



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



## ارزیابی شاخص‌های شیمیایی و پایداری کمپوست کود مرغی و لجن خمیر کاغذ

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](mailto:shariat@iut.ac.ir)

### چکیده

مدیریت پسماندهای کشاورزی و صنعتی از چالش‌های مهم کشاورزی پایداری و محیط زیست در ایران است. کود مرغی و لجن خمیر کاغذ به دلیل ترکیب غنی از مواد آلی و عناصر غذایی، در صورت مدیریت نادرست می‌توانند موجب آلودگی خاک و آب شوند. فرآیندهای کمپوست کردن و ورمی کمپوست کردن به‌عنوان رویکردهای پایدار، ضمن کاهش اثرات زیست‌محیطی، امکان تبدیل این مواد را به اصلاح‌کننده‌های مفید خاک فراهم می‌کنند. هدف این پژوهش، ارزیابی شاخص‌های شیمیایی و پایداری کمپوست کود مرغی و لجن خمیر کاغذ و مقایسه کیفیت نهایی آن‌ها بود. بدین منظور کمپوست کود مرغی، کمپوست لجن خمیر کاغذ و ورمی کمپوست لجن خمیر کاغذ به مدت ۱۲۰ روز تولید شدند و تغییرات کربن آلی (OC)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، اسید هیومیک (HA)، اسید فولویک (FA) و شاخص پلیمریزاسیون (DP) در طی فرآیند با استفاده از مدل سینتیکی پارابولیک مطالعه شدند. نتایج نشان داد میزان OC در تمامی تیمارها کاهش یافت که بیشترین کاهش در کمپوست کود مرغی مشاهده شد. در مقابل، CEC و شاخص‌های هیومیکی (DP, FA, HA) در کمپوست کود مرغی بیشترین بهبود را نشان دادند. بنابراین، کمپوست کود مرغی از نظر پایداری و کیفیت شیمیایی بهترین عملکرد را داشت و پس از آن ورمی کمپوست لجن خمیر کاغذ و کمپوست لجن خمیر کاغذ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

**واژگان کلیدی:** کمپوست کود مرغی، لجن خمیر کاغذ، ورمی کمپوست کردن، مواد هیومیکی، مدل سینتیکی پارابولیک

## مقدمه

مدیریت پسماندهای کشاورزی و صنعتی، به‌ویژه کود مرغی و لجن خمیر کاغذ، از چالش‌های عمده در کشورهای در حال توسعه است (Karimi et al., 2024). این پسماندها به دلیل ترکیب غنی از مواد آلی و عناصر غذایی، در صورت مدیریت نادرست می‌توانند مشکلات زیست‌محیطی جدی ایجاد کنند (Shapovalov et al., 2020). از جمله این مشکلات می‌توان به آلودگی منابع آب، انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش کیفیت خاک اشاره کرد. در این راستا، فرآیند کمپوست کردن به‌عنوان یک روش پایدار برای مدیریت این پسماندها و تبدیل آن‌ها به اصلاح‌کننده‌های مفید خاک مطرح است (Abdullah et al., 2015). کود مرغی به‌دلیل محتوای بالای نیتروژن، فسفر و پتاسیم، به‌عنوان یک منبع غنی برای تولید کمپوست شناخته می‌شود. با این حال، نسبت کربن به نیتروژن (C/N) کم آن می‌تواند منجر به انتشار آمونیاک و کاهش کیفیت کمپوست شود. در مقابل، لجن خمیر کاغذ دارای نسبت C/N بزرگ‌تری است که می‌تواند به‌عنوان یک منبع کربن در فرآیند کمپوست کردن استفاده شود (Karimi et al., 2025). مطالعات نشان داده‌اند که کمپوست کردن لجن خمیر کاغذ می‌تواند ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک را بهبود بخشد و از آن به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک استفاده شود (Manogaran et al., 2022). با توجه به اهمیت فرآیند کمپوست کردن در مدیریت پایدار پسماندها و بهبود کیفیت خاک، در این مطالعه به بررسی شاخص‌های شیمیایی و پایداری کمپوست کود مرغی و لجن خمیر کاغذ پرداخته شده است. هدف اصلی این تحقیق، مقایسه ویژگی‌های شیمیایی و هوموسی شدن این دو نوع کمپوست و ارزیابی روند تغییرات آن‌ها در طول زمان با استفاده از مدل‌های ریاضی است. امید است بررسی شاخص‌های آزمایشی به شناخت بهتر و مدیریت فرآیند کمپوست کردن این پسماندها کمک نماید.

