



Review Article

Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

(2026) 5(3):1-22

A Review of Emerging Technologies in the Biomass Value Chain: A Clear Path Toward a Green Future

Soraya Rostami¹, M.Sc, Sara Jokar¹, M.Sc, Abbas Bahri¹, Assistant Professor

¹ Renewable Energy Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran

Abstract:

The transition toward a green future and the realization of a sustainable, low-carbon economy necessitates fundamental transformations in the ways energy is produced and consumed. Among renewable resources, biomass energy holds particular importance due to its high potential for reducing greenhouse gas emissions. However, challenges such as high costs, resource sustainability, low efficiency, and environmental concerns have limited the full exploitation of this energy source. Technological advancements—especially in the digital realm—have created new opportunities to enhance efficiency and sustainability across the biomass production chain. This article examines the role of emerging technologies in the development and optimization of biomass energy systems. These technologies include artificial intelligence, geographic information systems (GIS), innovations in the selection and processing of feedstocks such as refinery residues, algae, agricultural and industrial waste, modular systems, carbon capture and storage (CCS), sludge volume reduction methods in wastewater treatment, and novel pyrolysis technologies. Adopting a descriptive–analytical approach, the paper not only analyzes the technologies but also introduces examples of startups active in the field. Furthermore, it reviews the current status of biomass in Iran, the life cycle of related technologies, and the challenges and opportunities of digitalization. Findings indicate that leveraging these technologies can significantly improve efficiency, optimize resource management, reduce costs, and decrease reliance on fossil fuels, thus playing a pivotal role in the future of biomass energy. This article aims to provide a comprehensive overview of the current landscape and future outlook of the field in light of technological advancements.

Keywords: Biomass, Emerging technologies, Artificial intelligence, Geographic information system (GIS), Startup.

Received: 07 April 2025

Revised: 09 June 2025

Accepted: 15 June 2025

Corresponding Author: Eng. Soraya Rostami, srostami@nri.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1885851.1173>



فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

مرور فناوری‌های نوظهور در زنجیره ارزش زیست‌توده، مسیری روشن برای آینده‌ای سبز

ثریا رستمی^۱، کارشناسی/ارشد، سارا جوکار^۱، کارشناسی/ارشد، عباس بحری^۱، استادیار

۱- گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

چکیده: گذار به آینده‌ای سبز و دستیابی به اقتصادی پایدار و کم‌کربن، مستلزم تحولاتی بنیادین در شیوه‌های تولید و مصرف انرژی است. در این میان، انرژی زیست‌توده به‌عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر و دارای پتانسیل بالا برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالا، پایداری منابع، راندمان پایین و مسائل زیست‌محیطی، بهره‌برداری کامل از این منبع را محدود ساخته‌اند. پیشرفت‌های فناوری‌های فناورانه، به‌ویژه در حوزه‌های دیجیتال، فرصت‌های تازه‌ای برای ارتقای بهره‌وری و پایداری در زنجیره تولید زیست‌توده فراهم کرده‌اند. در این مقاله، نقش فناوری‌های نوین در توسعه و بهینه‌سازی سامانه‌های انرژی زیست‌توده مورد بررسی قرار گرفته است. این فناوری‌ها شامل هوش مصنوعی، سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS)، نوآوری در انتخاب و فرآوری مواد اولیه نظیر پسماندهای پالایشگاهی، جلبک‌ها، پسماندهای کشاورزی و صنعتی، فرآیندهای مازولار، فناوری جذب و ذخیره کربن (CCS)، روش‌های کاهش حجم لجن در تصفیه‌خانه‌ها و فناوری‌های نوین پیرولیز می‌باشند. رویکرد مقاله توصیفی-تحلیلی است و در آن علاوه بر تحلیل فناوری‌ها، نمونه‌هایی از استارت‌آپ‌های فعال در این زمینه نیز معرفی شده‌اند. در ادامه، وضعیت زیست‌توده در ایران، چرخه عمر فناوری‌های مرتبط و چالش‌ها و فرصت‌های دیجیتالی‌سازی بررسی شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهند که بهره‌گیری از این فناوری‌ها می‌تواند با افزایش راندمان، بهبود مدیریت منابع، کاهش هزینه‌ها و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، نقش مهمی در آینده انرژی زیست‌توده ایفا کند. این مقاله تلاش دارد تصویری جامع از وضعیت فعلی و افق‌های پیش‌روی این حوزه در پرتو پیشرفت‌های فناورانه ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: انرژی زیست‌توده، فناوری‌های نوین، هوش مصنوعی، سیستم اطلاعات مکانی، استارت‌آپ.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

نویسنده مسئول: مهندس ثریا رستمی، srostami@nri.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1885851.1173>

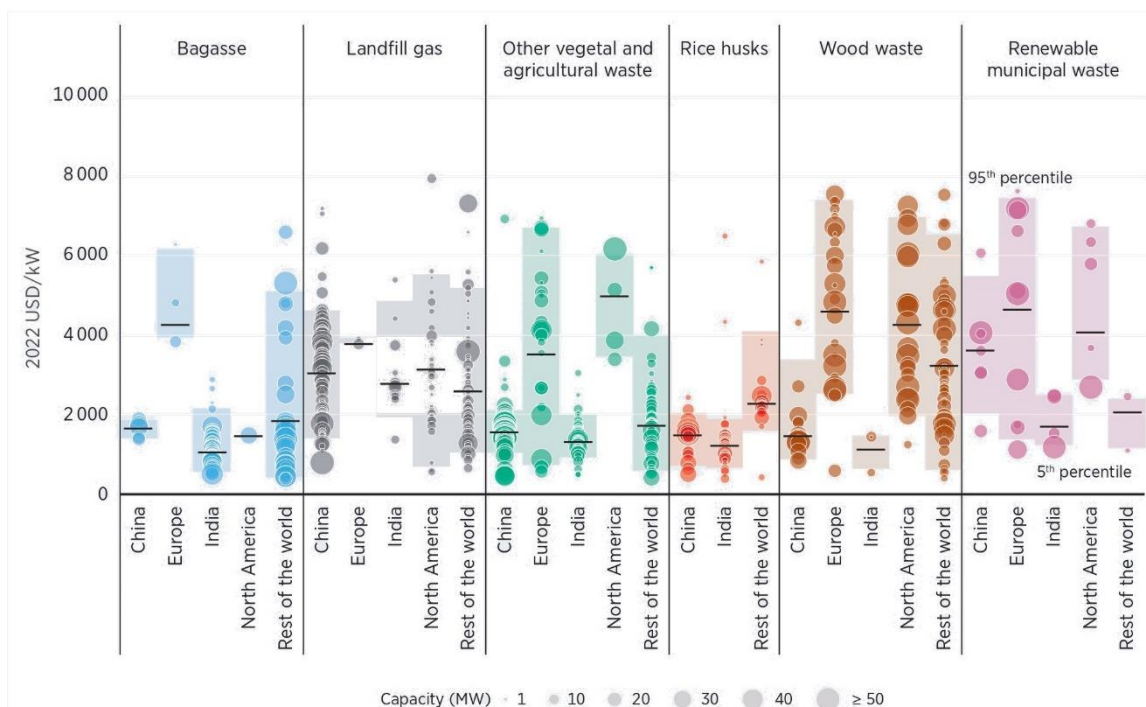


۱- مقدمه

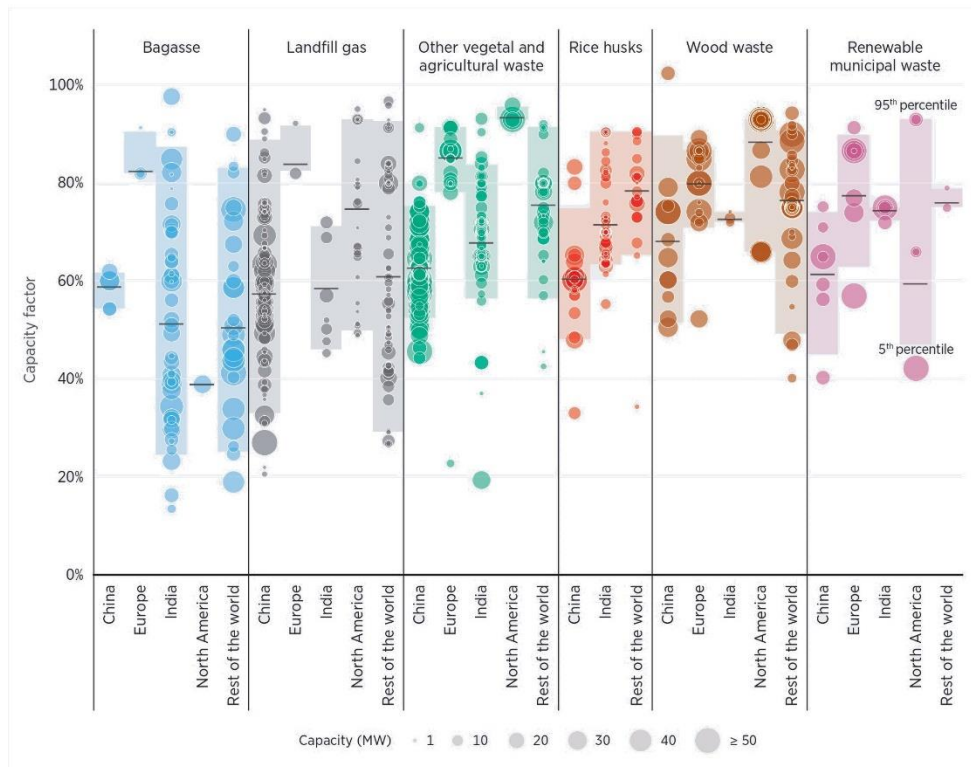
در دهه‌های اخیر، با افزایش چشمگیر جمعیت جهانی و گسترش شهرنشینی، تقاضا برای انرژی به‌طور بی‌سابقه‌ای رشد کرده است. این افزایش مصرف، همراه با رشد فزاینده تولید ضایعات، به‌ویژه زباله‌های شهری و کشاورزی، چالش‌های جدیدی را برای تأمین انرژی پایدار و کاهش آلودگی زیست‌محیطی ایجاد کرده است [۱]. در چنین شرایطی، توسعه و استفاده از منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر نه تنها ضروری است، بلکه به یک اولویت جهانی تبدیل شده است. یکی از مهم‌ترین این منابع، زیست‌توده است که با قابلیت تولید انرژی پایدار، نقشی اساسی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند [۲].

انرژی زیست‌توده که غالباً از مواد آلی تجدیدپذیر تولید می‌شود، به‌عنوان منبعی برای تولید و تأمین مستقیم انرژی یا غیرمستقیم به‌عنوان ذخیره‌ساز شناخته شده است. گیاهان طی فرآیند فتوسنتز، کربن‌دی‌اکسید را از جو جذب و در بافت خود ذخیره می‌کنند. در هنگام استفاده از این زیست‌توده برای تولید انرژی، کربن ذخیره‌شده مجدداً به جو بازمی‌گردد، اما با توجه به چرخه‌ی پایدار کربن و کاربرد فناوری‌های نوین، این فرآیند می‌تواند موجب افزایش سطح کلی کربن‌دی‌اکسید در جو نشود [۳]. زیست‌توده به‌عنوان یکی از منابع اصلی انرژی تجدیدپذیر مدرن، دارای ظرفیتی معادل ۵۵ درصد از کل منابع انرژی تجدیدپذیر در جهان است که در صورت بهره‌برداری مؤثر، می‌تواند تا بیش از ۶ درصد از عرضه جهانی انرژی را تأمین کند [۴]. با این وجود، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و استفاده از منابع زیست‌توده همچنان یکی از چالش‌های اساسی برای توسعه پایدار این صنعت محسوب می‌شود.

یکی از عوامل کلیدی در توسعه انرژی زیست‌توده، هزینه‌های اقتصادی مرتبط با احداث و بهره‌برداری از نیروگاه‌های زیست‌توده است [۵]. بررسی هزینه‌های سرمایه‌گذاری در بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد که این هزینه‌ها بسته به نوع مواد اولیه و فناوری مورد استفاده، از ۷۰۲ دلار بر کیلووات (برای نیروگاه‌های مبتنی بر پسماندهای نیشکر) تا بیش از ۷۴۴۵ دلار بر کیلووات (در پروژه‌های استفاده از زباله‌های شهری تجدیدپذیر در اروپا) متغیر است (شکل ۱). علاوه بر این، راندمان الکتریکی این نیروگاه‌ها حدود ۳۰٪ است و میانگین وزنی ضریب ظرفیت آن‌ها بین ۶۰ تا ۹۳٪ متغیر می‌باشد (شکل ۲). این آمار نشان می‌دهد که بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته و تأمین مواد اولیه با هزینه پایین، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های نهایی و افزایش بازدهی اقتصادی پروژه‌ها دارد. در کشورهای در حال توسعه، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه معمولاً پایین‌تر است، زیرا نیروی کار و مواد اولیه ارزان‌تری در دسترس است، اما در برخی موارد، این موضوع می‌تواند به افزایش آلاینده‌های محلی منجر شود [۶].



شکل (۱): هزینه کل احداث پروژه‌های تولید برق زیست‌توده به تفکیک تکنولوژی و منطقه در سال ۲۰۲۲ (دلار بر کیلووات) [۶]



شکل (۲): ضرایب ظرفیت پروژه‌های تولید برق زیست‌توده بر اساس تکنولوژی و منطقه، ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ [۶]

فناوری‌های نوین در حوزه زیست‌توده تأثیر چشمگیری بر بهره‌وری و مقیاس‌پذیری این منبع انرژی داشته‌اند. به‌عنوان مثال، در بخش ساختمان‌سازی، استفاده از نمای جلبکی که هم‌زمان به‌عنوان عایق حرارتی و جمع‌کننده انرژی خورشیدی عمل می‌کند، می‌تواند مصرف انرژی را تا ۲۰ درصد کاهش دهد. یک شبیه‌سازی انجام‌شده در یک آسمان‌خراش ۹۴ طبقه در نیویورک^۱ نشان داده است که این فناوری توانسته است سالانه بیش از یک میلیون دلار صرفه‌جویی در هزینه‌های برق به همراه داشته باشد [۷]. همچنین، پروژه‌های نوآورانه مانند «ایربابل»^۲ در لهستان که از ۵۲ بیوراکتور شیشه‌ای حاوی ۵۲۰ لیتر جلبک کلرلا استفاده می‌کنند، قادر به تصفیه ۲۰۰ لیتر هوا در دقیقه بوده و میزان آلاینده‌های نیتروژن و ذرات معلق را به ترتیب تا ۹۷٪ و ۷۵٪ کاهش داده‌اند [۸]. این نمونه‌ها نشان می‌دهند که چگونه فناوری‌های نوین می‌توانند زیست‌توده را به‌عنوان یک منبع انرژی کارآمدتر و سازگارتر با محیط‌زیست معرفی کنند.

