



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



An Analytical Review of Biomass Conversion Technologies, Challenges and Perspectives

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors

Iman Shemshadi *

Department of Mechanics, Payamnoor
University, Tehran, Iran,

Iman Pishkar Dehkordi

Department of Mechanics, Payamnoor
University, Tehran, Iran,

* Correspondence

Shemshadyeman@gmail.com
e.pishkar@pnu.ac.ir

Article History

Received: 05 Jun, 2026

Accepted: 29 Jun, 2026

ePublished: 5 Jul, 2026

ABSTRACT

Biomass energy is transitioning from the laboratory phase to widespread industrial applications. Despite extensive research, there remains a significant gap in the simultaneous analysis of technical, economic, and environmental dimensions of conversion technologies within a systematic review framework. This paper aims to fill this gap by systematically examining the technical, economic, and environmental challenges of biomass conversion technologies and outlining their development prospects up to the 2040 horizon. This review study, employing an analytical-descriptive approach and utilizing a systematic review protocol, conducted a comprehensive search across Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases from 2010 to 2025. From 260 initial sources, 149 credible articles were selected for final analysis. Data analysis was performed using a directed qualitative content analysis method. Findings indicate that novel technologies such as plasma gasification and algal bioreactors can increase energy efficiency by up to threefold while significantly reducing pollution. However, challenges related to industrial scalability and high capital costs, particularly in logistics and pretreatment, remain major barriers to commercialization. Successful experiences in Brazil and Sweden highlight the key role of governmental incentives and international standardization. The "waste-to-wealth" approach not only addresses waste management but also facilitates green job creation and sustainable income in rural areas. With its potential to become a cornerstone of sustainable energy systems, biomass plays a critical role in achieving a low-carbon economy. The innovation of this paper lies in presenting an integrated framework for the three-dimensional analysis of challenges, integrating hybrid technologies and nanomaterials, and conducting a comparative analysis of energy policies with recommendations for developing countries. Ultimately, biomass is not merely an energy option but an integral part of a comprehensive solution to combat climate change and advance toward sustainable development.

Keywords: Biomass Energy, Sustainable Energy, Technology, Challenges, Perspectives

مروری تحلیلی بر فناوری ، چالش ها و چشم اندازه تبدیل انرژی زیست توده

ایمان شمشادی*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

ایمان پیشکار دهکردی

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

کلید واژه ها

انرژی زیست توده، انرژی پایدار ، فناوری، چالش، چشم انداز

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸

* نویسنده مسئول: shemshadyeman@gmail.com

۱-مقدمه

افزایش تقاضای جهانی انرژی، کاهش منابع سوخت های فسیلی و نگرانی های روزافزون درباره تغییرات آب و هوایی، توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر را به یکی از اولویت های اساسی سیاست گذاری انرژی در سطح بین المللی تبدیل کرده است [۱]. در این میان، زیست توده به عنوان یکی از گسترده ترین و در دسترس ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، نقشی کلیدی در گذار به سیستم های انرژی پایدار ایفا می کند [۲]. زیست توده به کلیه مواد آلی با منشأ گیاهی، جانوری یا میکروبی اطلاق می شود که از طریق فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به اشکال مختلف انرژی شامل برق، حرارت و سوخت های مایع و گازی تبدیل می شوند [۳]. این مواد طیف وسیعی از منابع را در بر می گیرند که از مهم ترین آنها می توان به ضایعات کشاورزی و جنگلی، پسماندهای آلی شهری، فضولات دامی و جلبک ها اشاره کرد [۴]. مهم ترین ویژگی زیست توده که آن را از سایر منابع تجدیدپذیر متمایز می سازد، ماهیت کربن خنثی آن است؛ به این معنا که دی اکسید کربن حاصل از احتراق یا تبدیل آن، معادل دی اکسید کربنی است که در طی رشد گیاهان توسط فرآیند فتوسنتز از جو جذب شده است [۵]. این ویژگی، زیست توده را به گزینه ای کارآمد برای

چکیده

انرژی زیست توده در حال گذار از مرحله آزمایشگاهی به کاربردهای صنعتی گسترده است. با وجود پژوهش های گسترده، شکاف قابل توجهی در تحلیل هم زمان ابعاد فنی، اقتصادی و زیست محیطی فناوری های تبدیل در قالب یک مطالعه مروری نظام مند وجود دارد. این مقاله با هدف پر کردن این شکاف و بررسی نظام مند چالش های فنی، اقتصادی و زیست محیطی فناوری های تبدیل زیست توده و ترسیم چشم انداز توسعه آن تا افق ۲۰۴۰ انجام شده است. این مطالعه مروری با رویکرد تحلیلی-توصیفی و بهره گیری از پروتکل مرور نظام مند، به جستجوی جامع در پایگاه های Scopus، Web of Science و Google Scholar در بازه سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ پرداخته است. از میان ۲۶۰ منبع اولیه، ۱۴۹ مقاله معتبر برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. تحلیل داده ها با روش تحلیل محتوای کیفی جهت یافته انجام شد. یافته ها نشان می دهد فناوری های نوینی نظیر گازی سازی پلاسما و بیوراکتورهای جلبکی، بازده انرژی را تا ۳ برابر افزایش و آلایندگی را کاهش می دهند. با این حال، چالش های مقیاس پذیری صنعتی و هزینه های بالای سرمایه گذاری در لجستیک و پیش تصفیه، موانع اصلی تجاری سازی هستند. تجارب برزیل و سوئد نقش کلیدی مشوق های دولتی را نشان می دهند. رویکرد «پسماند به ثروت» ضمن مدیریت پسماند، زمینه ساز اشتغال سبز و درآمد پایدار در مناطق روستایی است. زیست توده با

کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقابله با تغییرات اقلیمی تبدیل کرده است [۶]. با این حال، چالش‌های متعددی از جمله یازده پایین فرآیندهای تبدیل، هزینه‌های بالای جمع‌آوری و لجستیک، و رقابت با منابع غذایی (در مورد سوخت‌های زیستی نسل اول) مسیر توسعه صنعتی این فناوری را با موانعی جدی مواجه ساخته است [۷]. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در توسعه فناوری‌های تبدیل زیست توده صورت گرفته است. فناوری‌های پیشرفته‌ای نظیر گازپسازی پلاسما، هضم بی‌هوازی پیشرفته و بیوراکتورهای جلبکی، امکان تولید انرژی با بازدهی بالاتر و آلاینده‌گی کمتر را فراهم آورده‌اند [۸]. علاوه بر این، توسعه سوخت‌های زیستی نسل دوم و سوم که از منابع غیرخوراکی نظیر ضایعات لیگنوسلولزی و جلبک‌ها تولید می‌شوند، تا حد زیادی چالش رقابت با امنیت غذایی را کاهش داده است [۹]. این فناوری‌ها نه تنها به افزایش بهره‌وری انرژی کمک می‌کنند، بلکه با رویکرد (پسماند به ثروت) می‌توانند راهکاری جامع برای مدیریت پسماندهای آلی شهری و کشاورزی ارائه دهند [۱۰]. از منظر اقتصادی، توسعه صنایع زیست توده می‌تواند با کاهش وابستگی به واردات سوخت‌های فسیلی، امنیت انرژی کشورها را بهبود بخشد [۱۱]. همچنین، ایجاد شبکه‌های جمع‌آوری ضایعات و احداث نیروگاه‌های تولید انرژی در مناطق روستایی، زمینه‌ساز ایجاد اشتغال پایدار و توسعه متوازن مناطق خواهد بود [۱۲]. با توجه به افزایش تعهدات جهانی برای کاهش انتشار کربن در چارچوب توافقنامه پاریس، پیش‌بینی می‌شود سهم زیست توده در سبد انرژی جهانی تا سال ۲۰۴۰ به ۱۵ تا ۲۰ درصد برسد [۱۳]. با وجود پتانسیل‌های فراوان، مسیر تجاری‌سازی و توسعه صنعتی فناوری‌های تبدیل زیست توده همچنان با چالش‌های فنی، اقتصادی و زیست محیطی متعددی مواجه است. شناسایی نظام‌مند این چالش‌ها و ارائه راهکارهای نوین برای رفع آن‌ها، یکی از ضرورت‌های پژوهشی در این حوزه محسوب می‌شود. بر این اساس، مقاله حاضر با هدف بررسی جامع محدودیت‌های فنی، موانع اقتصادی و مسائلی زیست محیطی فناوری‌های تبدیل

زیست توده و همچنین ترسیم چشم‌انداز توسعه و تجاری‌سازی آن‌ها، به مرور نظام‌مند یافته‌های پژوهشی دهه اخیر پرداخته است. نوآوری پژوهش حاضر در سه سطح قابل تبیین است: نخست، رویکرد یکپارچه و چندبعدی به تحلیل هم‌زمان چالش‌های فنی، اقتصادی و زیست محیطی در قالب یک مطالعه مروری نظام‌مند که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ دوم، ارائه چارچوبی تحلیلی برای تلفیق راهکارهای نوین شامل فناوری‌های هیبریدی، کاربرد نانومواد پیشرفته و به‌کارگیری زیست توده‌های نسل سوم که می‌تواند به عنوان نقشه راهی برای پژوهش‌های آتی و سیاست‌گذاری انرژی مورد استفاده قرار گیرد، سوم، تحلیل تطبیقی سیاست‌های انرژی کشورهای پیشرو (برزیل، سوئد و آلمان) و ارائه توصیه‌های سیاستی متناسب با شرایط کشورهای در حال توسعه که تاکنون در مطالعات داخلی به صورت نظام‌مند بررسی نشده است. این مقاله با تلفیق یافته‌های تحقیقاتی و سیاست‌های انرژی جهانی، به ترسیم مسیرهای بهینه‌سازی و تجاری‌سازی فناوری‌های تبدیل زیست توده پرداخته و نقش کلیدی آن را در گذار به اقتصاد کم‌کربن مورد تأکید قرار می‌دهد. در نهایت، زیست توده به عنوان پلی بین سیستم انرژی فعلی و آینده‌ای کم‌کربن، می‌تواند نقشی محوری در تحول انرژی جهانی و دستیابی به اهداف توسعه پایدار ایفا کند.

۲-مرور ادبیات و پیشینه تحقیق

تبدیل انرژی از زیست توده به عنوان یکی از راه کارهای کلیدی در سیستم انرژی پایدار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. بر اساس گزارش اخیر آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، زیست توده می‌تواند تا ۱۴٪ از انرژی اولیه جهان را تأمین نماید [۱۴]. فناوری‌های تبدیل زیست توده عمدتاً به سه دسته اصلی ترموشیمیایی، بیوشیمیایی و فیزیکوشیمیایی تقسیم‌بندی می‌شوند که هر یک دارای مزایا و چالش‌های خاص خود هستند [۱۵]. در حوزه تبدیل ترموشیمیایی، فرآیندهای گازی سازی و پیرولیز بیشترین توجه پژوهشی را به خود جلب کرده‌اند. مطالعات

این مقاله مروری با رویکردی تحلیلی-توصیفی به بررسی نظام‌مند چالش‌ها و چشم‌اندازهای فناوری‌های تبدیل زیست‌توده می‌پردازد. با تمرکز بر سه محور اصلی محدودیت‌های فنی (شامل بازده پایین فرآورده‌ها و چالش‌های پیش‌تصفیه)، موانع اقتصادی (مانند هزینه‌های بالای لجستیک و سرمایه‌گذاری) و مسائل زیست‌محیطی (از جمله تعارضات کاربری زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای) و چشم‌اندازهای آینده و راه‌کارهای نوین، این مطالعه با بهره‌گیری از روش‌شناسی استاندارد مرور نظام‌مند و تحلیل محتوای کیفی، به گردآوری و ارزیابی یافته‌های پژوهشی دهه اخیر می‌پردازد. جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های داده معتبر Scopus، Web of Science و Google Scholar و با استفاده از کلیدواژه‌های مرتبط با حوزه تبدیل زیست‌توده، در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ انجام شد. در این راستا، ابتدا تعداد ۱۱۰ منبع اولیه شناسایی گردید که پس از اعمال معیارهای ورود و خروج (شامل اصالت محتوا، انتشار در مجلات معتبر و ارتباط مستقیم با محورهای سه‌گانه تحقیق) و طی فرآیند غربالگری عنوان، چکیده و متن کامل، در نهایت ۴۲ منبع معتبر علمی که دارای موضوعیت با راهکارهای نوین شامل توسعه فناوری‌های هیبریدی، کاربرد نانومواد پیشرفته و به‌کارگیری زیست‌توده‌های نسل سوم بودند، برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. با تلفیق یافته‌های تحقیقاتی و سیاست‌های انرژی جهانی، این مقاله به ترسیم مسیرهای بهینه‌سازی و تجاری‌سازی فناوری‌های تبدیل زیست‌توده پرداخته و نقش کلیدی آن را در گذار به اقتصاد کم‌کربن مورد تأکید قرار می‌دهد.

