مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳

ISSN 2716-9804 الکترونیکی، ISSN 2717-0632 چاپی

بازیافت پسماند کشاورزی با استفاده از میکروارگانیسم‌ها: یک رویکرد پایدار

نوع مقاله: مروری 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6

شیوا احمدی پور سرشکه[۱]، علی محمدی[۲*]

۱- دانشجوی دکتری میکروبیولوژی، گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

۲- دانشیار میکروبیولوژی، گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

a.mohammadi@alzahra.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰

صفحه ۸۵-۵۸

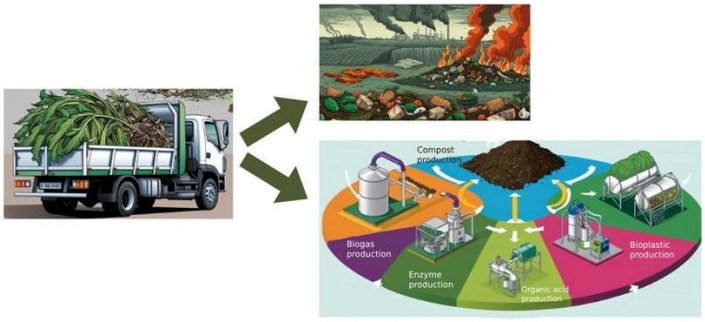
چکیده

با افزایش جمعیت جهان و به‌تبع آن، رشد تقاضا برای محصولات کشاورزی، حجم گسترده‌ای از پسماندهای کشاورزی تولید می‌شود که به یک چالش زیست‌محیطی تبدیل شده است. این پسماندها که معمولاً به‌عنوان ضایعات و منابع غیرقابل استفاده تلقی می‌شوند به‌عنوان یک منبع ارزشمند، فرصتی مناسب برای تبدیل به محصولات با ارزش افزوده به‌شمار می‌آیند. رویکردهای نوین درزمینه میکروبیولوژی به‌ویژه تجزیه میکروبی پسماندهای کشاورزی، می‌توانند به‌طور مؤثری تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از دفع زباله را کاهش دهند و بقایای زراعی را به منابع ارزشمندی نظیر کمپوست، بیوگاز، پروتئین میکروبی، اسیدهای آلی و بیوپلاستیک تبدیل کنند. این فرآیند ضمن کاهش حجم پسماندها، به تقویت اکوسیستم‌ها کمک کرده و در کاهش گازهای گلخانه‌ای و کنترل تغییرات اقلیمی نقش مهمی ایفا می‌کند. این رویکردها می‌توانند منجر به بهینه‌سازی استفاده از منابع طبیعی و ترویج کشاورزی پایدار شوند. در این مقاله مروری، به بررسی نقش میکروارگانیسم‌ها در فرآیند بازیافت پسماندهای کشاورزی و مزایای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی این روش‌ها پرداخته می‌شود. همچنین، به پتانسیل بالای بازیافت پسماندهای کشاورزی به‌عنوان یک راه‌حل پایدار برای آینده، توجه ویژه‌ای خواهد شد که می‌تواند به تحقق اقتصاد دایره‌ای و امنیت غذایی و کاهش فقر و وابستگی به منابع غیرتجدیدپذیر کمک نماید.

واژه‌های کلیدی: ارزش‌افزوده، اقتصاد دایره‌ای، بازیافت زباله‌های کشاورزی، زیست‌توده گیاهی، فرآیند زیستی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]



شکل ۱- ارزش افزایی ضایعات کشاورزی

مقدمه

مدیریت پسماندهای کشاورزی امروزه به یکی از چالش‌های اساسی در سطح جهانی تبدیل شده است. از نیمه قرن نوزدهم، توجه به طبقه‌بندی و تبدیل این ضایعات به محصولات جدید اهمیت پیداکرده است و در قرن بیستم، ضرورت بازیافت ضایعات به‌خوبی مورد شناسایی قرار گرفت. عدم مدیریت صحیح این پسماندها می‌تواند منجر به مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی قابل‌توجهی شود (Alan and Köker, 2023; Duque-Acevedo et al. 2020). مدیریت پسماند کشاورزی نه‌تنها بر محیط‌زیست بلکه بر اقتصاد و سلامت عمومی نیز تأثیرات گسترده‌ای دارد. با کاهش هدر رفت منابع و بهبود بهره‌وری، این فرآیند به حفظ منابع طبیعی کمک کرده و موجب توجه به ایجاد اقتصادی پایدار و دائمی می‌شود. ضایعات کشاورزی حاوی زیست مولکول‌های با ارزشی مانند پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها هستند که می‌توانند به‌عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرند. برآوردها نشان می‌دهند که منابع انرژی تجدیدپذیر قادر به تأمین ۲۰ تا ۴۰ درصد از کل تقاضای انرژی جهان تا سال ۲۰۵۰ هستند (Khaswal et al. 2024; Oyedeji et al. 2024).

کشاورزی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین منابع تولید گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شود (Babu et al. 2022). همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است سوزاندن پسماندهای کشاورزی، به‌ویژه در آسیا، یکی از مسائل اساسی است که نیاز به مداخلات فناورانه و سیاست‌گذاری مناسب دارد. روش‌های مدیریت بهینه می‌توانند میزان انتشار گازها را به حداقل رسانده و سرعت تأثیر تغییرات اقلیمی بر تنوع زیستی را کاهش دهند. به این ترتیب، به‌کارگیری تکنیک‌های کارآمد در مدیریت ضایعات کشاورزی می‌تواند به حل چالش‌های مربوط به امنیت انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. به طور کلی، مقدار پسماندهای کشاورزی تولید شده در جهان معادل حدود ۵۰ میلیارد تن نفت است (Babu et al. 2022;

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

Sumiyati et al. 2024). این زباله‌ها می‌توانند به محصولات مختلف با ارزش اقتصادی بالا تبدیل شوند.

اقتصاد دایره‌ای یک سیستم اقتصادی است که در این مدل مواد و منابع تا حد امکان در چرخه اقتصادی باقی می‌مانند و با بازیابی، بازسازی و بازیافت ارزش‌افزوده جدید خلق می‌کنند و به دنبال آن گسترش چرخه عمر محصولات و حداقل کردن زباله‌ها انجام می‌گیرد و یک مدل تولید و مصرف پایدار را ترویج می‌کند. در همین راستا پژوهش‌های آینده می‌بایست بر اساس نظریه‌های مدیریت زباله و پارادایم بوم‌شناسی صنعتی پایه‌گذاری شده و به توسعه مدیریت پایدار پسماند کمک کنند. همچنین، تحقیقات بین‌رشته‌ای و چند رشته‌ای بیشتری برای توسعه و گسترش نظریه‌های مرتبط با این حوزه مورد نیاز است (Alan and Köker, 2023; Liu et al. 2024; Vigneswari et al. 2024).

توجه به تجزیه زیستی با استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مدیریت پسماند، اهمیت ویژه‌ای پیداکرده است. این رویکرد، به دلیل مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی بی‌نظیر خود، به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های پایدار برای کاهش حجم پسماندها و به حداقل رساندن آلودگی در نظر گرفته می‌شود. استفاده از تجزیه بیولوژیکی برای ضایعات کشاورزی، نه‌تنها روش دوستدار محیط‌زیست است، بلکه می‌تواند هزینه‌های نگهداری مراکز دفع زباله را کاهش داده و نیاز به دفن زباله‌ها را نیز کم کند (Osselin et al. 2019; Oyedeji et al. 2024; Vigneswari et al. 2024).

هدف از این مقاله مروری، بررسی نظام‌مند پتانسیل بازیافت پسماندهای کشاورزی با به‌کارگیری میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان محرکی برای گذار به سمت یک اقتصاد دایره‌ای پایدار است. در این راستا، این مطالعه به دنبال تبیین راهبردهای بیولوژیکی برای تبدیل زیست‌توده‌های گیاهی زائد به محصولات با ارزش‌افزوده است تا بجای رویکردهای مخرب متداول مانند سوزاندن، چرخه بسته‌ای از مواد و انرژی ایجاد کند. هدف کلیدی دیگر، تحلیل مزایا و کارآیی استفاده از کنسرسیوم‌های میکروبی در مقایسه با میکروارگانیسم‌های منفرد برای تجزیه مؤثر پسماندهای لیگنوسلولزی و کاهش هزینه‌های مدیریت پسماند است (Rasool and Irfan, 2024; Vu et al. 2023). درنهایت، این مقاله در پی ارائه چشم‌اندازی روشن از چگونگی تلفیق این فرآیندهای زیستی در پارادایم اکولوژی صنعتی است تا به‌عنوان نقشه راهی برای پژوهش‌های آینده و سیاست‌گذاری در جهت دستیابی به اهداف محیط‌زیستی و اقتصادی عمل کند.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

انواع پسماند کشاورزی

پسماند کشاورزی به مجموعه‌ای از مواد باقی‌مانده از فعالیت‌های کشاورزی اطلاق می‌شود که شامل بقایای گیاهی و زباله‌های تولیدشده در فرآیندهای کشاورزی و صنعتی می‌باشد. این پسماندها به‌طورکلی به چند دسته تقسیم می‌شوند.

بقایای گیاهی، شامل اجزای مختلف گیاهان مانند برگ‌ها، پوست، ساقه‌ها، کاه و علف‌های هرز هستند. این بقایا نه‌تنها منبع قابل‌توجهی از مواد مغذی برای خاک محسوب می‌شوند، بلکه می‌توانند به‌عنوان مواد اولیه در فرآیندهای بازیافت و تبدیل به محصولات با ارزش، نظیر بیوگاز و کمپوست، مورد استفاده قرار گیرند (Chojnacka, 2023). دسته دیگر از پسماندهای کشاورزی، زباله‌های کشاورزی صنعتی هستند که شامل مواد دور ریختنی ناشی از فرآوری محصولات کشاورزی می‌باشند. این زباله‌ها معمولاً شامل پالپ‌ها و ملاس هستند و می‌توان به پوسته‌های مختلف ازجمله پرتقال، سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی و پیاز اشاره کرد. پالپ میوه‌ها نیز یکی دیگر از انواع پسماندهای کشاورزی هستند که شامل باقی‌مانده‌های میوه‌هایی نظیر پرتقال، سیب، انبه، انار، نیشکر، آناناس، پاپایا و گوجه‌فرنگی می‌باشند. این مواد ناکارآمد می‌توانند به محصولات با ارزش تبدیل شوند (Shirahigue and Ceccato-Antonini, 2020). دانه‌های روغنی، شامل پالپ‌ها و اجزای زائد دانه‌های روغنی مانند هسته نخل، بادام زمینی، سویا، خردل، آفتابگردان، کنجد و نارگیل نیز جزء این پسماندها هستند. این دانه‌ها به دلیل محتوای بالای روغن می‌توانند منبع مهمی برای تولید بیودیزل و دیگر محصولات با ارزش به‌حساب بیایند (Alan and Köker, 2023; Hasani et al. 2023; Mamivand et al. 2024). مدیریت صحیح انواع پسماند کشاورزی می‌تواند به جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست کمک کند و همچنین بهینه‌سازی استفاده از منابع کشاورزی را تسهیل نماید. توجه به بازیافت و استفاده مجدد از این پسماندها می‌تواند به ایجاد یک اقتصاد دایره‌ای و پایدار منجر گردد (Baharloo et al. 2024).