علاوه بر پیشرفت‌های فناوری، سیاست‌های حمایتی نیز نقش کلیدی در توسعه انرژی زیست‌توده ایفا می‌کنند. کشورهایی نظیر چین، برزیل، اتحادیه اروپا، هند و ایالات متحده با اجرای سیاست‌های مالی و قانونی از جمله کاهش مالیات، مشوق‌های سرمایه‌گذاری و الزام به استفاده از سوخت‌های زیستی، توانسته‌اند چشم‌انداز توسعه این صنعت را تا سال ۲۰۳۰ و حتی ۲۰۵۰ بهبود بخشند [۹]. بیش از ۸۰ کشور در حال حاضر سیاست‌هایی برای حمایت از سوخت‌های زیستی مایع دارند که نشان از تعهد آن‌ها به گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. به‌عنوان مثال، در سال ۲۰۲۲ ایالات متحده قانون کاهش تورم را تصویب کرد که شامل حمایت‌های جدید از سوخت‌های زیستی و مواد شیمیایی زیستی بود. همچنین، هند برنامه زیست‌توده خود را تمدید کرده تا از تولید و استفاده از انرژی زیست‌توده جامد و گازی تا سال ۲۰۲۶ حمایت کند. این اقدامات نشان‌دهنده نقش سیاست‌گذاری در تسریع پذیرش فناوری‌های زیست‌توده و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است [۴].

در مجموع، توسعه زیست‌توده به‌عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارهای گذار به انرژی‌های پاک و کاهش انتشار کربن، به‌شدت وابسته به پیشرفت‌های فناوری و سیاست‌های حمایتی است [۱۰]. با توجه به افزایش تقاضای جهانی برای انرژی و رشد روزافزون ضایعات، فناوری‌های نوین می‌توانند تحول قابل‌توجهی در بهره‌وری زیست‌توده ایجاد کرده و هزینه‌های تولید را کاهش دهند. در همین راستا، این مقاله به بررسی تأثیر فناوری‌های نوین و مؤثر در حوزه زیست‌توده پرداخته و نقش آن‌ها و روندهای برتر را در ارتقای بهره‌وری،





مقیاس‌پذیری و پایداری این فناوری بیان می‌کند. لذا در این پژوهش در بخش‌های ۱-۲ تا ۷-۲، فناوری‌های پیشرفته‌ای همچون هوش مصنوعی، سیستم‌های اطلاعات مکانی^۲، پردازش ماژولار، تجزیه حرارتی از طریق پیرولیز و تولید و بهینه‌سازی بیوگاز در تصفیه‌خانه‌ها به‌عنوان راهکارهای مؤثر برای افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها مرور می‌شوند. علاوه بر این، مقاله رویکردهای نوآورانه در استفاده از منابع اولیه زیستی، از جمله پسماندهای کشاورزی و صنعتی و محصولات جانبی فرآورده‌های تولیدی را بررسی خواهد کرد. همچنین، فناوری‌های جذب و استفاده مجدد از کربن^۴ به‌عنوان یکی از استراتژی‌های کلیدی برای کاهش انتشار کربن و افزایش بهره‌وری انرژی زیست‌توده معرفی خواهد شد. در این خصوص استارت‌آپ‌های فعال در توسعه فناوری‌های نوین انرژی زیست‌توده و ارائه راهکارهای پایدار نیز معرفی می‌شوند. در ادامه، در بخش ۳ به بررسی وضعیت زیست‌توده در ایران و جایگاه آن در میان کشورهای خاورمیانه پرداخته می‌شود. بخش ۴ به تحلیل چرخه عمر فناوری‌های پردازش زیست‌توده اختصاص دارد، و در بخش ۵ نیز چالش‌ها و فرصت‌های مرتبط با دیجیتالی‌سازی در این حوزه مورد توجه قرار خواهند گرفت. درنهایت، مقاله بر اهمیت همگرایی فناوری‌های نوین و سیاست‌های حمایتی تأکید کرده و نقش انرژی زیست‌توده را در دستیابی به سناریوی کربن صفر و گذار به انرژی‌های پاک تبیین می‌کند.

۲- بررسی فناوری‌های نوظهور زیست‌توده و آثار راهبردی آن

بخش حاضر با هدف ارائه یک نمای کلی و یکپارچه از فناوری‌های نوظهور در زنجیره ارزش زیست‌توده تدوین شده است؛ به‌گونه‌ای که ابتدا ابعاد نرم‌افزاری شامل دیجیتالی‌سازی زنجیره تأمین، هوش مصنوعی و سیستم‌های اطلاعات مکانی (زیربخش‌های ۱-۲ و ۲-۲) و سپس موضوع تأمین پایدار مواد اولیه زیست‌توده (۳-۲) مورد بررسی قرار می‌گیرد، آنگاه فرآورده‌های تولید و پردازش ماژولار، پیرولیز و کاهش حجم لجن (۲-۴ تا ۶-۲) و در پایان فناوری‌های جذب و ذخیره کربن برای بهبود کیفیت سوخت زیستی و کاهش اثرات زیست‌محیطی (۷-۲) تشریح می‌شود. شایان ذکر است که بسیاری از این فناوری‌ها نه به‌صورت صرفاً نرم‌افزاری و نه صرفاً سخت‌افزاری، بلکه به‌صورت تلفیقی از هر دو بخش عمل می‌کنند و این هم‌افزایی، امکان بهینه‌سازی هم‌زمان پیش‌بینی، کنترل و بهره‌برداری از منابع زیست‌توده را فراهم می‌سازد. در پایان، جدول (۱) مقایسه‌ای خلاصه از روش‌های نوین و سنتی تبدیل زیست‌توده بر اساس چند شاخص کلیدی ارائه می‌دهد.

۲-۱- هوش مصنوعی، دوقلوهای دیجیتال و دیجیتالی‌سازی زنجیره تأمین در انرژی زیست‌توده

همان‌طور که هوش مصنوعی و فناوری‌های نوین مشتق شده از آن در تمامی حوزه‌ها نفوذ کرده و نقش آن‌ها روزبه‌روز پررنگ‌تر می‌شود، صنعت زیست‌توده نیز از این روند مستثنی نیست. فناوری‌های نوظهور و ابزارهای دیجیتالی در این حوزه به بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و افزایش پایداری فرآورده‌های تولید انرژی زیست‌توده کمک می‌کنند [۱۱]. بر اساس مطالعات اخیر، ادغام هوش مصنوعی در فرآورده‌های بهینه‌سازی طراحی می‌تواند باعث افزایش بهره‌وری بین ۲۰ تا ۳۰ درصد شود و صرفه‌جویی‌های اقتصادی ناشی از کاهش قابل توجه ظرفیت تجهیزات و افزایش بازدهی انرژی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد برآورد شده است. همچنین، خودکارسازی فرآورده‌های طراحی از طریق فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند ۳۰ تا ۴۰ درصد در کاهش زمان پروژه و هزینه‌های نیروی انسانی نقش داشته باشد [۱۲، ۱۳]. یکی از این فناوری‌های نوظهور، دوقلو دیجیتال است که به‌عنوان یک ابزار پیشرفته در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سیستم‌های صنعتی، در بهبود عملکرد و بهره‌وری فرایندهای تولید انرژی زیست‌توده تأثیرگذار است. این فناوری با ایجاد یک مدل دیجیتال بلادرنگ از سیستم‌های فیزیکی، امکان پایش، تحلیل و بهینه‌سازی فرآورده‌های تولید انرژی را فراهم می‌آورد [۱۴]. در همین راستا، استفاده از پهپادها و سیستم‌های خودکار هوشمند در مراحل نصب و اجرا، صرفه‌جویی‌هایی در حدود ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ دلار به ازای هر مگاوات نصب‌شده به همراه داشته است. این صرفه‌جویی عمدتاً ناشی از کاهش هزینه‌های نیروی انسانی و تجهیزات است [۱۳]. به‌عنوان مثال، استارت‌آپ هندی «اسیلیس»^۵ که در سال ۲۰۲۰ تأسیس شده، سیستم «هیپریو»^۶ را توسعه داده که یک نیروگاه بیوگاز قابل حمل و غیرمتمرکز است. این سیستم از ضایعات زیستی برای تولید بیوگاز با فشار و محتوای متان بالا استفاده کرده و با بهره‌گیری از رفرمرهای بخار، هیدروژن تولید می‌کند. هیپریو از فناوری دوقلو دیجیتال برای شبیه‌سازی فرآورده‌های تولید استفاده می‌کند و ابزارهایی مانند RENLE (کتابخانه عددی برای اجزای صنعتی) و RELEC (کتابخانه انرژی تجدیدپذیر در فضای ابری) را ارائه می‌دهد. این ابزارها امکان نمونه‌سازی مجازی و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی و ریزشبکه‌ها را از





طریق شبیه‌سازی ابری فراهم می‌کنند. فناوری اسیلیس با کاهش وابستگی به منابع فسیلی و مدیریت پسماندهای دفن‌شده، راهکاری نوآورانه برای بازیافت‌کنندگان زباله و مصرف‌کنندگان انرژی ارائه می‌دهد [۱۵].

در کنار فناوری‌های بهینه‌سازی تولید، دیجیتالی‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی نیز به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای افزایش شفافیت و پایداری در زنجیره‌های تأمین مورد توجه قرار گرفته است. ابزارهای دیجیتالی با ردیابی هوشمند، تطبیق با مقررات زیست‌محیطی و دیجیتالی‌سازی داده‌ها، از بروز تقلب در زنجیره‌های تأمین جلوگیری کرده و فرآیندهای تولید و توزیع را بهینه‌سازی می‌کنند [۱۶]. در این راستا، استارت‌آپ بریتانیایی «بیولجر»^۷ که در سال ۲۰۱۹ تأسیس شده، یک ابزار دیجیتالی برای ردیابی سوخت‌های زیستی پایدار از منبع تا مصرف‌کننده توسعه داده است. این نرم‌افزار به‌عنوان یک سیستم موازنه جرمی عمل کرده و با پایگاه داده سوخت‌های زیستی اتحادیه اروپا یکپارچه شده است تا فرآیند جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، ردیابی و اعتبارسنجی زباله‌های غذایی را تسهیل کند. بیولجر علاوه بر تطابق با استانداردهای اتحادیه اروپا، الزامات آژانس حفاظت از محیط‌زیست^۸ را نیز برآورده ساخته و با خودکارسازی فرآیندهای پیچیده زنجیره تأمین، به کشاورزان، رانندگان و شرکت‌های مدیریت زباله راهکاری شفاف و کارآمد ارائه می‌دهد [۱۵]. مطالعات همچنین نشان داده‌اند که استفاده از نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند سالانه ۱۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ دلار به ازای هر مگاوات صرفه‌جویی به همراه داشته باشد. به‌طور کلی، بهره‌گیری جامع از ابزارهای هوش مصنوعی در چرخه عمر پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر می‌تواند عملکرد کلی سیستم را بین ۲۵ تا ۴۰ درصد بهبود بخشد و صرفه‌جویی‌هایی در حدود ۱۰۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ دلار به ازای هر مگاوات نصب‌شده به دنبال داشته باشد [۱۳].

یک کاربرد عملی هوش مصنوعی در حوزه زیست‌توده، توسعه یک سیستم کنترل تطبیقی مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری ماشینی برای بهینه‌سازی فرآیند پیش‌پردازش مواد اولیه زیست‌توده است. پژوهشگران برنامه زیست‌توده آزمایشگاه ملی آیداهو^۹ در واحد توسعه فرایند^{۱۰} تسهیلات ملی زیست‌توده، سیستمی را راه‌اندازی کردند که با بهره‌گیری از حسگرهای رطوبت و سایر پارامترهای کلیدی، مدل‌های فرایندی و الگوریتم‌های پیش‌بینی، به‌صورت لحظه‌ای پارامترهای آسیاب^{۱۱}، متراکم‌سازی^{۱۲} و پلت‌سازی^{۱۳} را تنظیم می‌کند. این کنترل هوشمند قابلیت اطمینان تجهیزات پیش‌پردازش را بیش از ۵۰ درصد افزایش داد و در آزمایش‌های مقدماتی با مشارکت انسان در حلقه^{۱۴}، سامانه توانست ۹۷ درصد اطمینان عملیاتی را در ۹۰ درصد ظرفیت طراحی‌شده تجهیزات حفظ نماید؛ شایان ذکر است که متوسط نرخ بهره‌برداری کارخانه‌های سلولزی در مرحله راه‌اندازی تنها ۷ درصد گزارش شده بود. مدل توسعه‌یافته مبتنی بر داده‌های رطوبت و نرخ خوراک^{۱۵}، امکان پیش‌بینی دقیق «ظرفیت جریان»^{۱۶} و «پایداری عملکرد»^{۱۷} را فراهم آورد. پیاده‌سازی این سامانه هزینه‌های نیروی انسانی و تجهیزات را ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ دلار به ازای هر مگاوات نصب‌شده کاهش داد؛ همچنین خودکارسازی طراحی و نصب، زمان اجرای پروژه‌ها را ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش و از بزرگ‌سازی غیرضروری تجهیزات ۱۰ تا ۲۰ درصد جلوگیری می‌کند. بهینه‌سازی فرآیند پیش‌پردازش مواد اولیه زیست‌توده با کاهش اتلاف انرژی و ارتقای کارایی زنجیره تأمین، به کاهش انتشار کربن و بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر منجر شده و بهبودی ۲۵ تا ۴۰ درصدی در کارایی کلی این سیستم‌ها ثبت گردیده است. هم‌زمان، الگوریتم‌های نگهداری پیش‌بینی‌پذیر با تشخیص زودهنگام عیوب، زمان توقف ناخواسته را کاهش داده، طول عمر تجهیزات را افزایش و آلاینده‌های عملیاتی را به حداقل می‌رسانند. این نوآوری‌ها گامی مؤثر در تحقق هدف دفتر فناوری‌های زیست‌توده ایالات متحده برای دستیابی به هزینه معادل ۳ دلار به ازای هر گالن بنزین محسوب می‌شوند [۱۷]. این نمونه‌ها حاکی از آن هستند که با بهره‌گیری از هوش مصنوعی، شبیه‌سازی دیجیتالی و سیستم‌های ردیابی هوشمند، می‌توان چالش‌های موجود در صنعت زیست‌توده را کاهش داد و مسیر را برای توسعه پایدارتر انرژی‌های تجدیدپذیر هموار کرد.