۴- منابع زیست‌توده و انواع آن

زیست‌توده به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، در چهار دسته اصلی شامل زیست‌توده لیگنوسلولزی (ضایعات کشاورزی و جنگلی)، زیست‌توده دریایی (جلبک‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی)، پسماندهای آلی شهری و صنعتی و زیست‌توده های مخصوص طبقه‌بندی می‌شود که هر یک دارای ویژگی‌ها، مزایا و چالش‌های خاص خود هستند. این تنوع در منابع زیست‌توده، امکان انتخاب روش‌های تبدیل مناسب بر اساس نوع ماده اولیه و

برجواثر نشان داده‌اند که بازده انرژی در گازی سازی زیست‌توده می‌تواند به ۷۵٪ برسد، اما چالش‌هایی مانند تشکیل تار و نیاز به پیش‌تصفیه مواد اولیه همچنان باقی است [۱۶]. در مقابل، فناوری‌های بیوشیمیایی مانند هضم بی‌هوازی به دلیل سازگاری با پسماندهای مرطوب مورد توجه ویژه قرار دارند. ویلند در پژوهش خود نشان داده که بازده تولید متان در این سیستم‌ها به شدت به ترکیب ماده اولیه و شرایط عملیاتی وابسته است [۱۷]. در زمینه سوخت‌های زیستی نسل دوم، پژوهش‌های نایک و همکاران تأکید دارند که فرآورده‌های مبتنی بر لیگنوسلولوز به دلیل پیچیدگی ساختار پلیمری با محدودیت‌های فنی قابل توجهی مواجه هستند [۱۸]. با این حال، توسعه آنزیم‌های کم‌هزینه و روش‌های پیش‌تصفیه نوین مانند تخریب با امواج فراصوت امیدهای تازه‌ای ایجاد کرده است [۱۹]. از منظر اقتصادی، گزارش آژانس بین‌المللی انرژی نشان می‌دهد که هزینه تولید انرژی از زیست‌توده در حال حاضر ۲۰-۳۰٪ بالاتر از سوخت‌های فسیلی است، اما با پیشرفت فناوری‌ها و افزایش مقیاس تولید، این شکاف در حال کاهش است [۲۰]. چالش‌های زیست‌محیطی مرتبط با تبدیل زیست‌توده نیز به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. چروبینی و استرومان با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات نشان داده‌اند که برخی مسیرهای تبدیل مانند احتراق مستقیم ممکن است به دلیل انتشار ذرات معلق اثرات منفی محلی داشته باشند [۲۱]. در مقابل، فناوری‌های پیشرفته مانند گازسازی همراه با جذب و ذخیره کربن می‌توانند به دستیابی به تعادل کربن منفی کمک کنند [۲۲]. از دیدگاه سیاست‌گذاری، تحلیل‌های سرل و مالینز تأکید می‌کنند که مشوق‌های مالیاتی و استانداردهای سوخت‌های زیستی مانند دستورالعمل اتحادیه اروپا نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه بازار داشته‌اند [۲۳]. در منطقه خاورمیانه، پژوهش‌های حسینی و همکاران کمبود سرمایه‌گذاری در تحقیقات زیست‌توده را یکی از موانع اصلی توسعه این فناوری‌ها شناسایی کرده‌اند [۲۴].

۳- روش‌شناسی تحقیق

شرایط محلی را فراهم می آورد. خلاصه ویژگی های این سه دسته اصلی در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

۴-۱- زیست توده لیگنوسلولزی (ضایعات کشاورزی و جنگلی)

زیست توده لیگنوسلولزی که عمدتاً از ضایعات کشاورزی (مانند کاه و کلش گندم، کاه برنج، باگاس نیشکر و بقایای ذرت)، پسماندهای جنگلی و محصولات انرژی زیست تشکیل می شود، به دلیل فراوانی جهانی و محتوای انرژی بالا، یکی از امیدوارکننده ترین منابع برای تولید سوخت های زیستی نسل دوم محسوب می شود [۲۵]. سالانه بیش از ۹۹۸ میلیون تن پسماند کشاورزی در جهان تولید می شود که شامل کاه گندم (حدود ۳۵۰ میلیون تن)، باگاس نیشکر (۲۷۹-۳۰۰ میلیون تن) و کاه برنج (۱۰۰-۱۲۰ میلیون تن) می باشد [۲۶]. این حجم عظیم از پسماندها که اغلب به روش های سنتی سوزانده یا دفن می شوند، علاوه بر هدررفت انرژی، به آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه ای کمک می کنند. از نظر ترکیب شیمیایی، زیست توده لیگنوسلولزی عمدتاً از سه جزء اصلی سلولز (۴۰-۶۰٪)، همی سلولز (۲۰-۴۰٪) و لیگنین (۱۰-۲۵٪) تشکیل شده است که ساختار پیچیده و مقاوم آنها چالش های فنی قابل توجهی در فرایندهای تبدیل ایجاد می کند [۲۷] [۲۸]. سلولز، فراوان ترین پلیمر آلی در طبیعت، دارای ساختاری نیمه بلورین با پیوندهای هیدروژنی قوی است که آن را در برابر هیدرولیز آنزیمی مقاوم می سازد [۲۸]. همی سلولز، پلیمری غیرخطی از قندهای پنج کربنه و شش کربنه، به عنوان پلی بین سلولز و لیگنین عمل می کند و نسبت به سلولز ساختاری آمورف تر دارد [۲۹]. لیگنین، پلیمری فنولی و سه بعدی، به عنوان چسب طبیعی استحکام ساختاری گیاه را تأمین می کند، اما مهم ترین مانع برای دسترسی آنزیم ها به سلولز محسوب می شود [۲۹]. ترکیب شیمیایی دقیق زیست توده لیگنوسلولزی به عواملی مانند نوع گیاه، شرایط اقلیمی، نوع خاک و زمان برداشت بستگی دارد. پیشرفت های اخیر در روش های پیش تصفیه نظیر تخریب اسیدی و قلیایی، انفجار بخار، انبساط آمونیاکی، امواج فراصوت و حلال های یوتکتیک عمیق،

همچنین توسعه راکتورهای پیشرفته و آنزیم های مهندسی شده، امکان دستیابی به بازده تبدیل بالاتر (تا ۹۰٪ قندهای قابل تخمیر) را فراهم کرده است [۳۰] [۳۱]. به عنوان مثال، پیش تصفیه با آمونیاک و انفجار بخار می تواند ساختار لیگنین را تخریب کرده و دسترسی آنزیم ها به سلولز را به طور قابل توجهی افزایش دهد [۳۰]. با این حال، چالش های مربوط به سمیت لیگنین برای میکروارگانیسم ها در فرایندهای تخمیر و نیاز به جداسازی ترکیبات بازدارنده، همچنان نیازمند پژوهش های بیشتری است [۳۲]. هزینه های بالای جمع آوری و حمل و نقل مواد لیگنوسلولزی (به دلیل چگالی پایین انرژی، رطوبت بالا و توزیع پراکنده جغرافیایی) همچنان به عنوان یک مانع اصلی در توسعه تجاری این فناوری ها باقی مانده است [۳۳]. مطالعات نشان داده است که هزینه لجستیک می تواند بین ۱۳۰ تا ۲۰۰ دلار به ازای هر تن متغیر باشد که بخش قابل توجهی (تا ۳۰-۴۰٪) از هزینه های کل تولید را به خود اختصاص می دهد [۳۳]. عوامل دیگری مانند تغییرات فصلی در دسترسی به مواد اولیه، تخریب زیستی در طول ذخیره سازی و نیاز به پیش فرآوری در محل (شامل خریداری و دانه بندی) از جمله موانع عملیاتی دیگر محسوب می شوند [۳۴]. در این راستا، ایجاد مراکز تجمع محلی، خشک سازی اولیه با انرژی خورشیدی و توسعه زنجیره های تأمین یکپارچه به عنوان راهکارهایی برای کاهش هزینه های لجستیک پیشنهاد شده است [۳۴].

۴-۲- زیست توده دریایی (جلبک ها و ماکروآلگ ها)

زیست توده دریایی شامل جلبک های میکروسکوپی (میکروآلگ ها) و جلبک های ماکروسکوپی (ماکروآلگ ها یا جلبک های دریایی) است که به دلیل رشد سریع، نیاز نداشتن به زمین های کشاورزی و منابع آب شیرین، و توانایی بالای جذب CO₂، گزینه های امیدوارکننده ای برای تولید سوخت های زیستی نسل سوم محسوب می شوند [۳۵]. جلبک ها به عنوان سریع ترین گیاهان رشدکننده در جهان شناخته می شوند و می توانند در آب های شور، فاضلاب و حتی شرایط سخت محیطی کشت شوند، بدون آنکه رقابتی با منابع

به شرایط محیطی و نیاز به بهینه‌سازی فرآیندهای استخراج روغن، از دیگر موانع فنی در مسیر تجاری‌سازی این فناوری به شمار می‌روند [۴۲].

۴-۳- پسماندهای آلی شهری و صنعتی

پسماندهای شهری و صنعتی به عنوان منبع مهم زیست‌توده، شامل ضایعات آلی جامد (زباله‌های غذایی، میوه‌ها، سبزیجات، مواد غذایی فاسد شدنی، ضایعات نان و مواد نشاسته‌ای)، فاضلاب‌های شهری و لجن فاضلاب، پسماندهای صنایع غذایی (مانند تفاله چغندررقند، ملاس، تفاله انگور، تفاله خرما و ضایعات کشتارگاه‌ها)، پسماندهای صنایع کاغذسازی و همچنین ضایعات کشاورزی فرآوری شده هستند که پتانسیل قابل توجهی برای تولید انرژی دارند [۴۳]. بر اساس برآوردهای جهانی، سالانه بیش از ۱.۳ میلیارد تن زباله غذایی در جهان تولید می‌شود که بخش قابل توجهی از این حجم عظیم پسماند، قابلیت تبدیل به انرژی را داراست [۴۳]. همچنین، فاضلاب‌های شهری با تولید روزانه میلیون‌ها مترمکعب در سطح جهان، حاوی مقادیر قابل توجهی مواد آلی هستند که در صورت مدیریت صحیح، می‌توانند منبع ارزشمندی برای تولید انرژی تجدیدپذیر محسوب شوند [۴۴]. این مواد از طریق فرآیندهای مختلفی مانند هضم بی‌هوازی (تولید بیوگاز)، احتراق مستقیم (تولید برق و حرارت)، پیرولیز (تولید بیوجاز، بیوتیلن)، گازی‌سازی (تولید گاز سنتز) و تخمیر (تولید اتانول) قابل تبدیل به انرژی هستند [۴۵]. در میان فرآیندهای فوق، هضم بی‌هوازی به دلیل سازگاری با پسماندهای مرطوب و تولید بیوگاز (عمدتاً متان و دی‌اکسید کربن) به عنوان یکی از مناسب‌ترین فناوری‌ها برای پسماندهای شهری شناخته می‌شود [۴۶]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در هضم بی‌هوازی، میزان تولید بیوگاز به ترکیب ماده اولیه بستگی داشته و برای زباله‌های غذایی، به عنوان یکی از غنی‌ترین بسترها از نظر مواد آلی، پتانسیل تولید بیوگاز بین ۵۰ تا ۱۵۰ مترمکعب به ازای هر تن ماده خشک متغیر است [۴۵]. احتراق مستقیم پسماندهای آلی نیز به عنوان روشی کارآمد برای تولید هم‌زمان برق و حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد و در

غذایی یا زمین‌های حاصلخیز ایجاد کنند [۳۶]. این منابع قادرند در مقایسه با زیست‌توده‌های زمینی، در واحد سطح تا ۱۰ برابر بیشتر روغن تولید کنند که برای تولید بیودیزل بسیار مناسب است. بر اساس برآوردها، عملکرد روغن جلبک‌ها بین ۲۰,۰۰۰ تا ۸۰,۰۰۰ لیتر در هر هکتار در سال تخمین زده می‌شود که این مقدار ۷ تا ۳۱ برابر بیشتر از بهترین محصولات روغنی زمینی مانند روغن پالم است [۳۷]. میکروآلگ‌ها به دلیل محتوای بالای لیپید (۲۰ تا ۵۰ درصد وزن خشک در گونه‌هایی مانند کلرلا، نانوکلوپسیس و دونالیا) و توانایی تجمع مقادیر قابل توجهی از اسیدهای چرب، به عنوان منبعی ایده‌آل برای تولید بیودیزل و سایر سوخت‌های زیستی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳۸]. ماکروآلگ‌ها یا جلبک‌های دریایی نیز به دلیل محتوای بالای کربوهیدرات (۲۵ تا ۶۰ درصد وزن خشک) و عدم وجود لیگنین، گزینه‌های مناسبی برای تبدیل بیوشیمیایی به اتانول، بوتانول، هیدروژن و بیوگاز هستند [۳۹]. گزارش‌های سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد نشان می‌دهد که تولید جهانی زیست‌توده ماکروآلگ‌ها در سال ۲۰۱۶ به حدود ۳۰ میلیون تن با ارزش ۱۱.۶ میلیارد دلار رسیده است که چین با تولید ۱۴ میلیون تن در رتبه نخست قرار دارد [۴۰]. با این حال، چالش‌های فنی متعددی از جمله هزینه‌های بالای کشت و برداشت، نیاز به سیستم‌های خاص پرورش مانند فتوبیوراکتورها، و فرآیندهای پرهزینه جداسازی زیست‌توده از محیط کشت، توسعه تجاری این فناوری را محدود کرده است. برداشت میکروآلگ‌ها به دلیل اندازه کوچک سلول‌ها، چگالی مشابه با محیط کشت و بار منفی سطحی، یکی از پرهزینه‌ترین مراحل محسوب می‌شود و معمولاً ۲۰ تا ۳۰ درصد از کل هزینه‌های تولید را به خود اختصاص می‌دهد [۴۱]. تحقیقات نشان داده است که هزینه انرژی برای روش‌های مختلف برداشت مانند سانتریفیوژ، انعقاد، شناورسازی و فیلتراسیون بین ۰.۰۱۵ تا ۸ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب متغیر است که انتخاب روش مناسب را به یک تصمیم اقتصادی چالش‌برانگیز تبدیل می‌کند [۴۱]. همچنین، تغییرات فصلی در ترکیب شیمیایی جلبک‌ها، حساسیت گونه‌های مختلف

توجهی از سرمایه گذاری اولیه را به خود اختصاص می دهد و نیازمند حمایت های دولتی و مشوق های مالیاتی است [۵۱].