نقش میکروارگانیسم‌ها در بازیافت پسماند کشاورزی

میکروارگانیسم‌ها نقشی کلیدی در تجزیه و تبدیل مواد آلی موجود در پسماند کشاورزی ایفا می‌کنند. این موجودات میکروسکوپی با تولید آنزیم‌های مختلف، مواد آلی پیچیده را به ترکیبات ساده‌تر تجزیه می‌کنند. این فرآیند نه‌تنها به کاهش حجم پسماند و جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به تولید محصولات با ارزش افزوده بالا نیز منجر شود (Boondaeng et al.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

2024; Vigneswari et al. 2024; Zhang et al. 2021).

انواع متنوعی از میکروارگانیسم‌ها در فرآیند بازیافت پسماند کشاورزی مشارکت دارند. به‌عنوان مثال، باکتری‌هایی همچون *Pseudomonas* spp و *Bacillus* spp به‌عنوان کنسرسیوم‌های میکروبی با فعالیت آنزیمی بالا، در تجزیه آلاینده‌های آلی و زباله‌های کشاورزی مؤثر واقع می‌شوند. همچنین، باکتری‌های *Clostridium* spp نیز نقش حیاتی در فرآیندهای بی‌هوازی تجزیه مواد آلی ایفا می‌کنند. قارچ‌ها نیز به‌عنوان تخریب‌کنندگان اصلی مواد آلی در اکوسیستم عمل می‌کنند و با آنزیم‌های خاص خود ترکیبات پیچیده‌ای مانند سلولز و لیگنین را تجزیه می‌نمایند. به‌ویژه، قارچ‌هایی نظیر *Pleurotus ostreatus* و *Phanerochaete chrysosporium* در تجزیه مواد لیگنوسلولزی بسیار کارآمد هستند *Aspergillus niger* نیز از توانایی بالایی در تجزیه سلولز و همی‌سلولز برخوردار است و در صنایع غذایی و بیوتکنولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزون بر این، اکتینومیست‌ها به‌عنوان میکروارگانیسم‌های ضروری برای تجزیه مواد آلی پیچیده نظیر لیگنین و کیتین شناخته می‌شوند و قادرند آنزیم‌های مهم صنعتی را از ضایعات کشاورزی تولید کنند (Akın et al. 2023; McCarthy, 1987; Montoya et al. 2015; Vigneswari et al. 2024).

روش‌های تخمیر میکروبی نقش حیاتی در تبدیل پسماندهای کشاورزی به محصولات با ارزش افزوده ایفا می‌کنند. عوامل تأثیرگذار بر فرآیند تخمیر شامل دما، pH، رطوبت و هوادهی هستند. تخمیر حالت جامد که در آن میکروارگانیسم‌ها روی سوبستراهای جامد و در غیاب آب آزاد رشد می‌کنند، به‌ویژه برای استفاده از ضایعات کشاورزی و پسماندهای صنایع مختلف بسیار مناسب است. این روش مزایای متعددی مانند نیاز کمتر به آب، هزینه‌های عملیاتی پایین‌تر و عدم نیاز به تجهیزات پیچیده را به همراه دارد. در مقابل، در تخمیر مایع، میکروارگانیسم‌ها در محیط مایع رشد می‌کنند و این روش برای تولید محصولاتی نظیر اتانول و اسیدهای آلی کاربرد دارد (Chilakamarry et al. 2022; Sadh et al. 2018; Zhang et al. 2021).

با توجه به آمار وزارت جهاد کشاورزی، ایران سالیانه حدود ۳۰ میلیون تن ضایعات کشاورزی تولید می‌کند که می‌تواند به‌عنوان منبع مناسبی برای فرآیند تخمیر مایع مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، بهره‌برداری مؤثر از میکروارگانیسم‌ها در مدیریت پسماند کشاورزی می‌تواند به ایجاد راهکارهای پایدار و اثرگذار درزمینه‌ی کاهش

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

آلایندگی‌ها و تولید محصولات با ارزش کمک کند (Farzanfar et al. 2025).

مکانیسم‌های عملکرد میکروارگانیسم‌ها در تجزیه پسماندها

میکروارگانیسم‌ها با بهره‌گیری از چندین مکانیسم متفاوت، نقش مهمی در تجزیه پسماندها ایفا می‌کنند. یکی از این مکانیسم‌ها تجزیه آنزیمی است؛ در این فرآیند، میکروارگانیسم‌ها آنزیم‌هایی مانند سلولاز، لیگنیناز و پروتئاز تولید می‌کنند که به تجزیه ترکیبات آلی پیچیده به مولکول‌های ساده‌تر کمک می‌کند. این فرآیند به ویژه در تولید محصولاتی با ارزش افزوده نظیر سوخت‌های زیستی و کمپوست اهمیت فراوانی دارد (Boondaeng et al. 2024; Vigneswari et al. 2024).

در تجزیه هوازی، باکتری‌ها در حضور اکسیژن مواد آلی را به آب و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌کنند. این روش به کاهش سریع حجم پسماند و تولید حرارت بالا کمک می‌کند و به‌طور گسترده‌ای در کمپوست‌سازی استفاده می‌شود. در مقابل، تجزیه بی‌هوازی، باکتری‌های بی‌هوازی در غیاب اکسیژن فعالیت می‌کنند و قادرند بیوگاز تولید نمایند؛ بیوگاز یک منبع انرژی تجدیدپذیر و ارزشمند است که این فرآیند غالباً در مخازن بیوگاز انجام می‌شود (Indran et al. 2021).

علاوه بر این، تجزیه سینرژیک به تعامل مؤثر بین میکروارگانیسم‌ها اطلاق می‌شود که می‌تواند سرعت فرآیند تجزیه را افزایش دهد. درنهایت، تولید بیوپلیمرها به‌عنوان یکی از روش‌های نوآورانه و پایدار در مدیریت پسماندها شناخته می‌شود. این بیوپلیمرها که به طور طبیعی و زیست‌تخریب‌پذیر تولید می‌شوند، می‌توانند به بهبود کیفیت خاک و کاهش آلودگی محیط‌زیست کمک نمایند در میان انواع مختلف بیوپلیمرها، اگزوپلی ساکاریدها (EPSs) از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. از دهه ۱۹۶۰، برخی از پلی‌ساکاریدهای میکروبی مانند زانتان و دکستران به بازار عرضه‌شده‌اند که به ترتیب دارای حجم تولید جهانی معادل ۲۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ تن هستند. باوجود چالش‌هایی که تولید اقتصادی این بیوپلیمرها هنوز با آن‌ها مواجه است، پتانسیل بالای آن‌ها نوید بخش آینده‌ای پایدار در مدیریت پسماندها و حفاظت از محیط‌زیست می‌باشد (Tabassum et al. 2023).

ارزش افزایی ضایعات کشاورزی به محصولات با ارزش افزوده

ضایعات کشاورزی اکنون در پرتو اقتصاد دایره‌ای و زیست‌فناوری به‌عنوان منابعی ارزشمند و بسترهای بالقوه برای تولید محصولات با ارزش شناخته می‌شوند. با به‌کارگیری میکروارگانیسم‌ها

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

و فرآیندهای زیستی، می‌توان این زیست‌توده‌های گیاهی را به طیف وسیعی از محصولات نهایی با کاربرد در صنایع مختلف تبدیل نمود. به‌طورکلی، مهم‌ترین مسیرهای ارزش‌افزایی ضایعات کشاورزی را می‌توان در قالب محصولاتی همچون کمپوست، بیوگاز، آنزیم‌های صنعتی، اسیدهای آلی، پروتئین تک‌یاخته، بیوپلاستیک‌ها، سوخت‌های زیستی و مواد شیمیایی بیولوژیک دسته‌بندی کرد.

برای درک جامع‌تری از این مسیرهای تبدیلی، جدول ۱ به‌طور خلاصه میکروارگانیسم‌های شاخص، نقش آن‌ها و محصولات نهایی حاصل از ارزش افزایی ضایعات کشاورزی را نمایش می‌دهد. این جدول به‌عنوان نقشه راهی مفهومی، چارچوب مناسبی برای تبیین جزئیات فرآیندهای زیستی فراهم می‌سازد. در ادامه، هر یک از این مسیرهای ارزش افزایی به‌طور مشروح مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ضایعات کشاورزی به‌عنوان منبعی برای تولید کمپوست

تبدیل پسماندهای گیاهی به کمپوست برای استفاده به‌عنوان کود طبیعی، نه‌تنها به کاهش حجم پسماند کمک می‌کند، بلکه به بهبود کیفیت خاک و افزایش محتوی مواد مغذی آن نیز می‌انجامد. در این راستا، ترکیبی از باکتری‌های هوازی و قارچ‌ها در تجزیه سریع مواد آلی برای تولید کمپوست به کار گرفته می‌شوند (Alan and Köker, 2023; Babu et al. 2022). استفاده از روش‌های پیشرفته بیوتکنولوژیکی در فرآیند کمپوست‌سازی به‌سرعت در حال رشد است. این رویکردها شامل به‌کارگیری میکروارگانیسم‌های مهندسی ژنتیکی و ترکیبات میکروبی برای بهبود کیفیت کمپوست و کاهش زمان پردازش می‌باشد. توجه به فنون نوین، نوید بخش تحولی در روش‌های سنتی کمپوست‌سازی و بهبود عملکرد آن‌هاست (Sumiyati et al. 2024; Vyas et al. 2022).