۲-۲- سیستم اطلاعات مکانی و پیش‌بینی و مدیریت منابع زیست‌توده

سیستم اطلاعات مکانی به‌عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل مکان‌بنای منابع انرژی زیست‌توده می‌تواند نقش مهمی ایفا کند. این فناوری با بهره‌گیری از تحلیل‌های مکانی‌زمانی و داده‌های آماری، به برآورد پتانسیل انرژی زیست‌توده و تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی و توسعه به‌کارگیری انرژی کمک می‌کند. یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت زیست‌توده، بهینه‌سازی هزینه‌های جمع‌آوری و حمل‌ونقل است که مانعی برای توسعه اقتصادی این منبع انرژی محسوب می‌شود [۵]. سیستم اطلاعات مکانی از طریق پردازش داده‌های مکان‌مبنا و ارائه نقشه‌های توزیعی متغیرهای مختلف، امکان برآورد هزینه‌های تأمین زیست‌توده و بهینه‌سازی زنجیره تأمین



را فراهم می‌کند. علاوه بر این، پلتفرم‌های تحت WebGIS بستری برای انتشار اطلاعات، تحلیل داده‌های مکانی و برنامه‌ریزی انرژی یکپارچه در اختیار کاربران قرار می‌دهند [۱۸].

یکی از نمونه‌های موفق به‌کارگیری سیستم اطلاعات مکانی در تحلیل منابع زیست‌توده، اطلس زیست‌توده فنلاند است که به‌عنوان یک ابزار جامع برای پایش، ارزیابی و برنامه‌ریزی استفاده از زیست‌توده توسعه یافته است. این سامانه بیش از ۳۰۰ لایه داده‌ای را در مقیاس ۱ کیلومترمربع پوشش می‌دهد و اطلاعات دقیقی درباره کاربری اراضی، محصولات کشاورزی، زیست‌توده‌های جنگلی، دامداری و صنایع ارائه می‌دهد. از طریق این اطلس، می‌توان مقدار زیست‌توده را در یک منطقه خاص برآورد کرد و فرصت‌ها و محدودیت‌های بهره‌برداری از آن را تحلیل نمود. علاوه بر این، این ابزار امکان شناسایی مناطق دارای پتانسیل بالا برای تولید انرژی تجدیدپذیر، مدیریت بهینه زیست‌توده‌های قابل بازیافت و ارزیابی تنوع کاربری اراضی را فراهم می‌سازد. اطلس زیست‌توده فنلاند به‌عنوان یک پلتفرم کاربرپسند، حتی برای افرادی که تجربه‌ای در سیستم اطلاعات مکانی و تحلیل زیست‌توده ندارند، قابل استفاده است و به آن‌ها امکان تهیه نقشه‌های دقیق و گزارش‌های تصمیم‌گیری را اعطا می‌کند [۱۹]. این سامانه نمونه‌ای از کاربرد پیشرفته سیستم اطلاعات مکانی در مدیریت پایدار منابع زیستی و سیاست‌گذاری انرژی است که می‌تواند به‌عنوان الگویی برای سایر کشورها نیز مورد استفاده قرار گیرد.

سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو) نیز با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات مکانی به توسعه روشی نوین برای تخمین چگالی زیست‌توده پرداخته است. این روش بر اساس مدل‌سازی و ترکیب داده‌های مکانمند دیجیتالی مختلف، مانند نقشه‌های پوشش گیاهی، تراکم جمعیت، شرایط اقلیمی، خاک و توپوگرافی، به ارزیابی میزان زیست‌توده جنگل‌ها در مقیاس‌های وسیع مانند قاره‌ها می‌پردازد. هدف این مدل، گسترش داده‌های دقیق اما محدود در مناطق خاص به تخمین‌هایی در سطح ملی و منطقه‌ای است تا بتوان اطلاعات بهتری درباره منابع جنگلی و تغییرات آن‌ها به دست آورد. در این مدل، چگالی زیست‌توده جنگل‌ها از طریق یک رویکرد چندمرحله‌ای و با استفاده از نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات مکانی تحلیل شده است. ابتدا نقشه‌ای از پتانسیل زیست‌توده بر اساس شرایط اقلیمی، خاک و توپوگرافی تولید شده و سپس این نقشه با نقشه‌های پوشش جنگلی ترکیب شده است. پس از آن، تأثیر فعالیت‌های انسانی بر کاهش زیست‌توده جنگلی مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار، تراکم جمعیت است که بر اساس آن، نسبت تخریب زیست‌توده برای هر منطقه برآورد شده و با استفاده از مدل‌های آماری، میزان زیست‌توده واقعی در مقایسه با مقدار بالقوه آن تخمین زده شده است. نتایج حاصل از این مدل‌سازی در قاره‌های آفریقا و آسیا نشان می‌دهد که زیست‌توده واقعی جنگل‌ها به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مقدار بالقوه آن‌ها است. برای مثال، در جنگل‌های برخی کشورهای آسیایی مانند هند و بنگلادش، زیست‌توده واقعی تنها ۳۷٪ مقدار پتانسیل آن است، در کشورهایی مانند برونئی و کامبوج، این مقدار به بیش از ۶۰٪ می‌رسد [۲۰]. بنابراین فناوری سیستم اطلاعات مکانی نه‌تنها اطلاعاتی درباره وضعیت فعلی منابع جنگلی ارائه می‌دهد، بلکه می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی تغییرات آتی جنگل‌ها و تأثیرات فعالیت‌های انسانی بر آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. با بهبود کیفیت داده‌های ورودی، از جمله نقشه‌های پوشش گیاهی و اطلاعات خاک، دقت این مدل‌ها افزایش می‌یابد. این روش می‌تواند به سیاست‌گذاران و محققان در مدیریت پایدار جنگل‌ها و کاهش اثرات منفی تغییرات زیست‌محیطی کمک کند.

هزینه تأمین زیست‌توده می‌تواند بین ۴۰ تا ۷۰ درصد از کل هزینه تولید انرژی زیستی را شامل شود که عمدتاً به دلیل چگالی انرژی پایین و پراکندگی مکانی منابع است. استفاده از سیستم اطلاعات مکانی با تحلیل‌های زمانی و مکانی، امکان مکان‌یابی بهینه، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و برنامه‌ریزی راهبردی را فراهم می‌سازد. به‌عنوان نمونه، در یونان استفاده از سیستم اطلاعات مکانی باعث کاهش ۵۰۵ تا ۱۲۰۵ درصدی مسافت حمل‌ونقل و صرفه‌جویی زمانی ۳ تا ۱۷ درصد نسبت به مسیرهای سنتی شد [۲۱]. در شمال هلند نیز، با استفاده از ابزار GIS-BIOLOCO، بررسی دو سناریوی زنجیره تأمین با استفاده از منابع زیست‌توده‌ی مختلف (کاه و درخت بید) نشان داد که هزینه حمل‌ونقل برای کاه ۲۹۷۰۰ یورو و برای درخت بید ۴۵۶۰۰ یورو بود، درحالی‌که هزینه پیش‌پردازش بید ۲۴۳۲۱۰۰ یورو و برای کاه ۳۰۷۷۰۰ یورو گزارش شد؛ هزینه ذخیره‌سازی نیز برای کاه ۲۰۴۲۰۰ یورو و برای بید ۸۹۰۰۰ یورو بود. این نتایج نشان می‌دهد که تلفیق سیستم اطلاعات مکانی با مدل‌های بهینه‌سازی، ابزاری مؤثر برای کاهش هزینه‌ها، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در طراحی زنجیره تأمین انرژی زیستی محسوب می‌شود [۲۲].

در مطالعات و پروژه‌های متعدد دیگر در ایتالیا، پرتغال، چین و هند نیز، سامانه اطلاعات مکانی نقشی کلیدی در برنامه‌ریزی، مکان‌یابی و تحلیل اقتصادی پروژه‌های زیست‌توده ایفا کرده است. در ایتالیا، با استفاده از ماژول r.green در نرم‌افزار GRASS GIS، پتانسیل سالانه ۱۳۰۰ تن زیست‌توده محاسبه و با تحلیل تقاضای ۱۹۳۰۰ مگاوات‌ساعت در شعاع ۶۰۰ متری، ظرفیت بهینه نیروگاه ۱/۲





مگاوات تعیین شد و با تطبیق ظرفیت منابع و نیاز مصرف، از احداث نیروگاه بیش از حد ظرفیت جلوگیری کرد؛ تحلیل هزینه‌فایده نیز ارزش فعلی خالص مثبت تا ۹/۳ میلیون یورو را دربر داشت [۲۳]. در ماروان پرتغال، سیستم اطلاعات مکانی امکان شناسایی سالانه ۱۰۶۰۰ تن پسماند معادل ۱۰۶۰۰۰ گیگاژول انرژی را فراهم کرد و موجب صرفه‌جویی اقتصادی با جایگزینی سیستم گرمایش سوخت فسیلی هتل شد. در چین، ۵۰۵/۵ میلیون تن پسماند زراعی با قابلیت استحصال ۷/۴ اگراژول انرژی شناسایی شد. همچنین در هند، استفاده از داده‌های مکانی، هزینه جمع‌آوری زیست‌توده را به ۳/۹ دلار بر تن کاهش داد. این فناوری با بهینه‌سازی مسیر حمل‌ونقل، انتخاب مکان‌های مناسب برای نیروگاه‌ها و انجام تحلیل‌های مکانی‌زمانی دقیق، ابزار مؤثری برای کاهش هزینه‌ها، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارتقای تصمیم‌گیری در سطوح مختلف برنامه‌ریزی انرژی پایدار به‌شمار می‌آید [۲۴].

۲-۳- رویکردهای نوآورانه در تهیه پایدار مواد اولیه زیست‌توده

نوع ماده اولیه زیست‌توده تأثیر مستقیمی بر کمیت و کیفیت انرژی زیست‌توده تولید شده و هزینه‌های تولید انرژی دارد. این مواد از منابع مختلفی مانند پسماندهای کشاورزی، شهری، صنعتی یا محصولات اختصاصی کشت‌شده برای تولید انرژی تأمین می‌شوند و تفاوت‌های اساسی در ترکیب شیمیایی، محتوای خاکستر، چگالی، اندازه ذرات و رطوبت آن‌ها می‌تواند فرآیند تبدیل انرژی را تغییر داده و هزینه‌های عملیاتی را تحت تأثیر قرار دهد. استفاده از موادی که نیازمند پیش‌پردازش‌های پیچیده و پرهزینه هستند، منجر به افزایش هزینه‌ها می‌شود، اما موادی که خواص فیزیکی مناسب دارند می‌توانند هزینه‌های ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل را کاهش دهند و بازده بیشتری ارائه دهند [۶]. از سوی دیگر، گرچه مواد اولیه ارزان‌تری مانند پسماندها می‌توانند هزینه‌ها را کاهش دهند، اما ناهمگنی و کیفیت پایین‌تر آن‌ها ممکن است کارایی فرآیند تبدیل انرژی را مختل کرده و بهره‌وری را کاهش دهد. بنابراین، انتخاب بهینه ماده اولیه با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن، نه تنها برای بلندمدت هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه نقش مهمی در بهبود بازده تولید انرژی دارد [۲۵]. از این رو، نوآوری در نوع و کیفیت مواد اولیه زیست‌توده مورد توجه استارت‌آپ‌ها قرار گرفته است.

یکی از رویکردهای نوآورانه در این حوزه، زیست‌توده مبتنی بر ریزجلبک به‌عنوان یک منبع پایدار انرژی است که پتانسیل چشمگیری در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد [۲۶]. در این راستا، استارت‌آپ‌های نوآور متعددی با توسعه فناوری‌های پیشرفته به دنبال بهینه‌سازی تولید انرژی زیست‌توده از جلبک‌ها هستند. به‌عنوان نمونه، استارت‌آپ بریتانیایی «فیکوبلوم»^{۱۸} با استفاده از زیست‌شناسی سنتزی، فرآیند تولید روغن زیستی را متحول کرده است. این شرکت جلبک‌های مهندسی‌شده‌ای را توسعه داده که از قابلیت آزادسازی روغن زیستی در محیط برخورداری است. این ویژگی امکان استفاده چندباره از همان جلبک‌ها را فراهم کرده و هزینه‌های تولید را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. از آنجاکه جلبک‌ها تنها به نور خورشید، آب و هوا برای رشد نیاز دارند، این فناوری چرخه انتشار گازهای گلخانه‌ای و تولید سوخت را به هم پیوند می‌دهد و چرخه‌ای پایدار برای تولید سوخت‌های زیستی ایجاد می‌کند که به کاهش وابستگی بخش حمل‌ونقل به سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند [۲۷]. در همین راستا، استارت‌آپ آمریکایی «برایت‌ویو»^{۱۹} که در سال ۲۰۱۹ تأسیس شده است، با توسعه سیستم‌های فوتوبیوراکتور پیشرفته، از ریزجلبک‌ها برای تولید زیست‌توده و تبدیل آن به سوخت مایع کربن‌زدایی‌شده بهره می‌برد. این سیستم‌ها با استفاده از نورپردازی درون‌آبی^{۲۰} و سامانه‌های پاک‌سازی مداوم، علاوه بر افزایش مقیاس‌پذیری، نیاز به نگهداری را کاهش داده و آلودگی را به حداقل رسانده‌اند [۱۵].

رویکرد دیگر، بهره‌گیری از مواد اولیه غیرسنتی مانند ضایعات صنعتی، پسماندهای کشاورزی و محصولات جانبی فرآیندهای تولیدی است که می‌تواند ضمن افزایش بهره‌وری، اثرات زیست‌محیطی را نیز به حداقل برساند [۲۸]. فناوری‌های پالایش زیستی، با استفاده از فرآیندهای زیستی و شیمیایی، طیف گسترده‌ای از مواد اولیه غیرممتدول را به سوخت‌های زیستی تجدیدپذیر و مواد شیمیایی زیستی با ارزش‌افزوده بالا تبدیل کرده و به ایجاد زنجیره‌های تأمین پایدارتر در صنعت انرژی کمک می‌کنند. در همین راستا، استارت‌آپ سوئدی «ووشن‌بایوریفاینریز»^{۲۱}، که در سال ۲۰۲۲ تأسیس شده است، نمونه‌ای از این نوآوری را ارائه کرده است. این شرکت با ترکیب فناوری‌های پالایش زیستی با صنایع خمیر و کاغذ، پالایشگاه‌های نفت و کارخانه‌های پتروشیمی، از زیست‌توده‌های پایدار و کم‌ارزش به‌عنوان ماده اولیه برای تولید سوخت‌های زیستی پیشرفته و سوخت پایدار هوانوردی^{۲۲} استفاده می‌کند [۱۵]. این رویکرد نوآورانه بازدهی و بهره‌وری تولید را افزایش داده و زنجیره‌های تأمین پایدارتر و کم‌کربن‌تری را در صنعت انرژی ایجاد کرده است.