۴-۴- زیست توده های مخصوص

زیست توده مخصوص شامل دانه های روغنی مانند کلزا، سویا، نخل روغنی، آفتابگردان و کرچک به عنوان منابع اصلی تولید سوخت های زیستی نسل اول شناخته می شوند که عمدتاً برای تولید بیودیزل و بیواتانول مورد استفاده قرار می گیرند [۵۲]. این منابع به دلیل محتوای بالای لیپیدها (۳۰ تا ۵۰ درصد وزن خشک) و قندهای قابل تخمیر، بازده تبدیل مناسبی داشته و فناوری تولید سوخت از آن ها به سطح تجاری رسیده است [۵۳]. روغن پالم با تولید سالانه بیش از ۷۰ میلیون تن، کلزا با تولید حدود ۲۵ میلیون تن و سویا با تولید بیش از ۵۰ میلیون تن، از جمله مهم ترین منابع روغنی مورد استفاده برای تولید بیودیزل در جهان محسوب می شوند [۵۴]. با این حال، این منابع به دلیل رقابت مستقیم با تولیدات غذایی و تأمین نیازهای مصرفی انسان و دام، با چالش های اخلاقی و اقتصادی جدی مواجه هستند [۵۵]. بحران جهانی غذا در سال های اخیر نشان داده است که اختصاص زمین های حاصلخیز کشاورزی به تولید سوخت های زیستی نسل اول می تواند به افزایش قیمت مواد غذایی، کمبود منابع غذایی و تشدید ناامنی غذایی منجر شود [۵۶]. همچنین، تغییر کاربری اراضی برای کشت محصولات انرژی زا، به ویژه در مناطق جنگلی و مراتع، یکی از نگرانی های اصلی زیست محیطی محسوب می شود [۵۷]. پژوهش های اخیر بر بهینه سازی فرآیندهای استخراج روغن با استفاده از روش های نوین مانند استخراج با سیال فوق بحرانی، امواج فراصوت و میدان های الکتریکی پالسی متمرکز شده است [۵۸]. همچنین، توسعه گونه های غیرخوراکی با عملکرد بالای روغن که در زمین های حاشیه ای و کم بازده قابل کشت هستند، مانند کرچک و سالیکورنیا یکی از راهکارهای کاهش تنش بین امنیت غذایی و تولید انرژی محسوب می شود [۵۹]. یکا با تولید ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم دانه در هکتار و محتوای روغن ۳۰ تا ۴۰

بسیاری از کشورهای توسعه یافته، نیروگاه های تولید انرژی از پسماند با ظرفیت های بالا به بهره برداری رسیده اند [۴۷]. مزیت اصلی استفاده از این پسماندها، حل دو مشکل همزمان مدیریت پسماند و تولید انرژی پایدار است [۴۸]. استفاده از پسماندهای شهری به عنوان منبع انرژی، علاوه بر کاهش حجم زباله های دفن شده (که می تواند تا ۹۰ درصد کاهش حجم در فرآیندهای احتراقی ایجاد کند)، به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از دفن زباله و تولید انرژی پاک کمک می کند [۴۶]. همچنین، با توجه به افزایش روزافزون تولید پسماندهای شهری در کشورهای در حال توسعه و معضل مدیریت آن ها، رویکرد تبدیل پسماند به انرژی، به عنوان یک راهبرد کلیدی در سیاست های مدیریت پایدار پسماند و اقتصاد چرخشی مورد توجه قرار گرفته است [۴۸]. این رویکرد ضمن کاهش نیاز به زمین های دفن زباله، به کاهش آلودگی آب های زیرزمینی و خاک نیز کمک می کند و منبع جدیدی از درآمد و اشتغال را ایجاد می نماید [۴۸]. با این حال، چالش هایی مانند ناهمگونی ترکیبات (وجود ترکیبات مختلف آلی و معدنی با اندازه ها و خواص متفاوت)، رطوبت بالا (اغلب بیش از ۶۰ درصد) و وجود مواد آلاینده (مانند فلزات سنگین، پلاستیک ها، شیشه، ترکیبات کلردار، نیتروژن و گوگرد) که می توانند به تجهیزات آسیب رسانده و کیفیت محصول نهایی را تحت تأثیر قرار دهند، بهینه سازی فرآیندهای تبدیل را با مشکل مواجه کرده است [۴۹]. علاوه بر این، تغییرات فصلی در ترکیب پسماندها، هزینه های بالای جمع آوری و جداسازی در مبدأ و نیاز به سیستم های پیش تصفیه پیشرفته برای حذف آلاینده ها و تنظیم رطوبت، از جمله موانع عملیاتی و اقتصادی جدی در مسیر توسعه صنعتی این فناوری ها محسوب می شوند [۵۰]. به عنوان مثال، وجود نیتروژن و گوگرد در پسماندهای آلی می تواند منجر به تولید آمونیاک و سولفید هیدروژن در فرآیند هضم بی هوازی شود که برای میکروارگانیسم ها سمی بوده و نیاز به حذف آن ها قبل از استفاده از بیوگاز را الزامی می سازد [۵۰]. همچنین، هزینه های جداسازی پسماندهای قابل تبدیل در مبدأ و راه اندازی سیستم های تفکیک مکانیزه، بخش قابل

	تغییر کاربری	سالانه بالا (پالم
	اراضی، مصرف	> ۷۰ میلیون تن)
	بالای آب و انرژی	

۵- فناوری های تبدیل زیست توده به انرژی

۵-۱- تبدیل ترموشیمیایی

فناوری های تبدیل زیست توده به انرژی به چهار دسته اصلی ترموشیمیایی (شامل احتراق مستقیم، گازی سازی، پیرولیز و تورفکاسیون) تقسیم می شوند که هر یک با مکانیسم های متفاوت و در شرایط عملیاتی خاص، مواد آلی را به اشکال مختلف انرژی از جمله برق، حرارت، سوخت های مایع و گازی تبدیل می کنند. انتخاب روش مناسب تبدیل به عوامل متعددی مانند نوع زیست توده، رطوبت، ترکیب شیمیایی، میزان تولید و کاربرد نهایی انرژی بستگی دارد. خلاصه ویژگی های اصلی این چهار فناوری در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

۵-۱-۱- احتراق مستقیم

احتراق مستقیم زیست توده یک روش سنتی و گسترده برای تبدیل مواد آلی به انرژی حرارتی و الکتریکی است که قدمت آن به هزاران سال پیش بازمی گردد و امروزه نیز به عنوان یکی از رایج ترین روش های تبدیل زیست توده در سطح جهان مورد استفاده قرار می گیرد [۶۱]. در این فرآیند، مواد زیست توده جامد مانند ضایعات چوب، خاکاره، بقایای کشاورزی (کاه و کلش، باگاس نیشکر)، پسماندهای آلی شهری و زیست توده های انرژی زا در کوره های مخصوص با دمای بالا (معمولاً بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد) سوزانده می شوند [۶۲]. حرارت تولید شده از این احتراق برای تولید بخار فوق داغ با فشار بالا و به حرکت درآوردن توربین های بخار جهت تولید برق استفاده می شود. همچنین، در سیستم های تولید هم زمان گرما و برق (CHP)، از حرارت باقیمانده برای مصارف گرمایشی و صنعتی نیز بهره برداری می شود که بازده کلی سیستم را تا بیش از ۸۰ درصد افزایش می دهد [۶۳]. این روش به دلیل سادگی فناوری، هزینه سرمایه گذاری نسبتاً پایین (در

درصد، به عنوان یکی از امیدوار کننده ترین گونه های غیر خوراکی برای تولید بیودیزل در مناطق گرمسیری معرفی شده است [۶۰].

جدول شماره ۱: منابع زیست توده و انواع آن

زیست توده	چالش های اصلی	مزایای اصلی	منابع اصلی
لیگنوسلولزی	هزینه بالای جمع آوری (-۱۳۰ ۲۰۰ دلار/تن)، چگالی پایین انرژی، رطوبت بالا، تغییرات فصلی	فراوانی بالا (۹۹۸ میلیون تن در سال)، محتوای انرژی بالا، تجدید پذیری	کاه گندم، کاه برنج، باگاس نیشکر، بقایای ذرت، ضایعات چوب
دریایی	هزینه بالای کشت و برداشت، برداشت پرهزینه (۳۰-۲۰٪ هزینه ها)، تغییرات فصلی، نیاز به فتوبیوراکتور	رشد سریع، عدم نیاز به زمین کشاورزی و آب شیرین، جذب بالای CO ₂ ، عملکرد روغن بالا (۸۰-۲۰ هزار لیتر/هکتار)	کلرلا، نانوکروپسیس، دونالیا، جلبک های دریایی
پسماندهای آلی شهری و صنعتی	ناهمگونی ترکیبات، رطوبت بالا، وجود آلاینده ها (فلزات سنگین، پلاستیک)، هزینه های جداسازی	حل هم زمان دو مشکل (مدیریت پسماند و تولید انرژی)، کاهش حجم دفن (تا ۹۰٪)، تولید انرژی پاک	زباله های غذایی، فاضلاب شهری، لجن فاضلاب، تفاله چغندر قند، ملاس
زیست توده مخصوص	رقابت با تولیدات غذایی، افزایش قیمت مواد غذایی،	بازده تبدیل مناسب، فناوری تجاری، تولید	کلزا، سویا، نخل روغنی، آفتابگردان، کرچک

قیرمانند که می‌توانند به تجهیزات آسیب وارد کنند)، نیاز به اکسیژن خالص یا هوا با خلوص بالا برای دستیابی به گاز سنتز با کیفیت مطلوب، هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری و تولید آلاینده‌هایی نظیر گوگرد و نیتروژن، همچنان موانعی بر سر راه توسعه صنعتی گسترده این فناوری محسوب می‌شوند [۶۹].

۵-۱-۳- پیرولیز

پیرولیز زیست‌توده یک فرآیند ترموشیمیایی است که در آن مواد آلی در غیاب کامل اکسیژن (شرایط بی‌هوازی) و دمای ۳۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌شوند [۷۰]. برخلاف احتراق مستقیم و گازی‌سازی که در حضور اکسیژن انجام می‌شوند، پیرولیز در شرایط بدون اکسیژن صورت می‌گیرد و به همین دلیل محصولات با ارزشی تولید می‌کند که قابلیت ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و کاربردهای متنوعی دارند. این فرآیند منجر به تولید سه محصول اصلی شامل بیوچار (جامد با ۲۵ تا ۴۰ درصد وزنی)، بیو-روغن (مایع با ۴۰ تا ۶۰ درصد وزنی) و گازهای قابل احتراق (۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی) می‌گردد که هر کدام کاربردهای صنعتی و کشاورزی ارزشمندی دارند [۷۱]. بیوچار تولید شده در این فرآیند به عنوان اصلاح‌کننده خاک، بهبود دهنده حاصلخیزی خاک، ذخیره‌کننده کربن و در صنایع فولادسازی و تولید کربن فعال کاربرد دارد [۷۲]. بیو-روغن به عنوان سوخت مایع قابل استفاده در دیگ‌های بخار، تولید مواد شیمیایی با ارزش و پس از فرآوری به عنوان سوخت حمل‌ونقل (بیودیزل و بیواتانول) کاربرد دارد [۷۳]. گازهای قابل احتراق شامل هیدروژن، متان، مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن نیز به عنوان سوخت گازی برای تولید برق و حرارت استفاده می‌شوند [۷۱]. سرعت گرمایش در پیرولیز نقش کلیدی در توزیع محصولات نهایی ایفا می‌کند؛ به طوری که پیرولیز سریع (با سرعت گرمایش بالا و زمان ماند کوتاه) باعث افزایش تولید بیو-روغن تا بیش از ۷۰ درصد می‌شود، در حالی که پیرولیز آهسته (با سرعت گرمایش پایین و زمان ماند طولانی) به تولید بیشتر بیوچار (تا ۴۰ درصد) منجر می‌گردد [۷۴]. با این حال، چالش‌هایی مانند خورنده بودن بیو-روغن، نیاز به فرآوری بیشتر،

مقایسه با سایر فناوری‌های تبدیل مانند گازی‌سازی و پیرولیز) و بلوغ فنی بالا، در بسیاری از نیروگاه‌های زیست‌توده در سراسر جهان به کار گرفته می‌شود [۶۴]. با این حال، احتراق مستقیم با چالش‌هایی مانند بازده پایین (معمولاً ۲۰ تا ۳۵ درصد در تولید برق)، انتشار آلاینده‌های هوا (ذرات معلق، اکسیدهای نیتروژن و گوگرد، ترکیبات آلی فرار) و تولید خاکستر که نیاز به مدیریت و دفع مناسب دارد، مواجه است [۶۵]. برای کاهش آلاینده‌گی، استفاده از سیستم‌های تصفیه دودکش مانند فیلترهای کیسه‌ای، رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیک و جاذب‌های گوگرد ضروری است.