## 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 یونولیتی 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 گرم خاکی از گونه *Eisenia fetida* به آن اضافه گردید. بسترها تا  $10 \pm 70$  درصد ظرفیت نگهداری آب (WHC) مرطوب شدند و جعبه‌های کمپوست و ورمی‌کمپوست به مدت ۱۲۰ روز در دمای اتاق ( $25 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند. ضمناً در کود مرغی احتمالاً به دلیل غلظت زیاد آمونیاک و شرایط شیمیایی نامساعد امکان استقرار کرم خاکی و تولید ورمی‌کمپوست وجود نداشت. از این رو فقط از نمونه لجن خمیر کاغذ، ورمی‌کمپوست ساخته شد.

از روش سوزاندن تر برای اندازه‌گیری کربن آلی استفاده شد (Allison, 1965). نسبت کربن به نیتروژن از رابطه‌ی زیر بدست آمد:

$$\text{درصد نیتروژن} / \text{درصد کربن} = \text{C/N}$$

از روش هارادا و اینوکو (۱۹۸۰) برای اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی استفاده شد. در این روش از استات باریم و HCl استفاده شد (Harada & Inoko, 1980). استخراج مواد هیومیکی از نمونه‌های کمپوست و ورمی‌کمپوست با استفاده از روش اصلاح‌شده سویفت (۱۹۹۶) و شنیتزر (۱۹۸۲) انجام شد (Schnitzler & Gruda, 2002; Swift, 1996).

$$\text{درصد اسید فولویک} = (\text{وزن نمونه} / \text{وزن خشک باقیمانده}) \times 100$$

$$\text{درصد اسید هیومیک} = (\text{وزن نمونه} / \text{وزن خشک باقیمانده}) \times 100$$

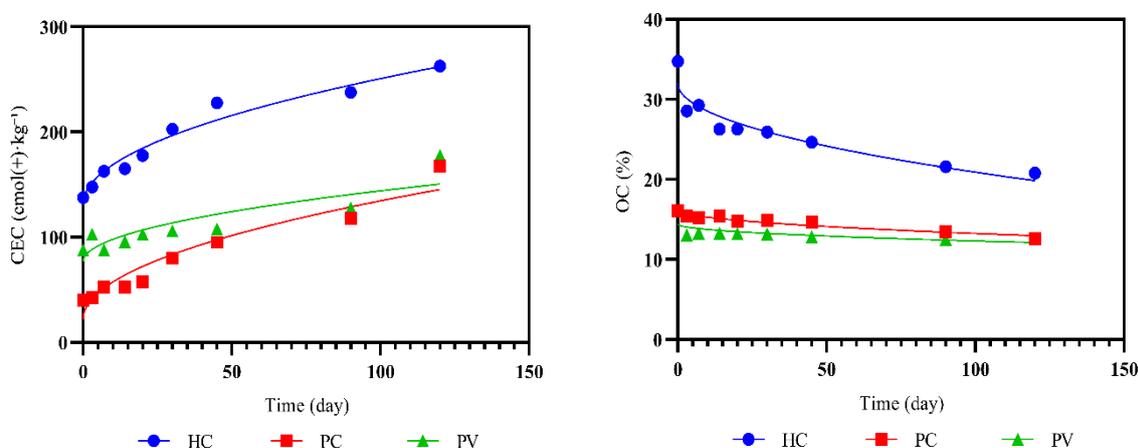
درجه پلیمریزاسیون با استفاده از معادله زیر محاسبه شدند (Paredes et al., 2002; Sánchez-Monedero et al., 1999).  
(Degree of polymerization):  $DP = HA/FA$

در این فرمول: HA (Humic Acid): اسید هیومیک، FA (Fulvic Acid): اسید فولویک

برای تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به تغییرات کربن آلی (OC)، (CEC)، اسیدهیومیک و اسیدفولویک و درجه پلیمریزاسیون در طول زمان، از مدل سینتیکی سهموی (Parabolic Kinetic Model) استفاده شد. این مدل‌ها به درک بهتر نرخ و میزان تجزیه مواد در طول فرآیندهای کمپوست‌سازی و ورمی‌کمپوست‌سازی کمک می‌کنند.

