ISSN:

مجله علمی نوآوری و تحقیق در مهندسی مکانیک

جلد ۱، شماره ۱، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه: ۱۸۷ تا ۲۰۶

مجله علمی مهندسی مکانیک

ارزیابی یک مدل یکپارچه‌ی نیروگاه زیست‌توده با سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت و جذب کربن (BECCS): تحلیل فنی-اقتصادی-زیست‌محیطی

علیرضا محمودی فرد*[۱]، سید محمدرضا حسینی علی آباد[۲]، کیوان فاضلی[۳]

[۱] پسادکترای آینده‌پژوهی و مدرس دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران، alireza۱۰.m۱۰@gmail.com

[۲] فوق دکتری مدیریت بازرگانی-مدیریت استراتژیک، دانشگاه بین‌المللی نورث‌وست ارمنستان و استاد دانشگاه های ایران، ارمنستان و ترکیه، info@confnashr.ir

[۳] کارشناس و متخصص سابق کنترل کیفیت شرکت های سایپا و پارس خودرو

ISSN

چکیده

نیروگاه‌های زیست‌توده با وجود پتانسیل بالای تأمین انرژی تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی‌پذیر، با چالش‌های عمده‌ای در زمینه‌ی هزینه‌های لجستیک سوخت، ناهمگونی کیفیت مواد اولیه و رقابت‌پذیری اقتصادی مواجه هستند. این پژوهش با هدف غلبه‌بر این چالش‌ها از طریق ارائه‌ی یک مدل توسعه‌ی یکپارچه و نوآورانه انجام شده است. مدل پیشنهادی بر سه پایه‌ی اصلی استوار است: بهینه‌سازی زنجیره تأمین منطقه‌ای زیست‌توده، استفاده از فناوری گازی‌سازی بستر سیال در یک سیکل تولید همزمان برق و حرارت (CHP)، و یکپارچه‌سازی سیستم جذب و ذخیره‌سازی کربن (BECCS). شبیه‌سازی‌های ترمودینامیکی و تحلیل‌های اقتصادی صورت‌گرفته نشان می‌دهد که این مدل، در مقایسه با نیروگاه‌های متعارف احتراق مستقیم، قادر است ضمن دستیابی به راندمان کلی انرژی بالای ۸۵ درصد، به انتشار خالص کربن منفی دست یابد. تحلیل چرخه‌ی حیات (LCA) نیز کاهش قابل‌توجهی در پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) را برای این مدل تأیید می‌کند. با این حال، تحلیل حساسیت اقتصادی حاکی از وابستگی قوی توجیه‌پذیری پروژه به قیمت سوخت، نرخ تنزیل و به‌ویژه مشوق‌های قیمت کربن است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تحقق پتانسیل کامل نیروگاه‌های زیست‌توده در گذار انرژی، نیازمند اتخاذ رویکردی کل‌نگر است که بهبود فناوری را با طراحی هوشمندانه‌ی زنجیره تأمین و چارچوب‌های سیاستی حمایتی و پایدار ترکیب نماید.

کلمات کلیدی

نیروگاه زیست‌توده، گازی‌سازی، تولید همزمان برق و حرارت، جذب و ذخیره‌سازی کربن، تحلیل چرخه حیات، بهینه‌سازی زنجیره تأمین، اقتصاد انرژی، انرژی تجدیدپذیر

مجله علمی مهندسی مکانیک
ISSN: mechanical-eng.ir

ارزیابی یک مدل یکپارچه‌ی نیروگاه زیست‌توده با سیستم تولید همزمان برق و حرارت و جذب کربن (BECCS): تحلیل فنی-اقتصادی-زیست‌محیطی

علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

مقدمه

افزایش شتابان تقاضای جهانی برای انرژی در کنار نگرانی‌های فزاینده‌ی زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی، جست‌وجو برای جایگزین‌های پایدار و کم‌کربن در برابر سوخت‌های فسیلی را به یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است. در این میان، انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان ستون فقرات گذار انرژی شناخته می‌شوند (IPCC, ۲۰۲۲). در حالی که فناوری‌هایی مانند خورشیدی و بادی به‌طور فزاینده‌ای به بلوغ و رقابت‌پذیری اقتصادی رسیده‌اند، یکی از چالش‌های پایدار آن‌ها، متناوب بودن (intermittency) و وابستگی به شرایط جوی است که نیاز به راه‌حل‌های مکمل برای تضمین پایداری شبکه را پررنگ می‌سازد (Lund et al., ۲۰۱۷). در این بستر، نیروگاه‌های زیست‌توده (Biomass Power Plants) به‌عنوان منبعی تجدیدپذیر با قابلیت تولید پایه‌ای (baseload) و برنامه‌ریزی‌پذیر، موقعیتی منحصربه‌فرد و راهبردی پیدا می‌کنند. زیست‌توده، به مواد آلی مشتق‌شده از گیاهان و موجودات زنده اطلاق می‌شود که می‌تواند به‌صورت مستقیم (از طریق احتراق) یا پس از فرآوری (تبدیل به بیوگاز، بیواتانول یا بیودیزل) به انرژی مفید تبدیل شود. جذابیت کلیدی این منبع، چرخه‌ی تقریباً خنثی کربن آن است؛ چرا که دی‌اکسیدکربن منتشرشده در حین احتراق، معادل مقداری است که گیاه در طول رشد خود از اتمسفر جذب کرده است (McKendry, ۲۰۰۲). با این حال، این مزیت در گرو مدیریت پایدار منابع زیست‌توده و جلوگیری از تغییر کاربری غیراصولی زمین است. نیروگاه‌های زیست‌توده مدرن، دیگر محدود به سوزاندن چوب به‌صورت سنتی نیستند، بلکه طیف وسیعی از فناوری‌های تبدیل ترموشیمیایی (مانند گازی‌سازی، پیرولیز)، زیست‌شیمیایی (مانند هضم بی‌هوازی، تخمیر) و فناوری‌های ترکیبی (هیبرید) را در برمی‌گیرند که هرکدام برای نوع خاصی از مواد اولیه (بیومس) بهینه‌سازی شده‌اند (Basu, ۲۰۱۸). با وجود پتانسیل بالا و مزایای شناخته‌شده، توسعه‌ی گسترده‌ی نیروگاه‌های زیست‌توده با موانع و چالش‌های متعددی مواجه است. این چالش‌ها شامل پراکندگی جغرافیایی و چگالی انرژی نسبتاً پایین زیست‌توده (که هزینه‌های لجستیک و جمع‌آوری را افزایش می‌دهد)، ناهمگونی ترکیب شیمیایی مواد اولیه (موجب پیچیدگی در طراحی و بهره‌برداری از فرآیند می‌شود)، مسائل مربوط به رقابت با کاربری زمین برای تولید غذا (بحث غذا در برابر سوخت)، و همچنین نگرانی‌های مربوط به انتشار آلاینده‌های محلی مانند NOx و ذرات معلق در صورت عدم کنترل مناسب می‌باشد (Rentizelas et al., ۲۰۰۹؛ Williams et al., ۲۰۱۶). بنابراین، پژوهش‌های معاصر در این حوزه، دیگر صرفاً بر اثبات امکان‌پذیری متمرکز نبوده، بلکه در جست‌وجوی راهکارهای نوآورانه برای افزایش کارایی تبدیل انرژی، کاهش هزینه‌های تمام‌شده، بهبود پایداری چرخه‌ی حیات، و یکپارچه‌سازی هوشمندانه با دیگر سیستم‌های انرژی هستند. این مقاله با درک این ضرورت، به بررسی یک رویکرد نوآورانه در طراحی مفهومی نیروگاه زیست‌توده می‌پردازد که هدف آن، افزایش چشمگیر راندمان و انعطاف‌پذیری از طریق ترکیب بهینه‌شده‌ی فناوری گازی‌سازی زیست‌توده در بستر بستر سیال با یک سیکل ترکیبی پیشرفته و یک سیستم جذب و ذخیره‌سازی کربن (BECCS) در مقیاس کوچک است. چنین طراحی یکپارچه‌ای نه‌تنها می‌تواند ضریب ظرفیت و قابلیت اطمینان نیروگاه را افزایش دهد، بلکه با تولید همزمان برق، حرارت و حتی سوخت‌های زیستی مایع (از طریق سنتز فیشر-تروپش)، امکان ارائه‌ی خدمات چندگانه و تطبیق با نیازهای متنوع انرژی‌ی محلی را فراهم می‌سازد.

بیان مسأله

با وجود پتانسیل نظری نیروگاه‌های زیست‌توده به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی‌پذیر برای کمک به امنیت انرژی و کاهش انتشار کربن، شکاف قابل‌توجهی بین پتانسیل فنی و عملکرد اقتصادی-زیست‌محیطی واقعی آن‌ها در مقیاس وسیع وجود

دارد. داده‌های عملیاتی نشان می‌دهد که چالش‌های ساختاری مانند پراکندگی منابع و هزینه‌های لجستیک بالا، ناهمگونی کیفیت سوخت، رقابت با کاربری زمین و انتشار آلاینده‌های محلی، به‌طور جدی بازده کلی، قابلیت اطمینان و رقابت‌پذیری این نیروگاه‌ها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Rentizelas et al., ۲۰۰۹; Williams et al., ۲۰۱۶). راه‌حل‌های متعارف، عمدتاً معطوف به بهبود جزءبه‌جزء فناوری‌های تبدیل (مانند بویلر یا گازی‌ساز) بوده و کمتر به رویکردی یکپارچه و سیستماتیک که کل زنجیره ارزش از تأمین سوخت تا تولید انرژی و مدیریت پسماند را به‌صورت بهینه‌شده‌ی هماهنگ مدنظر قرار دهد، پرداخته‌اند. بنابراین، مسأله‌ی اصلی این پژوهش، طراحی و ارزیابی یک مدل توسعه‌ی نوآورانه برای نیروگاه‌های زیست‌توده است که بتواند با کاهش اثرات محدودیت‌های کلیدی، پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی آن‌ها را به‌طور همزمان و در چارچوب یک سیستم انرژی مدرن ارتقاء بخشد.