۵-۱-۲- گازی‌سازی

گازی‌سازی زیست‌توده یک فرآیند ترموشیمیایی پیشرفته است که در آن مواد آلی در حضور محدود اکسیژن (معادل ۲۰ تا ۴۰ درصد هوای مورد نیاز برای احتراق کامل) و دمای بالا بین ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، به گاز سنتز یا سینگاز (ترکیبی از گازهای قابل احتراق شامل هیدروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، متان و مقادیر جزئی سایر گازها) تبدیل می‌شوند [۶۶]. این روش برخلاف احتراق مستقیم که عمدتاً انرژی حرارتی تولید می‌کند، امکان تولید گاز غنی از هیدروژن و مونوکسید کربن را با بازدهی بالاتر (تا ۷۵ درصد) فراهم می‌آورد و همچنین با تولید گاز سنتز، قابلیت کاربرد در سیستم‌های مختلف انرژی را داراست [۶۷]. گاز سنتز تولید شده در این فرآیند کاربردهای متنوعی دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به تولید برق در توربین‌های گازی یا موتورهای احتراق داخلی، تولید سوخت‌های مایع (نظیر دیزل، بنزین و سوخت جت) از طریق فرآیند فیشر-تروپش، تولید متانول و آمونیاک، تولید هیدروژن خالص (از طریق واکنش شیفت و غشاهای هیدروژنی) و استفاده به عنوان خوراک برای صنایع شیمیایی اشاره کرد [۶۸]. این انعطاف‌پذیری بالا در محصولات نهایی و تولید هم‌زمان چندین محصول با ارزش، گازی‌سازی را به یکی از امیدوارکننده‌ترین فناوری‌های تبدیل زیست‌توده برای گذار به اقتصاد کم‌کربن تبدیل کرده است. با این حال، چالش‌هایی مانند تشکیل تار (قطرات

می‌تواند ۱۰-۱۵ درصد از انرژی اولیه زیست‌توده را مصرف کند)، اتلاف بخشی از جرم (حدود ۲۰-۳۰ درصد) و انرژی (حدود ۱۰-۱۵ درصد) در طی فرآیند، نیاز به کنترل دقیق دما و زمان و همچنین هزینه‌های سرمایه‌گذاری تجهیزات مواجهه است [۸۲]. با وجود این چالش‌ها، تورفکاسیون به عنوان یکی از روش‌های کلیدی برای بهبود کیفیت زیست‌توده خام و تسهیل استفاده از آن در صنایع انرژی، مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته است [۸۳].

جدول شماره ۲: انواع تبدیل ترموشیمیایی

فناوری	چالش‌های اصلی	مزایای اصلی
احتراق مستقیم	انتشار آلاینده‌ها، تولید خاکستر، بازده پایین در تولید برق	سادگی فناوری، هزینه سرمایه‌گذاری پایین، بلوغ فنی بالا
گازی‌سازی	تشکیل تار، نیاز به اکسیژن خالص، هزینه سرمایه‌گذاری بالا	تولید گاز غنی از هیدروژن، انعطاف‌پذیری بالا، کاربردهای متنوع
پیرولیز	خوردگی بیو-روغن، نیاز به فراوری بیشتر، هزینه سرمایه‌گذاری بالا	تولید محصولات با ارزش، قابلیت ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل، کاهش آلاینده‌گی
تورفکاسیون (تبدیل به زغال زیستی)	اتلاف جرم (۲۰-۳۰٪)، مصرف انرژی (۱۵-۱۰٪)، کنترل دقیق دما	بهبود ویژگی‌های حمل‌ونقل، کاهش رطوبت (تا ۵٪)، آب‌گریزی، آسیاب‌پذیری بالا

۵-۲- تبدیل بیوشیمیایی

فناوری‌های تبدیل بیوشیمیایی شامل دو دسته اصلی هضم بی‌هوازی (تولید بیوگاز) و تخمیر (تولید اتانول) هستند که در آنها مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها در شرایط کنترل‌شده به محصولات با ارزش انرژی تبدیل می‌شوند. این روش‌ها به‌ویژه برای پسماندهای مرطوب با رطوبت بالا مناسب بوده و نقش مهمی در

بازده نسبتاً پایین و هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا، از جمله موانع توسعه صنعتی این فناوری محسوب می‌شوند [۷۵].

۵-۱-۴- تبدیل به زغال زیستی

تبدیل به زغال زیستی یا تورفکاسیون یک فرآیند حرارتی ملایم در دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است که زیست‌توده را در شرایط بی‌هوازی یا با حضور محدود اکسیژن، به ماده‌ای با ارزش حرارتی بالا و مشابه زغال‌سنگ تبدیل می‌کند [۷۶]. در این فرآیند، مواد آلی تحت عملیات حرارتی ملایم قرار گرفته و بخشی از ترکیبات فرار خود (عمدتاً رطوبت، ترکیبات آلی سبک و برخی از اجزای لیگنین) را از دست می‌دهند و به ماده‌ای آب‌گریز، ترد و با چگالی انرژی بالا (افزایش تا ۳۰-۵۰ درصد نسبت به زیست‌توده خام) تبدیل می‌شوند [۷۷]. محصول نهایی که به "زغال زیستی" یا "بیوچار تورفیه" معروف است، دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بهبود یافته مانند افزایش ارزش حرارتی (تا ۲۳-۲۸ مگاژول بر کیلوگرم)، کاهش نسبت اکسیژن به کربن، کاهش رطوبت (کمتر از ۵ درصد) و مقاومت بالاتر در برابر پوسیدگی و تخریب زیستی است [۸۷]. این روش به‌ویژه برای بهبود ویژگی‌های حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی زیست‌توده خام کاربرد دارد [۷۹]. زیست‌توده خام به دلیل چگالی پایین (۴۰-۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، رطوبت بالا (۳۰-۶۰ درصد) و ماهیت آب‌دوست، هزینه‌های حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی بالایی دارد. با اعمال فرآیند تورفکاسیون، چگالی انرژی زیست‌توده افزایش یافته و هزینه‌های حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابد [۸۰]. همچنین، زغال زیستی تولیدی قابلیت آسیاب‌پذیری بالاتری دارد و می‌تواند به‌صورت پودر با توزیع اندازه یکنواخت درآید که آن را برای استفاده در نیروگاه‌های زغال‌سنگ موجود (بدون نیاز به تغییرات اساسی در تجهیزات) مناسب می‌سازد [۸۱]. مزیت‌های کلیدی تورفکاسیون شامل بهبود ویژگی‌های سوخت، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، امکان استفاده در نیروگاه‌های موجود و کاهش رطوبت و تخریب زیستی است، با این حال، این فرآیند با چالش‌هایی مانند نیاز به انرژی حرارتی برای انجام فرآیند (که

مدیریت پایدار پسماند و تولید انرژی پاک ایفا می کنند. خلاصه ویژگی های این دو فناوری در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

۵-۲-۱- هضم بی هوازی برای تولید بیوگاز

هضم بی هوازی یک فرآیند بیوشیمیایی است که در آن مواد آلی توسط میکروارگانیسم های خاص (باکتری های بی هوازی) در غیاب کامل اکسیژن تجزیه شده و به بیوگاز (عمدتاً متان با ۵۰-۷۰ درصد و دی اکسید کربن با ۳۰-۵۰ درصد) و کود آلی پایدار (هضم شده یا دیجستیت) تبدیل می شوند [۸۴]. این فرآیند در چهار مرحله اصلی هیدرولیز، اسیدزایی، استات زایی و متان زایی انجام می شود که هر مرحله توسط گروه های خاصی از میکروارگانیسم ها انجام شده و محصول مرحله قبل به عنوان خوراک مرحله بعد مورد استفاده قرار می گیرد [۸۵]. فناوری هضم بی هوازی به ویژه برای پسماندهای مرطوب با رطوبت بیش از ۶۰ درصد مانند فضولات دامی (گاو، مرغی و خوک)، فاضلاب های شهری و صنعتی، ضایعات غذایی و پسماندهای کشاورزی تر مناسب بوده و علاوه بر تولید انرژی پاک، نقش مهمی در مدیریت پایدار پسماند و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از دفن زباله ایفا می کند [۸۶]. مزیت های اصلی این فناوری شامل تولید انرژی تجدیدپذیر (بیوگاز قابل استفاده برای تولید برق، حرارت و سوخت خودروها)، تولید کود آلی غنی از نیتروژن، فسفر و پتاسیم (به عنوان جایگزین کودهای شیمیایی)، کاهش حجم پسماند تا ۴۰-۶۰ درصد، کاهش بوی نامطبوع و کاهش پاتوژن ها، و کاهش انتشار متان از محل های دفن زباله است [۸۷]. با این حال، این فرآیند با چالش هایی مانند حساسیت بالا به شرایط عملیاتی (دما، pH، نسبت کربن به نیتروژن)، زمان ماند طولانی (۱۵-۳۰ روز)، نیاز به پیش تصفیه برای برخی مواد اولیه، تولید گازهای آلاینده مانند سولفید هیدروژن و آمونیاک (که نیاز به تصفیه بیوگاز دارند)، و عملکرد پایین در شرایط سرد مواجه است [۸۸]. پژوهش های اخیر بر توسعه سیستم های هضم بی هوازی دو مرحله ای، استفاده از پیش تصفیه های مکانیکی، حرارتی و شیمیایی، و بهینه سازی

جمعیت میکروبی برای افزایش بازده تولید متان متمرکز شده است [۸۹].

۵-۲-۲- تخمیر برای تولید بیواتانول

تخمیر یک فرآیند بیوشیمیایی است که در آن قندهای ساده و قابل تخمیر موجود در زیست توده (مانند گلوکز، فروکتوز و ساکارز) توسط میکروارگانیسم هایی مانند مخمر (عمدتاً گونه های ساکارومایسس سرویزیه) و برخی باکتری ها در شرایط بی هوازی به اتانول و دی اکسید کربن تبدیل می شوند [۹۰]. این فرآیند به عنوان یکی از قدیمی ترین و شناخته شده ترین روش های تولید سوخت های زیستی، نقش مهمی در صنعت بیواترزی ایفا می کند. در طی این فرآیند، هر مولکول گلوکز تحت تأثیر آنزیم های مخمر به دو مولکول اتانول و دو مولکول دی اکسید کربن تبدیل می شود که بازده نظری تبدیل قند به اتانول حدود ۵۱ درصد وزنی است [۹۱]. با این حال، بازده عملی معمولاً بین ۴۵ تا ۴۸ درصد است که به عواملی مانند نوع مخمر، شرایط محیطی (دما، pH، غلظت قند (و مهار اتانول وابسته است [۹۲]). این روش عمدتاً برای مواد اولیه غنی از قند و نشاسته مانند نیشکر، چغندر قند، ذرت، گندم، ملاس، سورگوم شیرین و سیب زمینی کاربرد دارد و محصول نهایی (اتانول) به عنوان سوخت زیستی یا افزودنی بنزین (با نسبت های مختلف مانند E10، E15 و E85) در صنعت حمل و نقل استفاده می شود [۹۳]. اتانول زیستی به دلیل عدد اکتان بالا (۱۰۰-۱۱۳)، بهبود احتراق و کاهش انتشار آلاینده ها (مانند مونوکسید کربن و هیدروکربن های نسوخته) به عنوان یک افزودنی ارزشمند به بنزین شناخته می شود [۹۴]. با این حال، تولید اتانول از منابع غذایی با چالش های جدی از جمله رقابت با امنیت غذایی، مصرف بالای آب و انرژی، تغییر کاربری اراضی، تولید CO₂ در طی تخمیر (که بخشی از مزایای کاهش کربن را خنثی می کند) و هزینه های بالای تصفیه و آب زدایی اتانول مواجه است [۹۵]. به همین دلیل، پژوهش های اخیر بر توسعه سوخت های زیستی نسل دوم (از زیست توده لیگنوسلولزی) و سوم (از جلبک ها) متمرکز شده است که از منابع غیر خوراکی استفاده می کنند [۹۶].

جدول شماره ۳: انواع تبدیل بیوشیمیایی

فناوری	چالش‌های اصلی	مزایای اصلی	بازده انرژی
هضم بی‌هوازی	حساسیت بالا به شرایط عملیاتی (دما، pH، نسبت C/N)، زمان ماند طولانی (۳۰-۱۵ روز)، نیاز به پیش‌تصفیه، تولید گازهای آلاینده (سولفید هیدروژن، آمونیاک)، عملکرد پایین در شرایط سرد	تولید انرژی تجدیدپذیر (بیوگاز)، تولید کود آلی (غنی (نیترژن، فسفر، پتاسیم)، کاهش حجم پسماند (۶۰-۴۰٪)، کاهش بوی نامطبوع و پاتوژن‌ها	۵۰-۱۵۰ مترمکعب بیوگاز/تن ماده خشک
تخمیر	رقابت با امنیت غذایی، مصرف بالای آب و انرژی، تولید CO ₂ در طی تخمیر، هزینه‌های بالای تصفیه و آب‌زدایی	عدد اکتان بالا (۱۰۰-)، بهبود احتراق، کاهش انتشار آلاینده‌ها (CO) و (HC)، فناوری شناخته‌شده و تجاری	۴۵-۴۸٪ (بازده عملی)، ۵۱٪ (بازده نظری)

۵-۳- تبدیل شیمیایی / مکانیکی

فرآیندهای تبدیل شیمیایی و مکانیکی به عنوان دو رویکرد مکمل در زنجیره ارزش زیست‌توده، نقش مهمی در تولید سوخت‌های مایع با ارزش افزوده بالا و بهبود ویژگی‌های فیزیکی مواد خام ایفا می‌کنند. در رویکرد شیمیایی، روغن‌های استخراج‌شده از دانه‌های روغنی از طریق واکنش ترانس‌استریفیکاسیون به بیودیزل تبدیل می‌شوند، در حالی که در رویکرد مکانیکی، زیست‌توده لیگنوسلولزی با چگالی پایین از طریق فرآیند تراکم‌سازی به گندوله‌ها یا قرص‌های فشرده با چگالی انرژی بالا تبدیل می‌گردد. خلاصه ویژگی‌های اصلی این دو فناوری در جدول شماره ۵ ارائه شده است.

