Yuan, X. (2025). Effects of Chicken Manure Combinations on Compost Maturity and Microbial Community Dynamics in Industrial-Scale Composting. *Waste and Biomass Valorization*, 1-10 .

چکیده انگلیسی

Dynamics of Microbial Activity and Biological Indicators in Compost and Vermicompost of Paper Mill Sludge and Poultry Manure

Shno Karimi, Hossein Shariatmadari*, Farshid Nourbakhsh

Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Corresponding author: shariat@iut.ac.ir

Abstract

The management of agricultural and industrial wastes, particularly paper mill sludge, is a major environmental challenge due to its high content of recalcitrant organic compounds. Composting and vermicomposting are considered sustainable strategies for converting these materials into valuable soil amendments. This study aimed to describe changes in biological indicators during composting of poultry manure (HC), paper mill sludge compost (PC), and paper mill sludge vermicompost (PV). Over a 120-day period, microbial biomass nitrogen (MBN), microbial respiration, net nitrogen mineralization or immobilization rate (Nm/i), and temperature profiles were monitored. In addition, microbial respiration data were fitted to a first-order kinetic model. Results showed that poultry manure compost (HC) exhibited the highest biological activity, with significantly greater MBN, Nm/i, and cumulative CO_2 compared to other treatments. In paper mill sludge vermicompost (PV), biological indicators were markedly higher than in paper mill sludge compost (PC), confirming the positive role of earthworms in enhancing microbial activity and organic matter mineralization. In contrast, PC showed the lowest biological performance. The first-order kinetic model provided a good fit for microbial respiration data ($R^2 > 0.95$) across all treatments, with the highest potentially mineralizable carbon (C_0) observed in HC. Overall, poultry manure compost, owing to its high nutrient content and intense microbial activity, demonstrated the highest biological quality, while vermicomposting proved to be an effective approach to improve the biological properties of paper mill sludge and produce a sustainable organic amendment for soils.

Keywords: Poultry manure compost, Paper mill sludge, Vermicomposting, Microbial biomass nitrogen, Microbial respiration, Nitrogen mineralization