J. Soil Plant Interact. 2026; 17(2): 1–21. https://doi.org/10.47176/jspi.17.2.21921

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Review Article

Humification in Composting and Vermicomposting Processes: Mechanisms, Dynamics, and Kinetic Models

Shno Karimi and Hossein Shariatmadari*

Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
* Corresponding author, Email: shariat@iut.ac.ir

(Received: 31 December 2025; Revised: 22 April 2026; Accepted: 27 April 2026)

Abstract

Humification is a fundamental stage in the stabilization of organic matter and the formation of persistent compounds, such as humic (HA) and fulvic acids (FA), during composting and vermicomposting processes. This stage not only determines the maturity, stability, and final quality of the product but also plays a key role in the carbon biogeochemical cycle and the sustainable management of organic wastes. In this review article, studies published between 2000 and 2025 were examined to analyze various aspects of humification reactions, including their physical, chemical, and microbial mechanisms, commonly applied kinetic and mathematical models, influential factors (such as C/N ratio, feedstock characteristics, and additives), and optimization strategies. The results indicate that composting and vermicomposting follow distinct pathways for phenolic ring formation and polymerization, depending on microbial communities and physical conditions. Additives such as biochar, metal oxides (e.g., Fe_2O_3 and MnO_2), and bio-ash significantly enhance redox-driven reactions and improve the HA/FA ratio. Classical kinetic models, including first-order, second-order, and parabolic models, are useful for predicting temporal changes in the humification index (HI), while artificial intelligence approaches such as artificial neural networks (ANN) and random forest (RF) have shown superior performance in capturing the nonlinear behavior of these reactions. Recent studies highlight that future research will focus on developing multiscale hybrid models, integrating omics-based datasets with kinetic frameworks, utilizing engineered enzymes, and implementing intelligent real-time control systems at an industrial scale. Overall, a deep mechanistic understanding and intelligent modeling of humification processes offer new opportunities for the sustainable bioconversion of organic wastes, carbon emission reduction, and the production of high-quality biofertilizers within a circular bioeconomy framework.

Keywords: Humification, Composting, Vermicomposting, Kinetic models, Artificial intelligence, Humic and fulvic acids.

How to Cite: Karimi, Sh., Shariatmadri, H., 2026. Humification in composting and vermicomposting processes: Mechanisms, dynamics, and kinetic models. J. Soil Plant Interact. 17(2), 1–21 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.17.2.21921

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۵؛ ۱۷(۲): ۲۱-۱، https://doi.org/10.47176/jspi.17.2.21921

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله مروری

هوموسی‌شدن در فرآیندهای تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست: سازوکارها، پویایی و مدل‌های سینتیکی

شنو کریمی و حسین شریعتمداری*

گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: shariat@iut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۷)

چکیده

هوموسی‌شدن یکی از مراحل بنیادی در تثبیت مواد آلی و شکل‌گیری ترکیبات پایداری مانند اسیدهای هیومیک (HA) و فولویک (FA) در فرآیندهای تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست است. این مرحله نه‌تنها تعیین‌کننده بلوغ، پایداری و کیفیت نهایی محصول این فرآیند است، بلکه نقش مهمی در چرخه زیستی کربن و مدیریت پایدار پسماندهای آلی دارد. در این مقاله، با بررسی یافته‌های پژوهش‌های منتشرشده در یک بازه زمانی ۲۵ ساله گذشته (بین سال‌های میلادی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵)، جنبه‌های مختلف واکنش‌های هوموسی‌شدن مانند سازوکارهای فیزیکی، شیمیایی و میکروبی، مدل‌های سینتیکی و ریاضی مورد استفاده، عوامل مؤثر (نسبت C/N مواد اولیه و افزودنی‌ها) و راهکارهای بهینه‌سازی آن‌ها مورد بررسی تحلیلی قرار گرفته است. بررسی یافته‌های پژوهش‌های گذشته نشان داد که کمپوست و ورمی‌کمپوست، بسته به نوع جمعیت میکروبی و شرایط فیزیکی، مسیرهای متفاوتی از حلقوی‌شدن و پلیمره‌شدن ترکیبات فنولی را طی می‌کنند. افزودنی‌هایی مانند زغال زیستی، اکسیدهای فلزی (مانند Fe_2O_3 و MnO_2) و زغال زیستی نقش مؤثری در تسریع واکنش‌های اکسایش–احیا و بهبود نسبت اسید هیومیک به اسید فولویک دارند. مدل‌های سینتیکی کلاسیک مانند مرتبه اول، دوم و پارابولیک، در پیش‌بینی تغییرات زمانی شاخص هوموسی‌شدن (HI) مفیدند، اما مدل‌های هوش مصنوعی از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و جنگل تصادفی (RF) توانسته‌اند رفتار غیرخطی این واکنش‌ها را با دقت بیشتری تعریف کنند. بر اساس پژوهش‌های اخیر، آینده پژوهش در این حوزه بر توسعه مدل‌های هیبریدی چندمقیاسی، ادغام داده‌های اومیکس با مدل‌های سینتیکی، به‌کارگیری آنزیم‌های مهندسی‌شده و استفاده از سامانه‌های هوشمند کنترل فوری در مقیاس صنعتی متمرکز است. در مجموع، درک عمیق از سازوکارها و مدل‌سازی هوشمند واکنش‌های هوموسی‌شدن، مسیر تازه‌ای برای بازیافت زیستی پسماندهای آلی، کاهش انتشار کربن، و تولید کودهای زیستی با کیفیت خوب در چارچوب اقتصاد زیستی چرخشی فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: هوموسی‌شدن، کمپوست، ورمی‌کمپوست، مدل‌های سینتیکی، هوش مصنوعی، اسیدهای هیومیک و فولویک.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

اهمیت واکنش‌های هوموسی‌شدن در مدیریت پسماندهای آلی

هوموسی‌شدن[1] یکی از مهم‌ترین مراحل در تبدیل پسماندهای آلی به مواد پایدار و غنی از کربن است. این مرحله، حلقه‌ای اساسی از چرخه کربن در اکوسیستم‌های خاکی و یکی از شاخص‌های کلیدی بلوغ و پایداری کمپوست محسوب می‌شود (Kulikowska, 2016; Karimi et al., 2024a; Karimi et al., 2025a). در فرایند هوموسی‌شدن، ترکیبات آلی ساده و ناپایدار حاصل از تجزیه مواد گیاهی و جانوری، از راه مجموعه‌ای از واکنش‌های اکسیدشدن، پلیمریزه‌شدن و تراکم[2] به ترکیبات آروماتیک با وزن مولکولی و پایداری زیاد تبدیل می‌شوند که به‌طور کلی به‌عنوان مواد هوموسی[3] شناخته می‌شوند. در سال‌های اخیر، به‌دلیل افزایش حجم پسماندهای کشاورزی، دامی و صنعتی و ضرورت بازیافت پایدار مواد آلی، شناخت دقیق واکنش‌های هوموسی‌شدن و عوامل مؤثر بر آن اهمیت زیادی یافته است (Bian et al., 2024). تشکیل مواد هوموسی نه تنها موجب بهبود کیفیت کمپوست و افزایش گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) آن می‌شود، بلکه از دیدگاه زیست‌محیطی نیز در تثبیت کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش بسزایی دارد (Waqas et al., 2023; Karimi and Haghighi, 2025). به بیان دیگر، سطح تکامل واکنش‌های هوموسی‌شدن ارتباط مستقیمی با شاخص‌های بلوغ، ثبات بیوشیمیایی و کیفیت نهایی کمپوست دارد. ازاین‌رو، مدیریت علمی این مرحله، کلید اصلی تولید کودهای آلی با کیفیت برتر و حداقل آثار زیست‌محیطی محسوب می‌شود (Kulikowska et al., 2015a). در چارچوب اقتصاد چرخشی، هوموسی‌شدن به‌عنوان یکی از مؤثرترین مسیرها برای بازیابی عناصر غذایی و کاهش خطر آلودگی ناشی از پسماندها شناخته می‌شود (Li et al., 2022). بنابراین، پژوهش‌های اخیر به‌ویژه در حوزه‌های کمپوست و ورمی‌کمپوست کردن، به بررسی سازوکارهای شیمیایی و زیستی کنترل‌کننده این فرآیند پرداخته تا بتوانند زمان فرآیند را کاهش داده و بازده تولید مواد هوموسی را افزایش دهند.

سازوکارهای هوموسی‌شدن در کمپوست و ورمی‌کمپوست

اگرچه اصول کلی هوموسی‌شدن در تمامی سامانه‌های تبدیل زیستی مواد آلی مشابه است، مسیرهای غالب واکنش و سرعت تحول ساختاری در کمپوست و ورمی‌کمپوست تفاوت‌های قابل‌توجهی نشان می‌دهد. در کمپوست‌سازی، پیشرفت هوموسی‌شدن عمدتاً به فعالیت ریزجانداران هوازی و اکسایش تدریجی ترکیبات لیگنوسلولزی وابسته است. این فرآیند شامل شکستن ساختارهای پیچیده گیاهی، تشکیل متابولیت‌های میانی، و در نهایت بازآرایی آن‌ها به ترکیبات پایدارتر است که سهم بیشتری از ساختارهای آروماتیک دارند (García-Gómez et al., 2005; Bernal et al., 2009).

در مقابل، ورمی‌کمپوست یک سیستم زیستی-فیزیکی پیچیده‌تر محسوب می‌شود که در آن فعالیت کرم‌های خاکی نقش تعیین‌کننده‌ای در دگرگونی مواد آلی ایفا می‌کند. عبور مواد از دستگاه گوارش کرم‌ها موجب خردشدگی مکانیکی، افزایش سطح تماس میکروبی و تحریک فعالیت آنزیم‌های اکسایشی می‌شود. این شرایط، فراهمی زیستی ترکیبات فنولی و لیگنینی را افزایش داده و مسیرهای تبدیل آن‌ها به ساختارهای پایدار را تسریع می‌کند (Gómez-Brandón et al., 2010; Domínguez and Gómez-Brandón, 2012). پژوهش‌های طیف‌سنجی نشان داده‌اند که محصولات ورمی‌کمپوست دارای نسبت بیشتری از گروه‌های عاملی پایدار و میزان بیشتری از آروماتیک‌شدن هستند، که بیانگر تسریع در فرآیند پایدارسازی مواد آلی است (Maffia et al., 2025).

تفاوت در ترکیب جامعه میکروبی و شرایط فیزیکی و شیمیایی حاکم بر بستر موجب می‌شود فرآیند تجزیه و تبدیل مواد آلی در ورمی‌کمپوست با یکنواختی بیشتری انجام شده و در

1- Humification
2- Condensation
3- Humic substances

برخی مراحل نیز با سرعت بیشتری نسبت به کمپوست پیش رود. این ویژگی به‌خصوص در مراحل ابتدایی دگرگونی مواد آلی مشاهده می‌شود، جایی که برهمکنش مستقیم کرم‌ها با بستر موجب تسریع تجزیه ترکیبات ناپایدار و فراهم‌شدن پیش‌سازهای هوموسی می‌شود (Edwards and Arancon, 2005; Cerda et al., 2018). در نتیجه، درحالی‌که هر دو سیستم به تشکیل مواد هوموسی پایدار منجر می‌شوند، تفاوت در مسیرهای زیستی و فیزیکی می‌تواند بر ساختار نهایی مواد هوموسی، سرعت بلوغ و کیفیت محصول تأثیرگذار باشد. درک این تفاوت‌ها برای تفسیر رفتار سینتیکی فرآیند و طراحی راهبردهای مدیریتی مؤثر در تولید کودهای آلی اهمیت اساسی دارد.