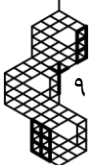
چنانکه عنوان شد سوخت‌های سنتی مانند زغال‌سنگ و هیزم به‌عنوان منابع اصلی انرژی در پخت‌وپز در بسیاری از نقاط جهان به کار می‌روند و علاوه بر انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای، منجر به جنگل‌زدایی و تخریب اکوسیستم‌های طبیعی می‌شوند. از این‌رو، فناوری‌های نوین به تولید سوخت‌های جایگزین، پایدار و تجدیدپذیر روی آورده‌اند. یکی از این رویکردهای نوآورانه، استفاده از گیاهان با رشد سریع برای تولید بریکت‌های زیستی است که بدون نیاز به قطع درختان، انرژی حرارتی لازم را تأمین می‌کنند. در این راستا، استارت‌آپ «دیواین‌بامبو»^{۲۳} در اوگاندا با بهره‌گیری از گیاه بامبو، بریکت‌هایی با ارزش حرارتی بالا و آلاینده‌ی پایین تولید می‌کند. گیاه بامبو به دلیل رشد سریع، نیاز کم به نگهداری و توانایی بالای جذب و ذخیره کربن، گزینه‌ای ایده‌آل برای تولید سوخت‌های زیستی محسوب می‌شود. همچنین این استارت‌آپ با آموزش و توانمندسازی گروه‌های زنان روستایی در فرآیند تولید بریکت‌ها، علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، فرصت‌های اقتصادی و بهبود معیشت جوامع محلی را نیز فراهم می‌آورد [۲۹].

از سوی دیگر، با افزایش جمعیت جهانی و به تبع آن افزایش تقاضای غذا، تولید پسماندهای غذایی نیز به‌طور چشمگیری رو به رشد است. بازیافت این پسماندها نه تنها به کنترل و مدیریت زباله‌ها کمک می‌کند، بلکه از طریق فناوری‌های زیست‌توده می‌تواند جایگزین‌های پاک برای سوخت‌های فسیلی ارائه دهد. به‌عنوان نمونه، مدیریت پسماند قهوه که به دلیل حجم بالای تولید و دفن ضایعات آن به معضل زیست‌محیطی تبدیل شده است، توسط استارت‌آپ لهستانی «اکوبین»^{۲۴} به شکلی نوآورانه مورد توجه قرار گرفته است. این شرکت با جمع‌آوری تفاله‌های قهوه از دفاتر کار، کافی‌شاپ‌ها و دیگر اماکن، آن‌ها را به بریکت‌های قهوه‌ای کربن‌خنثی تبدیل می‌کند که نسبت به چوب‌های سنتی زمان سوخت طولانی‌تری دارند و انرژی بیشتری تولید می‌کنند. محصول اکوبین علاوه بر ارائه جایگزینی سازگار با محیط‌زیست برای زغال‌سنگ در شومینه‌ها و اجاق‌ها، با کاهش مصرف منابع چوبی و انتشار کربن، می‌تواند نقش مهمی در بهره‌برداری پایدار از منابع طبیعی ایفا کند [۳۰].

از آنجایی که چوب یکی از منابع رایج سوخت در دیگ‌های بخار صنعتی است و مصرف گسترده آن می‌تواند به جنگل‌زدایی منجر شود، استفاده از ضایعات کشاورزی به‌عنوان جایگزینی پایدار برای چوب اهمیت ویژه‌ای دارد؛ در این راستا، استارت‌آپ کنیایی «ووما بیوفیول»^{۲۵} از پوسته‌های نیشکر برای تولید بریکت‌های زیستی بهره می‌برد که علاوه بر جایگزینی مؤثر برای هیزم سنتی، با تولید دو برابر گرما، مدت‌زمان سوختن بیشتر و انتشار دود و خاکستر کمتر، گزینه‌ای اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست برای تأمین انرژی صنعتی ارائه می‌دهند. این راهکار همچنین به کشاورزان امکان مدیریت بهینه ضایعات کشاورزی و تأمین انرژی پاک برای صنایع را اعطا می‌کند [۲۹]. در همین راستا، استارت‌آپ دانمارکی «گرین‌توایکس»^{۲۶} نیز رویکردی مشابه را با استفاده از فرآورده‌های تخمیر پیشرفته دنبال می‌کند. این شرکت با جمع‌آوری کاه و تبدیل آن به بریکت‌های فشرده و بیوگاز پرانرژی، ضمن بهینه‌سازی حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی، زمینه تولید بیومتان و سوخت‌های زیستی پیچیده‌تری مانند بیومتانول را فراهم کرده است. این فرآیند نه تنها انتشار کربن‌دی‌اکسید را کاهش می‌دهد، بلکه امکان جایگزینی گاز طبیعی در صنایع تولیدی و حمل‌ونقل سنگین را نیز فراهم می‌آورد [۱۵]. یکی دیگر از رویکردهای نوآورانه در این حوزه، استفاده از پیل‌های سوختی زیستی است که با بهره‌گیری از فرآورده‌های زیست‌کاتالیتی، امکان تبدیل مستقیم ترکیبات آلی به الکتریسیته را فراهم می‌کنند. این فناوری، به دلیل عدم نیاز به فلزات سنگین و استفاده از منابع تجدیدپذیر، گزینه‌ای پایدار برای تأمین انرژی دستگاه‌های کم‌مصرف به شمار می‌رود. توسعه سیستم‌های زیست‌سازگار در این حوزه می‌تواند نقش مهمی در کاهش ردپای کربنی ایفا کند. در همین راستا، استارت‌آپ فرانسوی «بیوانزما‌تیک»^{۲۷} با استفاده از پیل‌سوختی زیستی مبتنی بر کاغذ، موفق به تولید برق شده است. این سیستم، الکترودهای کربن، آنزیم‌ها و میکروسیال‌ها^{۲۸} را ترکیب می‌کند. آنزیم‌ها با استفاده از یک ماده کاغذی مینیاتوری^{۲۹}، گلوکز و اکسیژن را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. این فناوری برای کاربردهای کم‌مصرف مانند جمع‌آوری و انتقال داده‌های حسگر مناسب است. علاوه بر این، عدم استفاده از پلاستیک و فلز آن را به شکلی پایدار و غیر سمی از وسایل ذخیره انرژی تبدیل می‌کند [۲۷]. این نوآوری‌ها نشان‌دهنده ظرفیت بالای فناوری‌های زیستی در تولید انرژی پاک و کاهش ردپای کربنی در صنایع مختلف هستند.

۴-۲- فناوری‌های پردازش ماژولار و تولید انرژی زیست‌توده غیرمتمرکز و پایدار

افزایش تولید انرژی زیست‌توده از منابع پایدار برای همسویی با سناریوی خالص صفر امری ضروری است؛ اما تأمین مداوم و اقتصادی مواد اولیه برای احداث نیروگاه‌های زیست‌توده همچنان چالشی جدی محسوب می‌شود [۳۱]. در این فناوری، علاوه بر نیاز گسترده به زمین، رقابت بر سر منابع، افزایش قیمت مواد غذایی، کاهش تنوع زیستی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله این موارد است.





از طرفی، موفقیت اقتصادی پروژه‌های زیست‌توده به در دسترس بودن مواد اولیه‌ای با ویژگی‌های قابل پیش‌بینی، پایدار و کم‌هزینه بستگی دارد و ناهمگنی در ترکیب، هزینه‌های برداشت، حمل‌ونقل و نگهداری این مواد، فرآیند تولید انرژی زیست‌توده را پیچیده و گران می‌کند [۳۲]. به همین دلیل، بسیاری از تولیدکنندگان زیست‌توده به دلیل محدودیت‌های فنی و مالی، امکان احداث یا نگهداری تأسیسات پردازش انرژی زیست‌توده را ندارند. در پاسخ به این چالش، فناوری‌های پردازش ماژولار زیست‌توده توسعه یافته‌اند که امکان استقرار سریع و انعطاف‌پذیر را در محل تولید مواد اولیه فراهم می‌کنند [۳۳].

در همین راستا، استارت‌آپ آلمانی «سیبکن تکنولوژی»^{۳۰} یکی از شرکت‌های نوآور در حوزه پردازش زیست‌توده است که از فناوری‌های ماژولار برای بهینه‌سازی تولید انرژی استفاده می‌کند. این شرکت سیستم‌های نیمه‌متحرک کانتینری را توسعه داده است که امکان استقرار در مناطق مختلف را فراهم می‌کنند. ویژگی‌های کلیدی این فناوری شامل بازیابی یکپارچه حرارت و استفاده از اجزای کم‌مصرف است که موجب افزایش بهره‌وری انرژی می‌شود. این راهکار ماژولار قابلیت پردازش ضایعات صنایع چوب، کشاورزی و زباله‌های زیستی را دارد و از طریق تبدیل آن‌ها به انرژی زیست‌توده، وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد [۲۹].

از سوی دیگر، استارت‌آپ لهستانی «پولسکی بیوگاز»^{۳۱} که در سال ۲۰۲۲ تأسیس شده، بر توسعه نیروگاه‌های بیوگاز ماژولار تمرکز دارد. این واحدهای سیار بدون نیاز به عملیات ساخت‌وساز، قابلیت جابه‌جایی و تنظیم مقیاس دارند و با بهره‌گیری از هوش مصنوعی، فرآیندهای تولید بیوگاز از جمله هیدرولیز و متانوژن را بهینه‌سازی می‌کنند. طراحی ماژولار این سیستم‌ها امکان تعمیر و نگهداری آسان را فراهم کرده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهد [۱۵]. به‌طور مشابه، استارت‌آپ بریتانیایی بیوفکتوری^{۳۲} راهکار بایوفارم^{۳۳} را ارائه کرده است که یک سیستم هضم بی‌هوازی ماژولار برای مدیریت فضولات دامی و تولید بیوگاز است. این فناوری مقیاس‌پذیر به مزارع امکان می‌دهد با افزودن ماژول‌های بیشتر، ظرفیت تولید انرژی خود را افزایش دهند و در کنار آن، سلامت خاک را بهبود بخشند و هزینه‌های دفع فضولات را کاهش دهند [۳۰].

علاوه بر این، فناوری‌های نوین در تصفیه، انتقال و ردیابی بیوگاز و سوخت‌های زیستی نیز نقش مهمی در بهبود زنجیره تأمین محلی و کاهش چالش‌های زیرساختی حمل‌ونقل دارند. یکی از نوآوری‌های برجسته در این حوزه، مایع‌سازی بیوگاز در محل تولید است که با حذف وابستگی به تزریق مستقیم متان در شبکه‌های گازی، حمل‌ونقل کارآمدتری را امکان‌پذیر می‌سازد. این فناوری علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، استفاده از BioLNG و BioCO₂ را در بازارهای مختلف تسهیل می‌کند. BioCO₂ به عنوان محصول جانبی در صنایع متعدد کاربرد یافته و به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. هم‌چنین، BioLNG به عنوان یک سوخت تجدیدپذیر و کم‌کربن جایگزین سوخت‌های فسیلی در حمل‌ونقل و صنایع سنگین محسوب می‌شود [۳۴].

در همین راستا، استارت‌آپ فرانسوی «ساب‌لایم انرژی»^{۳۴} که در سال ۲۰۱۹ تأسیس شده است، رویکرد نوآورانه‌ای در مایع‌سازی بیوگاز ارائه داده است. این شرکت با توسعه فرآیند متان‌سازی مستقیم در مزارع و استفاده از حامل اختصاصی، بیوگاز را پس از تصفیه در محل مایع‌سازی کرده و سپس از طریق فرآیند کرایوژنیک به سطح خلوص بالا می‌رساند. در نتیجه، بیوگاز مایع‌شده به بازار عرضه شده و حامل مورد استفاده بازیافت و به مزرعه بازگردانده می‌شود، که این امر نیاز به سرمایه‌گذاری سنگین را کاهش و انتقال کارآمد بین محل تولید و بهره‌برداری را تسهیل می‌کند. با ترکیب این فناوری‌های پردازش ماژولار و مایع‌سازی بیوگاز، صنعت انرژی زیست‌توده قادر خواهد بود تا با رفع چالش‌های مربوط به زیرساخت‌های حمل‌ونقل، مسیر توسعه پایدار و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی را هموار کند [۱۵].

در مطالعه‌ای کاربردی در زمینه طراحی زنجیره تأمین زیست‌سوخت، با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی، ساختاری ترکیبی شامل واحدهای ثابت پیرولیز سریع^{۳۵}، واحدهای سیار پیرولیز سریع^{۳۶} و یک واحد پالایش نهایی^{۳۷} برای اراضی کم‌بازده اسکاتلند طراحی شد. در سناریوی پایه، یک واحد ثابت با ظرفیت ۲۹۱ تن در روز، یک واحد سیار با ظرفیت ۵۰ تن در روز و یک واحد پالایش نهایی با ظرفیت ۲۰۰ تن در روز به‌کار گرفته شدند. واحدهای ثابت تأسیسات ثابت تولید بیواوویل هستند و واحدهای سیار قابلیت جابه‌جایی فصلی دارند که می‌توانند بسته به محل و زمان در دسترس بودن زیست‌توده، به مناطق مختلف منتقل شوند و واحدهای پردازش نهایی وظیفه ارتقاء کیفیت محصول نهایی را بر عهده دارد. این پیکربندی منجر به کاهش چشمگیر نیاز به حمل‌ونقل بلندمدت شد، به‌طوری‌که هزینه جابه‌جایی واحدهای سیار تنها ۱/۱۷ درصد از کل هزینه حمل‌ونقل و ۰/۱۴ درصد از کل هزینه زنجیره تأمین را شامل شد. هم‌چنین بهره‌گیری از ذخیره‌سازی و برنامه‌ریزی فصلی موجب افزایش بهره‌برداری از منابع پراکنده و کاهش نیاز به ظرفیت



بالا در واحدهای ثابت گردید. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب هدفمند فناوری‌های غیرمتمرکز با زیرساخت‌های ثابت می‌تواند کارایی اقتصادی و زیست‌محیطی زنجیره تأمین را در مناطق با پراکندگی جغرافیایی بالا به‌طور محسوسی افزایش دهد [۳۵].

۲-۵- راهکارهای نوآورانه با فناوری پیرولیز

فناوری پیرولیز یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های تجزیه حرارتی زیست‌توده محسوب می‌شود که نقش مهمی در کاهش پسماندهای آلی و تولید سوخت‌های جایگزین دارد. این فناوری با اعمال حرارت بالا به مواد آلی در محیطی فاقد اکسیژن، موجب تجزیه آن‌ها و تولید گاز سنتزی، بیوجار و سوخت‌های مایع می‌شود. از آنجایی‌که فرآیند پیرولیز نیازی به سوخت‌های فسیلی ندارد و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به حداقل می‌رساند، به عنوان راهکاری پایدار و دوستدار محیط‌زیست در صنعت انرژی شناخته می‌شود. این فناوری علاوه بر کاهش حجم زباله، امکان بازیابی انرژی از پسماندهای زیستی و صنعتی را نیز فراهم می‌آورد [۳۶].

به‌عنوان مثال، استارت‌آپ استرالیایی «اینریم»^{۳۸} که در سال ۲۰۱۶ تأسیس شده است، از فناوری پیرولیز برای تجزیه حرارتی زباله‌های آلی بهره می‌برد. این شرکت با قابلیت پردازش طیف وسیعی از مواد اولیه، از جمله پسماندهای زیستی، سوخت مشتق‌شده از زباله و پلاستیک خودروهای فرسوده، راهکاری نوآورانه برای تبدیل محصولات جانبی کم‌ارزش به دیزل مصنوعی با استاندارد EN590 ارائه می‌دهد. علاوه بر این، گاز سنتزی تولیدشده در این فرآیند، به دلیل سطح پایین اکسیداسیون، ردپای کربنی ناچیزی دارد و به کاهش آلودگی زیست‌محیطی کمک می‌کند. این مدل فناورانه، علاوه بر تولید سوخت‌های جایگزین، امکان مدیریت بهینه پسماندهای شهری و صنعتی را نیز فراهم می‌سازد [۳۰].

