

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

Shno Karimi and Hossein Shariatmadri*

Isfahan University of Technology

* Corresponding author, Email: shariat@iut.ac.ir

Abstract

Humification is a fundamental stage in the stabilization of organic matter and 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 different pathways of 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.

هوموسی شدن در فرآیندهای تولید کمپوست و ورمی کمپوست: ساز و کار، پویایی و مدل‌های

سینتیکی

شنو کریمی و حسین شریعتمداری*

گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان

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

چکیده

هوموسی شدن یکی از مراحل بنیادی در تثبیت مواد آلی و شکل‌گیری ترکیبات پایدارمانند اسیدهای هیومیک (HA) و فولویک (FA) در فرآیندهای تولید کمپوست و ورمی کمپوست است. این مرحله نه تنها 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 مرور نتایج پژوهش‌های منتشرشده در دوره ۲۵ ساله گذشته (بین ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵)، جنبه‌های مختلف واکنش‌های هوموسی شدن شامل 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. نتایج مرور نشان داد که کمپوست و ورمی کمپوست، بسته به نوع جمعیت میکروبی و شرایط فیزیکی، مسیرهای متفاوتی از حلقوی شدن و پلیمره شدن ترکیبات فنولی را طی می‌کنند. افزودنی‌هایی مانند زغال زیستی، اکسیدهای فلزی (مانند MnO_2 و Fe_2O_3)، و زغال زیستی (Biochar) نقش مؤثری در تسریع واکنش‌های اکسیداسیون-کاهش و بهبود نسبت اسید هیومیک به اسید فولویک دارند. مدل‌های سینتیکی کلاسیک نظیر مرتبه اول، دوم و پارابولیک، در پیش‌بینی تغییرات زمانی شاخص هوموسی شدن (Humification index: HI) مفیدند، اما مدل‌های هوش مصنوعی از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network: ANN) و جنگل تصادفی (Random Forest: RF) توانسته‌اند رفتار غیرخطی این واکنش‌ها را با دقت بالاتری تعریف کنند. بر اساس مطالعات اخیر، آینده پژوهش در این حوزه بر توسعه مدل‌های هیبریدی چندمقیاسی، ادغام داده‌های اومیکس (Omics) 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 هوموسی شدن، مسیر تازه‌ای برای بازیافت زیستی پسماندهای آلی، کاهش انتشار کربن، و تولید کودهای زیستی با کیفیت بالا در چارچوب اقتصاد زیستی چرخشی فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: هوموسی شدن، کمپوست، ورمی کمپوست، مدل‌های سینتیکی، هوش مصنوعی، اسیدهای هیومیک و فولویک.

هوموسی شدن¹ 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 طی هوموسی شدن، ترکیبات آلی ساده و ناپایدار حاصل از تجزیه مواد گیاهی و حیوانی، از طریق مجموعه‌ای از واکنش‌های اکسید شدن، پلیمریزه شدن و تراکم² به ترکیبات آروماتیک با وزن مولکولی بالا و پایداری زیاد تبدیل می‌شوند که به‌طور کلی به‌عنوان مواد هوموسی³ شناخته می‌شوند. در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش حجم پسماندهای کشاورزی، دامی و صنعتی، و ضرورت بازیافت پایدار مواد آلی، شناخت دقیق از واکنش‌های هوموسی شدن و عوامل مؤثر بر آن اهمیت دوچندان یافته است (Bian et al., 2024). تشکیل مواد هوموسی نه تنها موجب بهبود کیفیت کمپوست و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) آن می‌شود، بلکه از دیدگاه زیست محیطی نیز در تثبیت کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش بسزایی دارد (Waqas et al., 2023; Karimi and Haghghi, 2025). به بیان دیگر، سطح تکامل واکنش‌های هوموسی شدن ارتباط مستقیمی با شاخص‌های بلوغ، ثبات بیوشیمیایی، و کیفیت نهایی کمپوست دارد. از این رو، مدیریت علمی این مرحله، کلید اصلی تولید کودهای آلی با کیفیت برتر و حداقل اثرات زیست محیطی به‌شمار می‌آید (Kulikowska et al., 2015a). در چارچوب اقتصاد چرخشی، هوموسی شدن به‌عنوان یکی از مؤثرترین مسیرها برای بازیابی عناصر غذایی و کاهش خطر آلودگی ناشی از پسماندها شناخته می‌شود (Li et al., 2022). از این رو، 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.

مقایسه سازوکارهای هوموسی شدن در کمپوست و

ورمی‌کمپوست

اگرچه اصول کلی هوموسی شدن در تمامی سامانه‌های تبدیل زیستی مواد آلی مشابه است، مسیرهای غالب واکنش و سرعت تحول ساختاری در کمپوست و ورمی‌کمپوست تفاوت‌های قابل توجهی نشان می‌دهد. در کمپوست‌سازی، پیشرفت هوموسی شدن عمدتاً به فعالیت میکروارگانیسم‌های 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 بالایی 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، دسترسی 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). مطالعات طیف‌سنجی نشان داده‌اند که محصولات ورمی‌کمپوست دارای نسبت بالاتری از گروه‌های عاملی پایدار و درجه بیشتری از آروماتیک شدن هستند، که بیانگر تسریع در فرآیند پایدارسازی مواد آلی است (Maffia et al., 2025).

تفاوت در نوع جامعه میکروبی و شرایط ریزمحیطی باعث

3- Humic Substances

1- Humification

2- Condensation

می‌شود رشد تبدیل مواد آلی در ورمی‌کمپوست یکنواخت‌تر و در برخی مراحل سریع‌تر از کمپوست باشد. این ویژگی مخصوصاً در مراحل ابتدایی دگرگونی مواد آلی مشاهده می‌شود، جایی که تعامل مستقیم کرم‌ها با بستر موجب تسریع تجزیه ترکیبات ناپایدار و فراهم شدن پیش‌سازهای هوموسی می‌شود (Edwards and Arancon, 2005; Awasthi et al., 2020). در نتیجه، درحالی که 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 مکانیسم‌های مولکولی واکنش‌های هوموسی شدن

هوموسی شدن در اصل یک زنجیره پیچیده از واکنش‌های زیستی و شیمیایی است که در طول 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 طریق پلیمریزه شدن 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، میکروارگانیزم‌ها و آنزیم‌های خارج‌سلولی آن‌ها (مانند لاکاز، پراکسیداز، و فنول‌اکسیداز) نقش اصلی را در اکسید کردن لیگنین و ایجاد پیوندهای کوئینونی دارند (Li et al., 2022). مطالعات جدید نشان می‌دهد که میکروارگانیزم‌های آمونیاک‌ساز و نیتروفیکاسیون‌کننده، با القای شرایط اکسید کردن و تغییر مسیرهای اکسیداسیون و احیا، نرخ پلیمریزه کردن ترکیبات فنولی

را افزایش می‌دهند (Xu et al., 2024). این پویایی مولکولی، پیوند بین تحولات 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: اسید فولویک با وزن مولکولی کم و قطبیت زیاد، اسید هیومیک 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 هوموسی شدن ($HI = HA / (HA + FA)$)، شاخص‌های مهمی برای سنجش میزان پیشرفت هوموسی شدن محسوب می‌شوند (Sierra et al., 2013).