ماهیت و سازوکارهای مولکولی واکنش‌های هوموسی‌شدن

هوموسی‌شدن در اصل یک زنجیره پیچیده از واکنش‌های زیستی و شیمیایی است که در مسیر تجزیه مواد آلی رخ می‌دهد. مواد اولیه در این واکنش‌ها شامل لیگنین، سلولز، همی‌سلولز، پروتئین‌ها و چربی‌ها هستند که تحت تأثیر اکسیدکننده میکروبی، به ترکیبات فنولی، کوئینونی و اسیدهای آلی تبدیل می‌شوند (Kulikowska et al., 2015b). این ترکیبات سپس از راه پلیمریزه‌شدن غیرآنزیمی و واکنش‌های تراکمی [۴] ترکیبات آروماتیک بزرگی را تشکیل می‌دهند که اساس ساختار اسیدهای هیومیک (HA) و فولویک (FA) را می‌سازند (Xu et al., 2024). در این میان، ریزجانداران و آنزیم‌های خارج‌سلولی آن‌ها (مانند لاکاز، پراکسیداز، و فنول‌اکسیداز) نقش اصلی را در اکسیدکردن لیگنین و ایجاد پیوندهای کوئینونی دارند (Li et al., 2022). پژوهش‌های جدید نشان می‌دهد که ریزجانداران آمونیاک‌ساز و نیتریفیکاسیون‌کننده، با القای شرایط اکسیدکردن و تغییر مسیرهای اکسایش–احیا، نرخ پلیمریزه‌کردن ترکیبات فنولی را افزایش می‌دهند (Xu et al., 2024). این پویایی مولکولی، پیوند بین دگرگونی‌های شیمیایی و جامعه میکروبی را در تعیین کیفیت مواد هوموسی نهایی آشکار می‌سازد. از نظر ساختاری، مواد هوموسی حاصل از این فرآیند به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: FA با وزن مولکولی کم و قطبیت زیاد، HA با وزن مولکولی زیاد و ساختار آروماتیک پیچیده، و هومین [۵] که جزء نامحلول در باز است. نسبت بین این سه جزء، به‌ویژه نسبت HA/FA یا شاخص هوموسی‌شدن برابر HI = HA / (HA + FA)، شاخص‌های مهمی برای سنجش میزان پیشرفت هوموسی‌شدن محسوب می‌شوند (Sierra et al., 2013).

هوموسی‌شدن در کمپوست و ورمی‌کمپوست: مقایسه فرآیندها

کمپوست و ورمی‌کمپوست‌کردن هر دو مسیرهای زیستی برای پایداری مواد آلی هستند، اما از نظر دما، پویایی میکروبی و مسیرهای بیوشیمیایی تفاوت اساسی دارند. در فرآیند کمپوست کردن، بیشتر واکنش‌ها در دماهای زیاد (۴۵–۷۰ °C) و بیشتر تحت اثر ریزجانداران گرمادوست [۶] رخ می‌دهند که به تجزیه سریع ترکیبات آلی و در ادامه به هوموسی‌شدن گرمایی منجر می‌شود (Abbasi et al., 2009). در مقابل، ورمی‌کمپوست‌کردن در دماهای کم (۲۵–۳۰ °C) و در حضور باکتری‌های مزوفیل و کرم‌های خاکی (مانند گونه *Eisenia fetida*) انجام می‌شود. کرم‌ها با افزایش سطح تماس مواد آلی و ترشح موکوس و آنزیم‌ها، فرآیند میکروبی را تسریع کرده و باعث هوموسی‌شدن بیولوژیک می‌شوند (Dores-Silva et al., 2018). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در ورمی‌کمپوست، نسبت HA/FA معمولاً بیشتر از کمپوست معمولی است و سرعت تبدیل لیگنین به ساختارهای آروماتیک نیز افزایش می‌یابد (Zhu et al., 2025). به‌طور تحلیلی، می‌توان گفت که کمپوست بیشتر موجب تثبیت شیمیایی و حذف ترکیبات ناپایدار می‌شود، درحالی‌که ورمی‌کمپوست با ارتقای تشکیل ترکیبات حلقوی [۷] و تشکیل گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار (کربوکسیلیک، فنولی، آمیدی) کیفیت زیستی و کشاورزی بیشتری ایجاد می‌کند (Kulikowska et al., 2015b). همچنین،

4- Condensation reactions
5- Humin
6- Thermophile
7- Aromatic

عوامل محیطی مانند رسانایی الکتریکی و رطوبت می‌توانند مسیرهای میکروبی و سرعت هوموسی‌شدن را تغییر دهند (Xia et al., 2025). Bian et al. (2024) نیز نشان دادند که افزودنی‌هایی مانند زغال زیستی، MnO_2 و رس‌های آهن‌دار می‌توانند پلیمریزه‌شدن ترکیبات حلقوی را تسریع کرده و شاخص هوموسی‌شدن را تا دو برابر افزایش دهند. در مجموع، می‌توان بیان نمود فرآیند تولید کمپوست موجب افزایش پایداری شیمیایی (کاهش مواد ناپایدار) می‌شود، درحالی‌که فرآیند تولید ورمی‌کمپوست، با افزایش پایداری زیستی و آروماتیک، مواد هوموسی با کیفیت بهتر و گروه‌های عاملی بیشتر (کربوکسیلیک، فنولی، آمیدی) تولید می‌کند (Semenov et al., 2013; Karimi et al., 2026).

مدل‌سازی و رویکردهای سینتیکی در بررسی هوموسی‌شدن

نخستین مدل‌های ریاضی در فرآیند کمپوست‌کردن توسط Hamelers (2004) ارائه شد. در چارچوب این مدل‌ها، امکان توصیف سینتیک تجزیه‌ی مواد آلی با استفاده از مدل‌های سینتیکی مرتبه اول و مرتبه دوم مورد بررسی قرار گرفت. از آن زمان تاکنون، مدل‌های گوناگونی مانند مدل‌های لگاریتمی، توانی[8]، و مدل پارابولیک برای توصیف هوموسی‌شدن پیشنهاد شده‌اند (Ebrahimzadeh et al., 2017). این مدل‌ها معمولاً از داده‌های تغییرات کربن آلی کل، نسبت C/N و محتوای HA و FA برای تعریف روند تغییرات استفاده می‌کنند.

بررسی Zhang et al. (2012) یکی از نخستین پژوهش‌هایی بود که پویایی ماده آلی را در کمپوست‌های مختلف با مدل‌های چندجزئی[9] بررسی کرد. در سال‌های اخیر نیز مدل‌های ترکیبی مانند مدل‌های لجیستیک–توانی و مدل‌های ساختاری مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی برای توصیف سرعت هوموسی‌شدن پیشنهاد شده‌اند (De Medina-Salas et al., 2022; Amlinger et al., 2008).

در کنار مدل‌های ریاضی، روش‌های آماری نوین مانند مدل‌سازی معادله‌های ساختاری (SEM)[10] برای شناسایی روابط بین عوامل میکروبی، شیمیایی و سینتیکی در تشکیل هوموس به‌کار گرفته شده است (Xu et al., 2024). این مدل‌ها امکان تحلیل هم‌زمان اثر متغیرهایی همچون دما، فعالیت آنزیمی و ترکیب میکروبی را فراهم کرده‌اند. به‌طورکلی، مدل‌سازی سینتیکی درک عمیق‌تری از پویایی زمانی هوموسی‌شدن فراهم نموده و به طراحی بهینه فرآیندهای کمپوست و ورمی‌کمپوست از نظر زمان، شرایط محیطی و افزودنی‌ها کمک می‌نماید (Xu et al., 2024).

شکاف‌های پژوهشی و هدف مقاله

با وجود پیشرفت‌های گسترده در شناخت فرآیندهای کمپوست و ورمی‌کمپوست کردن، هنوز هم ارتباط بین سازوکارهای مولکولی هوموسی‌شدن ناشناخته است (Dey Chowdhury et al., 2023). اغلب پژوهش‌ها به یکی از دو جنبه‌ی ساختار شیمیایی یا مدل‌سازی عددی محدود شده‌اند، درحالی‌که فرآیند واقعی هوموسی‌شدن ترکیبی از واکنش‌های بیوشیمیایی و تحولات سینتیکی است. علاوه بر این، اثر برهمکنش بین جوامع میکروبی و مواد معدنی (مانند Fe_2O_3 و رس‌ها) بر پویایی هوموس هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است (Zhang et al., 2024).

ازاین‌رو، هدف پژوهش حاضر بررسی جامع و یکپارچه درباره هوموسی‌شدن در فرآیندهای تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست با تمرکز بر: (۱) سازوکارهای شیمیایی و زیستی تشکیل مواد هوموسی، (۲) پویایی زمانی و سینتیکی این فرآیند، و (۳) مدل‌های ریاضی و نوین پیش‌بینی هوموسی‌شدن است. این مقاله تلاش می‌کند با ادغام داده‌های اخیر (بین سال‌های میلاد ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۵) از پژوهش‌های مولکولی، میکروبی و مدل‌سازی، چارچوبی یکپارچه برای فهم بهتر تبدیل مواد آلی به هوموس

8- Power law
9- Multi-compartment
10- Structural equation modeling

ارائه دهد، فرآیندی که در قلب پایداری زیست‌محیطی و مدیریت هوشمند پسماندهای آلی جای دارد.

سازوکارهای شیمیایی و زیستی هوموسی‌شدن در تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست

هوموسی‌شدن را می‌توان یکی از پیچیده‌ترین و چند وجهی‌ترین فرآیندهای بیوشیمیایی در تبدیل مواد آلی دانست (Senesi and Plaza, 2007). این فرآیند شامل مجموعه‌ای از واکنش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی است که طی آن مولکول‌های آلی ساده (مانند قندها، اسیدهای آمینه و اسیدهای چرب) به ساختارهای پلیمری پیچیده با وزن مولکولی زیاد و ساختار حلقوی تبدیل می‌شوند (Zech et al., 1997). در واقع، هوموسی‌شدن به‌مفهوم «بلوغ و پایداری» ماده آلی است؛ زیرا در پایان آن، ترکیباتی ایجاد می‌شود که مقاومت زیادی در برابر تجزیه داشته و قادرند کربن را در خاک برای مدت‌های زیاد ذخیره کنند (Bian et al., 2024).

مسیرهای کلی واکنش‌های شیمیایی

از دیدگاه شیمیایی، هوموسی‌شدن شامل سه مرحله اصلی به‌شرح زیر است (Li et al., 2022).

الف) مرحله اکسیداسیون و تخریب لیگنین:

در این مرحله، لیگنین، سلولز و همی‌سلولز تحت اثر آنزیم‌هایی چون لاکاز[11] و لیگنین‌پراکسیداز تجزیه می‌شوند. محصولات اولیه در این مرحله شامل ترکیبات فنولی، کوئینونی و اسیدهای آلی هستند.

ب) مرحله پلیمریزه‌شدن و تراکم[12]:

در این مرحله، ترکیبات فنولی حاصل، با شرکت در واکنش‌های کوئینون–آمینو یا کوئینون–فنول به مولکول‌های بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند. این واکنش‌ها بیشتر در محیط‌های نیمه‌اکسیداتیو و حضور فشار جزئی اکسیژن رخ می‌دهند (Xu et al., 2024).

ج) مرحله تشکیل ترکیبات حلقوی و پایداری:

در پایان، حلقه‌های آروماتیک از راه تراکم پی‌درپی و حذف گروه‌های قطبی تشکیل می‌شوند. در نتیجه، ماده آلی از ساختارهای خطی به حلقوی تبدیل شده و ترکیباتی با رنگ تیره، وزن مولکولی و پایداری زیاد (یعنی اسید هیومیک و هیومین) به وجود می‌آید (Zhang et al., 2024). در طی این مراحل، نسبت هیدروژن به کربن کاهش می‌یابد که بیانگر افزایش درجه حلقوی‌شدن و پایداری ساختار است (Abbasi et al., 2009).