در حوزه گسترش فناوری‌های ترموشیمیایی نیز، استارت‌آپ «فرانت‌لین‌ویست»^{۳۹} که در سال ۲۰۱۶ در ایالات متحده تأسیس شده است، رویکردی نوآورانه برای بازیابی زباله‌های غیرآلی و تولید سوخت زیستی توسعه داده است. سیستم این شرکت قادر است انواع پسماندهای غیرآلی از جمله پلاستیک، لاستیک و منسوجات را در کنار زباله‌های زیست‌توده‌ای مانند محصولات کشاورزی و زباله جامد شهری پردازش کند. محصولات خروجی این فرآیند شامل بیوجار، سوخت زیستی و گاز سنتزی است که می‌توانند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی در صنایع مختلف باشند. علاوه بر این، فناوری فرانت‌لین‌ویست به دلیل طراحی واحدهای قابل حمل، امکان پردازش زباله در محل را فراهم می‌کند و با نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه پایین، گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه برای مدیریت پسماند در جوامع کوچک و صنایع محسوب می‌شود [۳۰].

در همین راستا، استارت‌آپ آمریکایی «چارم‌اینداسترال»^{۴۰} از فرآیند پیرولیز سریع برای تجزیه زیست‌توده گیاهی و تبدیل آن به روغن زیستی استفاده می‌کند. این روغن زیستی که محتوای کربنی بالا و ارزش حرارتی پایینی دارد، در چاه‌های ذخیره‌سازی تحت نظارت سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا تزریق می‌شود تا به‌عنوان یک روش حذف کربن عمل کند. علاوه بر این، این استارت‌آپ با گرم کردن زیست‌توده تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در غیاب اکسیژن، گاز سنتزی حاصل را تصفیه کرده و هیدروژن کربن‌خنی تولید می‌کند. این فناوری نه تنها انتشار کربن را کاهش می‌دهد، بلکه با استفاده بهینه از ضایعات زیستی، یک منبع پایدار برای تولید هیدروژن فراهم کرده و مسیر جدیدی برای اقتصاد هیدروژن تجدیدپذیر باز می‌کند [۲۹].

۲-۶- فناوری‌های کاهش حجم لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

بیوگاز یک منبع انرژی سبز است که انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند متان، کربن‌دی‌اکسید، اکسید نیتروژن و سایر گازهای مضر را کاهش می‌دهد. علیرغم اینکه روش‌های مرسوم تولید بیوگاز به سرمایه‌گذاری‌های قابل‌توجهی نیاز دارند، اما بازدهی پایینی دارند و در بسیاری از موارد، عناصر شیمیایی ارزشمندی را بدون بازیافت باقی می‌گذارند. یکی از چالش‌های اصلی این فناوری، تولید حجم بالای لجن در بسیاری از تأسیسات تولید بیوگاز است که باعث افزایش هزینه‌های دفع و کاهش بهره‌وری اقتصادی این نیروگاه‌ها می‌شود [۳۷]. به همین دلیل، استارت‌آپ‌ها در تلاش‌اند تا با توسعه فناوری‌های نوین، کارایی نیروگاه‌های جدید و موجود تولید بیوگاز را بهبود ببخشند.

به‌عنوان مثال، استارت‌آپ ایتالیایی «کربورم»^{۴۱} فناوری جدیدی را برای تولید بیوگاز در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب توسعه داده است. این استارت‌آپ با استفاده از فناوری تبدیل هیدروترمال حجم لجن را کاهش می‌دهد؛ که این امر هزینه‌های حمل‌ونقل و دفع آن را کم کرده و بهره‌وری اقتصادی تصفیه‌خانه‌ها را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، فناوری HTC C700 این شرکت، زباله را به مایعی تبدیل می‌کند



که کارایی هاضم‌های بی‌هوازی را در تولید بیوگاز افزایش می‌دهد. ماژولار بودن سیستم C700 نیز امکان ادغام آسان آن را در تأسیسات تصفیه فاضلاب موجود فراهم می‌کند. این فناوری نه تنها میزان زباله تولیدی را کاهش می‌دهد، بلکه هم‌زمان تولید سوخت زیستی سبز را نیز افزایش می‌دهد و به اپراتورهای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در بهینه‌سازی فرآیندهای خود کمک می‌کند [۲۹].

در چارچوب پروژه اروپایی LIFE+ISR، دو فناوری نوآورانه پیش تصفیه لجن «افیرا»^{۴۲} و «ثمیستا»^{۴۳} در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری به‌منظور کاهش تولید لجن، افزایش تولید انرژی و کاهش ردپای کربنی مورد آزمایش و پیاده‌سازی قرار گرفتند. در تصفیه‌خانه تولیدی^{۴۴} در هلند، استفاده از فناوری افیرا، با جداسازی زمان ماند هیدرولیکی و جامدات، موجب بهبود عملکرد هاضم، کاهش حجم لجن و افزایش تولید بیوگاز شد. نتیجه اجرای کامل آن در بازه ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹، منجر به کاهش سالانه بیش از ۴۴۰۰ تن لجن خشک (بیش از ۳۰ درصد)، کاهش ۷۶۰ تن دی‌اکسید کربن (معادل ۴۸ درصد)، افزایش ۲۰/۲ تراژول انرژی در سال و کاهش ۴ تا ۵ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای شد. فناوری ثمیستا نیز که در سال ۲۰۱۹ در تصفیه‌خانه کرالینگسه‌ویر^{۴۵} در نزدیکی روتردام هلند نصب گردید، در دوره آزمایشی سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱، با کاهش ۶۱۵۰ تن لجن خشک (۱۸ درصد) و افزایش ۱۰/۲ تراژول انرژی (۲۰ درصد) همراه بود. هر دو سامانه با برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری حداقل ۱۵ ساله، در مسیر استفاده از لجن خارجی نیز قرار دارند و کاربرد آن‌ها به‌ویژه برای تصفیه‌خانه‌ها، مزارع بزرگ کشاورزی و واحدهای صنعتی تولیدکننده پسماند آلی قابل تعمیم است. این پروژه با بودجه کل ۳۲۹۸۰۰۵ یورو و مشارکت مالی ۱۶۳۴۱۶۱ یورویی اتحادیه اروپا اجرا شده و نمونه‌ای موفق از راهکارهای نوین در کاهش حجم لجن و بهبود عملکرد انرژی در بخش زیست‌توده به‌شمار می‌رود [۳۸].

در یک کاربرد عملی دیگر از کاهش لجن در بخش زیست‌توده، بهره‌گیری از فناوری‌های کاهش لجن در محل تولید نشان داده است که به‌طور چشمگیری موجب کاهش هزینه‌ها و کاهش ردپای کربنی می‌شود. این فناوری‌ها قادرند با استفاده از روش‌هایی مانند هیدرولیز آنزیمی^{۴۶} و دستکاری مبتنی بر بیوفیلیم^{۴۷} میزان لجن زائد در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را تا ۸۰ درصد کاهش دهند. به‌عنوان نمونه، فناوری ISRB که در چین پیاده‌سازی شده است، تنها ۵۷۶ تن معادل کربن دی‌اکسید تولید می‌کند، درحالی‌که روش‌های سنتی دفن و سوزاندن حدود ۷۰۲۳ تن معادل کربن دی‌اکسید منتشر می‌سازند. همچنین هزینه این فناوری به‌طور میانگین ۲۰ دلار به‌ازای هر تن است که در مقایسه با دفن (۲۷۶ دلار/تن) و هاضم بی‌هوازی (۹۵/۵ دلار/تن) بسیار مقرون به‌صرفه‌تر است. برای مثال، هیدرولیز آنزیمی به‌تنهایی کاهش ۳۰ تا ۵۰ درصدی لجن را فراهم کرده و ترکیب آن با تشکیل بیوفیلیم کاهش ۴۹/۶۵ درصدی را نیز به همراه داشته است. این فناوری‌ها از طریق کاهش مصرف انرژی، حذف مواد شیمیایی و بهبود تجزیه‌پذیری زیستی، گامی مؤثر در کربن‌زدایی و ارتقاء پایداری زیست‌محیطی تصفیه‌خانه‌ها محسوب می‌شوند [۳۹].

۲-۷- فناوری‌های جذب و ذخیره کربن برای تولید سوخت زیستی

فناوری‌های تبدیل کربن به سوخت پایدار می‌توانند نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و جایگزینی سوخت‌های فسیلی در بخش‌های مختلف صنعتی ایفا کنند. یکی از رویکردهای نوآورانه در این زمینه، تبدیل کربن دی‌اکسید به متانول الکترونیکی^{۴۸} است که به‌عنوان یک حامل انرژی پاک در صنایع شیمیایی و حمل‌ونقل کاربرد دارد. در این فرآیند، کربن دی‌اکسید جذب شده و پس از جداسازی تحت شرایط دما و فشار مناسب، با هیدروژن ترکیب شده و متانول پایدار تولید می‌شود. فرآیند خالص‌سازی نهایی نیز از طریق تقطیر انجام می‌گیرد و محصول نهایی می‌تواند به‌عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی مورد استفاده قرار گیرد [۴۰].

به‌عنوان نمونه، استارت‌آپ آلمانی «آیکودوس»^{۴۹} که در سال ۲۰۲۲ تأسیس شده است، فناوری پیشرفته‌ای برای تبدیل گازهای زائد صنعتی به متانول الکترونیکی توسعه داده است. این فناوری با جذب کربن دی‌اکسید و ترکیب آن با هیدروژن، سوختی کربن‌خنی تولید می‌کند که می‌تواند در صنایع حمل‌ونقل دریایی و شیمیایی جایگزین سوخت‌های فسیلی شود. فرآیند این شرکت شامل جذب کربن دی‌اکسید، جداسازی آن تحت شرایط بهینه و در نهایت خالص‌سازی متانول از طریق تقطیر است. این راهکار نه تنها به کاهش انتشار کربن کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به عنوان یک راه‌حل پایدار برای تأمین انرژی در بخش‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد [۱۵].

یکی از کاربردهای مؤثر جذب و ذخیره کربن در بخش زیست‌توده، ادغام این فناوری با فرایندهای پیشرفته گازسازی و تولید سوخت‌های زیستی است که مطابق گزارش IEA Bioenergy منجر به دو برابر شدن میزان کربن جذب‌شده از ۰/۶ به ۱/۱ میلیون تن در سال در یک نیروگاه FischerTropsch ۶۰۰ مگاواتی در نروژ و نتایج مشابه در تولید bioSNG در هلند شده است، به‌طوری‌که در



سناریوی FT هزینه تولید از ۲۴ به ۲۶/۴ یورو به ازای هر گیگاژول (و تا ۳۰/۸ یورو/گیگاژول با احتساب هزینه حمل کربن دی اکسید) و در سناریوی bioSNG از ۱۹/۶ به ۲۲/۳ یورو/گیگاژول (افزایش ۱۴ درصد، از جمله ۵/۳ درصد برای حمل و ذخیره کربن دی اکسید) رسیده است؛ با این حال، استفاده از مواد زیست توده مانند لجن فاضلاب و دریافت عوارض ورودی^{۵۰} می تواند هزینه تأمین مواد زیست توده را تا ۳۵ درصد کاهش دهد، در حالی که تکنیک های پیش احتراقی مانند جذب آمینی یک سوم کربن ورودی را بازیابی می کنند و سیستم جذب Selexol مصرف انرژی الکتریکی ۵۵ تا ۷۰ کیلووات ساعت بر تن کربن دی اکسید دارد. تحلیل اقتصادی نشان می دهد قیمت تعادلی کربن دی اکسید حدود ۳۰ یورو/تن و برای سودآوری bioSNG سرمایه گذاری باید زیر ۱۱۸۰ یورو به ازای هر کیلووات ورودی باشد؛ بنابراین، ترکیب CCS با فناوری های زیست توده نه تنها در کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه ای نقش دارد، بلکه با طراحی مناسب و بهره گیری از منابع جانبی، از نظر اقتصادی نیز قابلیت رقابت در مسیر رسیدن به اهداف اقلیمی جهانی را داراست [۴۱].

یکی دیگر از کاربردهای مؤثر جذب و ذخیره کربن در بخش زیست توده، به کارگیری فناوری در تبدیل نیروگاه های سیکل ترکیبی گاز طبیعی (NGCC) به سیستم های انرژی زیستی مبتنی بر بیومتان است که به صورت جامع از منظر فنی و اقتصادی ارزیابی شده است. نتایج نشان می دهد که هزینه سرمایه گذاری برای افزودن واحد جذب و ذخیره کربن در سناریوهای محتمل بین ۱۴۳۴ تا ۲۰۹۸ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه عملیاتی بین ۳۲ تا ۵۱ دلار به ازای هر مگاوات ساعت است و برای توجیه اقتصادی پروژه، قیمت کربن باید حداقل ۱۴۲ دلار بر تن باشد. اجرای این فناوری موجب کاهش ۹۰ درصدی انتشار کربن دی اکسید و دستیابی به انتشار خالص منفی می شود، اما نرخ نشت متان در زنجیره تأمین تأثیر بسزایی بر ارزش خالص فعلی^{۵۱} پروژه دارد؛ به طوری که افزایش نرخ نشت از ۱ درصد به ۵ درصد باعث کاهش ارزش خالص فعلی از منفی ۹۸۸ به منفی ۱۵۴۱ دلار به ازای هر کیلووات می گردد. بر این اساس، تحقق اقتصادی و زیست محیطی این فناوری، مستلزم کاهش هزینه های فناوریانه، سیاست گذاری مؤثر در قیمت گذاری کربن، و مدیریت دقیق انتشارهای جانبی است [۴۲].