ضایعات کشاورزی به‌عنوان منبعی برای تولید بیوگاز

فرآیند هضم بی‌هوازی به میکروارگانیسم‌ها این امکان را می‌دهد که ضایعات کشاورزی را به بیوگاز (شامل متان و دی‌اکسید کربن) تبدیل کنند. بیوگاز به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر تلقی می‌شود و سیستم‌های هضم بی‌هوازی، انرژی پاک و دوستدار محیط‌زیست را از زباله‌های آلی تولید می‌کنند و چرخه اقتصادی را تقویت می‌نمایند. در دنیای امروز، با توجه به چالش‌های ناشی از منابع انرژی مبتنی بر نفت و زغال‌سنگ، بیوگاز به‌عنوان سوختی جایگزین بیشتر موردتوجه قرارگرفته

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

جدول ۱- نقش میکروارگانیسم‌ها در بازیافت پسماندهای کشاورزی و تولید محصولات با ارزش در چارچوب اقتصاد دایره‌ای

ردیف	محصول / فرآیند با ارزش	میکروارگانیسم‌های شاخص	نقش و مکانیسم کلیدی	محصول نهایی و کاربرد	منابع علمی
۱	کمپوست و کود زیستی	باکتری‌های هوازی مانند *Bacillus* spp قارچ‌ها مانند *Trichoderma* اکتینومیست‌ها	تجزیه هوازی مواد آلی، تولید حرارت، معدنی‌کردن مواد مغذی و تولید ترکیبات محرک رشد گیاه (PGPR)	کمپوست ارگانیک بهبود کیفیت خاک و حاصلخیزی	(Basu et al. 2021; Javed et al. 2021)
۲	بیوگاز (بیومتان)	کنسرسیوم‌های بی‌هوازی شامل باکتری‌های هیدرولیتیک، اسیدساز و متان‌سازها مانند *Methanobacterium*	هضم بی‌هوازی تجزیه پسماند در نبود اکسیژن و تبدیل نهایی به متان (CH_4) و دی‌اکسید کربن	بیوگاز (منبع انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق و حرارت) کاهش آلایندگی	(Wirth et al. 2012; Jiménez et al. 2025)
۳	آنزیم‌های صنعتی (سلولاز، زایلاناز، پکتیناز)	قارچ‌ها مانند *Aspergillus niger*، *Trichoderma reesei* باکتری‌ها مانند *Bacillus* spp	تولید آنزیم‌های برون سلولی از طریق تخمیر حالت‌جامد (SSF) روی پسماندهای کشاورزی برای تجزیه اجزای لیگنوسلولزی	آنزیم‌های صنعتی برای بخش‌های غذایی، شوینده‌ها و خوراک دام کاهش هزینه تولید	(Ravindran et al. 2018; Singh et al. 2025)
۴	اسیدهای آلی (سیتریک، لاکتیک، استیک)	اسید سیتریک *Aspergillus niger* اسید لاکتیک *Lactobacillus* spp اسید استیک *Acetobacter pasteurianus*	تخمیر میکروبی قندهای استخراج شده از پسماند (مانند پوست موز، باگاس نیشکر) به اسیدهای آلی با ارزش	اسید سیتریک (صنایع غذایی و دارویی) اسید لاکتیک (تولید بیوپلاستی (PLA) اسید استیک (سرکه و حلال صنعتی)	(Huang et al. 2022)

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

۵	پروتئین تک‌یاخته (SCP)	قارچ‌ها مانند *Fusarium venenatum* باکتری‌ها	استفاده از کربن و نیتروژن پسماندها به‌عنوان بستر برای رشد و تولید زیست‌توده غنی از پروتئین	خوراک دام با کیفیت مکمل‌های غذایی برای انسان کاهش وابستگی به منابع پروتئینی سنتی	(Ritala et al. 2017; Yunus et al. 2015)
۶	بیوپلاستیک‌ها (PHA, PLA)	PHA Cupriavidus necator PLA پیش ساز اسید لاکتیک از *Lactobacillus*	ذخیره‌سازی پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر درون‌سلولی (PHA)یا پلیمری کردن اسیدهای آلی حاصل از تخمیر (PLA)	بیوپلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر (جایگزین پلاستیک‌های نفتی) بسته‌بندی پایدار	(Martinaud et al. 2024)
۷	سوخت‌های زیستی (بیواتانول، بیوبوتانول)	بیواتانول *Saccharomyces cerevisiae* بیوبوتانول *Clostridium acetobutylicum*	تخمیر اتانولی یا تخمیر استون-بوتانول-اتانول (ABE) قندهای حاصل از هیدرولیز پسماند	بیواتانول و بیوبوتانول (سوخت زیستی نسل دوم) کاهش انتشار کربن	(Jin et al. 2022; Priharto et al. 2025)
۸	بیوسورفکتانت‌ها و اگزوپلی‌ساکاریدها (EPS)	*Pseudomonas aeruginosa* (رامنولیپید) *Bacillus subtilis* (سورفکتین) *Xanthomonas campestris* (زانتان)	تولید سورفکتانت‌ها و پلی‌ساکاریدهای زیستی از پسماندهای کربنی	بیوسورفکتانت (صنایع نفت، شوینده و دارو) زانتان (غلیظ‌کننده در صنایع غذایی)	(Ahmed et al. 2025; Fenibo et al. 2019)

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

۹	راهکارهای تخصصی برای چالش‌های خاص	مخمرهای غیرمتعارف (مانند *Yarrowia lipolytica*) برای پسماندهای روغنی باکتری‌های نمک دوست (مانند *Halomonas*) برای شرایط شور سیانوباکتری‌ها (مانند *Spirulina*) برای تثبیت CO_2 باکتری‌های کیتین‌خوار (مانند *Serratia*) برای پسماندهای پوسته دریایی	ارائه راهکارهای زیستی برای پسماندهای مشکل‌ساز (شور، روغنی، آلوده) و گسترش دامنه اقتصاد چرخشی به حوزه‌های جدید	روغن زیستی، پلی‌استر، پلی‌ساکاریدهای خاص پالایش زیستی (Bioremediation) خاک و آب‌های آلوده	(Chen et al. 2012; Lopes et al. 2022; Quiñones-Cerna et al. 2024; Li et al. 2025)
۱۰	تجزیه سینرژیستی لیگنوسلولز	کنسرسیوم‌های میکروبی (ترکیب قارچ و باکتری، مانند *Trichoderma* + *Bacillus*)	همکاری سینرژیستی برای تجزیه کارآمدتر ساختارهای پیچیده (لیگنین، سلولز، همی‌سلولز) از طریق تولید مجموعه کامل آنزیم‌ها	افزایش راندمان کلی فرآیندهای زیستی کاهش زمان کمپوست‌سازی و هیدرولیز	(Jiménez et al. 2015; Marx et al. 2013; Shahab et al, 2020)

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

است (Akın et al. 2023; Alan and Köker, 2023; Sumiyati et al. 2024).تحقیقات آینده باید روی روش‌ها و چشم‌اندازهای نوین متمرکز شوند تا زمینه‌های جدیدی برای تولید محصولات با ارزش از ضایعات کشاورزی شناسایی گردد. این رویکرد می‌تواند به کاهش زباله و بهینه‌سازی استفاده از منابع کمک کند. همچنین، توسعه روش‌های تحقیقاتی برای دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر در این حوزه، با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Alan and Köker, 2023; Tripathi et al. 2024).

ضایعات کشاورزی، به‌ویژه پالپ میوه‌هایی مانند انگور، سیب، پرتقال، انبه، سیب‌زمینی و چغندر، به دلیل غنای بالای الیاف، کربن و ترکیبات نیتروژنی، پتانسیل زیادی برای تبدیل به بیوگاز دارند (Marx et al. 2013; Sobczak et al. 2022). ترکیبات فنولیک موجود در پوست میوه‌هایی چون پرتقال که سرشار از آنتی‌اکسیدان‌ها هستند و همچنین ضایعات عناب، به دلیل غنی بودن از سلولز و همی‌سلولز نیز نشان دهنده کاربرد بالقوه این ضایعات در تولید بیوگاز باکیفیت بالا می‌باشد (Chubur et al. 2024).

به‌طورکلی، اروپا و آسیا در تولید بیوگاز پیشرو هستند، درحالی‌که دیگر مناطق، به‌ویژه آفریقا و خاورمیانه، به‌شدت به توسعه و سرمایه‌گذاری بیشتری در این زمینه نیاز دارند. این تفاوت‌های منطقه‌ای، فرصت‌های بسیاری برای ارتقاء فناوری و بهبود تولید انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم می‌آورد و می‌تواند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و بهینه‌سازی استفاده از پتانسیل ضایعات کشاورزی کمک کند (Alan and Köker, 2023; Tripathi et al. 2024).

ضایعات کشاورزی به‌عنوان منبعی برای تولید آنزیم‌ها

در سال‌های اخیر، افزایش تقاضای جهانی برای راه‌حل‌های پایدار در مدیریت ضایعات کشاورزی و غذایی (Agriculture Food Wastes, AFWs) منجر به علاقه‌مندی به استفاده از این مواد برای تولید آنزیم‌های میکروبی از طریق فرآیند تخمیر حالت‌جامد (Solid-State Fermentation, SSF) شده است. این روش به‌عنوان یک رویکرد نوید بخش برای تولید آنزیم‌های تجاری کلیدی با استفاده از ضایعات محصولات کشاورزی شناخته می‌شود. ضایعات کشاورزی به‌عنوان منبعی غنی برای تولید آنزیم‌ها از طریق همکاری میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌ها و قارچ‌ها) به یک حوزه تحقیقاتی و صنعتی مهم تبدیل شده است؛ زیرا بسیاری از این میکروارگانیسم‌ها توانایی طبیعی تولید آنزیم‌های تجزیه کننده دیواره سلولی را دارند و قادر به تجزیه AFWs هستند (BeigMohammadi et al. 2023; El-Bakry et al.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

2015; Khaswal et al. 2024; Ravindran et al. 2018).

در حال حاضر، آنزیم‌های تجاری مختلفی، ازجمله α-آمیلازها، زایلانازها، پکتینازها، آمیلوز گلیکوزیدازها، لیپازها، سلولازها، فروکتوزیل ترانسفرازها و لاکتازها، از طریق فناوری SSF و با استفاده از دامنه وسیعی از مواد AFWs به‌عنوان منبع انرژی اصلی تولید می‌شوند. در سطح جهانی، ایالات‌متحده با ۲۵٪ بالاترین سهم تولید آنزیم‌ها را دارد که نشان دهنده اهمیت و پیشرفت‌های تکنولوژیکی این کشور در استفاده از ضایعات کشاورزی برای تولید آنزیم‌های صنعتی است. هند نیز با ۲۱٪ به‌عنوان دومین تولید کننده بزرگ آنزیم‌ها شناخته می‌شود که این امر به دلیل تنوع زراعی و دسترسی به ضایعات کشاورزی به‌عنوان منبعی ارزشمند می‌باشد. چین، با ۱۴٪ سهم، به‌عنوان سومین تولید کننده بزرگ، از ظرفیت بالای کشاورزی و پتانسیل تبدیل ضایعات به محصولات با ارزش افزوده بهره‌برداری می‌کند (Babu et al. 2022; Khaswal et al. 2024; Ravindran et al. 2018).

این روند در تولید آنزیم از ضایعات کشاورزی نه‌تنها به بهبود فرآیندهای صنعتی کمک می‌کند، بلکه به مدیریت پایدار منابع و کاهش ضایعات نیز می‌انجامد.