نقش آنزیم‌ها و واکنش‌های اکسیداتیو-پلیمریزاسیون

یکی از عوامل کلیدی در هوموسی‌شدن، فعالیت آنزیم‌های اکسیداتیو است. آنزیم‌های لاکاز، منگنز پراکسیداز و لیگنین پراکسیداز با اکسیدکردن گروه‌های فنولی در لیگنین و تولید رادیکال‌های آزاد، مسیر پلیمریزاسیون کوئینونی را آغاز می‌کنند. در حضور اکسیژن، این رادیکال‌ها به‌صورت خودبه‌خودی با یکدیگر ترکیب شده و شبکه‌های حلقوی را تشکیل می‌دهند (Li et al., 2022).

پژوهش‌ها نشان داده است که افزودن محرک‌های آنزیمی مانند Mn^{2+} و Cu^{2+} می‌تواند فعالیت این آنزیم‌ها را افزایش داده و شاخص هوموسی‌شدن (HI) را تا ۳۰ درصد ارتقاء دهد (Zhang et al., 2024). در پژوهش Li et al. (2022) استفاده از آنزیم لاکاز در کمپوست‌کردن منجر به افزایش قابل‌توجه محتوای گروه‌های کربونیل و کربوکسیل در اسید هیومیک شد که بیانگر افزایش واکنش‌های اکسیداتیو بود. در ورمی‌کمپوست‌کردن، فعالیت آنزیمی نه تنها از سوی ریزجانداران بلکه از راه ترشحات گوارشی کرم‌های خاکی تقویت می‌شود. موکوس و ترشحات روده‌ای *Eisenia fetida* دارای آنزیم‌هایی مانند پروتئاز، آمیلاز و سلولاز است که منجر به تسریع تجزیه اولیه و افزایش سوبسترا برای واکنش‌های پلیمریزه‌شده بعدی می‌شود (Dores-Silva et

11- Laccase

12- Condensation

al., 2018). به همین دلیل، ورمی‌کمپوست معمولاً نسبت HA/FA بزرگ‌تری دارد، زیرا مرحله تراکم و حلقوی‌شدن با سرعت بیشتری رخ می‌دهد (Zhu et al., 2025).

نقش جوامع میکروبی در هوموسی‌شدن

جامعه میکروبی[13] کمپوست نقش مرکزی در تنظیم مسیرهای شیمیایی هوموسی‌شدن دارد. در مراحل اولیه، باکتری‌های تجزیه‌کننده سلولز مانند *Bacillus, Cellulomonas* و *Thermobifida* فعال هستند، درحالی‌که در مراحل پایانی، قارچ‌های لیگنولیتیک مانند *Trametes versicolor* و *Aspergillus fumigatus* غالب می‌شوند (Waqas et al., 2023).

در فرآیند تولید ورمی‌کمپوست، میکروفلورای درون مجرای گوارشی کرم‌ها غنی از باکتری‌های *Pseudomonas, Actinobacteria* و *Nocardia* است که تولیدکننده آنزیم پراکسیداز هستند (Dey Chowdhury et al., 2023). یافته‌های Zhu et al. (2025) نشان داده است که حضور باکتریوفاژها در بستر ورمی‌کمپوست باعث بازآرایی میکروبی و افزایش فعالیت ژن‌های مرتبط با اکسیداسیون لیگنین شد که در نهایت هوموسی‌شدن را تسریع کرد.

از نظر اکولوژیکی، جوامع میکروبی دو نقش کلیدی دارند: (۱) تولید متابولیت‌های فنولی و اسیدی که پیش‌ساز مواد هوموسی‌اند، و (۲) تنظیم توازن بین تجزیه و تراکم از راه تغییر شرایط اکسید و احیا و pH محیط. به‌عنوان مثال، در فرآیند تولید کمپوست کود دامی، افزایش غلظت نیتروژن معدنی (NH_4^+، NO_3^-) سبب اکسیداسیون بیشتر ترکیبات فنولی و در نتیجه افزایش غلظت اسید هیومیک می‌شود (Xu et al., 2024).

اثر مواد معدنی و افزودنی‌ها در مسیر هوموسی‌شدن

افزودن مواد معدنی[14] یکی از مؤثرترین روش‌ها برای اصلاح مسیرهای شیمیایی هوموسی‌شدن است. پژوهش Zhang et al., (2024) نشان داد که افزودن Fe_2O_3 در ترکیب با زغال زیستی، تشکیل ترکیبات حلقوی را تقویت نموده و نسبت HI را تا ۲/۷ درصد افزایش می‌دهد. در مقابل، غلظت‌های زیاد نمک یا pH قلیایی می‌تواند فرآیند تراکم را کند نماید، زیرا باعث یونیزه‌شدن گروه‌های کربوکسیلیک و کاهش برهم‌کنش بین مولکول‌های فنولی می‌شود (Xia et al., 2025).

تفاوت سازوکار هوموسی‌شدن در کمپوست و ورمی‌کمپوست

در ورمی‌کمپوست‌کردن، فعالیت فیزیکی کرم‌ها سطح تماس و فراهمی میکروبی را افزایش داده و محیطی با شرایط رطوبتی مناسب فراهم می‌کند. از سوی دیگر، در کمپوست‌کردن، افزایش دما سبب نابودی برخی ریزجانداران حساس و افزایش نرخ واکنش‌های اکسیداتیو می‌شود (Abbasi et al., 2009). نتیجه نهایی این است که در کمپوست، مواد آلی بیشتر به پایداری گرمایی می‌رسند، اما در ورمی‌کمپوست، پایداری زیستی و شیمیایی بیشتری حاصل می‌شود. این تفاوت‌ها در سازوکار، دلیل اصلی تفاوت در کیفیت و شاخص‌های هوموسی‌شدن دو نوع فرآیند است (Dey Chowdhury et al., 2023).

مدل‌سازی مولکولی هوموسی‌شدن

پیشرفت‌های اخیر در طیف‌سنجی (FTIR، ^{13}C-NMR، XPS) و مدل‌سازی مولکولی، درک عمیق‌تری از مسیرهای واکنشی هوموسی‌شدن فراهم کرده‌اند. پژوهش‌های Xu et al. (2024) و Bian et al. (2024) با استفاده از مدل‌های ساختاری (SEM) نشان دادند که نسبت لیگنین به سلولز و فعالیت لاکاز وابسته است که دو متغیر کلیدی تعیین‌کننده نرخ هوموسی‌شدن هستند. علاوه بر این، مدل‌های سینتیکی از جمله مدل‌های لوجیستیک، مرتبه دوم و پارابولیک، به‌صورت فزاینده‌ای با داده‌های مولکولی تلفیق می‌شوند تا مسیرهای واکنش به‌صورت کمّی تبیین شود. این ادغام دیدگاه‌های سینتیکی و مولکولی، پایه‌ای برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده کیفیت نهایی کمپوست را فراهم کرده است (Ebrahimzadeh et al., 2017; De Medina-Salas et al., 2022).

13- Microbiome

14- Mineral amendments

تحلیل یکپارچه برهمکنش مسیرهای شیمیایی و زیستی در هوموسی‌شدن

اگرچه هوموسی‌شدن اغلب به‌صورت سلسله‌ای از واکنش‌های شیمیایی و زیستی توصیف می‌شود، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند این فرآیند در عمل به‌صورت یک شبکه پویا و همبسته عمل می‌کند که هر مؤلفه می‌تواند شکل و سرعت مسیرهای دیگر را تغییر دهد. به بیان دیگر، هوموسی‌شدن نه یک مسیر خطی ساده، بلکه یک ساختار چندقاعده‌ای وابسته به شرایط محیطی و زیستی است (Knicker, 2011; Lehmann and Kleber, 2015). در این چارچوب، نقش آنزیم‌های اکسیداتیو مانند پراکسیدازها و لاکازها نه تنها در تجزیه لیگنین، بلکه در تولید واسطه‌های فنولی تعیین‌کننده مسیرهای بعدی است (Bugg et al., 2011). این آنزیم‌ها می‌توانند شدت و نوع واکنش‌های پلیمریزاسیون را تحت تأثیر قرار دهند، زیرا فعالیت آن‌ها به فراوانی جمعیت میکروبی و فراهمی بستر وابسته است (Sinsabaugh, 2010). بنابراین، مسیرهای شیمیایی و فعالیت زیستی درهم تنیده شده‌اند و نمی‌توان یکی را بدون دیگری تحلیل کرد.

در سامانه‌های کمپوست، افزایش دما و دگرگونی‌های فیزیکی–شیمیایی محیط سبب می‌شود جامعه میکروبی و فعالیت آنزیمی به‌طور مداوم بازآرایی شود. این بازآرایی نه‌تنها سرعت واکنش‌های اولیه را تغییر می‌دهد، بلکه توزیع پاسخ‌های میکروبی در زمان را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Blagodatskaya and Anderson, 1998). برای نمونه، دگرگونی‌های میکروبی که از تجمع *Bacillus* و *Actinobacteria* در فاز گرمایی کمپوست حکایت دارند، با افزایش نرخ تجزیه لیگنین و تغییر فراوانی واسطه‌های کربنی همراه بوده است (Ryckeboer et al., 2003). در مقابل، در تولید ورمی‌کمپوست فرآیند هوموسی‌شدن همزمان تحت تأثیر چندین عامل زیستی مانند برهمکنش مستقیم میان کرم‌های خاکی و ریزجانداران بستر، دگرگونی‌های میکروبی در مجرای گوارشی کرم‌ها و تسهیل تماس سطحی بین ریزجاندار و سوبسترا (Aira et al., 2007; Arancon and Edwards, 2011) قرار دارد. این شرایط موجب می‌شود که مسیرهای تسریع‌شده تجزیه و تشکیل ساختارهای آروماتیک برای ورمی‌کمپوست مشخص و متمایز از کمپوست کلاسیک باشد (Edwards et al., 2010; Kumari and Kumari, 2025).

تحلیل یکپارچه شبکه واکنش‌ها نشان می‌دهد که شاخص‌های رایج هوموسی‌شدن، مانند نسبت HA/FA یا شاخص معدنی–شدن، در واقع بازتاب توازن میان مسیرهای تخریب، بازترکیب، و تثبیت، نه صرفاً خروجی یک توالی خطی واکنش، هستند (Cotrufo et al., 2013; Plaza et al., 2013). بنابراین، تفسیر تغییرات این شاخص‌ها بدون در نظر گرفتن برهمکنش بین مؤلفه‌های زیستی، شیمیایی و محیطی می‌تواند به برداشت‌های نادرست منجر شود (Post et al., 1996). برای درک هوموسی–شدن، لازم است داده‌های ساختاری (طیفی)، میکروبی و سینتیکی به‌صورت یکپارچه در چارچوب‌های مدل جدیدتر تحلیل شوند تا بتوان ساختار شبکه‌های واکنشی و نقاط کنترل آن‌ها را استخراج کرد. چنین رویکردی نه‌تنها برای تحلیل سازوکارها ارزشمند است، بلکه می‌تواند اساس مدل‌های پیش‌بینی‌کننده برای سامانه‌های مختلف کمپوست و ورمی‌کمپوست را فراهم سازد.

مدل‌های سینتیکی و ریاضی هوموسی‌شدن در تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست

مدل‌سازی سینتیکی [15] در پژوهش‌های کمپوست و ورمی‌کمپوست یکی از مؤثرترین ابزارها برای کمّی‌سازی پویایی مواد آلی و پیش‌بینی کیفیت نهایی کمپوست است (Campbell and Paustian, 2015). هدف اصلی این مدل‌ها، توصیف تغییرات زمانی ویژگی‌هایی مانند کربن آلی کل (TOC)، نسبت C/N، اسیدهای هیومیک (HA) و فولویک (FA) در طول فرآیند است. همان‌طور که Hamelers (2004) در مرور جامع خود اشاره کرد، رفتار سینتیکی کمپوست‌کردن ترکیبی از چند واکنش متوالی و موازی است که شامل اکسیداسیون مواد آلی قابل‌تجزیه، تبدیل مواد نیمه‌پایدار به ترکیبات حلقوی و در نهایت پلیمریزاسیون مواد

15- Kinetic modeling

هوموسی است. از آن زمان تاکنون، ده‌ها مدل ریاضی توسعه یافته است که یا بر مبنای روش‌های استقرایی[16] و یا مبتنی بر سازوکارهای واکنش[17] هستند (Smith, 1979).