۳- وضعیت کنونی، فرصت ها و چالش های زیست توده در ایران

ایران با برخورداری از منابع فراوان زیست توده، شرایط مناسبی برای توسعه این نوع انرژی دارد. به طور روزانه بیش از ۵۸ هزار تن پسماند عادی در کشور تولید می شود که حدود ۴۸ هزار تن آن مربوط به مناطق شهری و مابقی در روستاها تولید می گردد؛ این حجم چشمگیر از پسماند، تأمین پایدار مواد اولیه برای تولید انرژی زیست توده را ممکن می سازد [۴۴]. انواع منابع زیست توده در ایران شامل پسماندهای شهری، کشاورزی (نظیر بقایای محصولات زراعی و باغی)، دامی (مانند فضولات دام و طیور)، جنگلی و صنعتی، همچنین فاضلاب و لجن های تصفیه خانه ای است. از نظر جغرافیایی، ایران با جمعیتی نزدیک به ۸۵ میلیون نفر و داشتن ۱۱ اقلیم از ۱۳ اقلیم جهانی، تنوع آب و هوایی گسترده ای دارد که شرایط متفاوتی برای تولید انواع سوخت های زیستی فراهم می آورد [۴۵]. همچنین، موقعیت راهبردی ایران در همسایگی بازارهای بزرگ انرژی در خاورمیانه، خلیج فارس و آسیای مرکزی، فرصت های مناسبی برای صادرات فناوری و تجهیزات این حوزه ایجاد کرده است. توسعه انرژی زیست توده در ایران با تکیه بر اسناد بالادستی مانند چشم انداز ۲۰ ساله و اهداف برنامه ای حوزه انرژی های تجدیدپذیر دنبال می شود و حمایت هایی نظیر تضمین خرید برق، نرخ های تشویقی و تسهیلات مالی نیز از سوی نهادهایی مانند ساتبا در دستور کار قرار دارد [۴۶].

همچنین ایران تا کنون پروژه های محدودی در حوزه تولید برق از زیست توده راه اندازی کرده است. مهم ترین آن ها تصفیه خانه فاضلاب غرب تهران (فیروزبهرام) است که در فروردین ۱۴۰۲ به بهره برداری رسید و با ظرفیت اسمی ۷/۲ مگاوات بزرگ ترین نیروگاه زیست توده (بیوگازسوز) کشور و حتی غرب آسیا با ارزش ۷۰۰۰ میلیارد ریال محسوب می شود. این نیروگاه سالانه حدود ۵۰ میلیون کیلووات ساعت برق تولید می کند و از انتشار حدود ۲۲۰ هزار تن گاز کربن دی اکسید جلوگیری می کند که معادل بیش از ۳۰۰۰ هکتار جنگل برای جذب کربن دی اکسید است. پیش از این نیز در تصفیه خانه های جنوب تهران نیروگاه هایی با ظرفیت های ۵ مگاوات (در سال ۱۳۸۹) و ۲/۴ مگاوات (فروردین ۱۴۰۲) راه اندازی شده بود؛ با اضافه شدن نیروگاه ۷/۲ مگاواتی فیروزبهرام، مجموع ظرفیت زیست توده کشور به حدود ۲۱ مگاوات رسید [۴۷، ۴۸]. سایر پروژه های در حال اجرا شامل ۴ نیروگاه بیوگاز در شهرهای اصفهان، قم، کاشان و شیراز هستند که انتظار می رود تا پایان سال ۱۴۰۴ به بهره برداری برسند. همچنین دولت با مصوبه شورای اقتصاد، مجوز ساخت حدود ۲۰۰ مگاوات نیروگاه زیست توده در کلان شهرها و شهرهای ساحلی شمال کشور (بخش عمده ای بر مبنای پسماند) صادر کرده است [۴۶]. ایران با ظرفیت نصب شده حدود ۲۱ مگاوات تا پایان سال ۱۴۰۲، در مقایسه با کشورهای منطقه در جایگاه نسبتاً





پایین‌تری قرار دارد. ترکیه با ۲۱۲۲ مگاوات و امارات با ۵۷۱ مگاوات سرمایه‌گذاری گسترده‌تری در این حوزه داشته‌اند، و عربستان نیز دستیابی به ظرفیت ۳۰۰۰ مگاوات تا سال ۲۰۳۰ را هدف‌گذاری کرده است. جدول (۲) ظرفیت نصب‌شده زیست‌توده ایران و برخی کشورهای منطقه را ارائه می‌دهد.

جدول (۱): مقایسه روش‌های نوین و سنتی زیست‌توده

شاخص	روش‌های سنتی	روش‌های نوین (همراه با فناوری‌های پیشرفته)
راندمان تبدیل انرژی (%)	۲۵ درصد تا ۳۶ درصد گازساز چوب: ۳۱ درصد بستر سیال مدرن: ۳۶ درصد متوسط: ۳۰ درصد [۶]	• افزایش ۳ تا ۵ درصد با بهره‌گیری از دوقلوی دیجیتال [۴۳] • افزایش ۲۰ تا ۳۰ درصد بهره‌وری با بهره‌گیری از هوش مصنوعی [۱۲، ۱۳]
ضریب ظرفیت (%)	۵۰ درصد تا ۹۳ درصد منابع فصلی: ۵۰ تا ۶۰ درصد منابع دائم: ۶۰ تا ۹۳ درصد [۶]	• بهبود عملکرد تا ۹۷ درصد اطمینان عملیاتی در ۹۰ درصد ظرفیت طراحی‌شده تجهیزات با بهره‌گیری از هوش مصنوعی [۱۷]
هزینه سرمایه‌گذاری	۵۷۲ تا ۷۴۴۵ (دلار به ازای هر کیلووات ساعت) باگاس (هند): ۵۷۲ زباله شهری (چین): ۵۴۸۱ اروپا: ۷۴۴۵ تا [۶]	• صرفه‌جویی ۵۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ دلار به ازای هر مگاوات با بهره‌گیری از هوش مصنوعی [۱۳] • ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش زمان پروژه و هزینه نیروی انسانی با خودکارسازی فرآیندها با هوش مصنوعی • ۵ تا ۱۰ درصد کاهش هزینه‌ها با بهره‌گیری از دوقلوی دیجیتال [۴۳] • کاهش هزینه‌ها با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات مکانی در انتخاب مکان بهینه نیروگاه و کاهش هزینه‌های لجستیکی [۱۸]
هزینه تولید برق (\$/KWH)	۰/۰۴۰ تا ۰/۱۹۵ هند: ۰/۰۶۰ چین: ۰/۰۶۲ اروپا: ۰/۰۹۲ آمریکا: ۰/۱۰۱ [۶]	• افزایش ۱۰٪ تا ۱۴ درصد نسبت به حالت بدون کربن‌گیری با بهره‌گیری از روش جذب و ذخیره کربن [۴۱]
هزینه عملیات و نگهداری	۲ تا ۶ درصد در سال (هزینه ثابت) [۶]	• کاهش هزینه‌ها با بهره‌گیری از نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر اینترنت اشیا، دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی [۱۳] • افزایش جذب کربن از ۰/۶ به ۱/۱ (تقریباً دو برابر) با افزودن فناوری جذب و ذخیره کربن [۴۱]
کاهش کربن‌دی‌اکسید	—	• ۴۸ درصد کاهش کربن‌دی‌اکسید با بهره‌گیری از فناوری کاهش لجن تصفیه‌خانه‌ها [۳۸]

در سال‌های اخیر، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) به منظور حمایت از توسعه پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه نیروگاه‌های زیست‌توده، نرخ خرید تضمینی برق تولیدی این نیروگاه‌ها را افزایش داده است. بر اساس مصوبه‌های جدید، نرخ پایه خرید تضمینی برق برای نیروگاه‌های زیست‌توده بسته به نوع فناوری متفاوت است؛ به‌طوری‌که برای نیروگاه‌های لندفیل با ظرفیت ۱۰ مگاوات و کمتر، این نرخ ۱۳۵۰۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت با حداکثر دوره ۲۴ ماه تعیین شده و شامل ضریب کاهش نرخ در دوره‌های زمانی نمی‌شود. در مقابل، فرآیندهای بیوشیمیایی نظیر هاضم بی‌هوازی دارای نرخ ۲۱۸۰۰ ریال و فرآیندهای حرارتی مانند زباله‌سوزی، گازی‌سازی و پیرولیز بالاترین نرخ یعنی ۳۰۰۰۰ ریال و دوره مجاز ۳۰ ماه مشمول این طرح هستند، که نشان از تمرکز ساتبا بر تشویق فناوری‌های پیشرفته‌تر و کارآمدتر دارد [۴۹].

با وجود ظرفیت بالای ایران در منابع زیست‌توده، توسعه این حوزه با چالش‌های متعددی مواجه است؛ از جمله هزینه بالای سرمایه‌گذاری اولیه برای احداث نیروگاه‌های زیست‌توده، رقابت با سوخت‌های فسیلی ارزان، کمبود زیرساخت‌های لجستیکی برای جمع‌آوری و حمل‌ونقل مواد اولیه پراکنده (پسماندهای کشاورزی، دامی و شهری)، جذاب نبودن نرخ‌های تضمینی خرید برق برای سرمایه‌گذاران و تعویق در تدوین و اجرای کامل مقررات مربوط به پسماند و انرژی زیستی. همچنین، نیاز به فناوری‌های پیشرفته و



ضعف در هماهنگی بین نهادهای مسئول نظیر وزارت نیرو، جهاد کشاورزی، شهرداری‌ها و سازمان محیط‌زیست، از دیگر موانع جدی هستند [۴۴].

با این حال، استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند بخش عمده‌ای از این چالش‌ها را برطرف کند. نیروگاه‌های مازولار و قابل حمل می‌توانند مشکل پراکندگی منابع زیست‌توده را حل کرده و هزینه‌های لجستیکی را کاهش دهند. فناوری سیستم اطلاعات مکانی نیز در مکان‌یابی بهینه محل‌های پرپتانسیل و مقرون به صرفه برای احداث نیروگاه‌های زیست‌توده نقش کلیدی دارد. علاوه بر این، فناوری‌های نوین پردازش و بهره‌گیری از انواع غیرمتداول پسماند، تأمین پایدار مواد اولیه را تسهیل کرده و به مدیریت مؤثر زباله و تولید انرژی با راندمان بالاتر کمک می‌کنند. به کارگیری فناوری‌های کاهش لجن در تصفیه‌خانه‌ها می‌تواند هزینه‌های نگهداری و زمان خاموشی نیروگاه‌ها را کاهش دهد. هوش مصنوعی نیز به عنوان یک ابزار تحول‌آفرین، در پیش‌بینی تولید، بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه، مدیریت هوشمند تأمین مواد اولیه، و حتی در تحلیل داده‌های مکانی برای مکان‌یابی سایت‌های جدید بسیار مؤثر است. از سوی دیگر، هرچند فناوری‌های جذب و ذخیره کربن در حال حاضر هزینه‌بر و گران‌قیمت هستند، اما در کاهش اثرات زیست‌محیطی نیروگاه‌های زیست‌توده در آینده نقش مهمی خواهند داشت. بهره‌گیری از هر یک از این مجموعه راهکارهای فناورانه می‌تواند مسیر دستیابی به توسعه پایدار زیست‌توده را هموار سازد.

جدول (۲): ظرفیت نصب‌شده زیست‌توده ایران و برخی کشورهای منطقه

کشور	ظرفیت نصب‌شده زیست‌توده (MW)	نکات قابل توجه	منبع
ایران	۲۱≈	این مقدار تا پایان سال ۱۴۰۲ گزارش شده است.	[۴۷] [۴۸]
ترکیه	۲۱۲۲	در کشور ترکیه، مجموعاً ۳۸۵ نیروگاه برق زیست‌توده‌ای (اعم از دارای مجوز و بدون مجوز) فعال هستند. از این تعداد، ۶۳ نیروگاه بدون مجوز به تولید برق از زیست‌توده می‌پردازند. این ارقام تا ۲۶ نوامبر ۲۰۲۴ گزارش شده است.	[۵۰]
امارات متحده عربی	۵۷۱≈	شش مورد از هشت پروژه کلیدی انرژی از پسماند در منطقه خاورمیانه، در امارات قرار دارند و مجموع ظرفیت آن‌ها به ۵۷۱ مگاوات رسیده است. این پروژه‌ها در راستای هدف دولت امارات برای جلوگیری از انباشت ۷۵ درصد زباله‌ها در محل‌های دفن و تبدیل آن‌ها به انرژی طراحی شده‌اند. برای نمونه، نیروگاه انرژی از پسماند شارجه در سال اول فعالیت خود توانست برق مورد نیاز ۲۰۰۰ خانه را تأمین کند، ۹۰ درصد از پسماند شهری را منحرف کرده و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از محل‌های دفن را کاهش دهد. این اطلاعات مربوط به جولای ۲۰۲۳ است.	[۵۱]
عربستان سعودی	۳۰۰۰ (تا سال ۲۰۳۰)	برنامه‌ریزی برای توسعه آن با هدف دستیابی به ظرفیت ۳ گیگاوات برق از پسماند تا سال ۲۰۳۰ در دستور کار قرار گرفته است.	[۵۲]
مصر	۱≈	ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌های زیست‌توده در مصر در حال حاضر در مرحله توسعه و برنامه‌ریزی قرار دارد. اولین نیروگاه بیوگاز ۱ مگاواتی این کشور از فضولات دامی در سادات (۲۰۲۳) احداث شده است.	[۵۳]

۴- تحلیل چرخه عمر و بهینه‌سازی فناورانه در حوزه زیست‌توده

فناوری‌های زیست‌توده با وجود توانایی کاهش ۴۵ تا ۶۰ درصدی انتشار کربن دی‌اکسید نسبت به سوخت‌های فسیلی و تولید هیدروژن با انتشار ۱/۵ تا ۴/۷ کیلوگرم معادل کربن دی‌اکسید به ازای هر کیلوگرم، با چالش‌هایی مانند وابستگی به پسماندها، سوخت فسیلی و تغییر کاربری زمین مواجه‌اند که می‌تواند مزایای زیست‌محیطی را تضعیف کند. ابزارهای هوش مصنوعی و سیستم اطلاعات مکانی با پیش‌بینی دقیق ویژگی‌های مواد اولیه زیست‌توده و بهینه‌سازی مکانی و لجستیکی، هزینه حمل‌ونقل و هدررفت انرژی را کاهش داده و راندمان تبدیل را افزایش می‌دهند. فناوری‌های مازولار کوچک مقیاس (مثلاً واحدهای بایوگاز یا گازی‌سازی محلی با هزینه تولید ۰/۲۵ تا ۱/۲۰ دلار کانادا به ازای هر کیلووات‌ساعت) امکان تأمین انرژی پاک در مناطق دورافتاده را فراهم می‌کنند و امنیت انرژی را تقویت می‌نمایند [۵۴-۵۷].

از منظر اقتصادی، زیست‌توده جهانی در سال ۲۰۲۲ حدود ۳/۶ میلیون شغل ایجاد کرد و پیش‌بینی می‌شود تا ۲۰۳۰ به ۴ تا ۶ میلیون شغل برسد؛ در اروپا این بخش ۵۴ درصد از انرژی تجدیدپذیر را تأمین و از انتشار ۳۰۰ میلیون تن کربن دی‌اکسید جلوگیری نمود [۵۸].