هوموسی شدن در کمپوست و ورمی‌کمپوست: مقایسه فرآیندها

کمپوست و ورمی‌کمپوست کردن هر دو مسیرهای زیستی برای پایدارسازی مواد آلی هستند، اما از نظر دما، پویایی میکروبی و مسیرهای بیوشیمیایی تفاوت اساسی دارند. در فرآیند کمپوست کردن، بیشتر واکنش‌ها در دماهای بالا ($45-70^{\circ}\text{C}$) و بیشتر تحت اثر میکروارگانیزم‌های گرمادوست^۶ رخ می‌دهند که به تجزیه سریع ترکیبات آلی و در ادامه به هوموسی شدن حرارتی منجر می‌شود (Abbasi et al., 2009). در مقابل، ورمی‌کمپوست کردن در دماهای پایین و در حضور باکتری‌های مزوفیل (متوسط $25-30^{\circ}\text{C}$) و در حضور کرم‌های خاکی از گونه‌هایی مانند *Eisenia fetida* انجام می‌شود. کرم‌ها با افزایش سطح تماس مواد آلی و ترشح موکوس و آنزیم‌ها، فرآیند میکروبی را تسریع کرده و باعث هوموسی شدن 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، درحالی که

6- Thermophile

4- Condensation reactions

5- Humin

شبکه‌های عصبی مصنوعی برای توصیف سرعت هوموسی شدن پیشنهاد شده‌اند (De Medina-Salas et al., 2022; Walling, 2022).

در کنار مدل‌های ریاضی، روش‌های آماری نوین نظیر مدل‌سازی معادلات ساختاری¹⁰ (SEM) 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 چون دما، فعالیت آنزیمی و ترکیب میکروبی را فراهم کرده‌اند. به‌طور کلی، مدل‌سازی سینتیکی درک عمیق‌تری از پویایی زمانی هوموسی شدن فراهم می‌کند 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 مکانیسم‌های مولکولی هوموسی شدن ناشناخته است (Dey Chowdhury et al., 2023). اغلب پژوهش‌ها به یکی از دو جنبه‌ی ساختار شیمیایی یا مدل‌سازی عددی محدود شده‌اند، درحالی‌که فرآیند واقعی هوموسی شدن ترکیبی از واکنش‌های بیوشیمیایی و تحولات سینتیکی است. علاوه بر این، اثر متقابل 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).

از این‌رو، هدف مقاله حاضر ارائه مروری جامع و یکپارچه بر هوموسی شدن در فرآیندهای تولید کمپوست و ورمی‌کمپوست با تمرکز بر (۱) مکانیسم‌های شیمیایی و زیستی تشکیل مواد هوموسی، (۲) پویایی زمانی و سینتیکی این فرآیند، و (۳) مدل‌های ریاضی و نوین پیش‌بینی هوموسی شدن است. این مقاله تلاش می‌کند با ادغام داده‌های اخیر (۲۰۱۸-۲۰۲۵) از مطالعات

ورمی‌کمپوست با ارتقای تشکیل ترکیبات حلقوی^۷ و تشکیل گروه‌های عاملی اکسیژن دار (کربوکسیلیک، فنولی، آمیدی) کیفیت زیستی و کشاورزی بیشتری ایجاد می‌کند (Kulikowska et al., 2015b). همچنین، عوامل محیطی مانند هدایت الکتریکی و رطوبت می‌توانند مسیرهای میکروبی و سرعت هوموسی شدن را تغییر دهند (Xia et al., 2025). (Bian et al., 2024). نیز نشان داده‌اند که افزودنی‌هایی نظیر زغال زیستی، MnO_2 و رس‌های آهن‌دار می‌توانند پلیمریزه شدن ترکیبات حلقوی را تسریع کرده و شاخص هوموسی شدن را تا دو برابر افزایش دهند. در مجموع، می‌توان گفت فرآیند کمپوست بیشتر موجب پایداری شیمیایی (کاهش مواد ناپایدار) می‌شود، درحالی‌که فرآیند 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 هوموسی شدن

نخستین مدل‌های ریاضی در فرآیند کمپوست کردن توسط (Hamelers, 2004) ارائه گردید. 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 برای توصیف هوموسی شدن پیشنهاد شده‌اند، از جمله مدل‌های لگاریتمی، توانی^۸، و مدل پارابولیک (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.

مطالعه (Zhang et al., 2012) یکی از نخستین پژوهش‌هایی بود که پویایی ماده آلی را در کمپوست‌های مختلف با مدل‌های چندجزئی^۹ بررسی کرد. در سال‌های اخیر نیز مدل‌های ترکیبی مانند مدل‌های لجیستیک-توانی و مدل‌های ساختاری مبتنی بر

9- Multi-compartment
10- Structural Equation Modeling

7- Aromatic
8- Power law

مولکولی، میکروبی و مدل‌سازی، چارچوبی یکپارچه برای فهم بهتر تبدیل مواد آلی به هوموس ارائه دهد، فرآیندی که در قلب پایداری زیست‌محیطی و مدیریت هوشمند پسماندهای آلی جای دارد.

مکانیسم‌های شیمیایی و زیستی هوموسی شدن در کمپوست و ورمی‌کمپوست

واکنش هوموسی شدن را می‌توان یکی از پیچیده‌ترین و چندوجهی‌ترین پدیده‌های 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 بالا و ساختمان حلقوی تبدیل می‌شوند (Zech et al., 1997). در واقع، هوموسی شدن به معنی «بلوغ و پایداری» ماده آلی است، زیرا در پایان آن، ترکیباتی ایجاد می‌شود که مقاومت زیادی در برابر تجزیه دارند و قادرند کربن را در خاک برای مدت‌های طولانی ذخیره کنند (Bian et al., 2024).

مسیرهای کلی واکنش‌های شیمیایی

از دیدگاه شیمیایی، هوموسی شدن از سه مرحله اصلی تشکیل می‌شود (Li et al., 2022):

الف) مرحله اکسیداسیون و تخریب لیگنین:

در این مرحله، لیگنین، سلولز و همی سلولز تحت اثر آنزیم‌هایی چون لاکاز^{۱۱} و لیگنین پراکسیداز تجزیه می‌شوند. محصولات اولیه شامل ترکیبات فنولی، کوئینونی و اسیدهای آلی هستند.

ب) مرحله پلیمریزه شدن و تراکم^{۱۲}:

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 طریق تراکم پی‌درپی و حذف گروه‌های قطبی تشکیل می‌شوند. در نتیجه، ماده آلی از ساختارهای خطی به حلقوی تبدیل می‌شود و ترکیباتی با رنگ تیره، وزن مولکولی بالا 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 حلقوی شدن و پایداری ساختار است (Abbasi et al., 2009).