مدل‌های سینتیک تجربی[18]

مدل‌های تجربی معمولاً از روابط ساده ریاضی برای برازش بر داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌کنند و فرض رایج آن است که سرعت واکنش تابعی از زمان است.

الف) مدل مرتبه اول[19]

$$C_t = C_0 e^{-k t} \quad (۱)$$

که در این رابطه، C_t مقدار کربن آلی (یا ویژگی انتخابی) در زمان t (برحسب % یا $g\ kg^{-1}$ یا $mg\ kg^{-1}$)، C_0 مقدار اولیه آن (برحسب % یا $g\ kg^{-1}$ یا $mg\ kg^{-1}$) و k ثابت سرعت واکنش (day^{-1}) است. این مدل، که نخستین بار برای کمپوست توسط Hamelers (2004) استفاده شد، فرض می‌کند که سرعت کاهش ماده آلی تنها تابعی از مقدار باقی‌مانده آن است. این مدل با وجود سادگی، در بسیاری از پژوهش‌ها برای مراحل ابتدایی فرآیند تجزیه مواد کاربرد دارد (Saypariya et al., 2024).

ب) مدل مرتبه دوم[20]

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_0} + kt \quad (۲)$$

که در این رابطه، ضرایب همان تعاریف پیشین را دارند. در این مدل، فرض بر این است که واکنش‌ها شامل دو مؤلفه هم‌زمان بوده و معمولاً ترکیبات کربوهیدراتی و نیتروژنی با یکدیگر برهمکنش دارند. پژوهش Ebrahimzadeh et al. (2017) نشان داد که در بسیاری از کمپوست‌های کود دامی، مدل مرتبه دوم دارای ضریب تبیین (R^2) بیشتر از ۰/۹۵ بوده و بهتر از مدل مرتبه اول تغییرات کربن آلی کمپوست را توصیف می‌کند.

ج) مدل لگاریتمی و نمایی تعدیل‌شده

برای توصیف مراحل کندتر و طولانی‌تر فرایند، از مدل لگاریتمی استفاده می‌شود:

$$C_t = a + b \ln(t) \quad (۳)$$

که در این رابطه، پارامترهای a و b از برازش مدل بر داده‌های تجربی به‌دست می‌آیند. این مدل بیشتر برای مراحل پایدارسازی[21] کاربرد دارد که کاهش مواد آلی با آهنگ آهسته‌تری صورت می‌گیرد (De Medina-Salas et al., 2022).

مدل‌های پارابولیک و توانی[22]

مدل پارابولیک به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین مدل‌ها برای توصیف فرآیندهای غیرخطی هوموسی‌شدن شناخته می‌شود.

الف) مدل پارابولیک (Parabolic model)

$$C_t = a + bt^{\frac{1}{2}} \quad (۴)$$

که در این رابطه، C_t مقدار متغیر مورد بررسی در زمان t، a عرض از مبدأ، b ضریب مدل پارابولیک و بیانگر سرعت نسبی تشکیل مواد هیومیکی، و t زمان فرایند (day) است. پژوهش‌های Ebrahimzadeh et al. (2017) و Karimi et al. (2024b) نشان دادند که مدل پارابولیک قادر است افزایش تدریجی HA و کاهش FA با گذشت زمان را با دقت زیاد ($R^2 > 0.98$) برآورد کند.

ب) مدل توان زمانی[23]

$$C_t = a\, t^n \quad (۵)$$

که در این رابطه، n شاخص سرعت فرآیند است. در کمپوست‌هایی که افزودنی‌های معدنی (مانند Fe_2O_3 یا MnO_2) دارند، a ضریب مقیاس یا ثابت مدل (با واحدی وابسته به مقدار n)، و مقدار n معمولاً بین ۰/۴ تا ۰/۶ گزارش شده که نشانگر سرعت فرآیند در مراحل اولیه است (Zhang et al., 2024).

16- Inductive models
17- Mechanistic models
18- Empirical kinetic models
19- First-order model
20- Second-order model
21- Stabilization
22- Parabolic and power models
23- Power-law model

مدل‌های چندجزئی و دو-مرحله‌ای[۲۴]

به‌دلیل محدودیت‌های مدل‌های موجود یا برای بیان و فهم بهتر واکنش‌های فرآیند هوموسی‌شدن، مدل‌های مختلفی به‌تدریج و در طول زمان توسعه یافته‌اند. از آنجا که ماده آلی شامل اجزای مختلفی است که با سرعت‌های متفاوتی تجزیه و پایدار می‌شوند، مدل‌های چندجزئی توسعه یافته است.

مدل دو-مرحله‌ای معمولاً شامل دو نرخ متفاوت است:

$$C_t = C_1 e^{-k1\, t} + C_2 e^{-k2\, t} \qquad (۶)$$

که در این رابطه، C_t مقدار متغیر مورد بررسی در زمان t، C_1 و C_2 به‌ترتیب سهم اجزای سریع‌تجزیه و کندتجزیه (واحد این سه پارامتر % یا $g\ kg^{-1}$ یا $mg\ kg^{-1}$)، k_1 و k_2 به‌ترتیب ثابت‌های سرعت تجزیه اجزای سریع‌تجزیه و کندتجزیه (day^{-1}) و t زمان (day) هستند.

این مدل نخستین بار توسط Zhang et al. (2012) در بررسی ۱۲ نوع کمپوست استفاده شد و توانست فرآیندهای سریع اولیه و کند پایانی را هم‌زمان تبیین کند. در مدل‌های پیشرفته‌تر (Amlinger et al., 2008) حتی سه جزء (مواد محلول، مواد نیمه‌پایدار و هوموس نهایی) در نظر گرفته می‌شود که امکان شبیه‌سازی پویایی کامل فرآیند را فراهم می‌کند. چنین مدل‌هایی اغلب در نرم‌افزارهای MATLAB یا Simulink اجرا می‌شوند.

مدل‌های ساختاری[۲۵]

مدل‌های ساختاری تلاش می‌کنند فرآیند هوموسی‌شدن را نه صرفاً به‌عنوان برازش ریاضی داده‌ها، بلکه در قالب شبکه‌ای از روابط علّی میان متغیرهای زیستی، شیمیایی و محیطی تبیین کنند. مبنای نظری این رویکرد بر مدل‌سازی روابط ساختاری (SEM)[26] استوار است؛ یک چارچوب آماری چندمتغیره که امکان بررسی هم‌زمان آثار مستقیم و غیرمستقیم میان متغیرهای مشاهده‌شده و پنهان را فراهم می‌کند و به‌طور گسترده برای تحلیل سیستم‌های پیچیده به‌کار می‌رود (Bowen and Guo, 2011; Ullman and Bentler, 2012; Hair et al., 2021). برخلاف مدل‌های سینتیکی کلاسیک که عمدتاً بر توصیف روند زمانی تغییر شاخص‌های هوموسی تمرکز دارند، رویکرد SEM بر شناسایی سازوکارهای زیستی و ساختار علّی فرآیند تأکید می‌کند. این ویژگی امکان ادغام هم‌زمان داده‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی را در یک چارچوب تحلیلی واحد فراهم نموده و در نتیجه دیدگاهی جامع‌تر از پویایی هوموسی‌شدن ارائه می‌دهد (Stein et al., 2011; Mueller and Hancock, 2018).

پژوهش Xu et al. (2024) با استفاده از مدل معادله‌های ساختاری (SEM) نشان داد که سه مسیر اصلی اکسیداسیون لیگنین، نیتریفیکاسیون و پلیمریزه‌شدن فنولیک، با ضرایب مسیر مستقیم[۲۷] به‌ترتیب ۰/۸۲، ۰/۶۴ و ۰/۵۹ بیشترین سهم را در تشکیل HA دارند. مدل SEM به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا آثار مستقیم و غیرمستقیم عوامل زیستی (مانند فعالیت لاکاز، رطوبت و pH) را هم‌زمان بررسی کنند (Bian et al., 2024). در پژوهش Zhu et al. (2025)، از مدل SEM برای بررسی اثر باکتریوفاژها بر تبدیل DOM به HA در ورمی‌کمپوست استفاده و مشخص شد که فازهای میکروبی تحت تأثیر فاکتورهای اکسید و احیا، سرعت تشکیل مواد هوموسی را تا ٪۲۰ افزایش می‌دهند.

مدل‌های ترمودینامیکی و سینتیکی پیشرفته

مدل‌های ترمودینامیکی نیز به‌منظور درک عمیق‌تر از تغییرات انرژی در فرآیند هوموسی‌شدن استفاده شده است. این مدل‌ها با ترکیب سینتیک واکنش و انتقال جرم[۲۸] می‌توانند میزان انرژی آزادشده در هر مرحله را محاسبه کنند (Amlinger et al., 2008).

مدل ترکیبی انرژی-سینتیکی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$k = A\, e^{-Ea/(RT)} \qquad (۷)$$

$$\frac{dC}{dt} = -kC^n \qquad (۸)$$

24- Multi-component and two-phase models
25- Mechanistic and structural models
26- Structural equation modeling
27- Path coefficients
28- Mass transfer

که در این روابط k ثابت سرعت واکنش (day^{-1})، A ضریب پیش‌نمایی یا ضریب فرکانس (day^{-1})، E_a انرژی فعال‌سازی، R ثابت گازها و T دمای کلوین است. C غلظت یا مقدار متغیر مورد بررسی (مانند ماده آلی، کربن آلی، HA یا FA)، (٪ یا $g\ kg^{-1}$)، t زمان فرآیند (day)، k ثابت سرعت واکنش (day^{-1}) و n مرتبه واکنش (بدون واحد) است. همچنین $\frac{dC}{dt}$ نرخ تغییرات متغیر مورد بررسی نسبت به زمان را نشان می‌دهد (day^{-1} % یا $g\ kg^{-1}$ day^{-1}). در کمپوست‌های ترموفیل، Ea معمولاً در دامنه ۴۵-۳۰ کیلوژول بر مول گزارش شده است، درحالی‌که در ورمی‌کمپوست، به‌دلیل دمای کمتر، مقدار آن کمتر (۲۵-۲۰ کیلوژول بر مول) است (Huang et al., 2025).

مدل‌های داده‌محور بر پایه هوش مصنوعی[۲۹]

پیشرفت در هوش مصنوعی و یادگیری ماشین مسیر جدیدی برای مدل‌سازی فرایندهای زیستی گشوده است. در چند سال اخیر، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، جنگل تصادفی (RF) و الگوریتم‌های فازی برای پیش‌بینی پارامترهای سینتیکی و شاخص هوموسی‌شدن به‌کار رفته‌اند. پژوهش Xu et al. (2024) از ترکیب مدل ANN با داده‌های سینتیکی پارابولیک استفاده کرد و توانست مقدار k و شاخص HI را با خطای کمتر از ۵ درصد پیش‌بینی کند. مدل‌های یادگیری ماشین به‌ویژه در پیش‌بینی کیفیت نهایی کمپوست، پویایی نسبت C/N و نرخ تولید CO_2 عملکرد بسیار دقیقی دارند، زیرا قادرند اثر برهمکنش متغیرهای محیطی را بدون فرض روابط خطی بین آن‌ها مدل‌سازی کنند (Bagheri et al., 2025). به‌عنوان نمونه، مدل RF توانست سهم نسبی هر عامل (مانند دما، رطوبت و ترکیب میکروبی) در افزایش HI را تعیین کند که نشان داد دما (۲۷ درصد) و نسبت C/N اولیه (۲۳ درصد) بیشترین اهمیت را دارند.