اهداف پژوهش

هدف اصلی: طراحی و ارائه‌ی یک مدل مفهومی یکپارچه و کم‌کربن برای نیروگاه زیست‌توده با محوریت فناوری گازی‌سازی و تولید همزمان برق، حرارت و کربن منفی (BECCS) و تحلیل فنی-اقتصادی-زیست‌محیطی آن در مقایسه با طرح‌های متعارف.

اهداف فرعی:

۱. بررسی مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین منطقه‌ای برای تأمین پایدار زیست‌توده از منابع مختلف (ضایعات کشاورزی، جنگلی و شهری) با حداقل هزینه و اثرات جانبی.

۲. بررسی طراحی مفهومی یک نیروگاه چرخه‌ی ترکیبی انعطاف‌پذیر مبتنی‌بر گازی‌سازی بستر سیال با قابلیت کار با سوخت‌های ترکیبی و مجهز به سیستم جذب کربن پس از احتراق.

۳. شبیه‌سازی ترمودینامیکی و بررسی پتانسیل افزایش راندمان از طریق یکپارچه‌سازی با منابع انرژی تجدیدپذیر متناوب (مانند خورشیدی حرارتی) در یک سامانه‌ی هیبرید.

۴. بررسی انجام تحلیل چرخه‌ی حیات پیشرفته (LCA) برای ارزیابی ردپای کربن و دیگر تأثیرات زیست‌محیطی مدل پیشنهادی در مقایسه با سناریوهای مرجع.

۵. تحلیل اقتصادی (محاسبه‌ی LCOE و NPV) تحت‌سناریوهای مختلف قیمت سوخت، کربن و سیاست‌های حمایتی و شناسایی نقاط سربه‌سر.

سؤالات پژوهش

سؤال اصلی: آیا مدل یکپارچه‌ی پیشنهادی نیروگاه زیست‌توده (ترکیب زنجیره تأمین بهینه‌شده، گازی‌سازی CHP و BECCS) می‌تواند در مقایسه با یک نیروگاه زیست‌توده‌ی متعارف احتراق مستقیم، هزینه‌ی تولید برق رقابتی‌تری را همراه با انتشار خالص کربن منفی (Negative Net Emissions) ارائه دهد؟

سؤالات فرعی:

۱. چگونه می‌توان با بهینه‌سازی ترکیب منابع مختلف زیست‌توده در یک منطقه، هزینه‌ی میانگین تأمین سوخت را در عین حفظ پایداری اکولوژیک، به‌حداقل رساند؟

۲. یکپارچه‌سازی یک میدان کلکتور خورشیدی حرارتی برای پیش‌گرمایش سیالات در فرآیند گازی‌سازی یا چرخه‌ی بخار، تا چه حد می‌تواند راندمان کلی سالانه‌ی نیروگاه و ضریب بهره‌برداری آن را افزایش دهد؟

۳. سهم نسبی بخش‌های مختلف مدل پیشنهادی (هزینه‌های سرمایه‌گذاری فناوری BECCS، هزینه‌های عملیاتی لجستیک، درآمدهای حاصل از فروش برق، حرارت و اعتبار کربن) در اقتصاد کلی پروژه چگونه است؟

۴. تحلیل حساسیت عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی مدل، نسبت به تغییرات کلیدی همچون قیمت سوخت، نرخ تنزیل، قیمت کربن و بازده جذب کربن چگونه است؟

۵. در مقایسه‌ی چرخه‌ی حیات، مدل پیشنهادی در شاخص‌هایی مانند پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)، اسیدی‌سازی (AP) و یوتریفیکاسیون (EP) چه مزیت یا چالشی نسبت به نیروگاه گاز طبیعی ترکیبی با CCS نشان می‌دهد؟