۵۷]. فناوری‌های جذب و ذخیره کربن در زیست‌توده قادر به ایجاد انتشار منفی هستند، ولی سرمایه‌گذاری سنگین و مصرف ۱۰ تا ۳۰ درصد توان خروجی محدودیت‌هایی بر مقیاس‌پذیری آن وارد می‌کند [۵۵]. پیرولیز زیست‌توده، به‌ویژه در نسخه‌های تلفیقی با انرژی خورشیدی که کارایی کربنی تا ۹۰ درصد دارد، تولید هم‌زمان بیوجار، روغن و گاز زیستی را ممکن ساخته و تثبیت طولانی‌مدت کربن در خاک را افزایش می‌دهد [۵۹]. در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نیز هیدرولیز حرارتی پیش‌هضم بی‌هوازی افزایش ۸۰ درصد بیوگاز و کاهش ۴۵ درصد حجم لجن را فراهم آورده است [۶۰].

از دیدگاه اجتماعی، شفافیت، اطلاع‌رسانی و مشارکت ذی‌نفعان پذیرش عمومی زیست‌توده را ارتقاء می‌دهد. آگاهی کشاورزان از مزایای اقتصادی کشت گیاهان انرژی‌زا (مثلاً خیزران در هند) موجب افزایش مشارکت محلی شده است. با توجه به نگرانی‌های امنیت غذایی و جنگل‌زدایی، ادغام تحلیل چرخه‌عمر با سیاست‌گذاری چندسطحی و عدالت انرژی، همراه با حمایت از کشاورزان، ضروری است تا زیست‌توده به‌صورت عادلانه و پایدار در گذار جهانی به انرژی پاک نقش ایفا کند [۶۱].

۵- چالش‌ها و فرصت‌های دیجیتالی‌سازی در حوزه انرژی

دیجیتالی‌سازی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین اطلاعاتی و هوش مصنوعی در حوزه زیست‌توده یکی از پیشرفت‌های کلیدی برای مدیریت منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی است. با این حال، این روند با چالش‌های متعددی همراه است که نیازمند توجه ویژه و برنامه‌ریزی دقیق هستند. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، مدیریت پیچیدگی‌های ناشی از ترکیب فناوری‌های نوین با زیرساخت‌های قدیمی انرژی است. ورود فناوری‌های جدید، مانند هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تقاضای انرژی یا تحلیل داده‌ها به‌منظور بهینه‌سازی تولید انرژی زیست‌توده، به سیستم‌هایی نیاز دارد که بتوانند این داده‌ها را به‌صورت لحظه‌ای جمع‌آوری، پردازش و تحلیل کنند. این رویکردها نه تنها باعث کاهش هزینه‌ها در بلندمدت می‌شوند، بلکه به مدیریت بهتر منابع و کاهش هدررفت انرژی نیز کمک می‌کنند. یکی دیگر از چالش‌های مهم در حوزه زیست‌توده، دقت و به‌روزرسانی داده‌های مکانی و زیست‌محیطی در سامانه اطلاعات مکانی است. بسیاری از مدل‌های ارزیابی منابع زیست‌توده به داده‌های دقیق درباره پراکنش منابع، کاربری اراضی، شرایط خاک، دسترسی به زیرساخت‌های حمل‌ونقل و عوامل محیطی وابسته هستند. با این حال، داده‌های مکانی ممکن است ناقص، قدیمی یا ناسازگار با نیازهای تحلیلی باشند. این مسئله می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را کاهش داده و بر تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مکان‌یابی نیروگاه‌های زیست‌توده، برنامه‌ریزی زنجیره تأمین و ارزیابی پتانسیل انرژی تأثیر منفی بگذارد. برای رفع این چالش، به‌روزرسانی مداوم و ترکیب داده‌های مکانی با فناوری‌های سنجش‌ازدور، یادگیری ماشین و کلان‌داده‌ها می‌تواند به بهبود دقت مدل‌ها و به‌روزرسانی داده‌های مربوط به منابع زیست‌توده کمک کند.

همچنین، هزینه‌های بالای اولیه برای پیاده‌سازی فناوری‌های نوین، یکی از موانع اساسی به‌ویژه در کشورها یا سازمان‌هایی با منابع محدود است. اجرای پروژه‌های پایلوت و استفاده از حمایت‌های مالی دولتی و خصوصی می‌تواند ریسک‌های مرتبط با این چالش را کاهش دهد. از سوی دیگر، افزایش وابستگی زیرساخت‌های انرژی به شبکه‌های هوشمند، خطرات امنیت سایبری را نیز تشدید کرده است. به همین دلیل، استفاده از سیستم‌های امنیتی پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی و ایجاد همکاری‌های بین‌المللی برای مقابله با این تهدیدات، امری ضروری به نظر می‌رسد.

یکی دیگر از موانع کلیدی، مقاومت سازمان‌ها در برابر تغییرات دیجیتالی است. نگرانی از پیچیدگی‌های اجرایی یا آشنایی ناکافی با فناوری‌های جدید، پذیرش این تغییرات را دشوار می‌کند. ایجاد فرهنگ دیجیتال‌محور، برگزاری کارگاه‌های آموزشی و جلب حمایت مدیران ارشد، از جمله اقدامات مؤثری هستند که می‌توانند این مقاومت را کاهش دهند و روند تحول را تسریع بخشند.

علاوه بر این، فناوری‌های نوین دیجیتالی و هوش مصنوعی نقشی تعیین‌کننده در مقابله با تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند. این فناوری‌ها با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود مدیریت منابع زیست‌توده، به تحقق اهداف پایداری محیط‌زیست کمک می‌کنند. به‌عنوان مثال، الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند مصرف انرژی در صنایع و ساختمان‌ها را بهینه کنند؛ که نتیجه آن کاهش تقاضای انرژی و ردپای کربن است. همچنین، فناوری‌های پیشرفته امکان تحلیل دقیق‌تر داده‌های محیطی را فراهم کرده و به سیاست‌گذاری مؤثرتری در مقابله با تغییرات اقلیمی منجر می‌شوند.

درنهایت، موفقیت در دیجیتالی‌سازی حوزه زیست‌توده مستلزم دستیابی به تعادلی میان نوآوری و تداوم فعالیت‌های جاری است. ادغام تدریجی فناوری‌های نوین، همراه با سرمایه‌گذاری هدفمند و همکاری با متخصصان، می‌تواند زیرساخت‌های انرژی زیست‌توده را به‌سوی



پایداری سوق دهد. این تحولات، علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، راهکاری جامع برای مقابله با تغییرات اقلیمی و تحقق توسعه پایدار ارائه می‌دهند. دیجیتالی‌سازی و به‌کارگیری فناوری‌های نوین نه‌تنها مسیری برای حل چالش‌های انرژی است، بلکه فرصتی برای تقویت همکاری‌های جهانی در راستای اهداف مشترک زیست‌محیطی و اقتصادی فراهم می‌کند. تحقیقات آتی می‌توانند با تمرکز بر توسعه فناوری‌های نوآورانه و کاهش موانع موجود، نقشی کلیدی در تسریع این تحول داشته و جهان را به‌سوی آینده‌ای پایدارتر هدایت کنند. جدول (۳) چالش‌ها و موانع دیجیتالی‌سازی در این حوزه را به‌طور خلاصه بیان می‌دارد.

جدول (۳): دسته‌بندی چالش‌ها و موانع دیجیتالی‌سازی در حوزه زیست‌توده

دسته چالش	شرح چالش	پیامدها / تأثیرات	راهکارهای پیشنهادی
فنی و زیرساختی	عدم تطابق فناوری‌های نوین با محدودیت در بهره‌برداری کامل از زیرساخت‌های قدیمی انرژی	محدودیت در بهره‌برداری کامل از پتانسیل هوش مصنوعی و داده‌محور	ارتقاء زیرساخت‌ها، توسعه سیستم‌های یکپارچه جمع‌آوری و پردازش داده
داده‌ای و مکانی	دقت پایین، ناسازگاری یا به‌روزرسانی‌نشدن داده‌های مکانی و زیست‌محیطی	کاهش دقت تحلیل‌ها، تصمیم‌گیری نادرست در مکان‌یابی و برنامه‌ریزی منابع	استفاده از سنسورهای دقیق، یادگیری ماشین، کلان‌داده و پایگاه داده‌های باز و پویا
اقتصادی و مالی	هزینه‌های بالای اولیه برای پیاده‌سازی فناوری‌ها	محدودیت پذیرش در کشورهای با منابع محدود، کندی در توسعه فناوری	پروژه‌های پایلوت، حمایت مالی دولتی و خصوصی، ارائه مشوق‌ها
امنیت سایبری	افزایش وابستگی به شبکه‌های هوشمند و خطر حملات سایبری	تهدید پایداری سیستم و اطلاعات حیاتی انرژی	توسعه سامانه‌های امنیتی مبتنی بر هوش مصنوعی، همکاری‌های بین‌المللی امنیت سایبری
سازمانی و فرهنگی	مقاومت سازمان‌ها در برابر تحول دیجیتال	کندی روند پذیرش، اجرای ناقص یا عدم پیاده‌سازی فناوری‌ها	ارتقاء فرهنگ دیجیتال، آموزش نیروی انسانی، جلب حمایت مدیران ارشد
زیست‌محیطی و اقلیمی	نیاز به مقابله با تغییرات اقلیمی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای	تأثیرگذاری پایین فناوری‌ها در صورت عدم یکپارچگی با سیاست‌های اقلیمی	استفاده از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، تدوین سیاست‌های هم‌راستا با فناوری

۶- نتیجه‌گیری

فناوری‌های نوین می‌توانند نقشی مؤثر در تسریع تحول صنعت انرژی زیست‌توده و بهبود بهره‌وری آن ایفا کنند. با توجه به افزایش تقاضای جهانی برای انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، استفاده از زیست‌توده به‌عنوان یک منبع تجدیدپذیر و کم‌کربن، راهکاری کلیدی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار محسوب می‌شود. با این حال، چالش‌هایی همچون هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری، بهره‌وری پایین برخی فرایندها و پیچیدگی‌های لجستیکی، نیازمند نوآوری‌های فناورانه و سیاست‌های حمایتی مناسب است. در این راستا، در پژوهش حاضر، مجموعه‌ای از فناوری‌های نوظهور در زنجیره‌ی ارزش زیست‌توده مرور شد که شامل دیجیتالی‌سازی زنجیره تأمین، هوش مصنوعی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی تولید، سیستم‌های اطلاعات مکانی برای انتخاب محل و لجستیک، تأمین پایدار مواد اولیه زیست‌توده، پردازش ماژولار، پیرولیز سریع، روش‌های کاهش حجم لجن و فناوری‌های جذب و ذخیره‌ی کربن می‌شود. برای هر یک از این فناوری‌ها، نمونه‌های عملی از پیاده‌سازی در مقیاس نیمه‌صنعتی و صنعتی بررسی شد تا نشان داده شود چگونه ادغام این راهکارها، توانمندی مدیریت منابع، کنترل فرایندها و بهره‌وری انرژی را همزمان ارتقا می‌دهد.

تحلیل چرخه عمر فناوری‌های معرفی‌شده بیانگر کاهش معنی‌دار انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی فراگیر در مقایسه با فرایندهای سنتی است، به‌طوری‌که تلفیق دیجیتال‌سازی با پردازش‌های ماژولار، امکان بهینه‌سازی زمان‌بندی برداشت و توزیع مواد اولیه زیست‌توده را فراهم آورده و از اتلاف منابع جلوگیری می‌کند. بررسی وضعیت زیست‌توده در ایران و جایگاه منطقه‌ای آن نشان می‌دهد با اتکا به فناوری‌های بومی و انتقال تجارب بین‌المللی، می‌توان ضمن مدیریت صحیح ذخایر زیست‌توده، سهم قابل‌توجهی در تأمین انرژی تجدیدپذیر خاورمیانه ایفا نمود.

در پایان، چالش‌هایی نظیر نیاز به زیرساخت‌های داده‌ای یکپارچه، تضمین امنیت سایبری و مقاومت سازمانی در برابر تحول دیجیتال را شناسایی کردیم و پیشنهاد دادیم با سرمایه‌گذاری هدفمند در پروژه‌های پایلوت، آموزش مستمر نیروی انسانی و تدوین سیاست‌های





حمایتی، بتوان به تدریج موانع را رفع و فرصت‌های گسترده‌ای را برای تسریع گذار به اقتصاد کم‌کربن و پایدار ایجاد کرد. پیاده‌سازی این رویکردهای تلفیقی، مسیری روشن برای آینده‌ای سبز و خودکفای انرژی زیستی پیش‌روی کشور قرار می‌دهد.

مراجع

- [1] O. E. Olayokun, B. E. Anyaegbuna, A. O. Onokwai, D. I. Faola, I. O. Muslim, A. O. Eruobodo and A. O. Adiatu, "Review of Biomass as a Renewable Energy for Sustainable Environment," in *2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG)*, pp. 1–7, April 2024, doi: 10.1109/SEB4SDG60871.2024.10629775.
- [2] A. P. Srivastava and B. K. Pandey, "Biomass Energy: A Crucial Component in the Renewable Energy Mix," *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 12, pp. 1512–1515, October 2024, doi: 10.22214/ijraset.2024.64933.
- [3] International Energy Agency, "Bioenergy," IEA, <https://www.iea.org/energy-system/renewables/bioenergy>. (accessed Feb. 20, 2025).
- [4] Y. Cheng and H. Li, "Utilization and development of biomass energy," *Energy Science & Policy*, vol. 1, pp. 1–6, June 2023, doi: 10.61187/esp.v1i1.12.
- [5] M. Taylor, "Renewable Power Generation Cost Trends to 2022-Michael Taylor," IRENA, 2023.
- [6] M. Sedighi, P. Pourmoghaddam Qhazvini and M. Amidpour, "Algae-Powered Buildings: A Review of an Innovative, Sustainable Approach in the Built Environment," *Sustainability*, vol. 15, pp. 3729–3738, February 2023, doi: 10.3390/su15043729.
- [7] F. Nadeem, "airbubble playground and exhibition," *ecologicstudio*. <https://www.ecologicstudio.com/projects/airbubble-playground-and-exhibition> (accessed may 22, 2024).
- [8] T. Wang, T. Zhou, C. Li, Q. Song, M. Zhang and H. Yang, "Development Status and Prospects of Biomass Energy in China," *Energies*, vol. 17, pp. 4484–4495, September 2024, doi: 10.3390/en17174484.
- [9] E. Dang, "Comparative Analysis Study and Response Strategies in the Role of Biomass Energy in Redefining Global Influence: A Study on the United States and China," *Transactions on Economics, Business and Management Research*, vol. 9, pp. 67–73, August 2024, doi: 10.62051/73n2sm85.
- [10] M. Liao and Y. Yao, "Applications of artificial intelligence- based modeling for bioenergy systems: A review," *GCB Bioenergy*, vol. 13, pp. 774–802, March 2021, doi: 10.1111/gcbb.12816.
- [11] J. Alatalo, E. Heilimo, M. Rantonen, O. Väänänen and T. Sipola, "Reducing Emissions Using Artificial Intelligence in the Energy Sector: A Scoping Review," *Applied Sciences*, vol. 15, pp. 999–1012, January 2025, doi: 10.3390/app15020999.
- [12] K. Ukoba, K. O. Olatunji, E. Adeoye, T.-C. Jen and D. M. Madyira, "Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects," *Energy & Environment*, vol. 35, pp. 3833–3879, May 2024, doi: 10.1177/0958305X241256293.
- [13] M. R. Khan, "Digital Twin-Driven Optimization Of Bioenergy Production From Waste Materials," *Innovatech Engineering Journal*, vol. 1, pp. 187–204, November 2024, doi: 10.70937/itej.v1i01.19.
- [14] S. Wallner, "10 New Biofuel Companies to Watch," *Startus*. <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/new-biofuel-companies/> (accessed Feb. 25, 2025).
- [15] B. Ameh, "Digital tools and AI: Using technology to monitor carbon emissions and waste at each stage of the supply chain, enabling real-time adjustments for sustainability improvements," *International Journal of Science and Research Archive*, vol. 13, pp. 2741–2757, October 2024, doi: 10.30574/ijrsra.2024.13.1.1995.
- [16] U.S. Department of Energy, "EERE Success Story—Artificial Intelligence-Based Control System Improves Biomass Preprocessing," *energy.gov*. <https://www.energy.gov/eere/success-stories/articles/eere-success-story-artificial-intelligence-based-control-system> (accessed May 13, 2025).