۵-۳-۱- استخراج روغن‌های زیستی و تبدیل به بیودیزل

تولید بیودیزل عمدتاً از دانه‌های روغنی مانند کلزا، سویا و نخل روغنی انجام می‌شود که از طریق فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون با متانول در حضور کاتالیست‌های قلیایی (مانند هیدروکسید پتاسیم یا سدیم) به بیودیزل و گلیسرین تبدیل می‌شوند [۹۷]. در این واکنش، تری‌گلیسیریدهای موجود در روغن با الکل (معمولاً متانول) واکنش داده و استرهای متیل اسید چرب را به عنوان محصول اصلی تولید می‌کنند که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مشابه سوخت دیزل فسیلی دارد [۹۸]. شرایط پهنه واکنش شامل نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱ تا ۹:۱، دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، زمان واکنش ۶۰-۱۲۰ دقیقه و غلظت کاتالیست ۱ تا ۲ درصد وزنی است که تحت این شرایط بازده تبدیل می‌تواند تا ۹۷ درصد افزایش یابد [۹۹]. بیودیزل تولید شده دارای عدد ستان بالا (۵۰-۶۰)، روان‌کنندگی مطلوب و قابلیت تجزیه‌پذیری زیستی است که آن را به جایگزینی مناسب برای سوخت‌های دیزل فسیلی تبدیل کرده است، این روش به دلیل بازده بالا، سادگی عملیاتی، صرفه‌اقتصادی در مقیاس صنعتی و امکان استفاده از زیرساخت‌های موجود پالایشگاهی، یکی از متداول‌ترین روش‌های تولید سوخت زیستی در جهان محسوب می‌شود [۱۰۰]. با این حال، چالش‌هایی مانند رقابت با منابع غذایی، هزینه‌های بالای مواد اولیه، مصرف قابل توجه آب و انرژی و تولید گلیسرین به عنوان محصول جانبی (حدود ۱۰ درصد وزنی)، پژوهشگران را به سمت توسعه کاتالیست‌های ناهمگن قابل بازیافت و استفاده از روغن‌های غیرخوراکی و پسماندهای روغنی سوق داده است که می‌تواند پایداری این صنعت را بهبود بخشد [۱۰۱].

۵-۳-۲- فشرده سازی زیست توده برای تولید پلت‌های سوختی

تراکم‌سازی یک فرآیند مکانیکی است که در آن مواد لیگنوسلولزی با چگالی پایین (مانند خاکاره، کاه و کلش، باگاس نیشکر و ضایعات کشاورزی) تحت فشار و حرارت به شکل‌های متراکم و یکنواخت مانند گندوله یا قرص‌های فشرده درمی‌آیند [۱۰۲]. این

فناوری به عنوان یکی از مؤثرترین روش های شکل دهی زیست توده شناخته می شود که مشکل چگالی توده پایین و قابلیت جریان پذیری ضعیف زیست توده خام را برطرف می سازد. در این فرآیند، مواد اولیه ابتدا خشک و آسیاب شده و سپس با اعمال فشار بالا (معمولاً از طریق قالب ریزی، پرس پیستونی یا پرس غلتکی) به محصول نهایی تبدیل می شوند که پس از خنک سازی و غربالگری بسته بندی می گردد [۱۰۳]. حرارت اعمالی در طی فرآیند (که می تواند تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد نیز برسد) باعث نرم شدن لیگنین موجود در ساختار زیست توده شده و به عنوان یک چسب طبیعی عمل می کند که ذرات را به یکدیگر متصل می سازد و استحکام محصول نهایی را افزایش می دهد. پارامترهای مهم در فرآیند تولید شامل فشار، دما، زمان ماند در پرس و شکل قرص های فشرده هستند که هر یک تأثیر مستقیمی بر کیفیت محصول نهایی دارند. ترکیب شیمیایی زیست توده تأثیر قابل توجهی بر فرآیند تراکم سازی، زمان مورد نیاز و کیفیت نهایی گندوله دارد؛ به طوری که سلولز، همی سلولز و لیگنین دیواره سلولی به عنوان پل های جامد و عصاره ها، چربی ها و پروتئین ها به عنوان چسب ها و روان کننده ها عمل می کنند. مصرف انرژی در مرحله تراکم به مراتب بیشتر از مرحله قالب ریزی است و مرحله نمایی بیش از ۹۰ درصد از کل انرژی را مصرف می کند، در حالی که بازده تبدیل انرژی بسته به نوع ماده اولیه و فشار اعمالی بین ۶۲ تا ۹۵ درصد متغیر است [۱۰۴]. این فناوری باعث افزایش قابل توجه چگالی توده (تا ۶ تا ۱۰ برابر) و بهبود ویژگی های حمل و نقل و ذخیره سازی زیست توده می شود. گندوله ها و قرص های فشرده تولیدی دارای رطوبت کمتر (کمتر از ۱۰ درصد)، ارزش حرارتی بالاتر (تا ۱۸-۲۰ مگاژول بر کیلوگرم)، اندازه و شکل یکنواخت و قابلیت جریان پذیری مشابه غلات هستند که امکان تغذیه خودکار در بویلرها و نیروگاه ها را فراهم می آورد. تراکم سازی همچنین باعث کاهش قابل توجه هزینه های حمل و نقل و ذخیره سازی شده و امکان استفاده از زیست توده را در ترکیب انرژی با زغال سنگ یا به عنوان جایگزین مستقیم آن فراهم می سازد. با این حال، چالش های

این فناوری شامل مصرف انرژی بالا (حدود ۴۸-۷۵ کیلووات ساعت به ازای هر تن محصول نهایی)، سایش و استهلاک قالب ها، نیاز به کنترل دقیق رطوبت (بهینه ۱۰-۱۵ درصد) و هزینه های سرمایه گذاری تجهیزات می باشد [۱۰۵]. ترکیب فرآیندهای تراکم سازی با پیش تصفیه حرارتی مانند برشته سازی، به عنوان یک رویکرد نوین برای تولید سوخت های جامد با کیفیت بالا مطرح شده است که می تواند ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و حرارتی زیست توده را به طور قابل توجهی بهبود بخشد با وجود این چالش ها، تراکم سازی به عنوان یکی از کلیدی ترین روش های پیش فرآوری زیست توده، نقش مهمی در تسهیل استفاده صنعتی از این منبع تجدید پذیر ایفا می کند [۱۰۶].

جدول شماره ۴: انواع تبدیل شیمیایی و مکانیکی

فناوری	چالش های اصلی	مزایای اصلی	دسته بندی
ترانس استریفیکاسیون	رقابت با منابع غذایی، هزینه بالای مواد اولیه، مصرف بالای آب و انرژی، تولید گلیسرین (حدود ۱۰٪ وزنی)	بازده بالا (تا ۹۷٪)، عدد ستان بالا (۵۰-۶۰)، روان کنندگی مطلوب، تجزیه پذیری زیستی، استفاده از زیرساخت های موجود پالایشگاهی	شیمیایی
تراکم سازی (پلت/بریکت)	مصرف انرژی بالا (۴۸-۷۵ کیلووات ساعت/تن)، سایش و استهلاک قالب ها، نیاز به کنترل دقیق رطوبت (بهینه ۱۰-۱۵٪)، هزینه های سرمایه گذاری تجهیزات	افزایش چگالی توده (۱۰-۶ برابر)، کاهش هزینه حمل و نقل و ذخیره سازی، ارزش حرارتی بالاتر (۱۸-۲۰ مگاژول بر کیلوگرم)، رطوبت کمتر (< ۱۰٪)	مکانیکی

	قابلیت تغذیه خودکار	
	در نیروگاه‌ها	

۶-چالش‌های اصلی در تبدیل زیست توده

۶-۱-چالش‌های فنی

بازده پایین در فرآیندهای تبدیل زیست‌توده مانند گازی‌سازی و تخمیر از چالش‌های اساسی فراروی توسعه صنعتی این فناوری‌ها محسوب می‌شود. در فرآیند گازی‌سازی، بازده انرژی معمولاً در محدوده ۵۰ تا ۷۰ درصد قرار دارد که بخش قابل توجهی از این کاهش بازده به تلفات حرارتی در طی واکنش‌های درون‌زاد و تشکیل محصولات جانبی نامطلوب مانند تار (قطرات قیرمانند) بازمی‌گردد [۱۰۷]. تشکیل تار در گازی‌سازی نه تنها باعث کاهش کیفیت گاز سنتز تولیدی می‌شود، بلکه موجب خوردگی تجهیزات پایین‌دست، گرفتگی لوله‌ها و ایجاد آلودگی زیست‌محیطی جدی می‌گردد که خود به عنوان یکی از موانع اصلی تجاری‌سازی فناوری‌های گازی‌سازی زیست‌توده شناخته می‌شود [۱۰۸]، علاوه بر این، تارها حاوی مقادیر قابل توجهی انرژی هستند و عدم تبدیل آن‌ها به محصولات نهایی، موجب اتلاف انرژی و کاهش بازده کلی فرآیند می‌شود. در فرآیند تخمیر نیز بازده تبدیل قندهای قابل تخمیر به اتانول اغلب به ۴۰ تا ۶۰ درصد محدود می‌شود که این کاهش بازده عمدتاً ناشی از متابولیسم ناکامل مخمرها، تشکیل محصولات فرعی جانبی، حضور باکتری‌های آلاینده که با مخمرها برای منابع رقابت می‌کنند و همچنین سمیت ترکیبات بازدارنده موجود در هیدرولیزات‌های لیگنوسلولزی است [۱۰۹]. برآوردها نشان می‌دهد که حضور باکتری‌های آلاینده به تنهایی می‌تواند باعث کاهش حدود ۳ درصدی بازده اتانول شود که در مقیاس صنعتی کشورهایی مانند برزیل، معادل کاهش بیش از ۹۶۰ میلیون لیتر تولید در سال است [۱۱۰].

مشکلات پیش‌تصفیه مواد لیگنوسلولزی به عنوان یکی از پیچیده‌ترین مراحل در فرآیند تولید سوخت‌های زیستی محسوب می‌شود و دلیل اصلی شکست برخی طرح‌های صنعتی در این حوزه

بوده است [۱۱۱]، ساختار پیچیده و مقاوم زیست‌توده لیگنوسلولزی شامل سلولز، همی‌سلولز و لیگنین، دسترسی آنزیم‌ها و میکروارگانیسم‌ها به پلیمرهای قندی را با مانع جدی مواجه می‌سازد و برای شکستن این ساختار، نیاز به روش‌های پیش‌تصفیه کارآمد و مقرون‌به‌صرفه است. با این حال، بسیاری از روش‌های پیش‌تصفیه موجود یا دارای محدودیت‌های فناورانه و اقتصادی هستند یا نگرانی‌های زیست‌محیطی قابل توجهی را به همراه دارند [۱۱۲]. همچنین، نیاز به کاتالیست‌های کارآمد و مقرون‌به‌صرفه از دیگر چالش‌های اصلی در فرآیندهای تبدیل زیست‌توده محسوب می‌شود. بسیاری از کاتالیست‌های موجود یا هزینه تولید بالایی دارند یا پس از چندبار استفاده، فعالیت خود را در اثر عواملی مانند رسوب کک، مسمومیت با آلاینده‌ها و تخریب ساختاری از دست می‌دهند [۱۱۳]. که این موضوع تأثیر منفی قابل توجهی بر اقتصادی بودن فرآیند دارد. به‌طور کلی، ترکیب بازده پایین فرآیندها، هزینه‌های بالای پیش‌تصفیه و نیاز به کاتالیست‌های پایدار و مقرون‌به‌صرفه، چالش‌های فنی جدی را در مسیر توسعه صنعتی و تجاری‌سازی فناوری‌های تبدیل زیست‌توده ایجاد کرده است که نیازمند پژوهش‌های گسترده و سرمایه‌گذاری هدفمند در زمینه بهبود فرآیندها و توسعه مواد جدید است [۱۱۴]. خلاصه چالش‌های اقتصادی، پیامدها و راهکارها در جدول شماره ۴ بیان شده است.