### نتایج و بحث

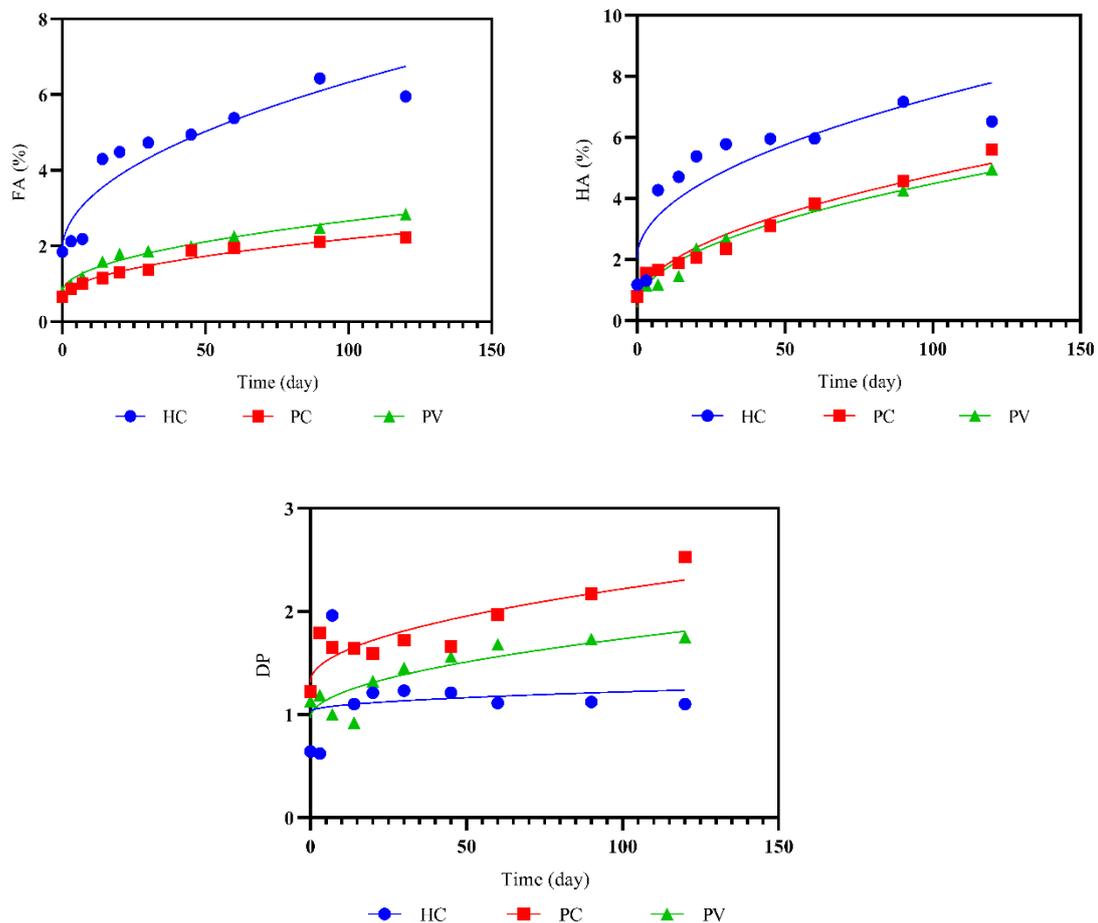
تغییرات کربن آلی در طی فرآیند کمپوست کردن و ورمی‌کمپوست کردن کود مرغی و لجن خمیرکاغذ در شکل ۱ نشان داده شده است. میزان کربن آلی در همه تیمارها روند کاهشی داشت که ناشی از مصرف مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها و تبدیل آن به دی‌اکسیدکربن طی فرآیند تجزیه است. این نتایج مشابه یافته‌های Gao و همکاران (2023) است، که کاهش چشمگیری در OC طی کمپوست کردن کود مرغی مشاهده کردند. بیشترین کاهش OC در کمپوست کود مرغی دیده شد که به دلیل نسبت کم C/N و فعالیت شدید میکروبی، مطابق با گزارش Maffia و همکاران (2024) که بوده آنها ورمی‌کمپوست و کمپوست با مواد آلی غنی فرآیند تجزیه سریع‌تری دارند. در مقابل، ورمی‌کمپوست لجن کاهش کمتری نشان داد که بیانگر پایداری نسبی ترکیبات آلی آن است. برازش معادله پارابولیک (جدول ۱) نشان داد که ضرایب همبستگی ( $R^2$ ) برای OC در همه تیمارها بالا بود (۰/۹۴-۰/۹۰)، که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در توصیف روند تغییرات OC می‌باشد. نتایج نشان داد CEC در همه تیمارها افزایش یافت که این افزایش در کمپوست کود مرغی چشمگیرتر بود (شکل ۱). افزایش CEC در این تیمار به تشکیل گروه‌های عاملی کربوکسیلی و فنولی در طی فرآیند هوموسی شدن نسبت داده می‌شود (Niebles et al., 2025). پس از آن، ورمی‌کمپوست لجن خمیر کاغذ و سپس کمپوست لجن خمیر کاغذ بیشترین مقادیر را نشان دادند. براساس جدول ۱،  $R^2$  برای CEC در کمپوست کود مرغی و ورمی‌کمپوست لجن خمیر کاغذ بالا بود (۰/۹۶ و ۰/۹۷) که انطباق مناسب داده‌های تجربی با مدل پارابولیک را تأیید می‌کند. این افزایش CEC مشابه نتایج Xie و همکاران (2023) است که نشان داد CEC با بلوغ کمپوست به‌طرز معناداری افزایش می‌یابد.