- [17] L. Jayarathna, G. Kent, I. O'Hara and P. Hobson, "A Geographical Information System based framework to identify optimal location and size of biomass energy plants using single or multiple biomass types," *Applied Energy*, vol. 275, pp. 115398-115410, October 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115398.
- [18] E. Lehtonen, P. Anttila, K. Hakala, S. Luostarinen, S. Lehtoranta, K. Merilehto, H. Lehtinen, V. Mäntylä, A. Maharjan, O. Niemeläinen and M. Kolehmainen, "An open web-based GIS service for biomass data in Finland," *Environmental Modelling & Software*, vol. 176, pp. 105972-105983, May 2024, doi: 10.1016/j.envsoft.2024.105972.
- [19] G. Kindermann, I. McCallum, S. Fritz and M. Obersteiner, "A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics," *Silva Fennica*, vol. 42, pp. 387-396, 2008, doi: 10.14214/sf.244.
- [20] G. Charis, G. Danha and E. Muzenda, "A review of the application of GIS in biomass and solid waste supply chain optimization: Gaps and opportunities for developing nations," *Detritus*, vol. 6, pp. 96-106, 2019, doi: 10.31025/2611-4135/2019.13819.
- [21] I. R. Geijzendorffer, E. Annevelink, B. Elbersen, R. Smidt and R. M. De Mol, "Application of a GIS-Bioloco tool for the design and assessment of biomass delivery chains," in *16th European Biomass Conference & Exhibition*, 2008, pp. 640-643.
- [22] G. Grilli, G. Garegnani, F. Geri and M. Ciolli, "Cost-benefit Analysis with GIS: An Open Source Module for the Forest Bioenergy Sector," *Energy Procedia*, vol. 107, pp. 175-179, February 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.164.
- [23] A. Bharti, K. Paritosh, V. R. Mandla, A. Chawade and V. Vivekanand, "GIS Application for the Estimation of Bioenergy Potential from Agriculture Residues: An Overview," *Energies*, vol. 14, pp. 898-919, February 2021, doi: 10.3390/en14040898.
- [24] K. L. Kenney, W. A. Smith, G. L. Gresham and T. L. Westover, "Understanding biomass feedstock variability," *Biofuels*, vol. 4, pp. 111-127, January 2013, doi: full/10.4155/bfs.12.83.
- [25] W.-L. Chu, "Strategies to enhance production of microalgal biomass and lipids for biofuel feedstock," *European Journal of Phycology*, vol. 52, pp. 419-437, October 2017, doi: 10.1080/09670262.2017.1379100.
- [26] Startus-insights, "Explore the Top 10 Renewable Energy Trends in 2025," *Startus-insights*. <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/top-10-renewable-energy-trends-2022> (accessed Feb. 2, 2025).
- [27] J. A. Kumar, S. Sathish, D. Prabu, A. A. Renita, A. Saravanan, V. C. Deivayanai, M. Anish, J. Jayaprabakar, O. Baigenzhenov and A. Hosseini-Bandegharai, "Agricultural waste biomass for sustainable bioenergy production: Feedstock, characterization and pre-treatment methodologies," *Chemosphere*, vol. 331, pp. 138680-138699, August 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138680.
- [28] Startus-insights, "Discover 5 Top Bioenergy Solutions," *startus-insights*. <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/bioenergy-solutions/> (accessed Feb. 28, 2025).
- [29] Startus-insights, "Discover 5 Top Waste to Energy Startups," *Startus-insights*. <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/waste-to-energy-startups/> (accessed Feb. 28, 2025).
- [30] A. V. Umakanth, A. Datta, B. S. Reddy and S. Bardhan, "Biomass feedstocks for advanced biofuels: Sustainability and supply chain management," *Advanced biofuel technologies*, pp. 39-72, January 2022, doi: 10.1016/B978-0-323-88427-3.00023-4.
- [31] E. Searcy, J. R. Hess, J. Tumuluru, L. Ovard, D. J. Muth, E. Trømborg, M. Wild, M. Deutmeyer, L. Nikolaisen, T. Ranta and R. Hoefnagels, "Optimization of Biomass Transport and Logistics," *International Bioenergy Trade: History, status & outlook on securing sustainable bioenergy supply, demand and markets*, pp. 103-123, August 2013, doi: 10.1007/978-94-007-6982-3_5.
- [32] R. Blay-Roger, M. Saif, L. F. Bobadilla, T. Ramirez-Reina, M. A. Nawaz and J. A. Odriozola, "Embracing the sustainable horizons through bioenergy innovations: a path to a sustainable energy future," *Frontiers in Chemistry*, vol. 12, pp. 1416102-1416110, July 2024, doi: 10.3389/fchem.2024.1416102.





- [33] S. Chen, H. Feng, J. Zheng, J. Ye, Y. Song, H. Yang and M. Zhou, "Life Cycle Assessment and Economic Analysis of Biomass Energy Technology in China: A Brief Review," *Processes*, vol. 8, pp. 1112-1128, September 2020, doi: 10.3390/pr8091112.
- [34] F. Psathas, P. N. Georgiou and A. Rentizelas, "Optimizing the Design of a Biomass-to-Biofuel Supply Chain Network Using a Decentralized Processing Approach," *Energies*, vol. 15, pp. 5001-5020, July 2022, doi: 10.3390/en15145001.
- [35] A. B. Cuevas, D. E. Leiva-Candia and M. P. Dorado, "An Overview of Pyrolysis as Waste Treatment to Produce Eco-Energy," *Energies*, vol. 17, pp. 2852-2864, June 2024, doi: 10.3390/en17122852.
- [36] S. Periyasamy, S. Kavitha, J. Beula Isabel, T. Temesgen, J. Rajesh Banu and P. Sivashanmugam, "Biogas recovery from sludge," In *Clean energy and resource recovery*, 2022, pp. 381-394, doi: 10.1016/B978-0-323-90178-9.00008-1.
- [37] European Commission, "LIFE+ISR-Innovative sludge reduction," *European Commission*. <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE13-ENV-NL-000178/lifeisr-innovative-sludge-reduction> (accessed May 16, 2025).
- [38] Y. Chen, X. Jiang, M. Yang and Z. Wang, "Biotechnology revival: in situ sludge minimization in wastewater," *Frontiers in Microbiology*, vol. 16, pp. 1603215-1603236, May 2025, doi: 10.3389/fmicb.2025.1603215.
- [39] A. Peppas, S. Kottaridis, C. Politi and P. M. Angelopoulos, "Carbon Capture Utilisation and Storage in Extractive Industries for Methanol Production," *Eng*, vol. 4, pp. 480-506, February 2023, doi: 10.3390/eng4010029.
- [40] G. del Alamo, J. Sandquist, B. J. Vreugdenhil, G. A. Almansa and M. Carbo, "Implementation of bio-CCS in biofuels production," in *IEA Bioenergy Task*, 2015.
- [41] E. Sproul, J. Barlow and J. C. Quinn, "Time-Resolved Cost Analysis of Natural Gas Power Plant Conversion to Bioenergy with Carbon Capture and Storage to Support Net-Zero Emissions," *Environmental Science & Technology*, vol. 54, pp. 15338-15346, November 2020, doi: 10.1021/acs.est.0c04041.
- [42] L. Ba, F. Tangour, I. El Abbassi and R. Absi, "Analysis of Digital Twin Applications in Energy Efficiency: A Systematic Review," *Sustainability*, vol. 17, pp. 3560-3569, April 2025, doi: 10.3390/su17083560.
- [43] Bargh News, "550 MW Biomass Power Capacity and the Waste Management Solution in the Country," *Bargh News*. <https://barghnews.com/000FiX> (accessed: May 12, 2025).
- [44] Y. Hamzeh, A. Ashori, B. Mirzaei, A. Abdulkhani and M. Molaei, "Current and potential capabilities of biomass for green energy in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 4934-4938, December 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.060.
- [45] IRNA, "Prevention of 220 Tons of Greenhouse Gas Emissions by Constructing a Biogas Power Plant in West Tehran," *IRNA*. <https://irna.ir/xjQfP9> (accessed: May 11, 2025).
- [46] Bargh News, "Inauguration of the Largest Wastewater-Fueled Biogas Power Plant in West Asia in Iran," *Bargh News*. <https://barghnews.com/000Exa> (accessed: May 13, 2025).
- [47] Asr Iran, "How Much Electricity Is Generated from Wastewater?," *Asr Iran*. <https://asriran.com/003z19> (accessed: May 11, 2025).
- [48] SATBA, "Announcement of the Guaranteed Power Purchase Tariffs from Renewable Power Plants: Solar, Wind, Biomass, Small Hydro, and Expansion Turbines," *SATBA*, Tehran, 2023.
- [49] enerjiekonomisi, "Biyokütle santral sayısı 385'e çıktı," *enerjiekonomisi*. <https://www.enerjiekonomisi.com/biyokutle-santral-sayisi-385-e-cikti/32993/> (accessed May 17, 2025).
- [50] fastcompany, "UAE to expand its waste-to-energy biomass capacity," *fastcompany*. <https://fastcompany.com/news/uae-to-expand-its-waste-to-energy-biomass-capacity> (accessed July 3, 2023).
- [51] International Trade Administration, "Saudi arabia Country Commercial Guide," *International Trade*



Administration. <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/saudi-arabia-waste-management> (accessed May 15, 2025).

- [52] bioenergy-insight, "Egypt establishes its first biogas plant," *bioenergy-insight*. <https://www.bioenergy-news.com/news/egypt-establishes-its-first-biogas-plant> (accessed May 15, 2025).
- [53] C. Schilling, B. Mola-Yudego, M. Marinescu, C. Gaston and D. Röser, "Biomass Gasification as a Viable Alternative for Small-scaled Combined Heat and Power Technologies in Remote Communities in Canada," *BioEnergy Research*, vol. 18, pp. 19–30, January 2025, doi: 10.1007/s12155-024-10812-w.
- [54] M. Abegg, Z. Clulow, L. Nava and D. M. Reiner, "Expert insights into future trajectories: assessing cost reductions and scalability of carbon dioxide removal technologies," *Frontiers in Climate*, vol. 6, pp.1331901-1331911, May 2024, doi: 10.3389/fclim.2024.1331901.
- [55] A. C. C. Chang, H.-F. Chang, F.-J. Lin, K.-H. Lin and C.-H. Chen, "Biomass gasification for hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 14252–14260, 2011.
- [56] bioenergyeurope, "Exploring the EU's Bioenergy Landscape: Key to Competitiveness and Strategic Autonomy," *bioenergyeurope*. <https://bioenergyeurope.org/exploring-the-eu-bioenergy-landscape-key-to-competitiveness-and-strategic-autonomy> (accessed May 16, 2025).
- [57] INTERNATIONAL Energy AGENCY, "World Energy Employment 2023," *IEA*, 2023.
- [58] M. A. Amjed, F. Sobic, M. C. Romano, T. Faravelli and M. Binotti, "Techno-economic analysis of a solar-driven biomass pyrolysis plant for bio-oil and biochar production," *Sustainable Energy & Fuels*, vol. 8, pp. 4243–4262, May 2024, doi: 10.1039/D4SE00450G.
- [59] R. Ferrentino, M. Langone, L. Fiori and G. Andreottola, "Full-Scale Sewage Sludge Reduction Technologies: A Review with a Focus on Energy Consumption," *Water*, vol. 15, pp. 615-623, February 2023, doi: 10.3390/w15040615.
- [60] J. Singh and Y. Clough, "Challenges and opportunities to a sustainable bioenergy utilization in climate mitigation: a global perspective," *Frontiers in Sustainable Energy Policy*, vol. 3, pp. 1460370-1460382, November 2024, doi: 10.3389/fsuep.2024.1460370.
- [61] A. Krotov, G. Karuna, S. Bhattaru, D. Singh, A. Joshi, L. Bhalla, A. Singh, U. Khandelwal and M. Al-Farouni, "Life Cycle Assessment of Biofuels using Monte Carlo Simulation," *E3S Web of Conferences*, vol. 581, pp. 01002-01014, May 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202458101002.

زیر نویس‌ها

-
- ¹ The One World Trade Center
 - ² Airbubble
 - ³ Geospatial Information Systems (GIS)
 - ⁴ Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)
 - ⁵ Esyls
 - ⁶ HiPrBio
 - ⁷ BioLedger
 - ⁸ Environmental Protection Agency (EPA)
 - ⁹ Idaho National Laboratory (INL) Bioenergy Program
 - ¹⁰ Process Development Unit (PDU)
 - ¹¹ Milling
 - ¹² Densification
 - ¹³ Pelletizing
 - ¹⁴ Human-in-the-Loop
 - ¹⁵ Feed Rate
 - ¹⁶ Throughput
 - ¹⁷ Reliability
 - ¹⁸ Phycobloom



- 19 BrightWave
- 20 internal illumination
- 21 Votion Biorefineries
- 22 Sustainable Aviation Fuel (SAF)
- 23 Divine Bambooh
- 24 Ecobean
- 25 Vuma Biofuels
- 26 Green2x
- 27 Bioenzematic
- 28 Microfluidics
- 29 Miniature Paper
- 30 CEBCON Technologies
- 31 Polski Biogaz
- 32 BioFactory
- 33 BioFarm
- 34 SUBLIME Energie
- 35 Fixed Fast Pyrolysis units (FFP)
- 36 Mobile Fast Pyrolysis units (MFP)
- 37 Final Upgrading unit - FU
- 38 InRim
- 39 Frontline Waste
- 40 Charm Industrial
- 41 CarboREM
- 42 Ephyra
- 43 Themista
- 44 Tollebeek WWTP
- 45 Kralingseveer WWTP
- 46 Enzymatic hydrolysis
- 47 Biofilm-based manipulation
- 48 e-methanol
- 49 ICODOS
- 50 Gate fee
- 51 Net Present Value (NPV)