ارزیابی مدل‌ها و شاخص‌های اعتبارسنجی

در تمامی مدل‌ها، اعتبار برازش معمولاً بر اساس شاخص‌هایی مانند ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، و معیار اطلاعاتی آکائیک (AIC) ارزیابی می‌شود. به‌طور کلی، مدل‌های پارابولیک و دو-مرحله‌ای در توصیف افزایش HA و کاهش FA عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های مرتبه اول نشان داده‌اند (Zhang et al., 2012; Ebrahimzadeh et al., 2017). همچنین، مدل‌های ساختاری و داده‌محور در پیش‌بینی تغییرات غلظت HA و HI در شرایط غیربهینه (مانند رطوبت متغیر یا افزودنی‌های چندگانه) برتری آشکاری دارند (Amlinger et al., 2008; Zhu et al., 2025).

ارزیابی تحلیلی کارایی مدل‌های سینتیکی هوموسی‌شدن

مدل‌سازی سینتیکی هوموسی‌شدن تلاشی برای ساده‌سازی رفتار زمانی یک فرآیند پیچیده زیستی-شیمیایی است؛ فرآیندی که تحت تأثیر ناهمگنی بستر، تغییرات محیطی و پویایی جامعه میکروبی قرار دارد. بسیاری از چارچوب‌های کلاسیک مدل‌سازی تجزیه مواد آلی بر فرض یکنواختی نرخ واکنش استوارند، درحالی‌که شواهد تجربی نشان می‌دهد تحول مواد آلی در خاک و سامانه‌های کمپوست ذاتاً چندفازی بوده و به تغییرات موضعی رطوبت، اکسیژن، دما و فعالیت میکروبی وابسته است (Sierra et al., 2012). این ناهمگنی می‌تواند موجب شود پارامترهای مدل بیشتر بیانگر برازش آماری بوده تا بازتاب مستقیم سازوکارهای زیستی باشند. در سیستم‌های تولید کمپوست، گذار از فاز تجزیه سریع ترکیبات ناپایدار به مرحله کند تثبیت ساختاری، نشان‌دهنده رفتار غیرخطی فرآیند است. مدل‌هایی که نرخ تجزیه را ثابت فرض می‌کنند، اغلب قادر به بازنمایی این انتقال نیستند. تحلیل‌های نظری نشان داده‌اند که در چنین شرایطی، مدل‌هایی که توزیع نرخ واکنش یا چند مخزن تجزیه را در نظر می‌گیرند، تصویر واقع‌بینانه‌تری از پویایی مواد آلی ارائه می‌دهند (Manzoni and Porporato, 2009). این موضوع به‌ویژه زمانی اهمیت می‌یابد که هدف، تفسیر فرآیندی داده‌ها و نه صرفاً دستیابی به برازش عددی مناسب باشد.

29- Data-driven and AI-based models

پیچیدگی سینتیکی در ورمی‌کمپوست بیشتر است، زیرا فعالیت کرم‌های خاکی موجب ایجاد خاکدانه‌های متفاوت و تغییر در فراهمی زیستی بستر می‌شود (Zhang et al., 2015). چنین شرایطی می‌تواند نوسانات مکانی و زمانی در نرخ تبدیل مواد آلی ایجاد کند؛ پدیده‌ای که مدل‌های ساده تک‌پارامتری قادر به توضیح آن نیستند. پژوهش‌های مربوط به پایداری ماده آلی خاک نشان می‌دهند که درک درست از این ناهمگنی‌ها برای تفسیر رفتار درازمدت مواد هوموسی ضروری است (Schmidt et al., 2011). نکته کلیدی در ارزیابی مدل‌های سینتیکی، تمایز میان کیفیت برازش آماری و مفهوم زیستی پارامترها است. مدلی که صرفاً بر شاخص‌های آماری تکیه دارد، ممکن است تصویر ناقصی از فرآیند ارائه دهد. حساسیت تجزیه مواد آلی به تغییرات محیطی (به‌ویژه دما و رطوبت) نشان می‌دهد که رابطه بین ساختار ریاضی مدل و سازوکارهای زیستی باید مورد توجه قرار گیرد (Davidson and Janssens, 2006). بنابراین، انتخاب مدل مناسب برای مقایسه فرآیندهای تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست نه صرفاً معیار آماری برازش مدل، بلکه مستلزم توجه هم‌زمان به منطق فرآیندی شرایط زیستی و قابلیت تفسیر پارامترها است.

مقایسه تحلیلی رویکردهای مدل‌سازی هوموسی‌شدن

مدل‌سازی فرآیند هوموسی‌شدن به‌عنوان ابزاری برای تبیین پویایی تبدیل ماده آلی، در سال‌های اخیر از چارچوب‌های کلاسیک سینتیکی به‌سمت رویکردهای چندمقیاسی و داده‌محور توسعه یافته است. چون هوموسی‌شدن حاصل برهم‌کنش همزمان مسیرهای زیستی، شیمیایی و فیزیکی است، هیچ مدل واحدی قادر به توصیف کامل آن نیست. در نتیجه، پژوهش‌های جدید بر مقایسه و ترکیب رویکردهای مختلف تمرکز دارند. مدل‌های سینتیکی مرتبه اول و دوم همچنان به‌دلیل سادگی ساختاری و مفهوم فیزیکی پارامترها، ابزارهای مفیدی برای برآورد نرخ تبدیل ماده آلی محسوب می‌شوند. این مدل‌ها به‌ویژه در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی عملکرد قابل قبولی دارند، اما در بسترهای ناهمگن کمپوست و ورمی‌کمپوست، فرض یکنواختی سیستم می‌تواند منجر به ساده‌سازی بیش از حد واقعیت شود (Sierra et al., 2011). برای رفع این محدودیت، مدل‌های چندمخزنی ماده آلی توسعه یافته‌اند که اجزای مختلف کربن را بر اساس پایداری و سرعت تجزیه تفکیک می‌کنند. چنین چارچوب‌هایی امکان بررسی گذار تدریجی مواد آلی ناپایدار به ساختارهای هوموسی پایدار را فراهم نموده و ارتباط بهتری با فرآیندهای زیستی واقعی برقرار می‌کنند (Wieder et al., 2023). مدل‌های غیرخطی مانند توابع لوجستیک نیز در توصیف رفتار اشباع‌شونده شاخص‌های هوموسی‌شدن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها قادرند مراحل اولیه سریع و فاز پایدار نهایی را بازنمایی نموده و تصویری واقع‌بینانه‌تر از پویایی فرآیند ارائه دهند (Moorhead and Sinsabaugh, 2006). در سال‌های اخیر، رویکردهای داده‌محور مبتنی بر یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی و جنگل تصادفی برای پیش‌بینی کیفیت کمپوست و شاخص‌های بلوغ به‌کار گرفته شده‌اند. این مدل‌ها روابط غیرخطی پیچیده میان متغیرهای محیطی، شیمیایی و زیستی را استخراج می‌کنند، هرچند تفسیر سازوکاری آن‌ها محدودتر است (Li et al., 2023; Peng et al., 2025). در کنار این رویکردها، مدل‌های روابط ساختاری امکان تحلیل روابط علّی میان متغیرها را فراهم نموده و نقش عوامل زیستی و شیمیایی را در هوموسی‌شدن به‌صورت یک شبکه تعاملی نشان می‌دهند. این چارچوب‌ها به ویژه در پژوهش‌های چندمتغیره مفید هستند (Grace et al., 2012; Hair et al., 2021). در مجموع، مقایسه این مدل‌ها نشان می‌دهد که ترکیب دیدگاه‌های سینتیکی، زیستی و داده‌محور می‌تواند تصویری جامع‌تر از فرآیند هوموسی‌شدن ارائه دهد. این رویکرد تلفیقی، مسیر توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده دقیق‌تر برای سیستم‌های کمپوست و ورمی‌کمپوست را هموار می‌سازد.

برای مقایسه نظام‌مند مدل‌های معرفی‌شده از نظر مبنای مفهومی، دامنه کاربرد، نقاط قوت و محدودیت‌ها، یک چارچوب تحلیلی خلاصه ارائه می‌دهند. مقایسه ارائه‌شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که هر یک از رویکردهای مدل‌سازی هوموسی‌شدن، جنبه

جدول ۱. مقایسه رویکردهای مدل‌سازی فرآیند هوموسی‌شدن

Table 1. Comparative analysis of modeling approaches for the humification process

نوع مدل Model type	مبنای مفهومی Conceptual basis	نقاط قوت Strengths	محدودیت‌ها Limitations	کاربرد در هوموسی‌شدن Application in humification	منبع Reference
سینتیکی مرتبه اول/دوم First/second-order kinetic model	نرخ واکنش کلاسیک Classical reaction kinetics	ساده و قابل تفسیر Simple and interpretable	فرض همگنی بستر Assumes substrate homogeneity	تخمین سرعت تبدیل ماده آلی Estimating organic matter conversion rate	(Sierra et al., 2011)
مدل چندمخزنی کربن Multi-compartment carbon model	تفکیک ذخایر ماده آلی Organic matter pools separation	بازنمایی مراحل تجزیه Represents decomposition stages	نیاز به پارامتر زیاد High parameter demand	تحلیل پایداری مواد هوموسی Stability analysis of humic substances	(Wieder et al., 2023)
مدل غیرخطی (لوجستیک) Nonlinear (logistic) model	درنظرگرفتن رفتار اشباع فرآیند Representation of process saturation	نمایش پویایی واقعی‌تر Captures realistic dynamics	حساس به داده اولیه Sensitive to initial data	تغییر شاخص‌های هوموسی‌شدن Tracking humification indices	(Moorhead and Sinsabaugh, 2006)
یادگیری ماشین (ANN/RF) Machine learning (ANN/RF)	الگوگیری داده‌محور Data-driven learning	پیش‌بینی روابط پیچیده Models complex relationships	تفسیر سازوکاری محدود Limited mechanistic interpretability	پیش‌بینی کیفیت کمپوست Compost quality prediction	(Zhang et al., 2015; Li et al., 2023)
مدل روابط ساختاری Structural equation modeling	روابط علّی متغیرها Causal variable relationships	تحلیل آثار مستقیم/غیرمستقیم Direct/indirect effect evaluation	نیاز به داده گسترده Requires extensive datasets	تحلیل برهمکنش زیستی–شیمیایی Bio-chemical interaction analysis	(Grace et al., 2012; Hair et al., 2021)

متفاوتی از پویایی تبدیل مواد آلی را هدف قرار می‌دهد و هیچ مدل واحدی قادر به پوشش کامل ابعاد شیمیایی، زیستی و زمانی این فرآیند پیچیده نیست. مدل‌های سینتیکی کلاسیک با وجود سادگی و قابلیت تفسیر مناسب، عمدتاً بر توصیف نرخ کلی واکنش متمرکزند و تغییرات ساختاری ماده آلی را به‌صورت صریح در نظر نمی‌گیرند. در مقابل، مدل‌های چندمخزنی و غیرخطی توانایی بیشتری در بازنمایی مراحل تجزیه و رفتار اشباع فرآیند دارند، هرچند وابستگی آن‌ها به پارامترهای متعدد می‌تواند کاربرد عملی را محدود کند. رویکردهای داده‌محور مانند شبکه‌های عصبی و جنگل تصادفی امکان مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده را فراهم می‌کنند، اما تفسیر سازوکاری نتایج آن‌ها همواره ساده نیست. از سوی دیگر، مدل‌های روابط ساختاری چارچوبی برای تحلیل روابط علّی میان متغیرهای زیستی و شیمیایی فراهم می‌سازند که می‌تواند به درک عمیق‌تر فرآیند کمک کند، هرچند اجرای آن‌ها مستلزم داده‌های گسترده و طراحی دقیق آزمایش است. در مجموع، شواهد موجود نشان می‌دهد که رویکردهای ترکیبی که عناصر سینتیکی، داده‌محور و ساختاری را هم‌زمان در نظر می‌گیرند، می‌توانند تصویری جامع‌تر از هوموسی‌شدن ارائه دهند و مبنایی مناسب برای پیش‌بینی رفتار فرآیند و بهبود راهبردهای مدیریتی در تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست فراهم سازند.