ضایعات کشاورزی به‌عنوان منبعی برای تولید اسیدهای آلی

تولید اسیدهای آلی از ضایعات کشاورزی با استفاده از میکروارگانیسم‌ها، فرآیند مهمی در بوم‌شناسی صنعتی است که می‌تواند به توسعه پایدار و بهینه‌سازی استفاده از منابع منجر شود (Kumar Sarangi et al. 2023). یکی از این اسیدهای آلی مهم، اسید سیتریک است که عمدتاً توسط قارچ‌ها و مخمرها، به‌ویژه *Aspergillus niger*، تولید می‌شود. این اسید کاربردهای فراوانی دارد و به‌عنوان نگه دارنده طبیعی، طعم دهنده و ماده‌ای برای تنظیم pH در صنایع غذایی و آشامیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، در صنایع دارویی و آرایشی به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان و ماده طعم دهنده به کار می‌رود. بسیاری از مطالعات به بررسی استفاده از پسماند پوست میوه‌ها برای تولید اسید سیتریک پرداخته‌اند؛ به‌عنوان نمونه، یک مطالعه نشان داده که پوست موز می‌تواند به‌عنوان محیطی ارزان قیمت برای تولید این اسید با استفاده از *Aspergillus niger* به کار رود (Kareem and Rahman, 2013).

اسید لاکتیک، یکی دیگر از اسیدهای آلی مهم است که می‌تواند توسط باکتری‌های تخمیری نظیر *Lactobacillus* تولید شود. این اسید در صنایع غذایی به‌عنوان ماده‌ای نگه دارنده در محصولات مختلف، ازجمله ماست و ترشیجات و همچنین در

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

صنایع دارویی برای تولید داروها و راهکارهای پزشکی، مانند محلول‌های بازسازی دهنده، به کار می‌رود. علاوه بر این، اسید لاکتیک در تولید زیست سوخت‌ها و بیوپلاستیک‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یک مطالعه خاص، باگاس کاساوا و باگاس نیشکر به‌عنوان مواد خام و زیرساخت‌های جامد بی‌اثر معرفی‌شده‌اند و باکتری *Lactobacillus delbrueckii* برای تولید اسید لاکتیک از آن‌ها به کار گرفته‌شده است (Vashisht et al. 2019).

علاوه بر این، اسید استیک، از دیگر اسیدهای آلی مهم است که از طریق تخمیر الکلی، به‌ویژه با استفاده از *Acetobacter* و دیگر باکتری‌های اسیدی تولید می‌شود. این اسید در صنایع غذایی به‌عنوان سرکه و نگه دارنده و در صنایع شیمیایی به‌عنوان ماده اولیه برای تولید پلاستیک‌ها، رنگ‌ها و داروها مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحقیقات حاکی از آن است که شناسایی باکتری‌هایی مانند *Acetobacter pasteurianus* SKYAA25 برای تولید اسید استیک از تفاله سیب می‌تواند به بهره‌برداری از ضایعات صنعتی در تولید این اسید کمک کند. نتایج این تحقیقات نوید بخش استفاده بهینه از منابع و کاهش پسماندها است (Vashisht et al. 2019).

به‌طورکلی، تولید اسیدهای آلی از ضایعات کشاورزی نه‌تنها به مدیریت پسماندهای کشاورزی و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه با تبدیل مواد زائد به محصولات مفید، به توسعه پایدار و حفظ منابع طبیعی نیز یاری می‌رساند (Li et al. 2006; Vashisht et al. 2019; West, 2023).

ضایعات کشاورزی به‌عنوان منبعی برای تولید پروتئین میکروبی

تولید پروتئین میکروبی از ضایعات کشاورزی به‌عنوان یک روش نوآورانه و پایدار، می‌تواند به شکل قابل‌توجهی به تأمین نیازهای پروتئینی در صنایع غذایی و دامپروری کمک کند. این رویکرد نه‌تنها به مدیریت مؤثر ضایعات کشاورزی منجر می‌شود، بلکه پاسخگویی به چالش‌های امنیت غذایی و تأثیرات منفی زیست‌محیطی ناشی از دامداری را نیز در پی دارد. با پیشرفت‌های تکنولوژیکی و افزایش نگرانی‌ها درباره شیوه‌های سنتی تأمین پروتئین، تولید پروتئین میکروبی به‌عنوان یک جایگزین اقتصادی و پایدار برای تأمین نیازهای پروتئینی در آینده مطرح می‌شود (Bogale, 2020; Raei et al. 2025).

در حال حاضر، شرکت‌ها و محققین به بررسی روش‌های نوین و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید این پروتئین‌ها مشغول هستند تا کیفیت و مقرون‌به‌صرفه بودن آن‌ها را بهبود بخشند. پروتئین میکروبی از طریق تخمیر میکروارگانیسم‌ها، نظیر

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

قارچ‌ها و باکتری‌ها، با استفاده از مواد خامی مانند ضایعات کشاورزی تولید می‌شود. این روش، به‌واسطه مزایای متعددی که در پی دارد، می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل اساسی برای چالش‌های جهانی تأمین غذا و مدیریت منابع شناخته شود. کاربردهای پروتئین میکروبی بسیار متنوع است. یکی از مهم‌ترین کاربردها در صنعت خوراک دام می‌باشد، جایی که پروتئین میکروبی می‌تواند به‌عنوان کنجاله سویا یا خوراک ماهی مورد استفاده قرار گیرد. این ویژگی به دامپروری این امکان را می‌دهد که وابستگی به منابع غیر پایدار را کاهش داده و درعین‌حال به تأمین نیازهای غذایی دام‌ها پاسخ دهد (Bogale, 2020; Nigam and Singh, 1996).

علاوه بر این، در صنایع غذایی، پروتئین‌های میکروبی به‌عنوان منابع پروتئینی سالم و پایدار برای مصرف‌کنندگان معرفی می‌شوند. این نوع پروتئین‌ها می‌توانند در تولید محصولات غذایی جدید نقش‌آفرینی کنند و به‌ویژه در ساخت برگرهای گیاهی و پروتئین‌های مورد استفاده در غذاهای آماده و سریع، نقش بسزایی ایفا کنند (Bogale, 2020; Raei et al. 2025).

به‌طورکلی، تولید پروتئین میکروبی از ضایعات کشاورزی نه‌تنها فرصتی برای بهره‌برداری بهینه از منابع موجود به‌شمار می‌رود، بلکه فرصت مناسبی برای کاهش ضایعات و ارتقاء پایداری در سیستم‌های غذایی جهانی ارائه می‌دهد.

ضایعات کشاورزی به‌عنوان منبعی برای تولید مواد شیمیایی بیولوژیک

بیوپلاستیک‌ها به‌عنوان جایگزینی برای پلاستیک‌های نفتی، یکی از نوآوری‌های مهم در زمینه حفاظت از محیط‌زیست و توسعه پایدار محسوب می‌شوند. این مواد معمولاً از منابع تجدیدپذیر، مانند پسماندهای کشاورزی تولید می‌شوند و به علت ویژگی‌های زیست سازگاری و تجزیه‌پذیری، می‌توانند به حل مشکلات ناشی از پلاستیک‌های سنتی کمک کنند. بیوپلاستیک‌ها به‌عنوان ابزاری مؤثر برای کاهش زباله‌های پلاستیکی و آلودگی‌های ناشی از پلاستیک‌های نفتی شناخته می‌شوند و استفاده از آن‌ها منجر به کاهش تقاضا برای منابع نفتی خواهد شد.

بااین‌حال، تولید بیوپلاستیک‌ها با چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز مواجه است. یکی از این چالش‌ها، هزینه بالای تولید آن‌ها نسبت به پلاستیک‌های سنتی است که می‌تواند مانع از پذیرش گسترده شود. علاوه بر این، برخی از بیوپلاستیک‌ها ممکن است ویژگی‌های مکانیکی مناسب نظیر سفتی و مقاومت لازم را نداشته باشند که این امر به محدودیت کاربردهای خاص منجر می‌شود. یکی دیگر از مسائل مهم، تأثیر استفاده از

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

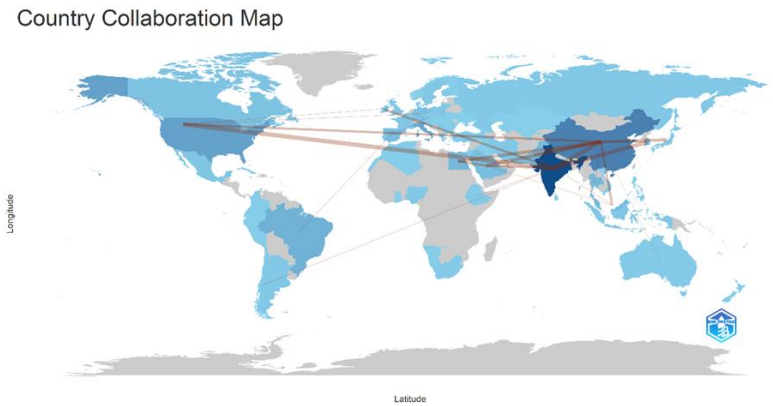
[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

مواد اولیه طبیعی برای تولید بیوپلاستیک بر منابع غذایی است. نگرانی‌هایی وجود دارد که اگر پسماندهای کشاورزی به‌عنوان ماده اولیه برای تولید بیوپلاستیک استفاده شوند، ممکن است بر سلامت منابع غذایی تأثیر بگذارند (Akın et al. 2023; Vigneswari et al. 2024).

علاوه بر میکروارگانیسم‌های متداول، گروه‌های تخصصی دیگری نیز وجود دارند که پتانسیل بالایی برای حل چالش‌های خاص در بازیافت پسماند دارند. برای نمونه، مخمر *Yarrowia lipolytica* باقابلیت مصرف پسماندهای روغنی، راهکاری برای تولید هم‌زمان روغن زیستی و پالایش این نوع پساب‌ها ارائه می‌دهد (Colacicco et al. 2022; Liu et al. 2015). به‌طور مشابه، باکتری‌های نمک دوست مانند *Halomonas* امکان اجرای فرآیندهای زیستی در شرایط شور را فراهم می‌کنند (Neagu and Stancu, 2025; Ye and Chen, 2021). این میکروارگانیسم‌ها با گسترش دامنه سوبستراها و شرایط عملیاتی قابل قبول، افق‌های جدیدی را در اقتصاد دایره‌ای پسماندهای کشاورزی می‌گشایند.

بررسی نمونه‌های موفق در مدیریت پسماندهای کشاورزی

مدیریت پسماندهای کشاورزی با بهره‌گیری از روش‌های بیوتکنولوژیکی و نوآورانه در کشورهای مختلف، به‌ویژه در اروپا و آسیا، پیشرفت‌های چشمگیری را تجربه کرده است. این رویکردها می‌توانند به درک بهتری از پتانسیل‌ها و چالش‌های موجود در این حوزه کمک کند.



شکل ۲- همکاری علمی بین کشورها از طریق Bibliometrix به تصویر کشیده شده است. از خطوط ضخیم برای پیوندهای مشترک نویسندگی قوی و از خطوط نازک برای اتصالات ضعیف‌تر استفاده می‌کند.سایه‌های تیره نشان دهنده‌ی انتشار بالای مقالات و سایه‌های روشن نشان دهنده‌ی مشارکت کم است.