متن اصلی

نیروگاه‌های زیست‌توده مدرن بر پایه‌ی طیف متنوعی از فناوری‌های تبدیل، با انتخاب فناوری به‌طور مستقیم وابسته به مشخصات ماده‌ی اولیه (نظیر رطوبت، محتوای خاکستر و ارزش حرارتی) و محصول نهایی مطلوب (برق، حرارت، سوخت گازی یا مایع) است. احتراق مستقیم (Direct Combustion) متداول‌ترین و بالغ‌ترین فناوری است که در آن بیومس خشک به‌طور مستقیم سوزانده شده و حرارت تولیدی برای تولید بخار و چرخاندن توربین بخار استفاده می‌شود. راندمان الکتریکی این نیروگاه‌ها معمولاً بین ۲۰ تا ۴۰ درصد است (Mckendry, ۲۰۰۲). برای افزایش راندمان کلی، سیستم‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP) به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که راندمان کلی انرژی را تا ۸۵ درصد نیز افزایش می‌دهند (Liu et al., ۲۰۱۷). فناوری پیشرفته‌تر، گازی‌سازی (Gasification) است که طی آن بیومس در یک محیط با اکسیژن محدود و در دمای بالا (معمولاً ۱۲۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) به یک گاز ترکیبی (Syngas) غنی از CO و H_2 تبدیل می‌شود. این گاز سنتز را می‌توان پس از پالایش، در یک موتور احتراق داخلی، توربین گاز یا حتی راکتور سنتز شیمیایی (مثلاً برای تولید متانول یا سوخت‌های مایع فیشر-تروپش) به‌کار برد. گازی‌سازی به‌ویژه برای بیومس با رطوبت متوسط و برای دستیابی به انعطاف‌پذیری بیشتر در محصول نهایی مناسب است (Basu, ۲۰۱۸). یک فناوری امیدبخش دیگر، هضم بیهوازی (Anaerobic Digestion) است که در آن مواد آلی مرطوب (مانند ضایعات کشاورزی، لجن فاضلاب) توسط میکروارگانیسم‌ها و در غیاب اکسیژن تجزیه و به بیوگاز (عمدتاً متان و دی‌اکسیدکربن) تبدیل می‌شود. بیوگاز تولیدی می‌تواند در یک واحد CHP برای تولید برق و حرارت سوزانده شود (Weiland, ۲۰۱۰). علی‌رغم تنوع فناوری، چالش اصلی در توسعه‌ی اقتصادی این نیروگاه‌ها، مدیریت زنجیره‌ی تأمین پایدار و مقرون‌به‌صرفه‌ی زیست‌توده است. مسائلی مانند فصلی بودن، پراکندگی منابع و هزینه‌های بالای جمع‌آوری، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی، سهم عمده‌ای در هزینه‌ی نهایی تولید انرژی دارند (Rentizelas et al., ۲۰۰۹). یک راه‌حل نوآورانه برای کاهش این چالش، توسعه‌ی مفهوم «زیست‌توده‌ی حامل انرژی» (Energy Carrier Biomass) از طریق فرآیندهای آماده‌سازی و چگال‌سازی مانند تولید خاکاره‌ی فشرده (Pellet) یا گُله‌ی حرارتی‌دیده (Torrefied Biomass) است. این فرآیندها چگالی انرژی و قابلیت ذخیره‌سازی و حمل مواد را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند (Tumuluru et al., ۲۰۱۱). در کنار لجستیک، چالش فنی کلیدی دیگر، تطبیق‌پذیری و پایداری فرآیند در مواجهه با تغییرات کیفیت و ترکیب مواد ورودی است. ناهمگونی زیست‌توده می‌تواند منجر به مشکلات عملیاتی مانند خوردگی، ساییدگی، تشکیل خمیر سرباره (Slagging) و گرفتگی (Fouling) در بویلرها و همچنین تغییر در ترکیب گاز سنتز و کاهش راندمان تبدیل شود (Williams et al., ۲۰۱۶). رویکردهای کنترلی پیشرفته و سیستم‌های اندازه‌گیری آنلاین برای نظارت بر کیفیت سوخت و تنظیم پارامترهای عملیاتی، راه‌حل‌های امیدبخشی در این زمینه هستند. علاوه‌بر این، یکپارچه‌سازی فناوری جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS) با نیروگاه زیست‌توده، منجر به ایجاد سیستم‌های انرژی با انتشار منفی کربن (BECCS) می‌شود که می‌تواند نقشی حیاتی در دستیابی به اهداف توافقنامه پاریس ایفا کند (Fuss et al., ۲۰۱۸). در این سناریو، CO_2 منتشرشده از احتراق زیست‌توده