شکل ۱- برازش تغییرات کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی در فرآیندهای کمپوست شدن (C) و ورمی‌کمپوست شدن (V) کود مرغی (H) و لجن خمیر کاغذ (P) با معادله سینتیکی پارابولیک

میزان اسید هیومیک در طول فرآیند کمپوست و همچنین ورمی‌کمپوست شدن افزایش یافت (شکل ۲)، در حالی که مقدار اسید فولویک کاهش نشان داد. افزایش HA و کاهش FA بیانگر فرآیند هوموسی شدن و تبدیل ترکیبات آلی ساده و محلول به ساختارهای آروماتیک پایدارتر است (Maffia et al., 2024). بیشترین افزایش HA و بیشترین کاهش FA در کمپوست کود مرغی دیده شد، که نشان‌دهنده پیشرفت سریع‌تر فرآیند هوموسی شدن و تشکیل ترکیبات پایدار است (Xie et al., 2023). پس از آن، ورمی‌کمپوست لجن خمیر کاغذ و در نهایت کمپوست لجن خمیر کاغذ قرار گرفتند. این الگو بیانگر آن است که اگرچه ورمی‌کمپوست توانست کیفیت لجن خمیر کاغذ را بهبود دهد، اما همچنان در مقایسه با کود مرغی در سطح پایین‌تری قرار