همان‌طور که در (شکل ۲) نمایان است هند به‌عنوان یکی از کشورهای غنی در منابع کشاورزی، سالانه حدود ۳۵۰ میلیون تن ضایعات ارگانیک از فعالیت‌های کشاورزی تولید می‌کند.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

عمده‌ترین پسماندهای جامد شامل باگاس نیشکر، کاه برنج، کاه گندم و پسماندهای سبزیجات است. در برخی مناطق هند، روش کمپوست‌سازی با کمک میکروارگانیسم‌ها به‌طور گسترده‌ای به کار گرفته می‌شود. این شیوه نه‌تنها به کاهش حجم پسماند کمک می‌کند بلکه محصول نهایی به‌عنوان کود آلی باکیفیت، به افزایش بهره‌وری زراعی منجر می‌شود. همچنین بسیاری از ایالت‌های هند به مدیریت نیروگاه‌های تولید مشترک انرژی مبتنی بر بقایای کشاورزی پرداخته‌اند که به‌عنوان روشی کم‌هزینه و دارای بازدهی انرژی بالا شناخته می‌شود (Babu et al. 2022).

چین با استفاده از فرآیندهای تخمیر بی‌هوازی میکروبی، از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان بیوگاز محسوب می‌شود. این روش نه‌تنها به تولید انرژی پاک کمک می‌کند، بلکه وابستگی به سوخت‌های فسیلی را نیز کاهش می‌دهد. چین تقریباً ۱۷ درصد از بازاستفاده ضایعات زیست‌توده جهانی را به خود اختصاص داده است (Tripathi et al. 2024).

از سوی دیگر، برزیل با بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌ها در تجزیه بقایای نیشکر، علاوه بر تولید انرژی به کمک این پسماندها، مواد مغذی موجود را به خاک بازمی‌گرداند و بدین ترتیب به بهبود کیفیت خاک و افزایش بهره‌وری کشاورزی کمک می‌کند (Tripathi et al. 2024).

در قاره اروپا، کشورهای ایتالیا و اسپانیا از میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه پسماندهای میوه‌ای استفاده می‌کنند و با تولید محصولات متنوعی مانند آنزیم‌ها و مکمل‌های خوراکی، ارزش اقتصادی بالایی از این فرآیند کسب می‌کنند. این رویکرد نه‌تنها به کاهش ضایعات کمک می‌کند، بلکه بازارهای جدیدی را برای محصولات مفید فراهم می‌آورد (Baharloo et al. 2024; Tripathi et al. 2024).

همچنین، کره جنوبی با اعمال ممنوعیت بر دفع ضایعات غذایی و سایر پسماندهای زیست‌تخریب‌پذیر، راهکار جامعی برای استفاده مجدد از این پسماندها در کارخانه‌های بیوگاز طراحی کرده است. بیوگاز تولیدشده در این کارخانه‌ها می‌تواند نیازهای انرژی مختلفی نظیر گرما، برق و سوخت را تأمین کند. همچنین، تولید بیومتان تصفیه‌شده برای مصارف حمل‌ونقل اثربخشی قابل‌توجهی به همراه داشته است (Tripathi et al. 2024).

به‌طورکلی، این نمونه‌های موفق در بازیافت و تولید بیوگاز و وجود همکاری‌های بین‌المللی نشان دهنده اهمیت و پتانسیل بالای فناوری‌های نوین در تولید انرژی پایدار، کاهش ضایعات و ارتقاء کیفیت محیط‌زیست است.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

چشم‌انداز جهانی

پسماندهای کشاورزی به‌عنوان یک موضوع تحقیقاتی، در سطح جهانی به مدت بیش از ۶۰ سال مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از سال ۱۹۹۸، توجه به این مقوله به‌طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته و در ۱۳ سال اخیر، بیش از ۶۰ درصد از کل تولیدات علمی مربوط به این حوزه منتشر شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است ایالات‌متحده، هند و چین به‌عنوان پیشتازان در این زمینه شناخته می‌شوند و تحقیقات این کشورها عمدتاً روی بهره‌برداری از بقایای کشاورزی متمرکز است. این بقایا به‌ویژه ناشی از محصولات زراعی مانند گندم و ذرت هستند که این کشورها به‌عنوان بزرگ‌ترین تولیدکنندگان در سطح جهانی به‌شمار می‌روند (Akın et al. 2023; Duque-Acevedo et al. 2020).

رشد جهانی انرژی‌های تجدیدپذیر در سال‌های اخیر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛ در سال ۲۰۲۲، این انرژی‌ها ۲/۴۰ ٪ از مصرف برق جهانی را تشکیل دادند. در اتحادیه اروپا، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق از ۵/۸٪ در سال ۲۰۰۵ به ۹/۸۰ ٪ در سال ۲۰۲۲ رسیده است. در میان این منابع، بیوگاز هم‌اکنون ۶۰٪ از انرژی تجدیدپذیر را شامل می‌شود و پیش‌بینی می‌شود که تولید آن تا سال ۲۰۳۰ به دو برابر افزایش یابد (Coskun and Kantar, 2025; Hoang et al. 2020).

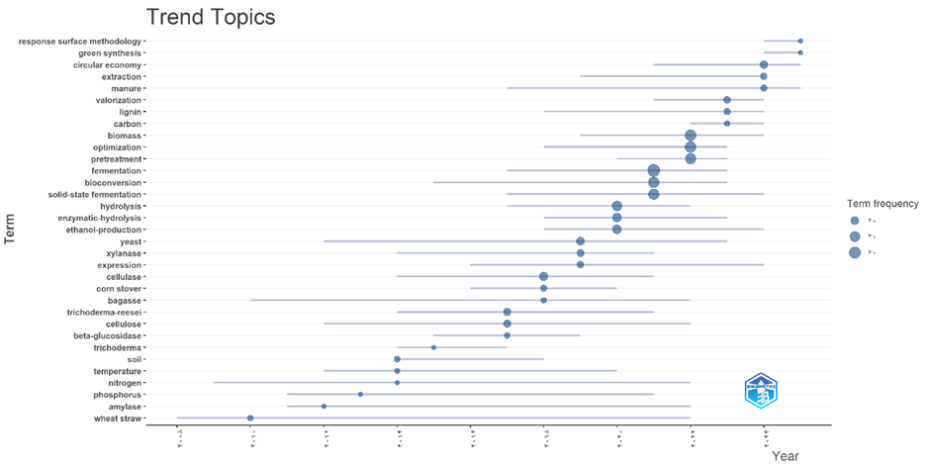
استفاده از سوخت‌های زیستی در حوزه حمل‌ونقل نیز در سال‌های اخیر رشد قابل‌توجهی داشته است. این روند از اوایل قرن بیستم در برزیل آغاز شد و اکنون حدود ۶۶ کشور در تلاش‌اند تا با بهره‌گیری از سوخت‌های زیستی، سهم گاز متان (CH_4) را در حمل‌ونقل جاده‌ای کاهش دهند. اتحادیه اروپا به‌طور خاص در این زمینه پیشتاز است و در سال گذشته موفق به مصرف ۱۶۰ میلیون مترمکعب بیومتان شده است. این منطقه همچنین دارای شبکه‌ای از ۳۵۰۰ ایستگاه سوخت گاز طبیعی فشرده (CNG) می‌باشد که نمایانگر زیرساخت قوی در این حوزه است (Akın et al. 2023; Coskun and Kantar, 2025; Tripathi et al. 2024).

روش‌های نوآورانه و مدیریت هوشمند پسماندهای کشاورزی می‌توانند به‌عنوان فرصت‌های اقتصادی مؤثر عمل کنند و به رشد اقتصادی پایدار کمک نمایند. با اتخاذ رویکردهایی متناسب، می‌توان از این منابع ارزشمند به‌طور بهینه بهره‌برداری کرد و در مسیر تحقق توسعه پایدار گام برداشت.

جهت‌گیری‌های آینده‌پژوهشی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]



شکل ۳- جهت گیری های موضوعات پژوهشی در طول زمان از طریق کلمات کلیدی با استفاده از Bibliometrix

نمودار (شکل ۳) روند موضوعی که تکامل فرکانس کلیدواژه‌ها را در طول زمان (۲۰۰۸ تا ۲۰۲۴) در حوزه تحقیقات مرتبط نشان می‌دهد، دیدگاه‌های ارزشمندی را برای پیشنهاد تحقیقات آتی در زمینه بازیافت پسماند کشاورزی با استفاده از میکروارگانیسم‌ها ارائه می‌دهد.

موضوعاتی که در سال‌های اخیر (به‌ویژه ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴) بیشترین اندازه دایره را دارند، نشان دهنده تمرکز و اشباع نسبی تحقیقات فعلی در آن‌ها هستند. این موضوعات شامل زیست تبدیل (Bioconversion)، بهینه‌سازی (Optimization)، تخمیر (Fermentation)، هیدرولیز (Hydrolysis) و تولید اتانول (Ethanol-Production) هستند. کلیدواژه‌های پاسخ سطح روش‌شناسی(Response Surface Methodology)، سنتز سبز (Green Synthesis)، اقتصاد دایره‌ای (Circular Economy)و ارزش‌گذاری (Valorization) نشان دهنده تغییر تمرکز از صرفاً تولید محصول به کارایی فرآیند، پایداری و ادغام در سیستم‌های بزرگ‌تر است. با توجه به تحلیل روند پژوهش، حوزه‌های آتی تحقیق باید بر رفع شکاف‌های موجود، افزایش پایداری و گسترش زنجیره ارزش محصولات متمرکز باشند. کاربرد پاسخ سطح روش‌شناسی (RSM) و مدل‌سازی پیشرفته موضوع بسیار نوظهور (۲۰۲۴-۲۰۲۲) و با فرکانس بالا است. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آتی بر روی بهینه‌سازی چندمتغیره فرآیندهای کلیدی (مانند پیش تیمار یا هیدرولیز) متمرکز شوند. استفاده از پاسخ سطح روش‌شناسی (RSM) یا روش‌های هوش مصنوعی (AI Artificial Intelligence) برای درک تعاملات پیچیده بین متغیرهای فیزیکی مانند دما، pH، زمان و متغیرهای شیمیایی مانند غلظت سوبسترا، غلظت آنزیم با بازده محصول، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کارایی مقیاس‌پذیری (scalability) را افزایش دهد.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

کلیدواژه‌های اقتصاد دایره‌ای و ارزش‌گذاری در سال‌های اخیر رشد را تجربه کرده‌اند تحقیقات نباید صرفاً بر تولید یک محصول واحد تمرکز کنند. باید رویکرد زیست پالایشگاه یکپارچه (Integrated Biorefinery) را باهدف ارزش‌گذاری کامل (Total Valorization) بر تمام جریان‌های فرآیند اتخاذ کنند. مطالعات باید به تولید محصولات با ارزش افزوده بالا (مانند مواد شیمیایی پلتفرمی، مواد زیستی یا کودهای آلی) از باقیمانده‌های فرآیند بپردازند تا پایداری اقتصادی پروژه تضمین شود.