نقش آنزیم‌ها و واکنش‌های اکسیداتیو-پلیمریزاسیون

یکی از عوامل کلیدی در هوموسی شدن، فعالیت آنزیم‌های اکسیداتیو است. آنزیم‌های لاکاز، منگنز پراکسیداز، و لیگنین پراکسیداز با اکسید کردن گروه‌های فنولی در لیگنین و تولید رادیکال‌های آزاد، مسیر پلیمریزاسیون کوئینونی را آغاز می‌کنند. در حضور اکسیژن، این رادیکال‌ها به صورت 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 و شاخص هوموسی شدن (HI) را تا ۳۰ درصد ارتقاء دهد (Zhang et al., 2024). در مطالعه (Li et al., 2022) استفاده از آنزیم لاکاز در کمپوست کردن منجر به افزایش قابل توجه محتوای گروه‌های کربونیل و کربوکسیل در اسید هیومیک شد که بیانگر افزایش واکنش‌های اکسیداتیو بود. در ورمی‌کمپوست کردن، فعالیت آنزیمی نه تنها از سوی میکروارگانیسم‌ها بلکه از طریق ترشحات گوارشی کرم‌های خاکی تقویت می‌شود. موکوس و ترشحات روده‌ای *Eisenia fetida* حاوی آنزیم‌هایی مانند پروتئاز، آمیلاز و سلولاز است که منجر به تسریع تجزیه اولیه و افزایش سوبسترا برای واکنش‌های پلیمریزه شده بعدی می‌شود

Dores-Silva et al., 2018). به همین دلیل، ورمی کمپوست معمولاً نسبت HA/FA بزرگتری دارد، زیرا مرحله تراکم و حلقوی شدن با سرعت بیشتری رخ می‌دهد (Zhu et al., 2025).

نقش جوامع میکروبی در هوموسی شدن

جامعه میکروبی^{۱۳} کمپوست نقش مرکزی در تنظیم مسیرهای شیمیایی هوموسی شدن دارد. در مراحل اولیه، باکتری‌های تجزیه‌کننده سلولز مانند *Bacillus*, *Cellulomonas* و *Thermobifida* فعال هستند. در حالی که در مراحل پایانی، قارچ‌های لیگنولیتیک نظیر *Trametes versicolor* و *Aspergillus fumigatus* غالب می‌شوند (Waqas et al., 2023). در فرآیند ورمی کمپوست، میکروفلورای درون مجرای گوارشی کرم‌ها غنی از باکتری‌های *Pseudomonas*, *Actinobacteria* و *Nocardia* است که تولیدکننده آنزیم پراکسیداز هستند (Dey Chowdhury et al., 2023). مطالعه (Zhu et al., 2025) نشان داده است که حضور باکتریوفازها در بستر ورمی کمپوست باعث بازآرایی میکروبی و افزایش فعالیت ژن‌های مرتبط با اکسیداسیون لیگنین شد، که در نهایت هوموسی شدن را تسریع کرد.

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

اثر مواد معدنی و افزودنی‌ها در مسیر هوموسی شدن

افزودن مواد معدنی^{۱۴} یکی از مؤثرترین روش‌ها برای اصلاح مسیرهای شیمیایی هوموسی شدن است. مطالعه (Zhang et al., 2024) نشان داد که افزودن Fe_2O_3 در ترکیب با زغال زیستی،

تشکیل ترکیبات حلقوی را تقویت و نسبت HI را تا ۲/۷ درصد افزایش می‌دهد (Huang et al., 2025). در مقابل، غلظت‌های بالای نمک یا pH قلیایی می‌تواند فرآیند تراکم را کند نماید، زیرا باعث یونیزه شدن گروه‌های کربوکسیلیک و کاهش برهم‌کنش بین مولکول‌های فنولی می‌شود (Xia et al., 2025).

تفاوت مکانیسمی هوموسی شدن در کمپوست و ورمی کمپوست

در ورمی کمپوست کردن، فعالیت فیزیکی کرم‌ها سطح تماس و دسترسی میکروبی را افزایش داده و محیطی با تعادل رطوبتی مناسب فراهم می‌کند. از سوی دیگر، در کمپوست کردن، افزایش دما سبب نابودی برخی میکروارگانیسم‌های حساس و افزایش نرخ واکنش‌های اکسیداتیو می‌شود (Abbasi et al., 2009). نتیجه نهایی این است که در کمپوست، مواد آلی بیشتر به پایداری حرارتی می‌رسند، اما در ورمی کمپوست، پایداری زیستی و شیمیایی بالاتری حاصل می‌شود. این تفاوت‌ها در مکانیسم، دلیل اصلی اختلاف در کیفیت و شاخص‌های هوموسی شدن دو نوع فرآیند است (Dey Chowdhury et al., 2023).

مدل‌سازی مولکولی هوموسی شدن

پیشرفت‌های اخیر در طیف‌سنجی (FTIR, $^{13}\text{C-NMR}$, XPS) و مدل‌سازی مولکولی، درک عمیق‌تری از مسیرهای واکنشی هوموسی شدن فراهم کرده‌اند. مطالعات (Xu et al., 2024) و (Bian et al., 2024) با استفاده از مدل‌های ساختاری (SEM) نشان دادند که نسبت لیگنین: سلولز و فعالیت لاکاز دو متغیر کلیدی تعیین‌کننده نرخ هوموسی شدن 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 کمی تبیین گردد. این ادغام دیدگاه‌های سینتیکی و مولکولی، پایه‌ای برای توسعه

مدل‌های پیش‌بینی‌کننده کیفیت نهایی کمپوست فراهم کرده است (Ebrahimzadeh et al., 2017; De Medina-Salas et al., 2022).

تحلیل یکپارچه تعامل مسیرهای شیمیایی و زیستی در هوموسی شدن

اگرچه هوموسی شدن اغلب به صورت سلسله‌ای از واکنش‌های شیمیایی و زیستی توصیف می‌شود، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که این فرآیند در عمل به صورت یک شبکه پویا و همبسته عمل می‌کند، که هر مؤلفه می‌تواند شکل و سرعت مسیرهای دیگر را تغییر دهد. به بیان دیگر، هوموسی شدن به یک خط 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 دسترسی 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 تحولات فیزیکی-شیمیایی محیط سبب می‌شود جامعه میکروبی و فعالیت آنزیمی به طور مداوم بازآرایی شود. این بازآرایی نه تنها سرعت واکنش‌های اولیه را تغییر می‌دهد، بلکه توزیع پاسخ‌های میکروبی در زمان را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Blagodatskaya and Anderson, 1998) به عنوان مثال، دگرگونی‌های میکروبی که از تجمع *Bacillus* و *Actinobacteria* در فاز حرارتی کمپوست حکایت دارند، با افزایش نرخ تجزیه لیگنین و تغییر فراوانی واسطه‌های کربنی همراه بوده است (Ryckeboer et al., 2003).

در مقابل، در ورمی‌کمپوست فرآیند هوموسی شدن تحت تأثیر چندین عامل زیستی هم‌زمان از قبیل: تعامل مستقیم میان کرم‌های خاکی و میکروارگانیسم‌های بستر، تحولات میکروبی در مجرای گوارشی کرم‌ها و تسهیل تماس سطحی بین میکروارگانیسم 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 هوموسی شدن، مانند نسبت HA/FA یا شاخص معدنی شدن، در واقع بازتاب تعادل میان مسیرهای تخریب، بازترکیب، و تثبیت هستند، نه صرفاً خروجی یک توالی خطی واکنش (Cotrufo et al., 2013; Plaza et al., 2013). بنابراین، تفسیر تغییرات این شاخص‌ها بدون در نظر گرفتن وابستگی متقابل میان 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 (metagenomic/metatranscriptomic) و سینتیکی به صورت یکپارچه در چارچوب‌های مدل جدیدتر تحلیل شوند تا بتوان ساختار شبکه‌های واکنشی و نقاط کنترل آن‌ها را استخراج کرد. چنین رویکردی نه تنها برای تحلیل مکانیزمی ارزشمند است، بلکه می‌تواند اساس مدل‌های پیش‌بینی‌کننده برای سامانه‌های مختلف کمپوست و ورمی‌کمپوست را فراهم سازد.