داشت. ضرایب برازش مدل (جدول ۱) نیز نشان دادند که تغییرات HA و FA در کمپوست کود مرغی با دقت بالاتری ( $R^2$  بالای ۰/۹۵) توصیف شدند (Gao et al., 2023). شاخص DP که از نسبت HA به FA محاسبه می‌شود، در همه تیمارها روند افزایشی داشت. بالاترین مقدار DP در کمپوست کود مرغی به‌دست آمد، که نشان‌دهنده تشکیل ترکیبات آروماتیک پایدارتر و بلوغ بیشتر این تیمار است. ورمی‌کمپوست لجن خمیر کاغذ نیز مقدار DP نسبتاً بالایی داشت که برتری آن را نسبت به کمپوست لجن عادی نشان داد. مقادیر  $R^2$  برای DP در ورمی و کمپوست لجن خمیر کاغذ (۰/۷۶-۰/۷۷) بیشتر از کمپوست کود مرغی (۰/۳۲) بود (جدول ۱). این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه مقدار مطلق DP در کود مرغی بالاتر بود، اما تغییرات زمانی در لجن خمیر کاغذ با مدل پارابولیک بهتر برازش شد. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که کمپوست کود مرغی (HC) از نظر شاخص‌های شیمیایی (CEC, OC) و هیومیکی (HA, FA, DP) بهترین عملکرد را داشت. پس از آن، ورمی‌کمپوست لجن خمیر کاغذ (PV) در رتبه دوم و کمپوست لجن خمیر کاغذ (PC) با کمی اختلاف در جایگاه سوم قرار گرفتند. بنابراین، کود مرغی می‌تواند به‌عنوان یک منبع بسیار مؤثر برای تولید کمپوست پایدار معرفی شود، در حالی‌که فرآیند ورمی‌کمپوست شدن می‌تواند کیفیت لجن خمیر کاغذ را بهبود داده و به‌عنوان یک گزینه مکمل در مدیریت پسماندهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد (Niebles et al., 2025; Xie et al., 2023).



شکل ۲- برازش تغییرات زمانی اسیدهای هیومیک (HA) و فولویک (FA) و درجه پلیمریزاسیون (DP) در کمپوست (C) و ورمی کمپوست (V) کود مرغی (H) و لجن خمیر کاغذ (P) با معادله سینتیکی پارابولیک

جدول ۱- ضرایب معادله‌ی پارابولیک در کمپوست و ورمی کمپوست کود مرغی و لجن خمیر کاغذ

درجه پلیمریزاسیون (DP)	اسید فولویک (FA)	اسید هیومیک (HA)	ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)	کربن آلی (OC)	پارامترهای سینتیکی	کمپوست/ورمی کمپوست
۰/۰۱۹	۰/۴۴	۰/۵۳	۱۱/۹۷	-۱/۱۱۶	r	
۱/۰۲۹	۱/۸۸	۲/۰۳۴	۱۳۱/۰	۳۲/۰۵	c	HC
۰/۳۲	۰/۸۸	۰/۷۹	۰/۹۶	۰/۹۰	R <sup>2</sup>	
۰/۳۸	۰/۶۱	۱/۰۱۳	۹/۰۵	۱/۴۰۷	SE	
۰/۰۹۰	۰/۱۶	۰/۴۳	۱۱/۲۹	-۰/۲۹۷	r	
۱/۳۱۵	۰/۶۲	۰/۴۸	۱۱/۶۳	۱۶/۲۲	c	PC
۰/۷۷	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۹۴	R <sup>2</sup>	
۰/۱۸	۰/۱۰	۰/۳۲	۱۳/۷۳	۰/۲۹	SE	
۰/۰۷۶	۰/۱۹	۰/۴۰	۶/۷۳۹	-۰/۲۱۱	r	
۰/۹۶	۰/۷۷	۰/۴۴	۷۶/۵۸	۱۴/۴۱	c	PV
۰/۷۶	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۷۴	۰/۴۹	R <sup>2</sup>	
۰/۱۶	۰/۱۰	۰/۲۸	۱۵/۰۸	۰/۸۲	SE	