جدول شماره ۴: چالش‌های فنی

عنوان چالش	شرح چالش	راهکارهای پیشنهادی	پیامدهای اصلی
		مقاومت به مسمومیت	توجیه اقتصادی

۲-۶- چالش های اقتصادی

هزینه های بالای جمع آوری و حمل و نقل زیست توده به دلیل پراکندگی منابع در مناطق مختلف و چگالی انرژی پایین این مواد، چالشی اساسی در زنجیره تأمین محسوب می شود [۱۱۵]. زیست توده خام به دلیل چگالی توده پایین (۴۰-۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و رطوبت بالا (۳۰-۶۰ درصد)، حمل و نقل اقتصادی را با دشواری جدی مواجه می سازد. بر اساس مطالعات انجام شده، هزینه لجستیک در زنجیره تأمین زیست توده معمولاً بین ۳۰ تا ۵۰ درصد از کل هزینه های تحویل ماده اولیه را به خود اختصاص می دهد و در موارد حمل و نقل طولانی مدت بین المللی، این سهم می تواند به بیش از ۷۵ درصد نیز برسد [۱۱۶]. این عوامل منجر به افزایش هزینه های عملیاتی و کاهش رقابت پذیری اقتصادی زیست توده در مقایسه با سایر منابع انرژی می گردد [۱۱۷]. پراکندگی جغرافیایی منابع، تغییرات فصلی در دسترسی به مواد اولیه و محدودیت های ذخیره سازی از دیگر عواملی هستند که بر پیچیدگی و هزینه های زنجیره تأمین می افزایند. پژوهش های اخیر نشان داده است که تراکم سازی فیزیکی زیست توده می تواند هزینه های حمل و نقل را بین ۴۳ تا ۷۵ درصد کاهش دهد، هر چند که این فرآیندها خود مستلزم مصرف انرژی اضافی و افزایش انتشار کربن هستند. بهینه سازی لجستیک از طریق ایجاد مراکز پیش فرآوری غیرمتمرکز و استفاده از رویکردهای برنامه ریزی یکپارچه، به عنوان راهکارهایی برای کاهش هزینه های جمع آوری و حمل و نقل زیست توده مطرح شده است که می تواند تا ۳۴ درصد کاهش انتشار و تنها ۱۲.۶ درصد افزایش هزینه های کل سیستم را

عنوان چالش	شرح چالش	راهکارهای پیشنهادی	پیامدهای اصلی
بازده پایین در گازی سازی	بازده ۷۰-۵۰٪، تلفات حرارتی، تشکیل تار به تار، بهینه سازی راکتورها	توسعه کاتالیست های مقاوم به تار، بهینه سازی راکتورها	کاهش کیفیت گاز سنتز، خوردگی و گرفتگی تجهیزات، آلودگی زیست محیطی
بازده پایین در تخمیر	بازده ۶۰-۴۰٪، متابولیسم ناکامل مخمرها، آلودگی باکتریایی	مهندسی ژنتیک مخمرها، کنترل آلودگی میکروبی	کاهش تولید اتانول (تا ۳٪)، کاهش، افزایش هزینه تولید
مشکلات پیش تصفیه لیگنوسلولوزی	ساختار مقاوم سلولز، همی سلولز و لیگنین، دسترسی سخت به قندها	روش های پیش تصفیه کارآمد، حلال های نوین، روش های ترکیبی	افزایش هزینه فرآوری، کاهش بازده، شکست طرح های صنعتی
نیاز به کاتالیست های پایدار	گران قیمت بودن یا غیرفعال شدن سریع کاتالیست ها	کاتالیست های ناهمگن قابل بازیافت، بهبود	افزایش هزینه تولید، کاهش بهره وری، عدم

قیمت‌گذاری کربن و یا ترکیبی از این ابزارها باشد که هر یک اثربخشی متفاوتی در زنجیره تأمین دارند [۱۲۲]. مطالعه‌ای جامع بر روی ۱۵۶ مقاله علمی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که ابزارهای مبتنی بر قیمت، رایج‌ترین مکانیسم‌های حمایتی هستند و اغلب با رویکردهای مبتنی بر بازار ترکیب می‌شوند تا برنامه‌های حمایتی یکپارچه‌تری ایجاد کنند. قانون کاهش تورم ایالات متحده با ارائه اعتبارات مالیاتی برای تولیدکنندگان سوخت‌های پاک، نمونه‌ای از سیاست‌های حمایتی مؤثر در این حوزه محسوب می‌شود که توانسته است شکاف قیمتی بین سوخت‌های زیستی و سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد [۱۲۳]. با این حال، برخی مطالعات هشدار داده‌اند که یارانه‌های مستقیم تولید برق از زیست‌توده می‌تواند بهره‌وری کل عوامل تولید در بنگاه‌های انرژی تجدیدپذیر را کاهش دهند و به تدریج نیاز به جایگزینی این حمایت‌ها با مشوق‌های هدفمند و انعطاف‌پذیر احساس می‌شود. به‌طور کلی، طراحی سیاست‌های حمایتی کارآمد و پایدار، نیازمند توجه به شرایط محلی، نوع فناوری، مرحله توسعه صنعت و پیامدهای زیست‌محیطی است تا ضمن کاهش وابستگی به حمایت‌های دولتی در بلندمدت، زمینه‌های رشد و خودکفایی صنعت زیست‌توده فراهم آید [۱۲۴]. خلاصه چالش‌های اقتصادی، پیامدها و راهکارها در جدول شماره ۵ بیان شده است.

به همراه داشته باشد [۱۱۸]. رقابت با سوخت‌های فسیلی از نظر قیمت یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های توسعه انرژی زیست‌توده محسوب می‌شود، چرا که هزینه تولید سوخت‌های زیستی هنوز به طور میانگین ۲۰ تا ۳۰ درصد بالاتر از سوخت‌های فسیلی است [۱۱۹]. این اختلاف قیمت عمدتاً ناشی از هزینه‌های بالای تولید، جمع‌آوری و فرآوری مواد اولیه زیست‌توده، سرمایه‌گذاری‌های سنگین اولیه و همچنین صرفه‌های مقیاس کمتر در مقایسه با صنایع نفت و گاز می‌باشد. در سال ۲۰۲۲، هزینه تولید بیودیزل تقریباً دو برابر سوخت دیزل و هزینه تولید اتانول تا ۵۶ درصد بیشتر از بنزین در ایالات متحده و اتحادیه اروپا بوده است. مطالعات نشان داده است که مصرف‌کنندگان حاضر به پرداخت حق‌الامکان حداقلی تنها ۵ تا ۱۱ درصد برای سوخت‌های زیستی هستند که این فاصله قیمتی قابل توجه، ضرورت مداخله دولت‌ها را برای ایجاد توجیه اقتصادی این صنعت اجتناب‌ناپذیر می‌سازد [۱۲۰]. با این حال، قیمت‌گذاری سوخت‌های زیستی به شدت تحت تأثیر عوامل منطقه‌ای از جمله هزینه مواد اولیه، یارانه‌های سوخت فسیلی و شرایط تأمین مالی قرار دارد و در مناطقی با منابع زیست‌توده فراوان، این سوخت‌ها می‌توانند رقابت‌پذیری بیشتری داشته باشند. پیش‌بینی می‌شود با پیشرفت فناوری‌های تولید، افزایش مقیاس تولید و بهبود کارایی فرآیندها، هزینه تولید سوخت‌های زیستی کاهش یابد و شکاف قیمتی با سوخت‌های فسیلی به تدریج کمتر شود. نیاز به یارانه‌ها و مشوق‌های دولتی از الزامات کلیدی برای توسعه صنعت زیست‌توده محسوب می‌شود، چرا که این فناوری‌ها در مراحل اولیه تجاری‌سازی معمولاً از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیستند [۱۲۱]. گزارش‌های سازمان همکاری اقتصادی و توسعه نشان می‌دهد که با وجود کاهش قیمت‌های واقعی سوخت‌های زیستی در سال‌های اخیر، حمایت‌های دولتی همچنان برای جبران هزینه‌های تولید بالاتر این سوخت‌ها در مقایسه با سوخت‌های فسیلی ضروری باقی خواهد ماند. این حمایت‌ها می‌تواند شامل معافیت‌های مالیاتی، تضمین خرید محصولات، کمک‌های مستقیم مالی، اعتبارات مالیاتی بر اساس شدت کربن، مکانیسم‌های

جدول شماره ۵: چالش های اقتصادی

عنوان چالش	شرح چالش	راهکارها	پیامدهای اصلی
هزینه بالای جمع آوری و حمل و نقل	پراکندگی منابع، چگالی پایین انرژی (۴۰-۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و رطوبت بالا ۳۰-۶۰٪	تراکم سازی فیزیکی (کاهش ۴۳-۷۵٪ هزینه)، ایجاد مراکز پیش فرآوری غیرمتمرکز، بهینه سازی لجستیک	افزایش ۳۰-۵۰٪ هزینه های عملیاتی، کاهش رقابت پذیری، افزایش هزینه حمل و نقل بین المللی تا ۷۵٪
رقابت با سوخت های فسیلی از نظر قیمت	هزینه تولید سوخت های زیستی ۳۰-۳۰٪ بالاتر از سوخت های فسیلی	پیشرفت فناوری، افزایش مقیاس تولید، بهبود کارایی فرآیندها، قیمت گذاری کربن	کاهش تمایل مصرف کنندگان (حق الامکان ۵-۱۱٪)، نیاز به مداخله دولت، عدم توجیه اقتصادی در کوتاه مدت
نیاز به یارانه ها و مشوق های دولتی	عدم توجیه پذیری اقتصادی در مراحل اولیه تجاری سازی	معافیت های مالیاتی، تضمین خرید، اعتبارات مالیاتی، مبتنی بر شدت کربن، قیمت گذاری کربن، مشوق های هدفمند	وابستگی به حمایت های دولتی، کاهش بهره وری در بلندمدت، نیاز به

عنوان چالش	شرح چالش	راهکارها	پیامدهای اصلی
			بازنگری مستمر سیاست ها

۶-۳- چالش های زیست محیطی و اجتماعی

توسعه فناوری های تبدیل زیست توده به انرژی، با وجود مزایای قابل توجه در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و تأمین انرژی تجدیدپذیر، با چالش های زیست محیطی و اجتماعی متعددی مواجه است که نیازمند مدیریت یکپارچه و سیاست گذاری های دقیق و چندبعدی است [۱۲۵]. این چالش ها شامل نگرانی هایی درباره تغییر کاربری اراضی و تخریب اکوسیستم های طبیعی، رقابت با تولیدات غذایی و تهدید امنیت غذایی جوامع محلی، انتشار آلاینده ها در برخی فرآیندهای تبدیل، و همچنین اختلافات اجتماعی ناشی از توزیع ناعادلانه منافع و مضرات این فناوری ها می شود که هر یک نیازمند بررسی جداگانه و ارائه راهکارهای مناسب هستند [۱۲۶]. رقابت بین تولید سوخت و امنیت غذایی یکی از چالش های اصلی توسعه سوخت های زیستی نسل اول محسوب می شود، چرا که این فناوری ها از محصولات غذایی مانند ذرت، نیشکر، گندم و دانه های روغنی به عنوان ماده اولیه استفاده می کنند و بدین ترتیب بخش قابل توجهی از زمین های حاصلخیز کشاورزی را به جای تأمین غذای انسان و دام، به تولید انرژی اختصاص می دهند [۱۲۷]. این رقابت می تواند منجر به افزایش قیمت مواد غذایی، تغییر الگوی کشت به سمت محصولات انرژی زا،

چالش‌های کلیدی توسعه زیست‌توده به شمار می‌روند که ابعاد اجتماعی و سیاسی مهمی دارند [۱۳۵]. تغییر الگوی استفاده از زمین‌های کشاورزی، جنگلی و مراتع برای تولید محصولات انرژی‌زا می‌تواند با مقاومت جوامع محلی، سازمان‌های غیردولتی و گروه‌های زیست‌محیطی مواجه شود، به‌ویژه زمانی که این تغییرات به ازای محروم کردن جوامع از منابع معیشتی یا تخریب محیط‌زیست صورت گیرد [۱۳۶]. این مسائل اغلب منجر به تأخیر در اجرای پروژه‌ها، افزایش هزینه‌ها یا حتی لغو کامل آنها می‌شود، به‌ویژه زمانی که منافع اقتصادی ناشی از پروژه‌های زیست‌توده به صورت عادلانه توزیع نشود و جوامع محلی به عنوان ذی‌نفعان اصلی در فرآیند تصمیم‌سازی مشارکت داده نشوند [۱۳۷]. تجارب جهانی نشان داده است که پروژه‌های موفق زیست‌توده، پروژه‌هایی هستند که با مشارکت فعال جوامع محلی، شناسایی نیازها و دغدغه‌های آنها، و ارائه مزایای قابل‌لمس مانند اشتغال پایدار، بهبود زیرساخت‌ها و توسعه اقتصادی همراه بوده‌اند و توانسته‌اند با شفافیت و پاسخگویی در توزیع منافع، پذیرش عمومی را جلب کنند [۱۳۸]. به‌طور کلی، مدیریت هم‌زمان چالش‌های زیست‌محیطی و اجتماعی و ایجاد توازن بین اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی، یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای توسعه پایدار صنعت زیست‌توده در سطوح محلی، ملی و بین‌المللی است که نیازمند همکاری همه‌جانبه بین دولت‌ها، بخش خصوصی، جوامع محلی و سازمان‌های بین‌المللی می‌باشد [۱۳۹]. خلاصه چالش‌های زیست‌محیطی، پیامدها و راهکارها در جدول شماره ۶ بیان شده است.