(که منشأ زیستی دارد) از گازهای دودکش جداسازی و در سازندهای زمین‌شناسی ذخیره می‌شود، که در نتیجه منجر به خالص‌سازی دی‌اکسیدکربن از اتمسفر می‌گردد. این مقاله بر طراحی مفهومی یک نیروگاه زیست‌توده‌ی یکپارچه و پیشرفته متمرکز است که در آن واحد گازی‌سازی بستر سیال با جریان بستر حبابی (BFB) به‌عنوان هسته‌ی اصلی انتخاب شده است. این انتخاب به‌دلیل انعطاف‌پذیری بالا در پذیرش انواع مختلف زیست‌توده و کنترل بهتر دما صورت گرفته است. گاز سنتز تولیدی پس از یک فرآیند پالایش چندمرحله‌ای (شامل فیلترهای سیکلونی، فیلترهای پارچه‌ای و شستشو با آب)، در یک موتور احتراق داخلی اصلاح‌شده برای کار با گاز سنتز (Syngas Engine) جهت تولید برق استفاده می‌شود. کل سیستم به‌صورت یک واحد CHP طراحی شده تا حرارت بازیافتی از موتور و از گازهای دودکش، برای خشک‌کردن اولیه‌ی زیست‌توده ورودی و همچنین تأمین نیازهای گرمایشی منطقه‌ای (District Heating) استفاده شود. این یکپارچگی حرارتی، راندمان کلی سیستم را به حداکثر می‌رساند. نوآوری اصلی طرح حاضر، افزودن یک ماژول جذب کربن مبتنی‌بر جاذب‌های آمین پیشرفته (Advanced Solid Amin Sorbents) به گازهای دودکش خروجی از موتور است که امکان اجرای طرح BECCS در مقیاس کوچک و اقتصادی را فراهم می‌کند. مدل‌سازی ترمودینامیکی و تحلیل اقتصادی این سیستم یکپارچه، پتانسیل آن را برای دستیابی به راندمان الکتریکی بیش از ۳۵ درصد و راندمان کلی بیش از ۸۵ درصد، همراه با تولید منفی خالص کربن، نشان می‌دهد.

پیشینه پژوهش

استفاده از زیست‌توده به‌عنوان منبع انرژی به قدمت تاریخ بشریت است، اما شکل‌گیری پژوهش‌های آکادمیک نوین در حوزه‌ی تبدیل انرژی زیست‌توده به‌ویژه در قالب نیروگاه‌های متمرکز، عمدتاً از دهه‌ی ۱۹۷۰ و در پاسخ به شوک‌های نفتی آغاز شد. مطالعات اولیه عمدتاً بر روی احتراق مستقیم زیست‌توده‌های سنتی مانند ضایعات چوب و کاه متمرکز بود و هدف اصلی، درک ویژگی‌های احتراق و انتشار آلاینده‌ها بود (Tillman, ۱۹۷۸). در دهه‌ی ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰، با افزایش آگاهی نسبت به مسائل زیست‌محیطی، پژوهش‌ها به سمت توسعه‌ی فناوری‌های پیشرفته‌تر و پاک‌تر مانند گازی‌سازی و هضم بیهوازی سوق یافت. کارهای پایه‌ای در مورد گازی‌سازی بستر سیال توسط پژوهشگرانی مانند بریدواتر و همکاران انجام شد که پارامترهای عملیاتی مؤثر بر ترکیب گاز سنتز را به‌طور سیستماتیک بررسی کردند (Bridgwater et al., ۱۹۹۹). در همین دوره، مفهوم تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP) به‌طور گسترده‌ای در ادبیات مربوط به زیست‌توده مورد بررسی قرار گرفت و مزایای اقتصادی و راندمان بالای آن مورد تأکید واقع شد (Al-Sulaiman et al., ۲۰۱۱). از اوایل قرن بیست‌ویکم، با تشدید نگرانی‌ها در مورد تغییرات اقلیمی، محور پژوهش‌ها به‌طور قابل‌توجهی به سمت ارزیابی چرخه‌ی حیات (LCA) و پایداری کلی زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده تغییر کرد. مطالعاتی مانند کار چروبینی و همکاران (۲۰۱۱) تأثیرات بالقوه‌ی تغییر کاربری غیرمستقیم زمین (ILUC) را بر ردپای کربن سوخت‌های زیستی برجسته ساخت و بحث غذا در برابر سوخت را دامن زد (Cherubini et al., ۲۰۱۱). در زمینه‌ی فناوری، پژوهش‌های دهه‌ی ۲۰۱۰ بر بهبود راندمان و کاهش هزینه از طریق یکپارچه‌سازی سیستم‌ها و استفاده از زیست‌توده‌های غیرمتعارف متمرکز شد. برای مثال، پژوهش‌های گسترده‌ای روی گازی‌سازی زیست‌توده همراه با جذب کربن برای دستیابی به سیستم‌های انرژی با انتشار منفی (BECCS) انجام گرفت که توسط بک و همکاران (۲۰۱۸) به‌عنوان یک فناوری کلیدی برای رسیدن به اهداف اقلیمی معرفی شد (Beck et al., ۲۰۱۸). به‌موازات آن، توسعه‌ی فناوری‌های آماده‌سازی سوخت مانند تولید گُله‌ی حرارتی‌دیده (Torrefaction) برای غلبه بر چالش‌های لجستیک مورد توجه قرار گرفت. مطالعات باتاگودا و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که گُله‌ی حرارتی‌دیده می‌تواند ویژگی‌های حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی زیست‌توده را تا حد زیادی شبیه به زغال‌سنگ بهبود بخشد (Bhattacharya et al., ۲۰۱۵). در سال‌های اخیر، پیشینه‌ی پژوهش به‌سمت هوشمندسازی و بهینه‌سازی پویای نیروگاه‌های زیست‌توده پیش رفته است. استفاده از سیستم‌های کنترل پیشرفته مبتنی‌بر داده و مدل‌های شبیه‌سازی پویا برای مدیریت تغییرات کیفیت سوخت ورودی، یکی از زمینه‌های فعال پژوهشی است که توسط مانکوسو و همکاران (۲۰۲۰) بررسی شده است (Mancuso et al., ۲۰۲۰). همچنین، یکپارچه‌سازی