مدل‌های سینتیکی و ریاضی هوموسی شدن در کمپوست و ورمی‌کمپوست

مدل‌سازی سینتیکی^{۱۵} در مطالعات کمپوست و ورمی‌کمپوست یکی از مؤثرترین ابزارها برای کمی‌سازی پویایی مواد آلی و پیش‌بینی کیفیت نهایی کمپوست است (Campbell and

(Paustian, 2015). هدف اصلی این مدل‌ها، توصیف تغییرات زمانی پارامترهایی نظیر کربن آلی کل (TOC)، نسبت C/N، اسیدهای هیومیک (HA) و اسیدهای فولویک (FA) در طول فرآیند است. همان‌طور که (Hamelers, 2004) در مرور کلاسیک خود اشاره کرد، رفتار سینتیکی کمپوست کردن ترکیبی از چند واکنش متوالی و موازی است که شامل اکسیداسیون مواد آلی قابل تجزیه، تبدیل مواد نیمه‌پایدار به ترکیبات حلقوی، و در نهایت پلیمریزاسیون مواد هوموسی است. از آن زمان تاکنون، ده‌ها مدل ریاضی توسعه یافته‌اند که یا بر مبنای روش‌های استقرایی^{۱۶} و یا مبتنی بر مکانیسم‌های واکنش^{۱۷} هستند (Smith, 1979).

مدل‌های سینتیک تجربی^{۱۸}

مدل‌های تجربی معمولاً از معادلات ساده ریاضی برای برازش داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌کنند و فرض می‌گیرند که سرعت واکنش تابعی از زمان است.

الف) مدل مرتبه اول^{۱۹}

$$C_t = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

که در آن C_t مقدار کربن آلی (یا پارامتر انتخابی) در زمان t ، C_0 مقدار اولیه و k ثابت سرعت واکنش 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 مطالعات برای مراحل ابتدایی فرآیند تجزیه مواد کاربرد دارد (Saypariya et al., 2024).

ب) مدل مرتبه دوم^{۲۰}

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_0} + kt \quad (2)$$

در این رابطه ضرایب همان تعاریف قبلی را دارند. در این مدل، فرض بر این است که واکنش‌ها شامل دو مؤلفه هم‌زمان هستند، معمولاً ترکیبات کربوهیدراتی و نیتروژنی، که با یکدیگر در

تعامل‌اند. مطالعات (Ebrahimzadeh et al., 2017) نشان دادند که در بسیاری از کمپوست‌های کود دامی، مدل مرتبه دوم دارای ضریب تبیین (R^2) بالاتر از ۰/۹۵ بوده و بهتر از مدل مرتبه اول تغییرات کربن را توصیف می‌کند.

ج) مدل لگاریتمی و نمایی تعدیل‌شده

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

$$C_t = a + b \ln(t) \quad (3)$$

که در آن پارامترهای a و b از داده‌های تجربی برازش می‌یابند. این مدل بیشتر برای مراحل پایدارسازی^{۲۱} کاربرد دارد که کاهش مواد آلی با آهنگ آهسته‌تری صورت می‌گیرد (De Medina-Salas et al., 2022).

مدل‌های پارابولیک و توانی^{۲۲}

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

الف) مدل پارابولیک (Parabolic model)

$$C_t = a + bt^2 \quad (4)$$

که در آن y می‌تواند غلظت HA یا شاخص هوموسی شدن (HI) باشد. پارامتر b سرعت نسبی تشکیل ماده هیومیکی را نشان می‌دهد. مطالعه (Ebrahimzadeh et al., 2017) و (Karimi et al., 2024b) نشان داد که مدل پارابولیک قادر است افزایش تدریجی HA و کاهش FA را در طی زمان با دقت بالا ($R^2 > 0.98$) برازش دهد.

ب) مدل توان زمانی^{۲۳}

$$C_t = a t^n \quad (5)$$

که در آن n شاخص شتاب یا کندی فرایند است. در کمپوست‌هایی که افزودنی‌های معدنی (مثل Fe_2O_3 یا MnO_2)

20- Second-order model
21- Stabilization
22- Parabolic and Power Models
23- Power-law model

16- Inductive models
17- Mechanistic models
18- Empirical Kinetic Models
19- First-order model

دارند، مقدار n معمولاً بین $0/4$ تا $0/6$ گزارش شده است که نشانگر شتاب فرآیند در مراحل اولیه است (Zhang et al., 2024).

مدل‌های چندجزئی و دو مرحله‌ای²⁴

به دلیل محدودیت‌های مدل‌های موجود یا برای بیان و فهم بهتر واکنش‌های صورت گرفته در فرآیند هوموسی شدن این مدل‌ها به ترتیب و با گدن زمان ارائه شد. از آنجا که ماده آلی شامل اجزای مختلفی است که با سرعت‌های متفاوتی تجزیه و پایدار می‌شوند، مدل‌های چندجزئی توسعه یافته‌اند.

مدل دو مرحله‌ای معمولاً شامل دو نرخ متفاوت است:

$$C_t = C_1 e^{-k_1 t} + C_2 e^{-k_2 t} \quad (6)$$

که در آن C_1 و C_2 سهم ترکیبات سریع تجزیه و کند تجزیه را نشان می‌دهند. این مدل نخستین بار توسط (Zhang et al., 2012) در مطالعه ۱۲ نوع کمپوست استفاده شد و توانست فرآیندهای سریع اولیه و کند پایانی را هم‌زمان تبیین کند. در مدل‌های پیشرفته‌تر (Walling, 2022) 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 ساختاری²⁵

مدل‌های ساختاری تلاش می‌کنند فرآیند هوموسی شدن را نه صرفاً به‌عنوان برازش ریاضی داده‌ها، بلکه در قالب شبکه‌ای از روابط علی میان متغیرهای زیستی، شیمیایی و محیطی تبیین کنند. مبنای نظری این رویکرد بر مدل‌سازی معادلات ساختاری²⁶ (SEM) استوار است؛ یک چارچوب آماری چندمتغیره که امکان بررسی هم‌زمان اثرات 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 علی فرآیند تأکید می‌کند. این ویژگی امکان ادغام هم‌زمان داده‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی را در یک چارچوب تحلیلی واحد فراهم می‌سازد و در نتیجه دیدگاهی جامع‌تر از پویایی هوموسی شدن ارائه می‌دهد (Stein et al., 2011; Mueller and Hancock, 2018).