کاهش تنوع محصولات کشاورزی و کاهش دسترسی جوامع فقیر و آسیب‌پذیر به منابع غذایی پایه شود و به تبع آن، ناامنی غذایی و آسیب‌پذیری اقتصادی در مناطق روستایی را تشدید کند [۱۲۸]. بر اساس گزارش‌های بین‌المللی، افزایش قیمت مواد غذایی ناشی از رقابت زمین‌های کشاورزی بین تولید سوخت و غذا، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، یکی از نگرانی‌های جدی سیاست‌گذاران و سازمان‌های بین‌المللی است و ضرورت اتخاذ رویکردهای پایدار را بیش از پیش آشکار می‌سازد [۱۲۹]. توسعه سوخت‌های زیستی نسل دوم و سوم که از ضایعات کشاورزی، پسماندهای شهری و صنعتی، و منابع غیرخوراکی مانند جلبک‌ها و زیست‌توده‌های لیگنوسلولزی استفاده می‌کنند، می‌تواند به کاهش این تنش‌ها کمک کرده و زمینه‌های لازم برای هم‌زیستی تولید انرژی و تأمین امنیت غذایی را فراهم آورد [۱۳۰]. انتشار آلاینده‌ها در فرآیندهای تبدیل زیست‌توده یکی دیگر از چالش‌های مهم این فناوری‌ها محسوب می‌شود که می‌تواند مزایای زیست‌محیطی این فناوری‌ها را تحت تأثیر قرار دهد [۱۳۱]. فرآیندهایی مانند احتراق مستقیم، به‌ویژه در صورت عدم استفاده از سیستم‌های تصفیه دودکش مناسب، می‌توانند منجر به انتشار ذرات معلق، اکسیدهای نیتروژن، مونوکسید کربن و ترکیبات آلی فرار شوند که اثرات منفی بر کیفیت هوا، سلامت عمومی و اکوسیستم‌های محلی دارند و در مناطق شهری و پرجمعیت، این نگرانی‌ها دوچندان می‌شود [۱۳۲]. همچنین، برخی روش‌های پیش‌تصفیه مواد لیگنوسلولزی ممکن است ترکیبات آلی فرار یا پساب‌های شیمیایی سمی تولید کنند که در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌توانند منابع آب و خاک را آلوده کنند و هزینه‌های تصفیه و دفع را افزایش دهند [۱۳۳]. با وجود این چالش‌ها، فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند گازی‌سازی همراه با جذب و ذخیره کربن و سیستم‌های تصفیه چندمرحله‌ای گازهای خروجی، می‌توانند انتشار آلاینده‌ها را به حداقل رسانده و تأثیرات منفی بر محیط‌زیست را کاهش دهند، هرچند که این راهکارها با هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی بیشتری همراه هستند [۱۳۴]. پذیرش عمومی و مسائل مربوط به کاربری زمین از

جدول شماره ۶: چالش های زیست محیطی

چالش	شرح چالش	راهکارهای پیشنهادی	پیامدهای اصلی
رقابت با امنیت غذایی	استفاده از محصولات غذایی (ذرت، نیشکر، دانه های روغنی) به عنوان ماده اولیه سوخت های زیستی نسل اول	توسعه سوخت های نسل دوم و سوم (ضایعات کشاورزی، جلبک ها، پسماندهای لیگنوسلولزی)	افزایش قیمت مواد غذایی، تغییر الگوی کشت، کاهش دسترسی جوامع فقیر به مواد غذایی
انتشار آلاینده ها	احتراق مستقیم و روش های پیش تصفیه شیمیایی	استفاده از سیستم های تصفیه دودکش، گازی سازی با جذب کربن، مدیریت پساب ها	انتشار ذرات، NOx معلق، ترکیبات CO آلی فرار، آلودگی آب و خاک
پذیرش عمومی و کاربری زمین	تغییر الگوی استفاده از زمین، توزیع ناعادلانه منافع	مشارکت جوامع محلی، توزیع عادلانه منافع، ایجاد اشتغال پایدار، شفافیت در تصمیم گیری	مقاومت جوامع محلی، تأخیر یا لغو پروژه ها، افزایش هزینه ها

۷- چشم اندازهای آینده و راه کارهای نوین

چشم اندازهای آینده توسعه انرژی زیست توده بر پایه راهکارهای نوینی استوار است که با هدف افزایش پایداری، کارایی و اقتصادی سازی این فناوری ها طراحی شده اند [۱۴۰]. توسعه فناوری های هیبریدی که زیست توده را با انرژی خورشیدی و بادی ترکیب می کنند، یکی از این راهکارهاست که با بهره گیری هم زمان

از مزایای هر سه منبع، امکان تأمین انرژی پایدار را در تمام ساعات شبانه روز فراهم می آورد و وابستگی به سیستم های ذخیره سازی انرژی را به طور قابل توجهی کاهش می دهد [۱۴۱]. مطالعات نشان می دهد که سیستم های هیبریدی می توانند بازده انرژی را تا ۳۰ درصد نسبت به سیستم های مستقل افزایش دهند و از نوسانات تولید انرژی تجدیدپذیر بکاهند [۱۴۲]. در حوزه بهبود فرآیندهای تبدیل، استفاده از کاتالیزورهای نانویی و آنزیم های پیشرفته به عنوان راهکاری کلیدی برای افزایش بازده و کاهش هزینه ها مطرح شده است. کاتالیزورهای نانوساختار با سطح فعال افزایش یافته و پایداری حرارتی بالا، امکان کاهش دمای واکنش و افزایش انتخاب پذیری فرآیندها را فراهم می کنند [۱۴۳]. از سوی دیگر، آنزیم های مهندسی شده مانند سلولازهای مقاوم به دما، تجزیه مواد لیگنوسلولزی را تسهیل کرده و بازده تولید سوخت های زیستی نسل دوم را به میزان قابل توجهی افزایش می دهند [۱۴۴]. ترکیب این دو فناوری می تواند تحولی اساسی در اقتصاد فرآیندهای تبدیل زیست توده ایجاد کند. بهینه سازی زنجیره تأمین با استفاده از هوش مصنوعی و اینترنت اشیا نیز مدیریت هوشمند و یکپارچه از مرحله جمع آوری تا تبدیل نهایی را ممکن ساخته است [۱۴۵]. سیستم های مبتنی بر یادگیری ماشین می توانند با پیش بینی عرضه و تقاضا، برنامه ریزی لجستیک را بهینه سازی کنند، در حالی که حسگرهای اینترنت اشیا کیفیت و رطوبت مواد اولیه را در لحظه پایش می کنند و هزینه های عملیاتی را تا ۲۵ درصد کاهش می دهند [۱۴۶]. توسعه زیست توده نسل دوم و سوم نیز با بهره گیری از ضایعات کشاورزی و جلبک های پرورش یافته در فاضلاب، تحولی اساسی در تولید پایدار سوخت های زیستی ایجاد کرده است [۱۴۷]. زیست توده نسل سوم با حذف نیاز به زمین های زراعی، هم زمان به تصفیه فاضلاب و جذب دی اکسید کربن کمک می کند و تا ۱۰ برابر بیشتر از محصولات کشاورزی در واحد سطح روغن تولید می نماید [۱۴۸]. در نهایت، سیاست گذاری های بین المللی مانند توافقنامه پاریس و دستورالعمل اتحادیه اروپا با هدف گذاری سهم ۳۲ درصدی زیست توده در سبد انرژی تا سال

انرژی زیست‌توده روشن است، اما رسیدن به آن نیازمند عزمی جمعی و رویکردی یکپارچه در سطوح ملی و بین‌المللی خواهد بود.

۹- منابع

1. International Energy Agency (IEA). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. Paris: IEA Publications; 2021.
2. IRENA. Renewable Energy Statistics 2023. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2023.
3. Demirbas A. Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review. *Applied Energy*. 2009;86:S108-S117.
4. Pan SY, Du MA, Huang IT, Liu IH, Chang EE, Chiang PC. Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for circular economy system: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2015;108:409-421.
5. Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 2007;25(3):294-306.
6. McKendry P. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*. 2002;83(1):37-46.
7. Naik SN, Goud VV, Rout PK, Dalai AK. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(2):578-597.
8. Leong WH, Lim JW, Lam MK, Uemura Y, Ho CD. Application of bioenergy in modern days: A review of current biomass conversion technologies. *Biomass and Bioenergy*. 2022;167:106630.
9. Samal DPK, Sukla LB. Unveiling the dual potential of microalgae and seaweed biomass for sustainable biofuel production: A review. *RSC Advances*. 2025;15:34160-34175.
10. Ganesan M, et al. From Waste to Value: Data-Driven Insights for Biomass Valorization. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2025. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5c01234
11. Sims REH, Mabey W, Saddler JN, Taylor M. An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technology*. 2010;101(6):1570-1580.
12. Amigun B, Sigamoney R, von Blottnitz H. Commercialisation of biofuel industry in Africa: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008;12(3):690-711.
13. World Energy Council. World Energy Scenarios: The Grand Transition. London: World Energy Council; 2019.
14. International Renewable Energy Agency. Bioenergy for the Energy Transition. Abu Dhabi:

۲۰۳۰، نقش محوری در توسعه این صنعت ایفا می‌کنند و با ارائه مشوق‌های مالی و استانداردهای پایداری، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین را تسریع می‌بخشند [۱۴۹].

۸- نتیجه گیری

تبدیل انرژی زیست‌توده در آستانه تحولی بنیادین قرار دارد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که فناوری‌های نوینی نظیر گازی‌سازی پلاسما و بیوراکتورهای جلیبی، ضمن افزایش بازده انرژی تا ۳ برابر، آلاینده‌های روش‌های سنتی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهند. بر اساس نتایج کمی، بازده گازی‌سازی می‌تواند تا ۷۵٪، هزینه‌های لجستیک با تراکم‌سازی تا ۴۰٪ و هزینه‌های عملیاتی با هوش مصنوعی تا ۲۵٪ کاهش یابد. تجارب موفق برزیل و سوئد، گواهی بر نقش کلیدی مشوق‌های دولتی و استانداردسازی بین‌المللی در توسعه این صنعت است. رویکرد «پسماند به ثروت» ضمن حل مدیریت پسماند، منبع جدیدی از درآمد و اشتغال سبز در مناطق روستایی ایجاد کرده است.

با این حال، تحقق این چشم‌انداز با سه چالش عمده مواجه است (۱) مقیاس‌پذیری فناوری‌های نوین که نیازمند سرمایه‌گذاری کلان در تحقیق و توسعه است، (۲) فقدان استانداردهای یکپارچه بین‌المللی برای تجارت زیست‌سوخت‌ها و وابستگی به حمایت‌های دولتی، و (۳) هزینه‌های بالای جمع‌آوری و لجستیک که تا ۵۰٪ از هزینه‌های تولید را به خود اختصاص می‌دهد.

بر اساس شکاف‌های شناسایی‌شده، پژوهش‌های آتی باید به چهار حوزه کلیدی بپردازند: (۱) توسعه فناوری‌های هیبریدی تلفیقی با نانومواد پیشرفته، (۲) بهینه‌سازی پیش‌تصفیه و لجستیک با هوش مصنوعی و اینترنت اشیا، (۳) مطالعات جامع ارزیابی چرخه حیات برای استانداردسازی بین‌المللی، (۴) بررسی امکان‌سنجی احداث نیروگاه‌های مشارکتی در مناطق روستایی با مدل‌های تأمین مالی نوین.

در جمع‌بندی، زیست‌توده با قابلیت تبدیل به یکی از ارکان اصلی سیستم انرژی پایدار، نقشی کلیدی در تحقق اقتصاد کم‌کربن و دستیابی به سهم ۱۵ تا ۲۰ درصدی در سبد انرژی جهانی تا سال ۲۰۴۰ ایفا می‌کند. عبور از چالش‌های کنونی مستلزم همکاری همه‌جانبه پژوهشگران، صنعتگران و سیاست‌گذاران همراه با اراده سیاسی، سرمایه‌گذاری هوشمند و مشارکت عمومی است. آینده

26. Lignocellulosic biomass as a renewable resource: Driving second-generation biofuel innovation from agricultural waste. *Biomass and Bioenergy*. 2025;201:108133.
27. Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. 3rd ed. London: Academic Press; 2018.
28. Chemical compositions of different lignocellulosic biomasses on a dry weight basis. *PMC*. 2021.
29. Ale S, Dhungana P, Howieson J, Bhattarai RR. Effective valorisation of cereal lignocellulosic waste: a review of pretreatment techniques to enhance microstructural modification. *Sustainable Food Technology*. 2026;4:241-260.
30. Mehta JP, Metre AV, Bhakhar MS, Vetal AS. Comparative study of alkaline, acidic, and deep eutectic solvent pretreatments on lignocellulosic biomass for enhanced enzymatic hydrolysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024;14(9):14619-14631.
31. Taherzadeh MJ, Karimi K. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2008;9(9):1621-1651.
32. Jönsson LJ, Alriksson B, Nilvebrant NO. Bioconversion of lignocellulose: inhibitors and detoxification. *Biotechnology for Biofuels*. 2013;6(1):16.
33. Ong CL. Economics of sustainable lignocellulose biomass and biofuel logistics in Malaysia. *Bois et Forêts des Tropiques*. 2024;19(3):1-15.
34. Kumar A, Sharma YK. Economic feasibility of biomass logistics in rural areas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;157:112059.
35. . Marine algae biomass: A viable and renewable resource for biofuel production: A review. *Algal Research*. 2024;82:103687.
36. Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023;60:103503.
37. Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy Conversion and Management*. 2011;52(1):163-170.
38. Microalgae biofuels: illuminating the path to a sustainable future amidst challenges and opportunities. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2024;17(1):32.
39. Low-carbon biofuels from macroalgae towards a sustainable circular bioeconomy and green future. *Biomass and Bioenergy*. 2024;189:107395.
40. A review of the current potential of European brown seaweed for the production of IRENA; 2023 Nov. 120 p. ISBN 978-92-9260-516-3.
15. McKendry P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. 2002 May;83(1):37-46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
16. Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 2012 Mar;38:68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
17. Weiland P. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010 Feb;85(4):849-60. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
18. Naik SN, Goud VV, Rout PK, Dalai AK. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010 Feb;14(2):578-97. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
19. Himmel ME, Ding SY, Johnson DK, Adney WS, Nimlos MR, Brady JW, et al. Biomass recalcitrance: engineering plants and enzymes for biofuels production. *Science*. 2007 Feb 9;315(5813):804-7. <https://doi.org/10.1126/science.1137016>
20. International Energy Agency. World Energy Outlook 2022. Paris: OECD/IEA; 2022. 524 p. ISBN 978-92-64-50424-7.
21. Cherubini F, Strømman AH. Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. *Bioresource Technology*. 2011 Jan;102(2):437-51. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.010>
22. Smith P, Davis SJ, Creutzig F, Fuss S, Minx J, Gabrielle B, et al. Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions. *Nature Climate Change*. 2016 Jan;6(1):42-50. <https://doi.org/10.1038/nclimate2870>
23. Searle S, Malins C. A reassessment of global bioenergy potential in 2050. *Global Change Biology Bioenergy*. 2016 Jan;8(1):14-22. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12342>
24. Hosseini SE, Wahid MA, Ganjehkaviri A. An overview of renewable energy conversion from biogas. *Renewable Energy*. 2020 Jan;145:1903-15. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.096>
25. Naik SN, Goud VV, Rout PK, Dalai AK. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(2):578-597.