فرکانس *xylanase* و *trichoderma-reesei* نشان دهنده اهمیت هیدرولیز همی‌سلولز در کنار سلولز است. تحقیقات آینده باید بر مهندسی سویه‌های میکروبی به‌ویژه *Trichoderma* با هدف بیان زیاد (Overexpression) و بهبود فعالیت آنزیم‌های خاص هیدرولیز کننده همی‌سلولز (مانند زایلاناز و بتا-گلوکوزیداز) متمرکز باشند. این امر برای شکست مؤثرتر زیست‌توده لیگنوسلولزی و افزایش بازده قندهای تخمیری حیاتی است. همچنین، مطالعه مهندسی سویه‌ها برای تحمل بالاتر در شرایط سخت (مانند غلظت بازدارنده‌های پیش تیمار) پیشنهاد می‌شود.

تخمیر حالت جامد یک موضوع ثابت و نسبتاً پر فرکانس است که مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی بالایی (کاهش مصرف آب) دارد. با توجه به مزایای SSF برای تولید آنزیم‌ها و زیست‌توده‌های میکروبی، تحقیقات باید بر مقیاس‌پذیری و طراحی رآکتورهای SSF در سطح نیمه‌صنعتی متمرکز شوند تا این فرآیند از سطح آزمایشگاهی فراتر رود. همچنین، مطالعه دقیق انتقال حرارت و جرم در طول SSF برای جلوگیری از محدودیت‌های فرآیندی الزامی است.

سنتز سبز یک کلیدواژه نوظهور در صدر نمودار است و لگنین (lignin) همچنان یک نقطه کانونی است. تحقیق در مورد روش‌های پیش تیمار پایدار و دوستدار محیط‌زیست (مانند استفاده از مایعات یونی، حلال‌های یوتکتیک عمیق، یا فرآیندهای کاتالیزوری آنزیمی/میکروبی ملایم) که به‌طور مؤثر لیگنین را حذف می‌کنند، حیاتی است. هدف باید جایگزینی فرآیندهای شیمیایی با رویکردهای سنتز سبز باشد تا نیازهای محیط زیستی فرآیند را کاهش و ارزش‌گذاری لگنین باقی‌مانده را تسهیل کند.

چالش‌ها و محدودیت‌های فنی و اقتصادی روش‌های میکروبی در ارزش افزایی ضایعات کشاورزی

ارزش افزایی ضایعات کشاورزی با روش‌های میکروبی اگرچه در تئوری بسیار امیدوار کننده است، اما در عمل با چالش‌های جدی مواجه می‌شود. اولین مشکل به خود ضایعات باز می‌گردد

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

که ترکیب شیمیایی ناهمگون و ساختار سخت آن‌ها، فرآیند تجزیه را پیچیده می‌کند. این ناهمگونی باعث می‌شود نتوان یک روش استاندارد برای همه انواع ضایعات تعریف کرد و برای شکستن ساختار سخت لیگنین‌سلولز نیاز به مراحل پرهزینه پیش تیمار است (Foster et al. 2010; Coskun and Kantar, 2025).

از سوی دیگر، میکروارگانیسم‌های مورد استفاده اغلب برای کاربرد صنعتی ایده آل نیستند. بسیاری از آن‌ها در مقیاس بزرگ کند عمل می‌کنند، به تغییرات شرایط حساس هستند و در برابر مواد بازدارنده که در فرآیند پیش تیمار تولید می‌شوند، تحمل کمی دارند. حتی اگر فرآیند تخمیر با موفقیت انجام شود، جداسازی و خالص‌سازی محصول نهایی از محیط کشت، خود چالش بزرگی است که تا ۶۰ درصد هزینه تولید را به خود اختصاص می‌دهد (Janković et al. 2024; Anggraini, 2025).

علیرغم پتانسیل بالای فناوری‌های میکروبی، توجه به ملاحظات ایمنی زیستی برای توسعه پایدار و مسئولیت‌پذیر آن‌ها ضروری است. کاربرد میکروارگانیسم‌ها در مقیاس صنعتی، به‌ویژه گونه‌های مهندسی‌شده ژنتیکی برای بهبود عملکرد، این نگرانی را به وجود می‌آورد که امکان رهاسازی تصادفی و تبادل ژنی با جمعیت‌های میکروبی بومی وجود داشته باشد که می‌تواند تعادل اکوسیستم‌ها را برهم زند؛ بنابراین، رعایت پروتکل‌های ایمنی در محیط‌های کار، استفاده از بیورآکتورهای کاملاً بسته و اتخاذ روش‌های مؤثر برای غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها پیش از دفع ضایعات فرآیند، ازجمله اقدامات اجتناب‌ناپذیر برای به حداقل رساندن این مخاطرات است (Tiedje et al. 1989; Gallagher et al. 2015; Asin-Garcia et al. 2023).

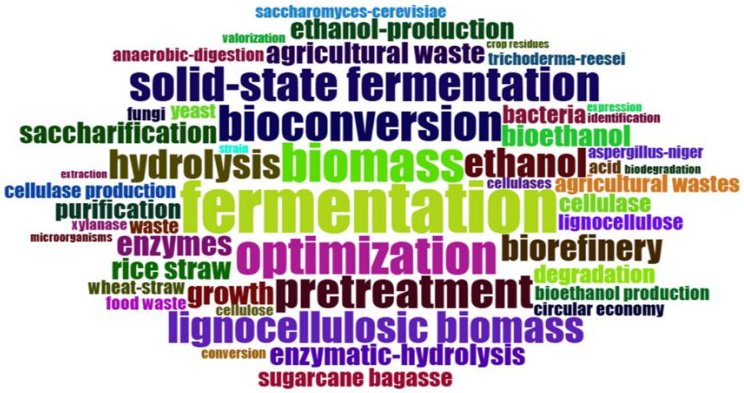
از دید اقتصادی نیز این روش‌ها با مشکل رقابت با محصولات سنتی روبرو هستند. قیمت تمام‌شده محصولات میکروبی مانند بیوپلاستیک‌ها و زیست‌سوخت‌ها در مقایسه با همتایان فسیلی خود بالاتر است و سرمایه‌گذاری اولیه برای احداث کارخانه‌های مجهز نیز بسیار سنگین می‌باشد. افزون بر این، نوسانات در تأمین مواد اولیه و عدم اطمینان از بازار فروش محصولات نهایی، ریسک مالی این پروژه‌ها را افزایش می‌دهد (Capanoglu and Tomás-Barberán, 2022).

بااین‌حال، با توجه به حرکت جهانی به سمت اقتصاد کم‌کربن و دایره‌ای، انگیزه لازم برای غلبه بر این چالش‌ها از طریق نوآوری‌های فنی و سیاست‌گذاری‌های هوشمند وجود دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]



شکل ۴- هم رخدادی واژگان کلیدی با استفاده از Bibliometrix

پیوند موضوعی نمایش داده‌شده در ابر کلمات کلیدی (شکل ۴)، ماهیت فرارشته‌ای پالایش زیستی پسماندهای کشاورزی را دربر می‌گیرد. این بصری سازی هم به‌عنوان یک ابزار راهبری برای پژوهشگران و هم به‌عنوان یک چارچوب مفهومی که یکپارچگی زیست‌فناوری میکروبی، مهندسی فرآیند و اصول اقتصاد دایره‌ای را در ادامه ارزش افزایی پسماند نشان می‌دهد، عمل می‌کند.

میکروارگانیسم‌ها نقشی کلیدی در بازسازی و مدیریت پسماندهای کشاورزی دارند و به‌عنوان رویکردی پایدار، امکان بازیافت این پسماندها را فراهم می‌کنند. این فرآیند نه‌تنها حجم پسماند را کاهش و از آلودگی محیط‌زیست جلوگیری می‌کند، بلکه به تولید محصولات با ارزش افزوده و بهبود حاصلخیزی خاک نیز کمک می‌کند.

با توجه به ظرفیت بالای کارخانجات صنایع غذایی و حجم انبوه ضایعات تولیدشده توسط آن‌ها، ضرورت بازیافت و استفاده مجدد از این مواد به‌ویژه با توجه به مواد مغذی موجود در آن‌ها روشن است. در ایران، حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد از تولیدات کشاورزی به ضایعات تبدیل می‌شود که ارزشی معادل ۵ میلیارد دلار در سال دارد؛ این میزان تقریباً ۶ برابر متوسط جهانی است و برابر با ۲۵ درصد درآمد نفتی کشور است. این آمار بیانگر نیاز به توجه به موانع تجاری‌سازی و ارائه راهکارهای عملی برای مدیریت پسماندهاست (Khouzani and Ghahfarokhi, 2022; Haji-Rahimi et al. 2024).

هرسال، میلیون‌ها دلار صرف واردات مواد اولیه صنایع تبدیلی می‌شود؛ درحالی‌که منابع تولید این مواد به هدر می‌رود. بااین‌حال، فرآیند بازیافت و

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

استفاده مجدد از پسماندها با چالش‌هایی مانند نیاز به شرایط بهینه، دما، رطوبت، pH و تهویه، زمان‌بر بودن تجزیه مواد آلی و نیاز به تخصص کافی روبه‌رو است.

تحقیقات در زمینه تولید از زباله‌های زیستی با استفاده از میکروارگانیسم‌ها به دلیل ماهیت چند رشته‌ای آن‌ها، نیاز به پیشرفت در علوم مختلف دارند. بنابراین، توسعه روش‌های تولید از این زباله‌ها می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهینه‌سازی منابع، مدیریت ضایعات و ایجاد ارزش اقتصادی پایدار عمل کند. تمرکز بر تحقیق و توسعه در این حوزه می‌تواند به تولید راهکارهایی سودآور و سازگار با محیط‌زیست منجر گردد. علاوه بر این، ادامه تحقیقات و پیشرفت‌های فناوری به بهینه‌سازی بیشتر این فرآیندها منجر خواهد شد و می‌تواند به تحقق آینده‌ای سبزتر و پایدارتر کمک کند. درنهایت، تنوع زباله در صنعت کشاورزی، زمینه‌ساز ظهور ایده‌های کسب‌وکار جدید برای بازیافت و ارزش‌گذاری در این حوزه است که محیط مناسبی برای ظهور مدل‌های کسب‌وکار نوآورانه فراهم می‌آورد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از استاد گرامی جناب آقای دکتر علی محمدی صمیمانه سپاسگزارم که باراهنمایی‌های ارزشمند و حمایت‌های بی‌دریغ خود، این پژوهش را به سرانجام رساندند. همچنین از ایشان برای پیشنهاد موضوع مقاله و ویرایش دقیق متن کمال تشکر را دارم.

فهرست منابع

References

Ahmed B, Ansari FA, Shoeb E, Akhtar J, Siddiqui K, Naz A, Ali B, Badar U. 2025. Cost-effective biosurfactant production by *Pseudomonas aeruginosa* analyzed through experimental design methodology. International Journal of Agriculture and Biology. 33: 1-7.