عوامل مؤثر بر هوموسی‌شدن در فرآیندهای تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست

دما و فازهای گرمایی فرآیند

دما یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کنترل‌کننده در فرآیندهای تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست است، زیرا به‌طورمستقیم بر فعالیت میکروبی، نرخ اکسیداسیون لیگنین، و نوع مواد هوموسی تشکیل‌شده اثر می‌گذارد. در فرآیند کمپوست‌کردن، دما معمولاً از فاز مزوفیل (۳۰–۴۰ °C) آغاز شده و به فاز ترموفیل (۵۰–۷۰ °C) می‌رسد. در این مرحله، ریزجانداران گرمادوست مانند *Bacillus stearothermophilus* و *Thermobifida fusca* موجب تجزیه سریع مواد آلی و تشکیل پیش‌سازهای فنولی و کوئینونی می‌شوند (Hamelers, 2004; Bian et al., 2024). افزایش دما واکنش‌های اکسیداتیو را تقویت می‌کند، اما دمای بیش از ۷۰ °C می‌تواند موجب تخریب آنزیم‌های کلیدی (به‌ویژه لاکاز و پراکسیداز) و در نتیجه، کاهش نرخ پلیمریزاسیون شود. در مقابل، در ورمی‌کمپوست دما در محدوده ۲۰–۳۰ °C باقی می‌ماند، زیرا حضور کرم‌های خاکی به حفظ محیط مزوفیل کمک می‌کند. این شرایط موجب حفظ آنزیم‌های حساس و افزایش پایداری زیستی مواد هیومیکی می‌شود (Dores-Silva et al., 2018). پژوهش Xia et al. (2025) نشان داد کاهش دما موجب افزایش نسبت اسید هیومیک به فولویک تا ۰/۹ شد، زیرا واکنش‌های آنزیمی در محیط مزوفیل پایدارترند. در مجموع، اگرچه دماهای بیشتر فرآیند را تسریع می‌کند، اما توازن بهینه بین واکنش‌های اکسیداتیو (در فاز گرم) و واکنش‌های تراکمی-ترکیبات حلقوی (در فاز مزوفیل) برای دستیابی به هوموس با کیفیت خوب ضروری است.

نوع ماده اولیه و نسبت C/N

ترکیب ماده اولیه یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل در سرعت و کیفیت هوموسی‌شدن است. مواد دارای لیگنین زیاد مانند کاه و بقایای چوبی به‌دلیل مقاومت شیمیایی، فرآیند را کند می‌کنند، درحالی‌که فضولات دامی با نسبت C/N کمتر، غنی از نیتروژن و قابل‌تجزیه‌ترند (Zhang et al., 2024). نسبت بهینه C/N برای آغاز فرآیند معمولاً بین ۲۵ تا ۳۰ گزارش شده است (Waqas et al., 2023). نسبت‌های C/N بزرگ‌تر منجر به کمبود نیتروژن و کندی فرآیند و نسبت‌های کوچک‌تر موجب تجمع آمونیوم و افزایش pH می‌شوند. در پژوهش Sierra et al. (2013) مشاهده شد که کمپوست‌های حاصل از ترکیب کودهای دامی و بقایای گیاهی (با نسبت C/N برابر ۳۰) بیشترین شاخص هوموسی‌شدن (HI ≈ 0.65) را داشتند. همچنین، ترکیب مواد اولیه مختلف با هدف ایجاد توازن کربن و نیتروژن، راهکار مؤثری برای افزایش بازده هوموسی‌شدن است (Kulikowska and Klimiuk, 2011). برای نمونه، کمپوست‌کردن مخلوط لجن خمیر کاغذ (غنی از کربن) با کود گوسفندی (غنی از نیتروژن) موجب افزایش معنی‌دار در محتوای HA و کاهش نسبت C/N نهایی تا ۱۲ شد (Karimi et al., 2024b; Karimi et al., 2025b).

رطوبت و شرایط حضور اکسیژن

رطوبت به‌صورت مستقیم بر انتقال جرم، پخشیدگی اکسیژن و فعالیت میکروبی اثر دارد. رطوبت بهینه برای تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست به‌ترتیب حدود ۶۵–۵۵ و ۸۰–۷۰ درصد گزارش شده است (Li et al., 2022). رطوبت کمتر از حد بهینه موجب خشک‌شدن بستر و کاهش فعالیت میکروبی می‌شود، درحالی‌که رطوبت بیش از حد باعث شرایط بی‌هوازی و تجمع اسیدهای آلی می‌شود که در نهایت pH را کاهش داده و فرآیند هوموسی‌شدن را مختل می‌کند (Amlinger et al., 2008). تهویه نیز نقش اساسی دارد؛ اکسیژن نه‌تنها برای اکسیداسیون ترکیبات فنولی ضروری است بلکه باعث جلوگیری از تشکیل متان و سولفید هیدروژن می‌شود. با این‌حال، تهویه بیش از حد ممکن است موجب هدررفت نیتروژن از راه تبخیر آمونیاک شود. پژوهش De Medina-Salas et al. (2022) نشان داد که میانگین شدت تهویه برابر 0.4 m^3 air/kg/day بیشترین غلظت HA (34.2 g/kg) را در پایان فرآیند ایجاد کرد.

افزودنی‌های معدنی و کربنی

افزودنی‌ها[30] مانند زغال زیستی، رس، MnO_2، Fe_2O_3 و مواد معدنی تبادل یونی، ابزار مؤثری برای بهبود هوموسی‌شدن محسوب می‌شوند.

الف) زغال زیستی: زغال زیستی به‌دلیل سطح ویژه زیاد و گروه‌های عاملی اکسیژنه، بستر مناسبی برای تسریع واکنش‌های جذب و تراکم ترکیبات فنولی فراهم می‌کند. افزون بر آن، این ماده می‌تواند شرایط رطوبتی و pH را تنظیم کند. پژوهش Zhang et al. (2024) نشان داد که افزودن ۵ درصد زغال زیستی همراه با ۲ درصد Fe_2O_3 در کمپوست فضولات خوکی و تفاله انگور، شاخص HI را از ۰/۴ به ۰/۷۳ افزایش داد.

ب) اکسیدهای فلزی (Fe_2O_3، MnO_2): این ترکیبات از راه واکنش‌های شبه‌فنتونی[31] موجب تسریع اکسیداسیون لیگنین و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شوند (Li et al., 2022). یون‌های فلزی واسطه همچنین آنزیم‌های اکسیداتیو را فعال‌تر می‌کنند. مشاهده شد که افزودن MnO_2 در سطح ۱ درصد می‌تواند نرخ تشکیل HA را تا ۴۰ درصد افزایش دهد (Huang et al., 2025).

ج) رس‌ها و مواد سیلیکاتی: رس‌های مونتموریلونیت و کائولینیت به‌عنوان جاذب‌های سطحی، نقش مهمی در تثبیت ترکیبات آلی ناپایدار دارند. این رس‌ها با فراهم‌کردن مکان‌های جذب برای ترکیبات کوئینونی، از هدررفت آن‌ها جلوگیری کرده و موجب افزایش پایداری مواد هوموسی می‌شوند (Bian et al., 2024).

اثر عوامل شیمیایی (pH، EC، نسبت‌های عنصری)

pH در محدوده ۶/۵ تا ۸ برای هوموسی‌شدن مناسب است (Li et al., 2022). رسانایی الکتریکی (EC) بیشتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر معمولاً بیانگر تجمع نمک‌هاست که می‌تواند فعالیت آنزیمی و میکروبی را کاهش دهد. پژوهش Saypariya et al. (2024) نشان داد که افزایش EC از ۲ به ۵ دسی‌زیمنس بر متر منجر به ۲۰ درصد کاهش در سرعت تشکیل اسید هیومیک شد. نسبت‌های عنصری مانند هیدروژن به کربن و اکسیژن به کربن نیز شاخص مهمی از درجه تشکیل ترکیبات آروماتیک است. کاهش نسبت هیدروژن به کربن از ۱/۶ به ۱/۰ و افزایش نسبت کربن به اکسیژن از ۱/۴ به ۲/۰ معمولاً نشانگر تبدیل ترکیبات آلیفاتیک به آروماتیک و افزایش پایداری ساختار هوموس است (Sinha et al., 1977; Zhang et al., 2024). در مسیر تولید کمپوست، تجزیه گرمایی و اکسیداسیون لیگنین موجب تشکیل ترکیبات کوئینونی و در ادامه مواد هوموسی می‌شود. در مقابل، در تولید ورمی‌کمپوست، فعالیت آنزیم‌های اکسیداتیو مانند لاکاز و پراکسیداز همراه با پلیمریزاسیون ترکیبات فنولی، نقش اصلی را در تبدیل ماده آلی ایفا می‌کند. هر دو مسیر در نهایت به تشکیل مواد هوموسی پایدار شامل اسید هیومیک، اسید فولویک و هومین منجر می‌شوند که با درجه آروماتیسیته زیاد و پایداری کربنی مشخص می‌شوند.

اثر هم‌افزایی و مدل‌های چندعاملی

عوامل فیزیکی (دما، رطوبت و تهویه)، شیمیایی (pH، EC و نسبت C/N)، و زیستی (میکروب‌ها و کرم‌های خاکی) در برهمکنش با یکدیگر فرآیند هوموسی‌شدن را کنترل می‌کنند. افزودنی‌های معدنی و کربنی با اصلاح شرایط اکسید و احیا و فراهم‌کردن بستر مناسب برای تراکم ترکیبات حلقوی، نقش تقویتی دارند (Bian et al., 2024). از دیدگاه کاربردی، ایجاد توازن میان اکسیداسیون سریع (در فاز داغ) و تراکم پلیمری آرام (در فاز سرد) و همچنین استفاده از افزودنی‌های مناسب، کلید دستیابی به کمپوستی با پایداری زیاد و غنای هوموسی است (جدول ۲). در نهایت، ترکیب داده‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی در چارچوب مدل‌های چندعاملی مانند SEM و AI، می‌تواند مسیر جدیدی برای بهینه‌سازی فرآیند هوموسی‌شدن در سیستم‌های کمپوست و ورمی‌کمپوست فراهم کند (Zhang et al., 2015; Xu et al., 2024).