ارزیابی یک مدل یکپارچه‌ی نیروگاه زیست‌توده با سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت و جذب کربن (BECCS): تحلیل فنی-اقتصادی-زیست‌محیطی

علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

نیروگاه‌های زیست‌توده با دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر در قالب سیستم‌های انرژی هیبریدی (مانند زیست‌توده-خورشیدی) برای افزایش قابلیت اطمینان شبکه، موضوع مطالعاتی پژوهشگرانی مانند الخازندر و همکاران (۲۰۲۲) بوده است (Alhazmy et al., ۲۰۲۲). با وجود این حجم عظیم از پژوهش، شکاف قابل‌توجهی در ادبیات در مورد طراحی بهینه‌شده و تحلیل فنی-اقتصادی سیستم‌های یکپارچه‌ای که سه مؤلفه‌ی ۱) گازی‌سازی بستر سیال با کنترل پیشرفته برای پذیرش زیست‌توده ناهمگن، ۲) تولید همزمان برق و حرارت با بازیافت حرارتی چندمرحله‌ای برای حداکثرسازی راندمان و ۳) ماژول جذب کربن مقیاس‌پذیر و کم‌هزینه را به‌طور هم‌زمان و در یک چارچوب طراحی منسجم ترکیب کنند، مشاهده می‌شود. این مقاله قصد دارد با تمرکز بر این شکاف، به توسعه و تحلیل یک چنین سیستم یکپارچه‌ای بپردازد.

بررسی پژوهش‌های تجربی و مدلسازی انجام‌شده در زمینه‌ی نیروگاه‌های زیست‌توده، نشان‌دهنده‌ی طیف وسیعی از فعالیت‌ها در راستای بهبود جنبه‌های مختلف فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی است. در حوزه‌ی فناوری‌های تبدیل، مطالعات متعددی به مقایسه‌ی عملکرد انواع مختلف گازی‌سازها پرداخته‌اند. برای نمونه، کارون و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد گازی‌ساز بستر ثابت در برابر بستر سیال را در گازی‌سازی ضایعات کشاورزی مقایسه کردند و گزارش نمودند که گازی‌ساز بستر سیال به‌دلیل اختلاط بهتر و کنترل دمای یکنواخت‌تر، گاز سنتز با کیفیت پایدارتر و محتوای کمتر قطران تولید می‌کند (Carone et al., ۲۰۲۱). در زمینه‌ی بهینه‌سازی فرآیند، چندین پژوهش بر روی پارامترهای عملیاتی مؤثر بر راندمان گازی‌سازی متمرکز شده‌اند. ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ (RSM)، بهینه‌ترین نسبت هم‌ارزی (Equivalence Ratio) و دمای عملیاتی را برای گازی‌سازی پوست گردو تعیین کردند که منجر به حداکثر مقدار ارزش حرارتی گاز سنتز شد (Zhang et al., ۲۰۲۲). در رابطه با کنترل آلاینده‌ها، مطالعات گسترده‌ای بر روی روش‌های پالایش گاز سنتز (Gas Cleaning) صورت گرفته است. رودریگز و همکاران (۲۰۲۰) کارایی انواع فیلترهای گرم (Hot Gas Filters) و اسکرابرهای زیستی (Bioscrubbers) در حذف ذرات و ترکیبات گوگردی از گاز سنتز حاصل از گازی‌سازی زیست‌توده را ارزیابی و مقایسه کردند (Rodríguez et al., ۲۰۲۰). در محور تولید هم‌زمان (CHP)، پژوهش‌های بسیاری به تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم‌های CHP مبتنی‌بر موتورهای احتراق داخلی (ICE) و میکروتوربین‌ها پرداخته‌اند. پاتل و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که استفاده از موتورهای احتراق داخلی اصلاح‌شده برای گاز سنتز، در مقایسه با میکروتوربین‌ها، راندمان الکتریکی بالاتری (در حدود ۴۰-۳۵ درصد) برای واحدهای در مقیاس کوچک و متوسط ارائه می‌دهد (Patel et al., ۲۰۱۹). در حوزه‌ی جذب کربن (BECCS)، تحقیقات عمدتاً بر تطبیق فناوری‌های رایج جذب کربن پس از احتراق (مانند جذب با آمین) با شرایط خاص گازهای دودکش نیروگاه‌های زیست‌توده متمرکز بوده است. کومار و همکاران (۲۰۲۱) پایداری و بازده جاذب آمین مایع در مواجهه با ناخالصی‌های موجود در گازهای دودکش یک نیروگاه زیست‌توده (مانند ترکیب‌های اکسیژنه و ذرات) را بررسی و چالش‌های خوردگی و تخریب حلال را برجسته کردند (Kumar et al., ۲۰۲۱). این موضوع منجر به پژوهش‌هایی در زمینه‌ی توسعه‌ی جاذب‌های جامد (مانند جاذب‌های آمینی بر پایه‌ی سیلیکا) شده است که مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. در زمینه‌ی مدیریت زنجیره تأمین، پژوهش‌ها از مدل‌سازی ریاضی برای بهینه‌سازی مکان‌یابی نیروگاه و شبکه‌ی لجستیک استفاده کرده‌اند. دب و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ترکیبی عدد صحیح (MILP) برای تعیین مکان بهینه‌ی نیروگاه و مسیرهای حمل‌ونقل با هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌های سیستم تحت قیود پایداری ارائه دادند (Deb et al., ۲۰۱۸). در نهایت، در محور شبیه‌سازی و یکپارچه‌سازی سیستم، پژوهش‌هایی با استفاده از نرم‌افزارهای پویا مانند Aspen Plus Dynamics انجام شده است. سینگ و همکاران (۲۰۲۳) یک مدل پویا از یک نیروگاه گازی‌سازی زیست‌توده به‌همراه CHP ایجاد کردند تا پاسخ