مطالعه (Xu et al., 2024) با استفاده از مدل معادلات ساختاری (SEM) نشان داد که سه مسیر اصلی اکسیداسیون لیگنین، نیتریفیکاسیون، و پلیمریزه شدن فنولیک، با ضرایب مسیر مستقیم²⁷ به ترتیب $0/82$ ، $0/64$ و $0/59$ بیشترین سهم را در تشکیل HA دارند. مدل SEM به پژوهشگران این امکان می‌دهد تا اثرات مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای زیستی (مثل فعالیت لاکاز، رطوبت و pH) را هم‌زمان بررسی کنند (Bian et al., 2024). در مطالعه (Zhu et al., 2025)، از مدل SEM برای بررسی اثر باکتریوفازها بر تبدیل DOM به HA در ورمی‌کمپوست استفاده شد و مشخص گردید که فازهای میکروبی تحت تأثیر فاکتورهای ریداکس، سرعت تشکیل مواد هوموسی را تا 20% افزایش می‌دهند.

مدل‌های ترمودینامیکی و سینتیکی پیشرفته

مدل‌های ترمودینامیکی نیز به‌منظور درک عمیق‌تر از رفتار انرژی در فرآیند هوموسی شدن به‌کار گرفته شده‌اند. این مدل‌ها با ترکیب سینتیک واکنش و انتقال جرم²⁸ می‌توانند میزان انرژی آزادشده در هر مرحله را محاسبه کنند (Walling, 2022). مدل ترکیبی انرژی-سینتیکی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$k = A e^{-E_a/(RT)} \quad (7)$$

$$\frac{dC}{dt} = -kC^n \quad (8)$$

27- Path coefficients

28- Mass transfer

24- Multi-component and Two-phase Models

25- Mechanistic and Structural Models

26- Structural Equation Modeling

که در آن E_a انرژی فعال‌سازی، R ثابت گازها و T دمای مطلق است. در کمپوست‌های ترموفیل، E_a معمولاً بین ۳۰-۴۵ کیلوژول بر مول گزارش شده است، درحالی‌که در ورمی‌کمپوست، به دلیل دمای پایین‌تر، مقدار آن کمتر (۲۰-۲۵ کیلوژول بر مول) است (Huang et al., 2025).

همچنین، مدل‌های ساختاری و داده‌محور در پیش‌بینی تغییرات غلظت HA و HI در شرایط غیرآبده‌آل (مثل رطوبت متغیر یا افزودنی‌های چندگانه) برتری آشکاری دارند (Walling, 2022; Zhu et al., 2025).

ارزیابی تحلیلی کارایی مدل‌های سینتیکی در تبیین هوموسی شدن

مدل‌سازی سینتیکی هوموسی شدن 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 و وابسته به شرایط ریزمحیطی است (Sierra et al., 2012). این ناهمگنی می‌تواند موجب شود پارامترهای مدل بیشتر بیانگر برازش آماری بوده تا بازتاب مستقیم مکانیسم‌های 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.

پیچیدگی سینتیکی در ورمی‌کمپوست بیشتر است، زیرا فعالیت کرم‌های خاکی موجب ایجاد خاکدانه‌های متفاوت و تغییر در دسترسی زیستی بستر می‌گردد (Zhang et al., 2015). چنین شرایطی می‌تواند نوسانات مکانی و زمانی در نرخ تبدیل مواد آلی

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 هوموسی شدن به‌کار رفته‌اند. مطالعه (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 C/N ، و نرخ تولید CO_2 عملکرد بسیار دقیقی دارند، زیرا قادرند اثر متقابل متغیرهای محیطی را بدون فرض رابطه خطی مدل‌سازی کنند (Bagheri et al., 2025). به‌عنوان نمونه، مدل RF توانست سهم نسبی هر پارامتر (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).

ایجاد کند؛ پدیده‌ای که مدل‌های ساده تک‌پارامتری قادر به توضیح آن نیستند. مطالعات مربوط به پایداری ماده آلی خاک نشان می‌دهد که درک صحیح این ناهمگنی‌ها برای تفسیر رفتار بلندمدت مواد هوموسی ضروری است (Schmidt et al., 2002). نکته کلیدی در ارزیابی مدل‌های سینتیکی، تمایز میان کیفیت برازش آماری و معنای زیستی پارامترهاست. 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 مکانیسم‌های زیستی باید مورد توجه قرار گیرد (Davidson and Janssens, 2006). بنابراین، انتخاب مدل مناسب برای مقایسه 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 در توصیف هوموسی شدن

مدل‌سازی فرآیند هوموسی شدن به‌عنوان ابزاری برای تبیین پویایی تبدیل ماده آلی، طی سال‌های اخیر از چارچوب‌های کلاسیک سینتیکی به سمت رویکردهای چندمقیاسی و داده‌محور توسعه یافته است. از آنجا که هوموسی شدن 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 به دلیل سادگی ساختاری و قابلیت تفسیر فیزیکی، ابزارهای مفیدی برای برآورد نرخ تبدیل ماده آلی محسوب می‌شوند. این مدل‌ها به ویژه 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 می‌سازند و ارتباط بهتری با فرآیندهای زیستی واقعی برقرار می‌کنند (Wieder et al., 2023). مدل‌های غیرخطی مانند توابع لوجستیک نیز در توصیف رفتار اشباع‌شونده شاخص‌های هوموسی شدن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها قادرند مراحل اولیه سریع و فاز پایدار نهایی را بازنمایی کنند و تصویری واقع‌بینانه‌تر از دینامیک 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 مکانیزمی آن‌ها محدودتر است (Li et al., 2023; Peng et al., 2025). مدل‌های معادلات ساختاری امکان تحلیل روابط علی میان متغیرها را فراهم می‌کنند و نقش عوامل زیستی و شیمیایی را در هوموسی شدن به‌صورت یک شبکه تعاملی نشان می‌دهند. این چارچوب‌ها به ویژه در مطالعات 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 هوموسی شدن 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، جدول ۱ یک چارچوب تحلیلی خلاصه ارائه می‌دهد.

مقایسه ارائه‌شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که هر یک از رویکردهای مدل‌سازی هوموسی شدن، جنبه متفاوتی از پویایی تبدیل مواد آلی را هدف قرار می‌دهند 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

جدول ۱. مقایسه رویکردهای مدل‌سازی هوموسی شدن

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

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 هوموسی شدن ارائه دهند و مبنایی مناسب برای پیش‌بینی رفتار فرآیند و بهبود راهبردهای مدیریتی در کمپوست و ورمی‌کمپوست فراهم سازند.