Akın M, Bartkiene E, Özogul F, Eyduran SP, Trif M, Lorenzo JM, Rocha JM. 2023. Conversion of organic wastes into biofuel by microorganisms: A bibliometric review. Cleaner and Circular Bioeconomy. 6: 100053. https://doi.org/10.1016/j.clcb.2023.100053.

Alan H, Köker AR. 2023. Analyzing and mapping agricultural waste recycling research: An integrative review for conceptual framework and future directions. Resources Policy. 85: 103987. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103987.

Anggraini W. 2025. The Role of Microbial Enzymes in Organic Waste Bioconversion: A Biochemical and Renewable Energy Perspective. Journal Pijar Mipa. 20(5): 835-841.

Asin-Garcia E, Robaey Z, Kampers LF, Martins dos Santos VA. 2023. Exploring the impact of tensions in stakeholder norms on designing for value change: The case of biosafety in industrial biotechnology. Science and Engineering Ethics. 29(2): 9. https://doi.org/10.1007/s11948-023-00432-6.

Babu S, Rathore SS, Singh R, Kumar S, Singh VK, Yadav S, Yadav V, Raj R, Yadav D, Shekhawat K. 2022. Exploring agricultural waste biomass for energy, food and feed production and pollution mitigation: A review. Bioresource Technology. 360: 127566.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127566.

Baharloo A, Esfandabadi SAJ, Roodi MZ. 2024. The effects of technology spillovers on private sector investment in Iran's food-agricultural industries. Iranian journal of food science and industry. 21: 61-75. https://doi.org/10.22034/FSCT.21.151.61.

Basu A, Prasad P, Das SN, Kalam S, Sayye R, Reddy M, El Enshasy H. 2021. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: recent developments, constraints, and prospects. Sustainability. 13(3): 1140. https://doi.org/10.3390/su13031140.

BeigMohammadi Z, Hamidi Esfahani Z, Khosravi Darani K. 2023. Optimization of phospholipase production condition in submerged medium for Trichoderma atroviride sp. ZB-ZH292. Journal of Food Science and Technology. 20: 169-179. https://doi.org/10.22034/FSCT.19.135.169.

Bogale TT. 2020. Microbial protein production from agro-industrial wastes as food and feed. American Journal of Life Sciences. 8(5): 121-126.

Boondaeng A, Keabpimai J, Trakunjae C, Vaithanomsat P, Srichola P, Niyomvong N. 2024. Cellulase production under solid-state fermentation by *Aspergillus* sp. IN5: Parameter optimization and application. Heliyon. 10(5): 1-9. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26601.

Capanoglu E, Tomás-Barberán FA. 2022. Introduction to novel approaches in the valorization of agricultural wastes and their applications. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 70(23): 6785-6786. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c03433.

Chen PH, Liu HL, Chen YJ, Cheng YH, Lin WL, Yeh CH, Chang CH. 2012. Enhancing CO_2 bio-mitigation by genetic engineering of cyanobacteria. Energy & Environmental Science. 5(8): 8318-8327. https://doi.org/10.1039/C2EE21124F.

Chilakamarry CR, Sakinah AM, Zularisam A, Sirohi R, Khilji IA, Ahmad N, Pandey A. 2022. Advances in solid-state fermentation for bioconversion of agricultural wastes to value-added products: Opportunities and challenges. Bioresource Technology. 343: 126065. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126065.

Chojnacka K. 2023. Valorization of biorefinery residues for sustainable fertilizer production: a comprehensive review. Biomass Conversion and Biorefinery. 13(16): 14359-14388. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04639-2.

Chubur V, Hasan G, Kára J, Hanzlíková I, Chernysh Y, Sedláček J, Wang J, Roubík H. 2024. Utilization of citrus, date, and jujube substrates for anaerobic digestion processes. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 18(6): 1917-1929. https://doi.org/10.1002/bbb.2665.

Colacicco M, Ciliberti C, Agrimi G, Biundo A, Pisano I. 2022. Towards the physiological understanding of *Yarrowia lipolytica* growth and lipase production using waste cooking oils. Energies. 15(14): 5217. https://doi.org/10.3390/en15145217.

Coskun NY, Kantar E. 2025. Hierarchical structure analysis of electricity consumption based on alternative energy sources: A comparative assessment of 66 countries. Bozok Journal of Science. 3(1): 10-19. https://doi.org/10.70500/bjs.1679895.

Duque-Acevedo M, Belmonte-Ureña LJ, Cortés-García FJ, Camacho-Ferre F. 2020. Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. Global Ecology and Conservation. 22: e00902. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00902.

El-Bakry M, Abraham J, Cerda A, Barrena R, Ponsá S, Gea T, Sanchez A. 2015. From wastes to high value added products: novel aspects of SSF in the production of enzymes. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 45(18): 1999-2042. https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1010423.

Farzanfar F, Sadeghi Mahoonak A, Ghorbani M, Hosseini Qaboos SH. 2025. Production of bioactive peptides from flaxseed meal: the effect of protease type and concentration, hydrolysis time, and microwave pretreatment. Journal of Food Science and Technology. 21: 191-204. https://doi,org/10.22034/FSCT.21.157.191.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

Fenibo EO, Ijoma GN, Selvarajan R, Chikere CB. 2019. Microbial surfactants: the next generation multifunctional biomolecules for applications in the petroleum industry and its associated environmental remediation. Microorganisms. 7(11): 581. https://doi.org/10.3390/microorganisms7110581.

Foster CE, Martin TM, Pauly M. 2010. Comprehensive compositional analysis of plant cell walls (lignocellulosic biomass) part I: lignin. Journal of Visualized Experiments: 37: e1837. https://doi.org/10.3791/1745.

Gallagher RR, Patel JR, Interiano AL, Rovner AJ, Isaacs FJ. 2015. Multilayered genetic safeguards limit growth of microorganisms to defined environments. Nucleic Acids Research. 43(3): 1945-1954. https://doi.org/10.1093/nar/gku1378.

Haji-Rahimi M, Bahmanzad K, Ghaderzadeh H. 2024. Challenges of applying circular economy in agricultural sustainable development: A case study of Kurdistan Province, Iran. Advances in Environmental and Engineering Research. 5(4): 1-16. http://dx.doi.org/10.21926/aeer.2404022.

Hasani B, Shahidi F, Mortazavi SA, Mohebbi M, Farhoos, R. 2023. The effect of using ultrasound pretreatment and pectinase enzyme on the extraction efficiency and antioxidant properties of the polyphenolic extract of sour grape (*Vitis viniferia*) waste. Journal of Food Science and Technology. 20: 196-218. https://doi.org/10.22034/FSCT.20.142.196.

Hoang DL, Davis C, Moll HC, Nonhebel S. 2020. Can multiple uses of biomass limit the feedstock availability for future biogas production? An overview of biogas feedstocks and their alternative uses. Energies. 13(11): 2747. https://doi.org/10.3390/en13112747.

Huang T, Lu ZM, Peng MY, Chai LJ, Zhang XJ, Shi JS, Li Q, Xu ZH. 2022. Constructing a defined starter for multispecies vinegar fermentation via evaluation of the vitality and dominance of functional microbes in an autochthonous starter. Applied and Environmental Microbiology. 88(3): e02175-02121. https://doi.org/10.1128/aem.02175-21.

Indran S, Divya D, Rangappa SM, Siengchin S, Christy PM, Gopinath L. 2021. Perspectives of anaerobic decomposition of biomass for sustainable biogas production: A Review. E3S Web of Conferences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130201015.

Janković T, Straathof AJ, Kiss AA. 2024. A perspective on downstream processing performance for recovery of bioalcohols. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 99(9): 1933-1940. https://doi.org/10.1002/jctb.7690.

Javed Z, Tripathi GD, Mishra M, Dashora K. 2021. Actinomycetes–the microbial machinery for the organic-cycling, plant growth, and sustainable soil health. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 31: 101893. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101893.

Jiménez DJ, Maruthamuthu M, van Elsas JD. 2015. Metasecretome analysis of a lignocellulolytic microbial consortium grown on wheat straw, xylan and xylose. Biotechnology for Biofuels. 8(1): 199. https://doi.org/10.1186/s13068-015-0387-8.

Jiménez J, Carabeo-Pérez A, Espinosa Negrín AM, Calero-Hurtado A. 2025. Addition of microbial consortium to the rice straw biomethanization: effect on specific methanogenic activity, kinetic and bacterial community. Preparative Biochemistry and Biotechnology. 1-12. https://doi.org/10.1080/10826068.2024.2448182.

Jin Y, Zhang L, Yi Z, Fang Y, Zhao H. 2022. Waste-to-energy: biobutanol production from cellulosic residue of sweet potato by Clostridia acetobutylicum. Environmental Engineering Research. 27(5). https://doi.org/10.4491/eer.2021.372.

Kareem S, Rahman R. 2013. Utilization of banana peels for citric acid production by *Aspergillus niger*. Agriculture and Biology Journal of North America. 4(4): 384-387. https://doi.org/10.5251/abjna.2013.4.4.384.387.

Khaswal A, Mishra SK, Chaturvedi N, Saini S, Pletschke B, Kuhad RC. 2024. Microbial enzyme production: Unlocking the potential of agricultural and food waste through solid-state fermentation. Bioresource Technology Reports. 27: 101880. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101880.

Khouzani MRZ, Ghahfarokhi ZD. 2022. Evaluation of agricultural waste management mechanism in

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

Iran. Industrial and Domestic Waste Management. 2(2): 113-124. https://doi.org/10.53623/idwm.v2i2.112.

Kumar Sarangi P, Subudhi S, Bhatia L, Saha K, Mudgil D, Prasad Shadangi K, Srivastava RK, Pattnaik B, Arya RK. 2023. Utilization of agricultural waste biomass and recycling toward circular bioeconomy. Environmental Science and Pollution Research. 30(4): 8526-8539. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20669-1.

Li J, Yang J, Huang X, Zhang KQ. 2006. Purification and characterization of an extracellular serine protease from *Clonostachys rosea* and its potential as a pathogenic factor. Process Biochemistry. 41(4): 925-929. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.10.006.

Li Y, Gu M, Xu W, Zhu J, Chu M, Tang Q, Yi Y, Zhang L, Li P, Zhang Y. 2025. Whole-genome analysis of Halomonas sp. H5 revealed multiple functional genes relevant to tomato growth promotion, plant salt tolerance, and rhizosphere soil microecology regulation. Microorganisms. 13(8): 1781. https://doi.org/10.3390/microorganisms13081781.

Liu HH, Ji XJ, Huang H. 2015. Biotechnological applications of *Yarrowia lipolytica*: past, present and future. Biotechnology Advances. 33(8): 1522-1546. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.07.010.

Liu J, Liu J, Zhang H, Zhou T. 2024. How does agricultural land scale affect recycling behavior of agricultural wastes: evidence from CLES. Frontiers in Sustainable Food Systems. 8: 1440786. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1440786.