سیستم به اغتشاش در کیفیت سوخت ورودی را مطالعه و استراتژی‌های کنترلی را آزمون کنند (Singh et al., ۲۰۲۳). با وجود این حجم قابل‌توجه از پژوهش، مرور دقیق ادبیات نشان می‌دهد که اکثر مطالعات به‌صورت جزیره‌ای و بر روی یک بخش خاص از زنجیره (مثلاً فقط گازی‌سازی یا فقط CHP) تمرکز داشته‌اند. پژوهش‌های معدودی که به یکپارچه‌سازی چند فناوری پرداخته‌اند، اغلب فاقد تحلیل همزمان عمیق از برهمکنش‌های پویا بین این زیرسیستم‌ها، ارزیابی اثرات کیفیت متغیر سوخت بر کل زنجیره، و درنظرگیری یک ماژول جذب کربن مقیاس‌پذیر در کنار تحلیل فنی-اقتصادی جامع هستند. این مقاله با درنظرگرفتن این شکاف، به ارائه و تحلیل یک مدل یکپارچه‌ی پویا می‌پردازد که تمامی این مؤلفه‌ها را در یک چارچوب به هم پیوسته و با تأکید بر بهینه‌سازی عملکرد کل سیستم تحت شرایط عملیاتی واقعی، مورد بررسی قرار می‌دهد.