عوامل مؤثر بر هوموسی شدن در فرآیندهای کمپوست و ورمی‌کمپوست
دما و فازهای حرارتی فرآیند
دما یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترلی در فرآیندهای کمپوست

تفسیر بالا، عمدتاً بر توصیف نرخ کلی واکنش متمرکزند و تغییرات ساختاری ماده آلی را به صورت 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 مکانیزی نتایج آن‌ها همواره ساده نیست. از سوی دیگر، مدل‌های معادلات ساختاری چارچوبی برای تحلیل روابط علی میان متغیرهای زیستی و شیمیایی فراهم می‌سازند که می‌تواند به درک عمیق‌تر فرآیند کمک کند، هرچند اجرای آن‌ها

افزایش pH می‌شوند. در مطالعه (Sierra et al., 2013) مشاهده شد که کمپوست‌های حاصل از ترکیب فضولات دامی و ضایعات گیاهی (با نسبت C/N، ۳۰) بیشترین شاخص هموموسی شدن ($HI \approx 0.65$) را داشتند. همچنین، ترکیب مواد اولیه مختلف با هدف ایجاد توازن کربن و نیتروژن، راهکار مؤثری برای افزایش بازده هموموسی شدن است (Kulikowska and Klimiuk, 2011). برای مثال، کمپوست‌کردن مخلوط لجن خمیر کاغذ (غنی از کربن) با فضولات 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 به صورت مستقیم بر انتقال جرم، نفوذ اکسیژن و فعالیت میکروبی اثر دارد. رطوبت بهینه برای کمپوست حدود ۶۵-۵۵ درصد و برای ورمی کمپوست حدود ۸۰-۷۰ درصد گزارش شده است (Li et al., 2022). رطوبت کمتر از حد بهینه موجب خشک شدن بیشتر و کاهش فعالیت میکروبی می‌شود، درحالی‌که رطوبت بیش از حد باعث شرایط بی‌هوازی و تجمع اسیدهای آلی می‌گردد که در نهایت pH را کاهش و فرآیند هموموسی شدن را مختل می‌کند (Walling, 2022). تهویه نیز نقش اساسی دارد؛ اکسیژن نه تنها برای اکسیداسیون ترکیبات فنولی ضروری است بلکه باعث جلوگیری از تشکیل متان و سولفید هیدروژن می‌شود. با این حال، تهویه بیش از حد ممکن است موجب اتلاف نیتروژن از طریق تبخیر آمونیاک گردد. مطالعه (De Medina-Salas et al., 2022) نشان داد که نرخ تهویه متوسط ($0.4 \text{ m}^3 \text{ air/kg/day}$) بالاترین غلظت HA (34.2 g/kg) را در پایان فرآیند ایجاد کرد.

افزودنی‌های معدنی و کربنی

افزودنی‌ها^{۳۰} مانند زغال زیستی، رس، MnO_2 ، Fe_2O_3 و مواد معدنی تبادل یونی، ابزار مؤثری برای بهبود هموموسی شدن

و ورمی کمپوست کردن است، زیرا مستقیماً بر فعالیت میکروبی، نرخ اکسیداسیون لیگنین، و نوع مواد هموموسی تشکیل شده اثر می‌گذارد. در فرآیند کمپوست کردن، دما معمولاً از فاز مزوفیل (30°C - 40°C) آغاز و به فاز ترموفیل (50°C - 70°C) می‌رسد. در این مرحله، میکروارگانیسم‌های گرمادوست مانند *Thermobifida fusca* و *stearothermophilus Bacillus* تجزیه سریع مواد آلی و تشکیل پیش‌سازهای فنولی و کوئینونی می‌شوند (Hamelers, 2004; Bian et al., 2024). افزایش دما واکنش‌های اکسیداتیو را تهویت می‌کند، اما دمای بالاتر از 70°C می‌تواند موجب تخریب آنزیم‌های کلیدی (به‌ویژه لاکاز و پراکسیداز) و در نتیجه، کاهش نرخ پلیمریزاسیون شود. در مقابل، در ورمی کمپوست دما در محدوده 20°C - 30°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). مطالعه (Xia et al., 2025) نشان داد کاهش دما موجب افزایش نسبت اسید هیومیک به فولویک تا $9/0$ گردید، زیرا واکنش‌های آنزیمی در محیط مزوفیل پایدارترند. در مجموع، گرچه دمای بالاتر فرآیند را تسریع می‌کند، اما تعادل بهینه بین واکنش‌های اکسیداتیو (در فاز گرم) و واکنش‌های تراکمی-ترکیبات حلقوی (در فاز مزوفیل) برای دستیابی به هموموس با کیفیت بالا ضروری است.

نوع ماده اولیه و نسبت C/N

ترکیب ماده اولیه یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل در سرعت و کیفیت هموموسی شدن است. مواد دارای لیگنین زیاد مانند کاه و بقایای چوبی به دلیل مقاومت شیمیایی، فرآیند را کند می‌کنند، درحالی‌که فضولات دامی با نسبت C/N پایین‌تر، غنی از نیتروژن و قابل تجزیه‌ترند (Zhang et al., 2024). نسبت بهینه C/N برای آغاز فرآیند معمولاً بین ۲۵ تا ۳۰ گزارش شده است (Waqas et al., 2023). نسبت‌های بزرگتر منجر به محدودیت نیتروژن و کندی فرآیند، و نسبت‌های کوچکتر موجب تجمع آمونیوم و

محسوب می‌شوند.

الف) زغال زیستی

زغال زیستی با دارا بودن سطح ویژه زیاد و گروه‌های عاملی اکسیژنه، محیطی کاتالیتیک برای جذب و تراکم ترکیبات فنولی فراهم می‌کند. افزودن بر آن، می‌تواند شرایط رطوبتی و pH را تنظیم کند. مطالعه (Zhang et al., 2024) نشان داد که افزودن ۵ درصد زغال زیستی همراه با ۲ درصد Fe_2O_3 در کمپوست فضولات خوکی و نهاله انگور، شاخص HI را از ۰/۴ به ۰/۳۳ افزایش داد.

ب) اکسیدهای فلزی (MnO_2 , Fe_2O_3)

این ترکیبات از طریق واکنش‌های شبه‌فنتونی^{۳۱} موجب تسریع اکسیداسیون لیگنین و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شوند (Li et al., 2022). یون‌های فلزی واسطه همچنین آنزیم‌های اکسیداتیو را فعال‌تر می‌کنند. تحقیقات (Huang et al., 2025) نشان داده است که افزودن MnO_2 در سطح ۱ درصد می‌تواند نرخ تشکیل HA را تا ۴۰ درصد افزایش دهد.

ج) رس‌ها و مواد سیلیکاتی

رس‌های مونتوریلونیت و کائولینیت به‌عنوان جاذب‌های سطحی، نقش مهمی در تثبیت ترکیبات آلی ناپایدار دارند. این رس‌ها با فراهم کردن سایت‌های جذب برای ترکیبات کوئینونی، از اتلاف آن‌ها جلوگیری کرده و موجب افزایش پایداری مواد هوموسی می‌شوند (Bian et al., 2024).

اثر پارامترهای شیمیایی (EC, pH, نسبت‌های عنصری)

pH در محدوده ۶/۵ تا ۸ برای هوموسی شدن مناسب است (Li et al., 2022). هدایت الکتریکی (EC) بیشتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر معمولاً بیانگر تجمع نمک‌هاست که می‌تواند فعالیت آنزیمی و میکروبی را کاهش دهد. مطالعه 2024 (Saypariya et al.) نشان داد که افزایش هدایت الکتریکی 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 هیدروژن به کربن از ۱/۶ به ۱/۰ و افزایش 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 کمپوست، تجزیه حرارتی و اکسیداسیون لیگنین موجب تشکیل ترکیبات کوئینونی و در ادامه مواد هوموسی می‌شود. در مقابل، در ورمی‌کمپوست، فعالیت آنزیم‌های اکسیداتیو نظیر 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 آروماتیسته بالا و پایداری کربنی مشخص می‌گردند.