Lopes M, Miranda SM, Costa AR, Pereira AS, Belo I. 2022. *Yarrowia lipolytica* as a biorefinery platform for effluents and solid wastes valorization–challenges and opportunities. Critical Reviews in Biotechnology. 42(2): 163-183. https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1931016.

Mamivand Z, Emamifar A, Salehi F, Karami M. 2024. Modeling of microwave pretreatment effect on the oil extraction from tomato seeds by artificial neural network method. Iranian Journal of Food Science and industry. 21: https://doi.org/10.22034/FSCT.21.152.181.

Martinaud E, Hierro-Iglesias C, Hammerton J, Hadad B, Evans R, Sacharczuk J, Leste D, Derry MJ, Topham PD, Fernandez-Castane A. 2024. Valorising cassava peel waste into plasticized polyhydroxyalkanoates blended with polycaprolactone with controllable thermal and mechanical properties. Journal of Polymers and the Environment. 32(8): 3503-3515. https://doi.org/10.1007/s10924-023-03167-4.

Marx IJ, Van Wyk N, Smit S, Jacobson D, Viljoen-Bloom M, Volschenk H. 2013. Comparative secretome analysis of *Trichoderma asperellum* S4F8 and *Trichoderma reesei* Rut C30 during solid-state fermentation on sugarcane bagasse. Biotechnology for Biofuels. 6(1): 172. https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-172.

McCarthy A. 1987. Lignocellulose-degrading actinomycetes. FEMS Microbiology Reviews. 3(2): 145-163. https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1987.tb02456.x.

Montoya S, Sánchez ÓJ, Levin L. 2015. Production of lignocellulolytic enzymes from three white-rot fungi by solid-state fermentation and mathematical modeling. African Journal of Biotechnology. 14(15): 1304-1317. https://doi.org/10.5897/AJB2014.14331.

Neagu S, Stancu MM. 2025. Novel halotolerant bacteria from saline environments: Isolation and biomolecule production. BioTech. 14(2): 49. https://doi.org/10.3390/biotech14020049.

Nigam PSN, Singh D. 1996. Processing of agricultural wastes in solid state fermentation for microbial protein production. Journal of Scientific and Industrial Research. 55(5-6): 373-380.

Osselin F, Saad S, Nightingale M, Hearn G, Desaulty A, Gaucher E, Clarkson C, Kloppmann W, Mayer B. 2019. Geochemical and sulfate isotopic evolution of flowback and produced waters reveals water-rock interactions following hydraulic fracturing of a tight hydrocarbon reservoir. Science of the Total Environment. 687: 1389-1400. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.066.

Oyedeji S, Patel N, Krishnamurthy R, Fatoba PO. 2024. Agricultural wastes to value-added products: Economic and environmental perspectives for waste conversion. Biowaste to Value-added Products: Economics and Technologies. 215-248. https://doi.org/10.1007/10_2024_274.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

Priharto N, Setiawan A, Astuti DI. 2025. Optimized bioethanol production from banana stem waste via simultaneous saccharification and fermentation with Saccharomyces cerevisiae. Indonesian Journal of Biotechnology. 30(1): 56-67.

Quiñones-Cerna C, Rodríguez-Soto JC, Hurtado-Butrón F, Centeno-Calderón L, Mejia-Ruedell R, López-Quiroz E, Gálvez-Rivera J, Ugarte-López W. 2024. Efficient chitin extraction from shrimp exoskeletons through single-step fermentation by *Pseudomonas aeruginosa* QF50 and *Serratia* sp. QCS23. Processes. 12(6): 1184. https://doi.org/10.3390/pr12061184.

Raei P, Khomeiri M, Sadeghi Mahoonak A, Moayedi A, Kashiri M. 2025. Antioxidant activity of sesame meal protein hydrolysate produced with fermentation by *Bacillus* species. Journal of Food Science and Technology. 21(156): 80-91.

Rasool G, Irfan M. 2024. The role of microbial diversity in lignocellulosic biomass degradation: A biotechnological perspective. ChemBioEng Reviews. 11(3): 613-635. https://doi.org/10.1002/cben.202300073.

Ravindran R, Hassan SS, Williams GA, Jaiswal AK. 2018. A review on bioconversion of agro-industrial wastes to industrially important enzymes. Bioengineering. 5(4): 93. https://doi.org/10.3390/bioengineering5040093.

Ritala A, Häkkinen ST, Toivari M, Wiebe MG. 2017. Single cell protein—state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. Frontiers in Microbiology. 8: 2009. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02009.

Sadh PK, Kumar S, Chawla P, Duhan JS. 2018. Fermentation: a boon for production of bioactive compounds by processing of food industries wastes (by-products). Molecules. 23(10): 2560. https://doi.org/10.3390/molecules23102560.

Shahab RL, Brethauer S, Davey MP, Smith AG, Vignolini S, Luterbacher JS, Studer MH. 2020. A heterogeneous microbial consortium producing short-chain fatty acids from lignocellulose. Science. 369: eabb1214. https://doi.org/10.1126/science.abb1214.

Shirahigue LD, Ceccato-Antonini SR. 2020. Agro-industrial wastes as sources of bioactive compounds for food and fermentation industries. Ciência Rural. 50: e20190857. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190857.

Singh H, Janiyani K, Gangawane A. 2025. Mutational enhancement of *Aspergillus niger* tiegh. for higher cellulase production comparable to trichoderma species in solid-state fermentation. Journal of Applied Biology and Biotechnology. 16: 132-154. https://doi.org/10.7324/jabb.2025.200551.

Sobczak A, Chomać-Pierzecka E, Kokiel A, Różycka M, Stasiak J, Soboń D. 2022. Economic conditions of using biodegradable waste for biogas production, using the example of Poland and Germany. Energies. 15(14): 5239. https://doi.org/10.3390/en15145239.

Sumiyati S, Samadikun B, Widiyanti A, Budihardjo M, Al Qadar S, Puspita A. 2024. Life cycle assessment of agricultural waste recycling for sustainable environmental impact. Global Journal of Environmental Science and Management. 10(2): 907-938. https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.02.30

Tabassum Z, Mohan A, Mamidi N, Khosla A, Kumar A, Solanki PR, Malik T, Girdhar M. 2023. Recent trends in nanocomposite packaging films utilising waste generated biopolymers: Industrial symbiosis and its implication in sustainability. Institution of Engineering and Technology Nanobiotechnology. 17(3): 127-153. https://doi.org/10.1049/nbt2.12122.

Tiedje JM, Colwell RK, Grossman YL, Hodson RE, Lenski RE, Mack RN, Regal PJ. 1989. The planned introduction of genetically engineered organisms: ecological considerations and recommendations. Ecology. 70(2): 298-315. https://doi.org/10.2307/1937535.

Tripathi A, Jadhav G, Jadhav DA, Ghangrekar MM, Surampalli RY. 2024. Electromethanogenic reactor for biogas production using agricultural and livestock waste and its comparative analysis with biogas plant: A mini-review. Biomass and Bioenergy. 185: 107246. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107246.

Vashisht A, Thakur K, Kauldhar BS, Kumar V, Yadav SK. 2019. Waste valorization: Identification

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

of an ethanol tolerant bacterium *Acetobacter pasteurianus* SKYAA25 for acetic acid production from apple pomace. Science of the Total Environment. 690: 956-964. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.070.

Vigneswari S, Kee SH, Hazwan MH, Ganeson K, Tamilselvan K, Bhubalan K, Amirul AA, Ramakrishna S. 2024. Turning agricultural waste streams into biodegradable plastic: A step forward into adopting sustainable carbon neutrality. Journal of Environmental Chemical Engineering. 12(2): 112135. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112135.

Vu VN, Kohári-Farkas C, Filep R, Laszlovszky G, Ban MT, Bujna E, Gupta VK, Nguyen QD. 2023. Design and construction of artificial microbial consortia to enhance lignocellulosic biomass degradation. Biofuel Research Journal. 10(3): 1890-1900. https://doi.org/10.18331/BRJ2023.10.3.3.

Vyas P, Sharma S, Gupta J. 2022. Vermicomposting with microbial amendment: implications for bioremediation of industrial and agricultural waste. BioTechnologia. 103(2): 203-215. https://doi.org/10.5114/bta.2022.116213.

West TP. 2023. Citric acid production by *Aspergillus niger* using solid-state fermentation of agricultural processing coproducts. Applied Biosciences. 2(1): 1-13. https://doi.org/10.3390/applbiosci2010001.

Wirth R, Kovács E, Maróti G, Bagi Z, Rákhely G, Kovács KL. 2012. Characterization of a biogas-producing microbial community by short-read next generation DNA sequencing. Biotechnology for Biofuels. 5(1): 41. https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-41.

Ye JW, Chen GQ. 2021. Halomonas as a chassis. Essays in Biochemistry. 65(2): 393-403. https://doi.org/10.1042/EBC20200159.

Yunus FN, Nadeem M, Rashid F. 2015. Single-cell protein production through microbial conversion of lignocellulosic residue (wheat bran) for animal feed. Journal of the Institute of Brewing. 121(4): 553-557. https://doi.org/10.1002/jib.251.

Zhang Z, Shah AM, Mohamed H, Tsiklauri N, Song Y. 2021. Isolation and screening of microorganisms for the effective pretreatment of lignocellulosic agricultural wastes. BioMed Research International. 2021(1): 5514745. https://doi.org/10.1155/2021/5514745.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]

Recycling Agricultural Waste Using Microorganisms: A Sustainable Approach

Shiva Ahmadipour Sereshkeh[1], Ali Mohammadi[2*]

1-Ph.D. Student, Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, Alzahra University, Tehran, Iran
2-Associate Professor, Microbiology, Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, Alzahra University, Tehran, Iran
a.mohammadi@alzahra.ac.ir

Abstract

With the increasing global population and the consequent rise in demand for agricultural products, vast amounts of agricultural waste are being generated, posing a significant environmental challenge. These residues, often regarded as worthless and unusable, are in fact a valuable resource, offering considerable potential for conversion into value-added products. Innovative approaches in microbiology, particularly the microbial degradation of agricultural waste, can effectively mitigate the environmental impacts associated with waste disposal. Such processes transform agricultural leftovers into valuable resources, including compost, biogas, microbial protein, organic acids, and bioplastics. This not only reduces waste volume but also contributes to ecosystem enhancement, playing a vital role in reducing greenhouse gas emissions and mitigating climate change. These approaches can further optimize the use of natural resources and promote sustainable agriculture. This review article examines the role of microorganisms in the recycling of agricultural waste and discusses the economic, social, and environmental benefits of these methods. Additionally, it highlights the substantial potential of agricultural waste recycling as a sustainable solution for the future, which can contribute to realizing a circular economy, enhancing food security, reducing poverty, and decreasing dependence on non-renewable resources.

Keywords: Value addition, Circular economy, Agricultural waste recycling, Plant biomass, Biological process

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.4.6]