30- Amendments

31- Fenton-like

جدول ۲. مرور مقایسه‌ای فرآیندها و ویژگی‌های هوموسی‌شدن در تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست

Table 2. Comparative review of humification processes and characteristics in compost and vermicompost production

ویژگی (Feature)	تولید کمپوست (Composting)	تولید ورمی‌کمپوست (Vermicomposting)	منابع (References)
محدوده دما (Temperature range) (°C)	45–70 °C (ترموفیل- Thermophilic)	25–30 °C (مزوفیل- Mesophilic)	(Abbasi et al., 2009; Dores-Silva et al., 2018)
عوامل زیستی اصلی (Main biological agents)	باکتری‌ها و قارچ‌های ترموفیل (Thermophilic bacteria & fungi)	کرم‌های خاکی (*Eisenia fetida*) + میکروب‌های همزیست (Earthworms + Symbiotic microbes)	(Dores-Silva et al., 2018)
نوع هوموسی‌شدن (Humification type)	گرمایی (Thermochemical)	زیستی–شیمیایی (Biochemical)	(Xu et al., 2024)
شاخص HI = HA/(HA+FA)	0.4–0.6	0.6–0.8	(Sierra et al., 2013; Zhu et al., 2025)
محتوای گروه‌های عاملی (Functional groups content)	تنوع کمتر گروه‌های عاملی مرتبط با مواد هوموسی Lower diversity of oxygen-containing functional groups	تنوع و غنای بیشتر گروه‌های عاملی مرتبط با مواد هوموسی Higher diversity and abundance of phenolic, amide, and carboxylic functional groups	(Bian et al., 2024)
پایداری نهایی مواد (Final material stability)	پایداری شیمیایی و گرمایی زیاد High chemical and thermal stability	پایداری زیستی زیاد و آروماتیسیته بیشتر High biological stability and aromaticity	(Waqas et al., 2023)
افزودنی‌های مؤثر (Effective additives)	زغال زیستی، Fe_2O_3 ،MnO_2 (Biochar & metal oxides)	زغال زیستی + باکتری‌های تقویت‌کننده لاکاز (Biochar + Laccase-enhancing bacteria)	(Zhang et al., 2024)
مزیت اصلی (Main advantage)	کاهش سریع مواد ناپایدار (Rapid reduction of unstable matter)	تولید مواد هوموسی با کیفیت خوب (Production of high-quality humic substances)	(Li et al., 2022)
محدودیت اصلی (Main limitation)	نیاز به دما و زمان زیاد (High temperature & long duration needed)	حساسیت به شوری و رطوبت (Sensitivity to salinity & moisture)	(Xia et al., 2025)

چالش‌ها و مسیرهای آینده در پژوهش‌های هوموسی‌شدن

مرور پژوهش‌های هوموسی‌شدن در سامانه‌های کمپوست و ورمی‌کمپوست نشان می‌دهد که اگرچه درک کلی از روند تبدیل ماده آلی در سال‌های اخیر پیشرفت قابل‌توجهی داشته است، هنوز فاصله معنی‌داری بین توصیف آزمایشگاهی این فرآیند و کاربرد عملی آن در مقیاس واقعی وجود دارد. بخش عمده پژوهش‌ها بر شاخص‌های شیمیایی کلاسیک مانند نسبت اسید هیومیک به اسید فولویک، تغییرات pH و کاهش نسبت C/N متمرکز بوده‌اند؛

شاخص‌هایی که اگرچه برای پایش بلوغ کمپوست مفیدند، اما لزوماً بیانگر سازوکارهای مولکولی زیربنایی نیستند. پژوهش‌های طیف‌سنجی پیشرفته نشان دادند که تشکیل ساختارهای حلقوی پایدار حاصل شبکه‌ای از واکنش‌های اکسایش و تراکم چندمرحله‌ای است. با این‌حال تبدیل این یافته‌های ساختاری-پایه‌ای به مدل‌های کمّی قابل تعمیم همچنان با محدودیت‌های مفهومی و داده‌ای مواجه است (Dey Chowdhury et al., 2023; Bian et al., 2024; Xu et al., 2024). این شکاف در بررسی ماهیت ورمی‌کمپوست برجسته‌تر است؛ جایی که برهم‌کنش هم‌زمان کرم‌های خاکی، ریزجانداران و شرایط فیزیکی بستر، رفتارهایی غیرخطی و وابسته به ویژگی‌های بستر ایجاد می‌کند. در چنین محیطی، مدل‌های سینتیکی کلاسیک که عمدتاً بر تغییرات زمانی متغیرهای شیمیایی تکیه دارند، توان توضیح کامل پویایی فرآیند را ندارند. شواهد اخیر نشان می‌دهد که ساختار جامعه میکروبی، مسیرهای اکسایش-احیا و فعالیت آنزیمی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت و سرعت تشکیل مواد هوموسی دارند، اما این دانسته‌های زیستی هنوز به‌صورت نظام‌مند در چارچوب‌های مدل‌سازی ادغام نشده‌اند (Li et al., 2022; Xu et al., 2024). در نتیجه، توسعه مدل‌هایی که بتوانند پیوندی میان فرآیندهای زیستی و تغییرات ساختاری ماده آلی برقرار کنند، یکی از چالش‌های اصلی این حوزه محسوب می‌شود.

چالش مهم دیگر، نبود استانداردهای یکپارچه برای سنجش میزان هوموسی‌شدن است. تنوع شاخص‌ها، تفاوت در روش‌های استخراج و تحلیل و ناهمگنی مواد اولیه باعث می‌شود مقایسه مستقیم نتایج پژوهش‌ها دشوار باشد. این مسئله زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که نتایج آزمایشگاهی قرار است به سامانه‌های صنعتی تعمیم داده شوند؛ زیرا در مقیاس واقعی، تغییرپذیری دما، رطوبت، تهویه و ترکیب مواد آلی اولیه می‌تواند مسیر واکنش‌ها را به‌طور محسوسی تغییر دهد (Waqas et al., 2023; Zhu et al., 2025; Karimi et al., 2026b). در نتیجه، توسعه مدل‌هایی که بتوانند پیوند میان فرآیندهای زیستی و تغییرات ساختاری ماده آلی را برقرار کنند، یکی از چالش‌های اصلی این حوزه محسوب می‌شود. در همین راستا، توازن میان دانش پایه و کاربرد مهندسی اهمیت ویژه‌ای دارد. کنترل عملیاتی عواملی مانند دما، رطوبت، تهویه و زمان ماند، طراحی بسترهای مناسب برای فعالیت زیستی و پایش شاخص‌های بلوغ به‌طورمستقیم بر مسیر هوموسی‌شدن اثر می‌گذارند. پیونددادن یافته‌های سازوکاری با راهبردهای طراحی و بهره‌برداری می‌تواند امکان بهینه‌سازی فرآیند در مقیاس واقعی را فراهم کند و شکاف میان آزمایشگاه و صنعت را کاهش دهد. در مجموع، مسیر آینده پژوهش در این حوزه به‌سمت رویکردهای یکپارچه و چندمقیاسی حرکت می‌کند؛ رویکردهایی که داده‌های شیمیایی، زیستی و سینتیکی را در چارچوب‌های تحلیلی مشترک ترکیب می‌کنند (Li et al., 2022; Bian et al., 2024; Bagheri et al., 2025; Huang et al., 2025). توسعه استانداردهای ارزیابی، ادغام مدل‌های فرآیندمحور و داده‌محور، و توجه هم‌زمان به محدودیت‌های عملیاتی، می‌تواند زمینه تبدیل دانش تجربی به ابزارهای قابل اتکا برای مدیریت سامانه‌های تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست را فراهم سازد.

نتیجه‌گیری

هوموسی‌شدن در فرآیندهای تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست را می‌توان نقطه تلاقی واکنش‌های شیمیایی، فعالیت‌های زیستی و مدیریت فرآیند دانست؛ پدیده‌ای که به‌طورمستقیم بر پایداری و کیفیت محصول نهایی اثر می‌گذارد. بررسی پژوهش‌های موجود نشان می‌دهد که اگرچه ابزارهای تحلیلی و مدل‌های متنوعی برای توصیف این فرآیند توسعه یافته‌اند، درک جامع آن تنها زمانی حاصل می‌شود که دانش‌های این حوزه در یک چارچوب منسجم کنار هم قرار گیرند. چشم‌انداز آینده این حوزه بیش از آنکه به توسعه فناوری‌های پراکنده وابسته باشد، به توانایی پیونددادن فهم سازوکاری با طراحی فرآیندهای قابل کنترل بستگی دارد. چنین رویکردی می‌تواند هوموسی‌شدن را از یک پدیده تجربی به یک فرایند قابل پیش‌بینی تبدیل کند؛ دانشی که در مدیریت پایدار پسماندهای آلی، بهبود کیفیت خاک و پشتیبانی از کشاورزی پایدار نقش کلیدی خواهد داشت.

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

References

1. Abbasi, T., Gajalakshmi, S., Abbasi, S., 2009. Towards modeling and design of vermicomposting systems: Mechanisms of composting/vermicomposting and their implications. Indian J. Biotechnol. 8(2), 177–182.
2. Aira, M., Monroy, F., Domínguez, J., 2007. Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermicomposting independently of the application rates of pig slurry. Sci. Total Environ.. 385(1-3), 252–261. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.06.031.
3. Arancon, N., Edwards, C.A., 2011. The use of vermicomposts as soil amendments for production of field crops. In: Edwards, C.A., Arancon, N.Q., Sherman, R.L. (Eds.), 2010. Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 129–151.
4. Bagheri, H., Izady, A., Zare Abyaneh, H., 2025. Ability of equilibrium and non-equilibrium models to simulate the effects of vermicompost and hydraulic conditions on nitrate and DOC leaching. Environ. Technol. 46(19), 3750–3761. https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2309476.
5. Bernal, M.P., Alburquerque, J.A., Moral, R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review. Bioresour. Technol. 100(22), 5444–5453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027.
6. Bian, H., Boguta, P., Huang, J., Deng, C., Kong, D., Zhou, H., Su, X., 2024. Transforming organic solid waste management: Embracing humification for sustainable resource recovery. ACS Sustain. Resour. Manage. 1(2), 181–198. https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.3c00080.
7. Blagodatskaya, E.V., Anderson, T.H., 1998. Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ratio and q_{CO2} of microbial communities in forest soils. Soil Biology and Biochemistry. 30, 10.1274–1269.11. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00050-9.
8. Bowen, N.K., Guo, S., 2011. Structural Equation Modeling. 1st edition, Oxford University Press, New York.
9. Bugg, T.D., Ahmad, M., Hardiman, E.M., Singh, R., 2011. The emerging role for bacteria in lignin degradation and bio-product formation. Curr. Opin. Biotechnol. 22(3), 394–400. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2010.10.009.
10. Campbell, E.E., Paustian, K., 2015. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: A review. Environ. Res. Lett. 10(12), 123004. 10.1088/1748-9326/10/12/123004.
11. Cerda, A., Artola, A., Font, X., Barrena, R., Gea, T. and Sánchez, A., 2018. Composting of food wastes: Status and challenges. Bioresour Technol, 248, pp.57-67. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.133.
12. Cotrufo, M.F., Wallenstein, M.D., Boot, C.M., Denef, K., Paul, E., 2013. The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? Glob. Change Biol. 19(4), 988–995. https://doi.org/10.1111/gcb.12113.
13. Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature 440(7081), 165–173. https://doi.org/10.1038/nature04514.
14. De Medina-Salas, L., Castillo-González, E., Giraldi-Díaz, M.R., Blanco-Pérez, B., 2022. Reaction kinetics in the vermicomposting process of peach waste. Life 12(9), 1290. https://doi.org/10.3390/life12091290.
15. Dey Chowdhury, S., Suhaib, K.H., Bhunia, P., Surampalli, R.Y., 2023. A critical review on the vermicomposting of organic wastes as a strategy in circular bioeconomy: mechanism, performance, and future perspectives. Environ. Technol. 47(8), 1284–1321. https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2215458.
16. Domínguez, J., Gómez-Brandón, M., 2012. Vermicomposting: composting with earthworms to recycle organic wastes. In: Kumar, S., Bharti, A. (Eds.), Management of Organic Waste. InTech, Rijeka, Croatia, pp. 29–48. https://doi.org/10.5772/33874.
17. Dores-Silva, P.R, Landgraf, M.D., Rezende, M.O., 2018. Humification process in different kinds of organic residue by composting and vermicomposting: Have microbioreactors really accelerated the process? Environ. Sci. Pollut. Res. 25(18), 17490–17498. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1908-3.
18. Ebrahimzadeh, R., Ghazanfari Moghaddam, A., Sarcheshmehpour, M., Mortezapour, H., 2017. A novel kinetic modeling method for the stabilization phase of the composting process for biodegradation of solid wastes. Waste Manage. Res. 35(12), 1226–1236. https://doi.org/10.1177/0734242X17733538.
19. Edwards, C.A., Arancon, N.Q., Sherman, R.L. (Eds.), 2010. Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