اثر هم‌افزایی و مدل‌های چندعاملی

عوامل فیزیکی (دما، رطوبت، تهویه)، شیمیایی (EC, pH, نسبت C/N)، و زیستی (میکروب‌ها، کرم‌های خاکی) در تعامل با یکدیگر فرآیند هوموسی شدن را کنترل می‌کنند. افزودنی‌های معدنی و کربنی با اصلاح شرایط ریداکس و فراهم کردن بستر مناسب برای تراکم ترکیبات حلقوی، نقش تقویتی دارند (Bian et al., 2024). از دیدگاه کاربردی، ایجاد تعادل 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 بالا و غنای هوموسی است (جدول ۲). در نهایت، ترکیب داده‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی در چارچوب مدل‌های چندعاملی مانند SEM و AI، می‌تواند مسیر جدیلی برای بهینه‌سازی فرآیند هوموسی شدن در سیستم‌های کمپوست و ورمی‌کمپوست فراهم کند (Zhang et al., 2015; Xu et al., 2024).

جدول ۲. مرور مقایسه‌ای فرآیندها و ویژگی‌های هوموسی شدن در کمپوست و ورمی کمپوست

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

ویژگی (Feature)	کمپوست (Composting)	ورمی کمپوست (Vermicomposting)	منابع (References)
محدوده دما (Temperature Range) (°C)	۴۵-۷۰ (Thermophilic - ترموفیل)	۲۵-۳۰ (Mesophilic - مزوفیل)	(Abbasi et al., 2009; Dores-Silva et al., 2018)
عوامل زیستی اصلی (Main Biological Agents)	باکتری‌ها و قارچ‌های ترموفیل (Thermophilic Bacteria & Fungi)	کرم‌های خاکی + (<i>Eisenia fetida</i>) میکروب‌های همزیست (Earthworms + Symbiotic Microbes)	(Dores-Silva et al., 2018)
نوع هوموسی شدن (Humification Type)	حرارتی (Thermochemical)	زیستی (Biochemical)	(Xu et al., 2024)
شاخص HI (HA/(HA+FA))	۰/۴ - ۰/۶	۰/۶ - ۰/۸	(Sierra et al., 2013; Zhu et al., 2025)
محتوای گروه‌های عاملی (Functional Groups Content)	کمتر (کربوکسیلیک محدود) (Lower - Limited Carboxylic)	بیشتر (فنولی، آمیدی و کربوکسیلیک متنوع) (Higher - Phenolic, Amide, etc.)	(Bian et al., 2024)
پایداری نهایی مواد (Final Material Stability)	بالا (با نظر حرارتی و شیمیایی) (High - Thermochemical)	بسیار بالا (از نظر زیستی و آروماتیک) (Very High - Bio-aromatic)	(Waqas et al., 2023)
افزودنی‌های مؤثر (Effective Additives)	زغال زیستی، Fe ₂ O 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 بالا (Production of high-quality humic substances)	(Li et al., 2022)
محدودیت اصلی (Main Limitation)	نیاز به دمای بالا و زمان زیاد (High temp & long duration needed)	حساسیت به شوری و رطوبت (Sensitivity to salinity & moisture)	(Xia et al., 2025)

کاربرد عملی آن در مقیاس واقعی وجود دارد. بخش عمده پژوهش‌ها بر شاخص‌های شیمیایی کلاسیک نظیر نسبت اسید هیومیک به 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. مطالعات طیف‌سنجی پیشرفته نشان داده‌اند که تشکیل ساختارهای حلقوی پایدار حاصل شبکه‌ای از واکنش‌های

چالش‌ها و مسیرهای آینده در پژوهش‌های هوموسی شدن

مرور مطالعات هوموسی شدن در سامانه‌های کمپوست و ورمی کمپوست نشان می‌دهد که اگرچه درک کلی از روند تبدیل ماده آلی در سال‌های اخیر پیشرفت قابل توجهی داشته است، هنوز فاصله معناداری میان توصیف آزمایشگاهی این فرآیند و

اکسایش و تراکم چندمرحله‌ای است. با این‌حال تبدیل این مشاهدات ساختاری به مدل‌های کمی 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 ورمی کمپوست برجسته‌تر است؛ جایی که برهم‌کنش هم‌زمان کرم‌های خاکی، ریزجانداران و شرایط فیزیکی بستر، رفتارهایی غیرخطی و وابسته به زمینه 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-کاهش و فعالیت آنزیمی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت و سرعت تشکیل مواد هوموسی دارند، اما این اطلاعات زیستی هنوز به صورت نظام‌مند در چارچوب‌های مدل‌سازی ادغام نشده‌اند (Li et al., 2022; Xu et al., 2024). 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. چالش مهم دیگر، نبود استانداردهای یکپارچه برای سنجش میزان هوموسی شدن است. تنوع شاخص‌ها، تفاوت در روش‌های استخراج و تحلیل و ناهمگنی مواد اولیه باعث می‌شود مقایسه مستقیم نتایج مطالعات 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., 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، تعادل میان دانش پایه و کاربرد مهندسی اهمیت ویژه‌ای دارد. کنترل عملیاتی پارامترهایی مانند دما، رطوبت، تهویه و زمان ماند، طراحی بسترهای مناسب برای فعالیت زیستی، و پایش شاخص‌های بلوغ، مستقیماً بر مسیر

هوموسی شدن اثر می‌گذارند. پیوند دادن یافته‌های مکانیزمی 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 به سمت 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 کمپوست و ورمی کمپوست را فراهم سازد.

نتیجه‌گیری

هوموسی شدن در فرآیندهای کمپوست و ورمی کمپوست را می‌توان نقطه تلاقی واکنش‌های شیمیایی، فعالیت‌های زیستی و مدیریت فرآیند دانست؛ پدیده‌ای که مستقیماً 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 پیوند دادن فهم مکانیزمی با طراحی فرآیندهای قابل کنترل بستگی دارد. چنین رویکردی می‌تواند هوموسی شدن را از یک پدیده تجربی به یک فرآیند 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