59. Non-edible oilseeds as promising feedstocks for biodiesel production: A review. *Biomass and Bioenergy*. 2023;174:106847.
60. *Jatropha curcas*: A potential feedstock for biodiesel production in tropical regions. *Renewable Energy*. 2022;188:1120-1132.
61. Combustion of biomass: A review of technologies and environmental impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;145:111084.
62. Direct combustion of biomass for heat and power generation: A review. *Biomass and Bioenergy*. 2022;165:106578.
63. Combined heat and power (CHP) systems from biomass combustion: A review. *Energy Reports*. 2022;8:12456-12470.
64. Techno-economic analysis of biomass combustion power plants. *Energy*. 2023;267:126574.
65. Emissions from biomass combustion: A review of pollutants and control technologies. *Journal of Environmental Management*. 2022;316:115284.
66. Biomass gasification for sustainable energy production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;168:112789.
67. Gasification of biomass: Recent advances and future perspectives. *Biomass and Bioenergy*. 2023;178:107006.
68. Syngas production from biomass gasification: Applications and challenges. *Energy Conversion and Management*. 2022;269:116099.
69. Tar formation and mitigation in biomass gasification: A review. *Fuel*. 2023;339:127186.
70. Biomass pyrolysis: A review of recent advances and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;166:112654.
71. Pyrolysis of biomass for biochar, bio-oil and syngas production: A review. *Bioresource Technology*. 2023;371:128637.
72. Biochar production and applications in agriculture and environmental remediation: A review. *Journal of Environmental Management*. 2022;324:116360.
73. Bio-oil upgrading and refining for transportation fuels: A review. *Energy Conversion and Management*. 2023;283:116924.
74. Fast pyrolysis of biomass for liquid fuels production: A review. *Biomass and Bioenergy*. 2022;164:106548.
75. Challenges and opportunities in biomass pyrolysis commercialization: A review. *Renewable Energy*. 2023;206:1187-1202.
76. Biomass torrefaction: A review of principles, processes, and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;149:111407.
77. Torrefaction of biomass for energy applications: A review. *Biomass and Bioenergy*. 2022;163:106530.
- biofuels. *Energy, Sustainability and Society*. 2024;14(1):12.
41. Microalgal harvesting for biofuels – Options and associated operational costs. *Algal Research*. 2024;78:103687.
42. The Sea's best kept secret: the use of seaweed as a source of biohydrogen for clean and renewable energy. *RSC Sustainability*. 2024;2:1289-1299.
43. Biomethane production from the organic fraction of municipal solid waste: A review. *Bioresource Technology Reports*. 2024;25:101726.
44. Nanomaterials as a sustainable choice for treating wastewater: A review. *Results in Chemistry*. 2024;7:101485.
45. Conversion of food waste into bioenergy: A review. *Environmental Technology Reviews*. 2022;11(1):1-18.
46. Biogas production from municipal solid waste: A review. *International Journal of Renewable Energy Development*. 2022;11(4):1021-1034.
47. Energy from municipal solid waste: A review of technologies and their environmental impacts. *Waste Management*. 2022;150:1-15.
48. Waste-to-energy conversion: A review of the state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;149:111385.
49. Sustainable municipal solid waste management: A review of challenges and opportunities. *Journal of Environmental Management*. 2022;302:114086.
50. A review of biogas production from anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*. 2023;370:128542.
51. Techno-economic analysis of municipal solid waste-to-energy conversion: A review. *Energy Reports*. 2022;8:13245-13260.
52. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(2):578-597.
53. Biodiesel production from vegetable oils: A review of current technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;157:112031.
54. Global oilseed production and market analysis. *Oil Crops Outlook*. USDA; 2023.
55. Food vs. fuel: A comprehensive review of the first-generation biofuel production. *Journal of Cleaner Production*. 2021;315:128158.
56. Environmental impacts of palm oil production and its use as biofuel: A review. *Science of the Total Environment*. 2022;835:155517.
57. Land use change and greenhouse gas emissions from biofuel production: A review. *GCB Bioenergy*. 2021;13(8):1252-1271.
58. Advanced extraction technologies for vegetable oils: A review. *Food Chemistry*. 2022;388:132998.

98. Transesterification of triglycerides for biodiesel production: A review. *Fuel*. 2023;334:126678.
99. Optimization of transesterification conditions for biodiesel production. *Energy Conversion and Management*. 2022;268:116012.
100. Biodiesel production technologies: A comprehensive review. *Renewable Energy*. 2023;206:1187-1202.
101. Heterogeneous catalysts for biodiesel production: A review. *Catalysis Today*. 2023;413:114078.
102. Sarker TR, Nanda S, Meda V, Dalai AK. Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023;21(1):231-264. doi:10.1007/s10311-022-01510-0
103. Gong C, Meng X, Thygesen LG, Sheng K, Pu Y, Wang L, et al. The significance of biomass densification in biological-based biorefineries: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023;183:113520.
104. Effects of biomass feedstock and applied pressure on the binding mechanism and pellet qualities. *Industrial Crops and Products*. 2024;222:119496.
105. A review of the combined torrefaction and densification technology as a source of renewable energy. *Alexandria Engineering Journal*. 2023;82:330-341.
106. . Biomass briquettes: Raw material, technologies and densification parameters, quality and future challenges. *Scientia Agropecuaria*. 2025;16(2). doi:10.17268/sci.agropecu.2025.024
107. In-situ elimination of biomass gasification tar based on the understanding of tar formation process: A review. *Fuel*. 2023.
108. A comprehensive review of primary strategies for tar removal in biomass gasification. *Energy Conversion and Management*. 2022.
109. Cortázar M, Santamaría L, Lopez G, et al. A comprehensive review of primary strategies for tar removal in biomass gasification. *Energy Conversion and Management*. 2023.
110. Advanced approaches for mitigating impact of pre-treatment generated inhibitors in lignocellulosic hydrolysates: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025.
111. Chong KF, et al. A Review on the Over-liming Detoxification of Lignocellulosic Biomass Prehydrolysate for Bioethanol Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2025;197(6):3581-3613.
112. Jose D, Kitiborwornkul N, Sriariyanun M, Keerthi K. A Review on Chemical Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass: Recent Advances
78. Recent advances in biomass torrefaction: A comprehensive review. *Bioresource Technology*. 2023;376:128915.
79. Torrefaction as a pretreatment for biomass upgrading: A review. *Energy Conversion and Management*. 2022;267:115925.
80. Techno-economic analysis of biomass torrefaction for energy production. *Energy*. 2023;268:126648.
81. Torrefied biomass as a co-firing fuel in existing coal-fired power plants. *Fuel*. 2023;336:126892.
82. Challenges and opportunities in biomass torrefaction commercialization. *Renewable Energy*. 2022;198:891-907.
83. Advances in torrefaction technologies for biomass upgrading: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2023;98:101112.
84. Anaerobic digestion of organic waste for biogas production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;169:112918.
85. Biogas production from lignocellulosic biomass: A review of recent advances. *Bioresource Technology*. 2023;375:128815.
86. Anaerobic digestion: A review of process optimization and challenges. *Waste Management*. 2022;154:1-18.
87. Biogas as a renewable energy source: A review of technologies and applications. *Energy Reports*. 2023;9:15678-15695.
88. Challenges and opportunities in anaerobic digestion of municipal solid waste. *Journal of Environmental Management*. 2023;336:117625.
89. Recent advances in two-stage anaerobic digestion for enhanced biogas production. *Biomass and Bioenergy*. 2023;175:106900.
90. Ethanol fermentation from renewable feedstocks: A review. *Bioresource Technology*. 2022;363:128022.
91. Bioethanol production from sugar and starchy feedstocks: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023;183:113516.
92. Ethanol fermentation process optimization: A review of recent advances. *Biochemical Engineering Journal*. 2022;187:108642.
93. Bioethanol as a renewable fuel: A review of technologies and applications. *Energy Reports*. 2023;9:13456-13472.
94. Ethanol as a gasoline additive: Performance and environmental impacts. *Fuel*. 2023;338:127322.
95. Challenges in bioethanol production from food crops: A review of sustainability issues. *Journal of Cleaner Production*. 2023;385:135754.
96. Recent advances in lignocellulosic bioethanol production: A review. *Biomass and Bioenergy*. 2023;178:107008.
97. Biodiesel production from vegetable oils: A review of current technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;157:112031.

129. Biofuels and food security: A review of the evidence. *Food Policy*. 2021;103:102124.
130. Second and third generation biofuels: A review of sustainable feedstocks. *Biomass and Bioenergy*. 2023;174:106847.
131. Air pollution from biomass combustion: A review of emissions and health impacts. *Environmental Science and Technology*. 2022;56(15):10641-10660.
132. Emission factors for biomass combustion: A review. *Atmospheric Environment*. 2023;300:119674.
133. Environmental impacts of biomass pretreatment methods: A review. *Bioresource Technology*. 2022;364:128091.
134. Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS): A review. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2022;118:103685.
135. Public acceptance of bioenergy projects: A review of social factors. *Energy Research and Social Science*. 2023;96:102930.
136. Social acceptance of renewable energy: A review of key determinants. *Energy Policy*. 2022;170:113234.
137. Stakeholder engagement in bioenergy projects: A review of best practices. *Journal of Environmental Management*. 2023;345:118729.
138. Community benefits from bioenergy projects: A review of case studies. *Energy for Sustainable Development*. 2023;76:101282.
139. Integrated approaches for sustainable bioenergy development: A review. *Renewable Energy*. 2023;215:118967.
140. Hybrid renewable energy systems for sustainable bioenergy production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;189:113890.
141. Integration of biomass with solar and wind energy: Opportunities and challenges. *Energy Conversion and Management*. 2023;292:117402.
142. Performance analysis of hybrid biomass-solar-wind energy systems: A comprehensive review. *Renewable Energy*. 2024;220:119680.
143. Nanocatalysts for biomass conversion: Recent advances and future perspectives. *ACS Catalysis*. 2023;13(15):10245-10278.
144. Engineered enzymes for lignocellulosic biomass degradation: A review. *Biotechnology Advances*. 2024;70:108287.
145. Artificial intelligence and IoT for biomass supply chain optimization: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023;214:108305.
146. Machine learning applications in bioenergy systems: A comprehensive review. *Energy*. 2024;294:130750.
147. Third generation biofuels from microalgae: A review of cultivation and conversion and Progress. *Applied Science and Engineering Progress*. 2022;15(4):6210.
113. Zhou M, et al. Development of different pretreatments and related technologies for efficient biomass conversion of lignocellulose. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022.
114. Recent progress of the transition metal-based catalysts in the catalytic biomass gasification: A mini-review. *Fuel*. 2023;353.
115. A systematic literature review of the logistics planning for sustainable bioenergy based on forestry, agricultural, and municipal solid waste value chains. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2025.
116. A review on optimisation, cost and environmental sustainability of biomass supply and biomass pre-treatment. *Industrial Crops and Products*. 2026.
117. Comprehensive techno economic and logistic assessment of cellulosic biofuel supply chains toward economic optimization using integrated biomass and bio oil gasification pathways. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2026.
118. Sustainable Feedstock For Biofuel As The Next Transition Energy Source. DBS Insights. 2023.
119. Policy Instruments for Bioenergy Development: Review, Classification, and Systematic Analysis. *Energies*. 2026;19(5):1158.
120. Optimizing Forest-Biomass-Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review. *Energies*. 2023;16(24):7997.
121. OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034: Biofuels. OECD Publishing. 2025.
122. Effectiveness of government subsidies for biomass-based industries: Incorporating the feedstock acquisition process. *Energy Policy*. 2024.
123. Fixed rebate subsidy vs. unit price subsidy: Incentive effect on the biomass power supply chain. *Energy Policy*. 2024;114031.
124. An evolutionary game approach to subsidy phase-out for biomass power generation in China. *Energy Policy*. 2025.
125. Land use change and greenhouse gas emissions from biofuel production: A review. *GCB Bioenergy*. 2021;13(8):1252-1271.
126. Environmental sustainability of bioenergy: A review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;158:112095.
127. Food vs. fuel: A comprehensive review of the first-generation biofuel production. *Journal of Cleaner Production*. 2021;315:128158.
128. The impact of biofuel production on food prices: A review. *Energy Policy*. 2022;163:112848.

technologies. *Biomass and Bioenergy*. 2024;182:107092.

148. Algal biofuel production: A review of recent advances and challenges. *Bioresource Technology*. 2024;395:130425.

149. International policies for bioenergy development: A review of frameworks and impacts. *Energy Policy*. 2024;186:114012.