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که فرآیندهای کمپوست و ورمی کمپوست کردن تأثیر قابل توجهی بر شاخص‌های شیمیایی و پایداری کود مرغی و لجن خمیر کاغذ دارد. کاهش کربن آلی در همه تیمارها مشهود بود، اما این کاهش در کمپوست کود مرغی سریع‌تر رخ داد که ناشی از نسبت پایین C/N و فعالیت شدید میکروبی بود. ظرفیت تبادل کاتیونی و شاخص‌های هیومیکی نیز در طی فرآیند افزایش یافتند و بیشترین مقدار در کمپوست کود مرغی مشاهده شد. این امر نشان‌دهنده بلوغ بیشتر و تشکیل ترکیبات پایدارتر در این تیمار است. برازش مدل سینتیکی پارابولیک بر داده‌ها نیز نشان داد که این مدل توانایی بالایی در توصیف تغییرات OC، CEC و شاخص‌های هیومیکی دارد. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که کمپوست کود مرغی از نظر کیفیت شیمیایی و پایداری، برتر از ورمی کمپوست و کمپوست لجن خمیر کاغذ است و می‌تواند به‌عنوان یک منبع بسیار مؤثر برای تولید اصلاح‌کننده‌های آلی پایدار معرفی شود.

### فهرست منابع

- Abdullah, R., Ishak, C. F., Kadir, W. R., & Bakar, R. A. (2015). Characterization and Feasibility Assessment of Recycled Paper Mill Sludges for Land Application in Relation to the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8), 9314-9329 .
- Allison, L. (1965). Organic carbon. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*, 9, 1367-1378 .
- Harada, Y., & Inoko, A. (1980). The measurement of the cation-exchange capacity of composts for the estimation of the degree of maturity. *Soil Science and Plant Nutrition*, 26(1), 127-134 .
- 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. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-58441-1\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-58441-1_16)
- Manogaran, M. D., Shamsuddin, R., Mohd Yusoff, M. H., Lay, M., & Siyal, A. A. (2022). A review on treatment processes of chicken manure. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2, 100013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100013>
- Niebles, C. C. C., Hernández, H., Salas, K. M., Hasse, A., & Ramos, C. G. (2025). Comparative evaluation of humic substance production from organic wastes in tropical vermicomposting using *Eisenia foetida*. *Bioresource Technology Reports*, 31, 102292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102292>

- Paredes, C., Bernal, M. P., Cegarra, J., & Roig, A. (2002). Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 85(1), 1-8. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00078-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00078-0)
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Cegarra, J., & Bernal, M. P. (1999). Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of different organic wastes during composting. *Bioresource Technology*, 70(2), 193-201. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00018-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00018-8)
- Schnitzler, W., & Gruda, N. (2002). Quality issues of greenhouse production. VI International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climate :Product and Process Innovation 614 ,
- Shapovalov, Y., Zhadan, S., Bochmann, G., Salyuk, A., & Nykyforov, V. (2020). Dry Anaerobic Digestion of Chicken Manure: A Review. *Applied Sciences*, 10 .(۲۱)
- Swift, R. S. (1996). Organic matter characterization. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 1011-1069 .
- Xie, J., Xia, H., Guan, M., Huang, K., & Chen, J. (2023). Accelerating the humification mechanism of dissolved organic matter using biochar during vermicomposting of dewatered sludge. *Waste Management*, 159, 102-113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.022>

### Evaluation of chemical indices and stability of poultry manure and paper mill sludge compost

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

Agricultural and industrial waste management is one of the major challenges for agriculture and environmental sustainability in Iran. Poultry manure and paper mill sludge, due to their high content of organic matter and nutrients, can cause soil and water pollution if mismanaged. Composting and vermicomposting are considered sustainable approaches that not only reduce environmental impacts but also convert these wastes into valuable soil amendments. The objective of this study was to evaluate the chemical indices and stability of poultry manure compost and paper mill sludge compost and vermicompost, and to compare their final quality. Poultry manure compost, paper mill sludge compost and vermicomposted paper mill sludge were produced for 120 days, and changes in organic carbon (OC), cation exchange capacity (CEC), humic acid (HA), fulvic acid (FA), and degree of polymerization (DP) were described using a parabolic kinetic model. The results showed that OC decreased in all treatments, with the highest reduction observed in poultry manure compost. In contrast, CEC and humification-related indices (HA, FA, and DP) showed the greatest improvement in poultry manure compost. Therefore, poultry manure compost demonstrated the best performance in terms of stability and chemical quality, followed by vermicomposted paper mill sludge and paper mill sludge compost.

**Keywords:** Poultry manure compost, paper mill sludge, vermicomposting, humic substances, parabolic kinetic model