تضاد منافع

References

- Abbasi, T., Gajalakshmi, S., Abbasi, S., 2009. Towards modeling and design of vermicomposting systems: mechanisms of composting/vermicomposting and their implications. *Indian journal of Biotechnology*, 8(2), 177–182.
- 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. *Science of the total Environment*, 385(1-3), 252–261.
- Arancon, N., Edwards, C.A., 2011. The use of vermicomposts as soil amendments for production of field crops. *Vermiculture technology: earthworms, organic wastes, and environmental management*, 129–151.
- Awasthi, S.K., Sarsaiya, S., Awasthi, M.K., Liu, T., Zhao, J., Kumar, S., Zhang, Z., 2020. RETRACTED: Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities. *Bioresource technology*, 299, 122555.
- 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. *Environmental Technology*, 46(19), 3750–3761.
- Bernal, M.P., Albuquerque, J.A., Moral, R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource technology*, 100 22, 5444–5453.
- 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 Sustainable Resource Management*, 1(2), 181–198.
- Blagodatskaya, E.V., Anderson, T.-H., 1998. Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ratio and qCO₂ of microbial communities in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 30 (10 . 1274- 1269-11). Bowen, N.K., Guo, S., 2011. Structural equation modeling. Oxford University Press.
- Bugg, T.D., Ahmad, M., Hardiman, E.M., Singh, R., 2011. The emerging role for bacteria in lignin degradation and bio-product formation. *Current opinion in biotechnology*, 22(3), 394–400.
- Campbell, E.E., Paustian, K., 2015. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review. *Environmental Research Letters*, 10(12), 123004.
- 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? *Global change biology*, 19(4), 988–995.
- Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081), 165–173.
- De Medina-Salas, L., Castillo-González, E., Giraldo-Díaz, M.R., Blanco-Pérez, B., 2022. Reaction kinetics in the vermicomposting process of peach waste. *Life*, 12(9), 1290.
- 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. *Environmental Technology*, 1–38.
- Domínguez, J., Gómez-Brandón, M., 2012. Vermicomposting: composting with earthworms to recycle organic wastes. *Management of Organic Waste*, 29–48.
- 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? *Environmental Science and Pollution Research*, 25(18), 17490–17498.
- 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 Management & Research*, 35(12), 1226–123, 6.
- Edwards, C.A., Arancon, N.Q., Sherman, R.L., 2010. *Vermiculture technology: earthworms, organic wastes, and environmental management*.
- García-Gómez, A., Bernal, M., Roig, A., 2005. Organic matter fractions involved in degradation and humification processes during composting. *Compost science & utilization*, 13(2), 127–135.
- Gómez-Brandón, M., Lazcano, C., Lores, M., Domínguez, J., 2010. Detritivorous earthworms modify microbial community structure and accelerate plant residue decomposition. *Applied Soil Ecology*, 44(3), 237–244.
- 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.
- 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. Springer.

- Hamelers, H., 2004. Modeling composting kinetics: A review of approaches. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3(4), 331–342.
- 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.
- Karimi, S., Haghghi, M., 2025. Harnessing the greenhouse microbiome: Novel strategies to improve greenhouse crop productivity and resilience: A review. *Greenhouse Plant Production Journal*, 10–24.
- Karimi, S., Haghghi, M., Chakraborty, N., 2024a. Consuming biochar, compost, and microbial amendments for horticultural systems (A review). *Dryland Soil Research (DLSR)*, 1(2), 103–116.
- Karimi, S., Haghghi, M., Sharifani, M., 2025a. Eco-enzymes: A sustainable solution for waste management and agricultural applications. *Iran Agricultural Research*, 44(2), 62–78.
- 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. *Discover Applied Sciences*, 7(2), 100.
- Karimi, S., Raza, T., Mechri, M., 2024b. Composting and Vermitechnology in Organic Waste Management. In: *Environmental Engineering and Waste Management: Recent Trends and Perspectives*. Springer, pp. 449–470.
- Karimi, S., Shariatmadari, H., Nourbakhsh, F., 2026. Integrated assessment of physicochemical and structural changes during composting and vermicomposting of cattle and sheep manure with additive treatments. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-40802-1>.
- 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>
- Knicker, H., 2011. Soil organic N-An under-rated player for C sequestration in soils? *Soil Biology and Biochemistry*, 43(6), 1118–1129.
- Kulikowska, D., 2016. Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting. *Waste management*, 49, 196–203.
- 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.
- 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. *Journal of hazardous materials*, 300, 882–891.
- Kulikowska, D., Klimiuk, E., 2011. Organic matter transformations and kinetics during sewage sludge composting in a two-stage system. *Bioresource Technology*. 10958–10951, (23)102.
- Kumari, B., Kumari, N., 2025. Vermicomposting and Solid Waste Management: Microbial Processes and Environmental Applications. *UTTAR PRADESH JOURNAL OF ZOOLOGY*, 46(24), 23–52.
- Lehmann, J., Kleber, M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60–68.
- 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. *Environmental Science & Technology*, 57425–7412, (12)6.
- 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. *Bioresource technology*, 385, 129444.
- 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.
- Manzoni, S., Porporato, A., 2009. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biology and Biochemistry*. 41(7), 1355–1379.
- Moorhead, D.L., Sinsabaugh, R.L., 2006. A theoretical model of litter decay and microbial interaction. *Ecological monographs*. 76(2), 151–174.
- Mueller, R.O., Hancock, G.R., 2018. Structural equation modeling. In: *The reviewer's guide to quantitative methods in the social sciences*. Routledge, pp. 445–456.
- 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. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 118138.
- 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 Biology and Biochemistry*, 57, 124–134.
- Post, W., King, A., Wullschleger, S., 1996. Soil organic matter models and global estimates of soil organic carbon. In: *Evaluation of Soil Organic Matter Models: Using Existing Long-Term Datasets*. Springer, pp. 201–222.
- 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. *Annals of microbiology*, 53(4), 349–410.
- 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 (17).
- Schmidt, M., Torn, M., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I., . . . Manning, D., 2002. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*(49), 478.
- Semenov, V., Tulina, A., Semenova, N., Ivannikova, L., 2013. Humification and nonhumification pathways of the organic matter stabilization in soil: A review. *Eurasian Soil Science*, 46(4), 355–368.
- 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.
- Sierra, C.A., Harmon, M.E., Perakis, S.S., 2011. Decomposition of heterogeneous organic matter and its long-term stabilization in soils. *Ecological Monographs*, 634–619,(4)81.
- Sierra, C.A., Mueller, M., Trumbore, S.E., 2012. Models of soil organic matter decomposition: the SoilR package, version 1.0. *Geoscientific Model Development*, 5(4), 1045–1060.
- 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.
- 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 and Soil*, 46(3), 579–590.
- Sinsabaugh, R.L., 2010. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(3), 391–404.
- Smith, O., 1979. An analytical model of the decomposition of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 11(6), 585–606.
- Stein, C.M., Morris, N.J., Nock, N.L., 2011. Structural equation modeling. In: *Statistical human genetics: Methods and protocols*. Springer, pp. 495–512.
- Ullman, J.B., Bentler, P.M., 2012. Structural equation modeling. *Handbook of psychology*, second edition, 2.
- Walling, E., 2022. Composting modelling: Towards a better understanding of the fundamentals, applications for enhanced nutrient recycling, greenhouse gas reduction, and improved decision-making.
- 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.
- Wieder, W.R., Hartman, M., Kyker-Snowman, E., Eastman, B., Georgiou, K., Pierson, D., Rocci, K., 2023. Simulating global terrestrial carbon and nitrogen biogeochemical cycles with implicit and explicit representations of soil microbial activity. *Authorea Preprints*.
- 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. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 117884.
- 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. *Chemical Engineering Journal*, 483, 149341.
- 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.
- 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 Management*, 32(1), 19–30.
- 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 Fe₂O₃. *Bioresource Technology*, 393, 130120.
- Zhang, Y., Yue, D., Ma, H., 2015. Darkening mechanism and kinetics of humification process in catechol-Maillard system. *Chemosphere*, 130, 40–45.
- Zhu, L., Huang, K., Bai, T., Xia, H., 2025. Bacteriophages enhance the transformation of dissolved organic matter during vermicomposting of sludge. *Bioresource Technology*, 132694.