20. García-Gómez, A., Bernal, M., Roig, A., 2005. Organic matter fractions involved in degradation and humification processes during composting. Compost Sci. Util. 13(2), 127–135. https://doi.org/10.1080/1065657X.2005.10702229.
21. Gómez-Brandón, M., Lazcano, C., Lores, M., Domínguez, J., 2010. Detritivorous earthworms modify microbial community structure and accelerate plant residue decomposition. Appl. Soil Ecol. 44(3), 237–244. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.12.010.
22. Grace, J.B., Schoolmaster Jr, D.R., Guntenspergen, G.R., Little, A.M., Mitchell, B.R., Miller, K.M., Schweiger, E.W., 2012. Guidelines for a graph-theoretic implementation of structural equation modeling. Ecosphere. 3(8), 1–44. https://doi.org/10.1890/ES12-00048.1.
23. Hair, J.F., Hult, G.T.M., Ringle, C.M., Sarstedt, M., Danks, N.P., Ray, S., 2021. Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) using R: A Workbook. 1st edition, Springer, Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80519-7.
24. Hamelers, H., 2004. Modeling composting kinetics: A review of approaches. Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 3(4), 331–342. https://doi.org/10.1007/s11157-004-2335-0.
25. Huang, C., Zhao, X., Zhang, H., Wang, Z., Xi, B., 2025. Karst multi-source organic solid waste bio-enhanced composting: The potential of circular utilization to enhance soil quality and control contaminants. Fermentation 11(8), 426. https://doi.org/10.3390/fermentation11080426.
26. Karimi, S., Haghighi, M., 2025. Harnessing the greenhouse microbiome: Novel strategies to improve greenhouse crop productivity and resilience: A review. Greenhouse Plant Prod. J. 2(4), 10–24. https://doi.org/10.66224/gppj.3.1.1.
27. Karimi, S., Haghighi, M., Chakraborty, N., 2024a. Cunsuming biochar, compost, and microbial amendments for horticultural systems (A review). Dryl. Soil Res. 1(2), 103–116. https://doi.org/10.47176/dlsr.01.02.1041
28. Karimi, S., Haghighi, M., Sharifani, M., 2025a. Eco-enzymes: A sustainable solution for waste management and agricultural applications. Iran Agric Res. 44(2), 62–78. https://doi.org/10.22099/iar.2025.52732.1679.
29. Karimi, S., Kolahchi, Z., Zarrabi, M., Nahidan, S., Raza, T., 2025b. 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. Discov. Appl. Sci. 7(2), 100. https://doi.org/10.1007/s42452-025-06525-0.
30. Karimi, S., Raza, T., Mechri, M., 2024. Composting and vermitechnology in organic waste management. In: Kumar, V., Bhat, S.A., Kumar, S., Verma, P. (Eds.), Environmental Engineering and Waste Management. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-58441-1.
31. Karimi, S., Shariatmadari, H., Nourbakhsh, F., 2026a. Integrated assessment of physicochemical and structural changes during composting and vermicomposting of cattle and sheep manure with additive treatments. Sci. Rep. 16, 10128 (2026). https://doi.org/10.1038/s41598-026-40802-1.
32. Karimi, S., Shariatmadari, H., Shayannejad, M., Nourbakhsh, F. 2026b. Maturity prediction and correlation analysis of additive-treated cattle and sheep manure composts and vermicomposts using machine learning algorithms. Agriculture 16(8), 834. https://doi.org/10.3390/agriculture16080834.
33. Knicker, H., 2011. Soil organic N-An under-rated player for C sequestration in soils? Soil Biol. Biochem. 43(6), 1118–1129. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.02.020.
34. Kulikowska, D., 2016. Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting. Waste Manage. 49, 196–203. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.005.
35. Kulikowska, D., Gusiatin, Z.M., Bułkowska, K., Kierklo, K., 2015a. Humic substances from sewage sludge compost as washing agent effectively remove Cu and Cd from soil. Chemosphere 136, 42–49. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.083.
36. Kulikowska, D., Gusiatin, Z.M., Bułkowska, K., Klik, B., 2015b. Feasibility of using humic substances from compost to remove heavy metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) from contaminated soil aged for different periods of time. J. Hazard. Mater. 300, 882–891. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.022.
37. Kulikowska, D., Klimiuk, E., 2011. Organic matter transformations and kinetics during sewage sludge composting in a two-stage system. Bioresour. Technol. 102(23), 10951–10958. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.009.
38. Kumari, B., Kumari, N., 2025. Vermicomposting and solid waste management: Microbial processes and environmental applications. Uttar Prad. J. Zool, 46(24), 23–52. https://doi.org/10.56557/upjoz/2025/v46i245406.
39. Lehmann, J., Kleber, M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. Nature. 528(7580), 60–68. https://doi.org/10.1038/nature16069.
40. Li, S., Sun, K., Latif, A., Si, Y., Gao, Y., Huang, Q., 2022. Insights into the applications of extracellular laccase-aided humification in livestock manure composting. Environ. Sci. Technol. 6(12), 57425–7412. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08042.
41. Li, Y., Xue, Z., Li, S., Sun, X., Hao, D., 2023. Prediction of composting maturity and identification of critical parameters for green waste compost using machine learning. Bioresour. Technol. 385, 129444. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129444.
42. Maffia, A., Oliva, M., Marra, F., Mallamaci, C., Nardi, S., Muscolo, A., 2025. Humic substances: Bridging ecology

and agriculture for a greener future. Agronomy 15(2), 410. https://doi.org/10.3390/agronomy15020410.
43. Manzoni, S., Porporato, A., 2009. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. Soil Biol. Biochem. 41(7), 1355–1379. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.02.031.
44. Moorhead, D.L., Sinsabaugh, R.L., 2006. A theoretical model of litter decay and microbial interaction. Ecol. Monogr. 76(2), 151–174. https://doi.org/10.1890/0012-9615(2006)076.
45. Mueller, R.O., Hancock, G.R., 2018. Structural equation modeling. In: Little, T.D. (Ed.), The Reviewer's Guide to Quantitative Methods in the Social Sciences. Routledge, New York, pp. 445–456.
46. Peng, H., Mu, L., Song, Y., Su, H., Ge, Y., Cheng, Z., Chen, G., 2025. Integrated machine learning model for prediction of nutrients contents and maturity in rural organic solid wastes aerobic composting. J. Environ. Chem. Eng. 118138. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118138.
47. Plaza, C., Courtier-Murias, D., Fernández, J.M., Polo, A., Simpson, A.J., 2013. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. Soil Biol. Biochem. 57, 124–134. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.07.026.
48. Post, W., King, A., Wullschleger, S., 1996. Soil organic matter models and global estimates of soil organic carbon. In: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.), Evaluation of Soil Organic Matter Models: Using Existing Long-Term Datasets. Springer. pp. 201–222. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_14.
49. Ryckeboer, J., Mergaert, J., Vaes, K., Klammer, S., De Clercq, D., Coosemans, J., Swings, J., 2003. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. Ann. Microbiol. 53(4), 349–410.
50. Saypariya, D.C., Singh, D., Dikshit, A.K., Dangi, M.B., 2024. Composting of organic fraction of municipal solid waste in a three-stage biodegradable composter. Heliyon 10 (2024) e37444. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37444.
51. Schmidt, M., Torn, M., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I., Manning, D., 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature (49), 478. https://doi.org/10.1038/nature10386.
52. Semenov, V., Tulina, A., Semenova, N., Ivannikova, L., 2013. Humification and nonhumification pathways of the organic matter stabilization in soil: A review. Eurasian Soil Sci. 46(4), 355–368. https://doi.org/10.1134/S106422931304011X.
53. Senesi, N., Plaza, C., 2007. Role of humification processes in recycling organic wastes of various nature and sources as soil amendments. Clean–Soil, Air, Water. 35(1), 26–41. https://doi.org/10.1002/clen.200600018.
54. Sierra, C.A., Harmon, M.E., Perakis, S.S., 2011. Decomposition of heterogeneous organic matter and its long-term stabilization in soils. Ecol. Monogr. 81(4), 634–619. https://doi.org/10.1890/11-0811.1.
55. Sierra, C.A., Mueller, M., Trumbore, S.E., 2012. Models of soil organic matter decomposition: The SoilR package, version 1.0. Geosci. Model Dev. 5(4), 1045–1060. https://doi.org/10.5194/gmd-5-1045-2012.
56. Sierra, J., Desfontaines, L., Favérial, J., Loranger-Merciris, G., Boval, M., 2013. Composting and vermicomposting of cattle manure and green wastes under tropical conditions: carbon and nutrient balances and end-product quality. Soil Research. 51(2), 142–151. https://doi.org/10.1071/SR13031.
57. Sinha, M., Sinha, D., Sinha, H., 1977. Organic matter transformations in soils: V. Kinetics of carbon and nitrogen mineralization in soils amended with different organic materials. Plant Soil. 46(3), 579–590. https://doi.org/10.1007/BF00015917.
58. Sinsabaugh, R.L., 2010. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil. Soil Biol. Biochem. 42(3), 391–404. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.014.
59. Smith, O., 1979. An analytical model of the decomposition of soil organic matter. Soil Biol. Biochem. 11(6), 585–606. https://doi.org/10.1016/0038-0717(79)90027-0.
60. Stein, C.M., Morris, N.J., Nock, N.L., 2011. Structural equation modeling. In: Balding, D.J., Bishop, M., Cannings, C. (Eds.), Statistical Human Genetics: Methods and Protocols. Springer, pp. 495–512.
61. Ullman, J.B., Bentler, P.M., 2012. Structural Equation Modeling. In: Weiner, I.B., Craighead, W.E. (Eds.), The Handbook of Psychology, 2nd edition, Vol. 2, Wiley, Hoboken, NJ, USA. https://doi.org/10.1002/9781118133880.hop202023.
62. Amlinger, F., Peyr, S. and Cuhls, C., 2008. Green house gas emissions from composting and mechanical biological treatment. Waste Manage. Res. 26(1), pp. 47–60. https://doi.org/10.1177/0734242X07088432.
63. Waqas, M., Hashim, S., Humphries, U.W., Ahmad, S., Noor, R., Shoaib, M., Lin, H.A., 2023. Composting processes for agricultural waste management: A comprehensive review. Processes 11(3), 731. https://doi.org/10.3390/pr11030731.
64. Wieder, W.R., Hartman, M., Kyker-Snowman, E., Eastman, B., Georgiou, K., Pierson, D., Rocci, K., 2024. Simulating global terrestrial carbon and nitrogen biogeochemical cycles with implicit and explicit representations of soil microbial activity. J. Adv. Model. Earth Syst. 16(6), e2023MS004156. https://doi.org/10.1029/2023MS004156.
65. Xia, H., Huang, W., Huang, K., Yang, R., Li, T., Mao, H., 2025. Effects of salt content on degradation and transformation performance of kitchen waste during vermicomposting. J. Environ. Chem. Eng. 117884. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117884.

66. Xu, Z., Li, R., Zhang, X., Wang, S., Xu, X., Tang, K.H.D., Quan, F., 2024. Molecular mechanisms of humus formation mediated by new ammonifying microorganisms in compost. Chem. Eng. J. 483, 149341. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149341.
67. Zech, W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T.M., Schroth, G., 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. Geoderma 79(1–4), 117–161. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00040-2.
68. Zhang, Y., Lashermes, G., Houot, S., Doublet, J., Steyer, J.-P., Zhu, Y., Garnier, P., 2012. Modelling of organic matter dynamics during the composting process. Waste Manage. 32(1), 19–30. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.008.
69. Zhang, Y., Liu, L., Huang, G., Yang, C., Tian, W., Ge, Z., Zhang, H., 2024. Enhancing humification and microbial interactions during co-composting of pig manure and wine grape pomace: the role of biochar and Fe_2O_3. Bioresour. Technol. 393, 130120. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130120.
70. Zhang, Y., Yue, D., Ma, H., 2015. Darkening mechanism and kinetics of humification process in catechol-Maillard system. Chemosphere 130, 40–45. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.051.
71. Zhu, L., Huang, K., Bai, T., Xia, H., 2025. Bacteriophages enhance the transformation of dissolved organic matter during vermicomposting of sludge. Bioresour. Technol. 132694. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132694.