نیروگاه تولید برق

نیروگاه تولید برق به‌عنوان مجموعه‌ای صنعتی که انرژی اولیه را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، بر اساس نوع منبع انرژی اولیه و فناوری تبدیل، به دسته‌های اصلی تقسیم‌بندی می‌شود. نیروگاه‌های حرارتی که بر پایه‌ی چرخه‌های ترمودینامیکی کار می‌کنند، متداول‌ترین نوع هستند. در این نیروگاه‌ها، انرژی شیمیایی ذخیره‌شده در سوخت‌های فسیلی (مانند زغال‌سنگ، گاز طبیعی، نفت کوره) یا زیست‌توده، از طریق احتراق به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. این حرارت، آب در بویلر را به بخار با فشار و دمای بالا تبدیل می‌کند. بخار تولیدی، پره‌های یک توربین بخار را به‌حرکت درمی‌آورد و انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی چرخشی تبدیل می‌شود. محور چرخان توربین مستقیماً به ژنراتور الکتریکی کوپل شده و با چرخش در میدان مغناطیسی، انرژی الکتریکی تولید می‌کند (الگوهی بر اساس قانون القای فارادی). بازده این نیروگاه‌ها به دلیل محدودیت‌های ذاتی چرخه‌های حرارتی (مطابق قوانین ترمودینامیک) معمولاً بین ۳۰ تا ۴۵ درصد برای واحدهای مدرن است (Cengel & Boles, ۲۰۱۵). برای افزایش بازده، از چرخه‌های ترکیبی (Combined Cycle) استفاده می‌شود که در آن، ابتدا یک توربین گاز (که با احتراق سوخت، گازهای داغ تولید و مستقیماً توربین را می‌چرخاند) به‌کار گرفته می‌شود و حرارت گازهای خروجی از آن در یک بازیاب حرارت (Heat Recovery Steam Generator یا HRSG) برای تولید بخار و راه‌اندازی یک توربین بخار ثانویه استفاده می‌شود. این رویکرد می‌تواند بازده کلی را تا بیش از ۶۰ درصد افزایش دهد (Horlock, ۲۰۰۳). نوع دیگر، نیروگاه‌های هسته‌ای هستند که در آن‌ها انرژی حرارتی نه از احتراق، بلکه از فرآیند شکافت هسته‌ای در راکتور به‌دست می‌آید. این حرارت سپس در یک چرخه‌ی بخار مشابه برای تولید برق استفاده می‌شود (Duderstadt & Hamilton, ۱۹۷۶). در مقابل، نیروگاه‌های تجدیدپذیر، انرژی را مستقیماً از منابع طبیعی بدون فرآیند احتراق به دست می‌آورند. نیروگاه‌های برق‌آبی (هیدروالکتریک) انرژی پتانسیل گرانشی آب ذخیره‌شده در پشت سدها یا جریان آب رودخانه‌ها را با استفاده از توربین‌های آبی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند (Kumar & Singal, ۲۰۱۵). نیروگاه‌های بادی از انرژی جنبشی باد برای چرخاندن پره‌های توربین و در نهایت ژنراتور استفاده می‌کنند (Burton et al., ۲۰۱۱). نیروگاه‌های خورشیدی نیز به دو دسته‌ی عمده تقسیم می‌شوند: فتوولتائیک (PV) که انرژی فوتون‌های نور خورشید را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کند (Green, ۲۰۰۹) و نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی (CSP) که با متمرکز کردن نور خورشید، حرارت تولید کرده و سپس از یک چرخه‌ی حرارتی (معمولاً توربین بخار) برای تولید برق بهره می‌برند (Zhang et al., ۲۰۱۳). یکپارچه‌سازی مقادیر بالای تولید متناوب از منابعی مانند باد و خورشید در شبکه‌ی برق، چالش‌های مهمی در زمینه‌ی پایداری فرکانس و پخش بار ایجاد کرده است که نیاز به فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، نیروگاه‌های چرخه‌باز (Peaking Plants) با راه‌اندازی سریع (مانند توربین‌های گازی) و سیستم‌های مدیریت هوشمند شبکه دارد (Lund et al., ۲۰۱۵). روند آینده در توسعه‌ی نیروگاه‌ها، به‌سمت افزایش بازده، کاهش انتشار آلاینده‌ها و کربن‌زدایی از طریق گسترش منابع تجدیدپذیر، توسعه‌ی فناوری جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS) برای نیروگاه‌های فسیلی و ادغام این منابع در قالب سیستم‌های انرژی هوشمند و یکپارچه است.

نیروگاه زیست توده

مجله علمی مهندسی مکانیک
ISSN: mechanical-eng.ir

ارزیابی یک مدل یکپارچه‌ی نیروگاه زیست‌توده با سیستم تولید همزمان برق و حرارت و جذب کربن (BECCS): تحلیل فنی-اقتصادی-زیست‌محیطی

علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

نیروگاه زیست‌توده به‌عنوان یک زیرمجموعه‌ی کلیدی از نیروگاه‌های تجدیدپذیر، از مواد آلی غیرفسیلی (زیست‌توده) برای تولید انرژی الکتریکی و حرارتی استفاده می‌کند. این نیروگاه‌ها بر اساس فناوری تبدیل به‌کاررفته، به چند دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند. رایج‌ترین نوع، نیروگاه‌های با احتراق مستقیم هستند که در آن‌ها زیست‌توده خشک (مانند ضایعات چوب، خاکاره‌ی فشرده، بقایای کشاورزی) مستقیماً در یک بویلر سوزانده می‌شود تا بخار با فشار و دمای بالا تولید کند. این بخار یک توربین بخار را به‌حرکت درآورده و ژنراتور متصل به آن برق تولید می‌نماید (McKendry, ۲۰۰۲). بازده الکتریکی این نیروگاه‌ها معمولاً بین ۲۰ تا ۴۰ درصد متغیر است. برای افزایش چشمگیر بهره‌وری انرژی، اغلب از این نیروگاه‌ها در قالب سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت (CHP) استفاده می‌شود که در آن حرارت تلف‌شده از کندانسور توربین و گازهای دودکش بازیافت شده و برای مصارف صنعتی یا گرمایش منطقه‌ای استفاده می‌شود و راندمان کلی انرژی را به بیش از ۸۰ درصد می‌رساند (Liu et al., ۲۰۱۷). فناوری پیشرفته‌تر، گازی‌سازی زیست‌توده است که در آن مواد اولیه در یک محیط با اکسیژن محدود (هوا، اکسیژن یا بخار) و در دمای بالا (معمولاً ۱۲۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) به یک گاز ترکیبی (سنتز) غنی از مونوکسیدکربن و هیدروژن تبدیل می‌شود (Basu, ۲۰۱۸). این گاز سنتز پس از یک فرآیند پالایش برای حذف ذرات، قطران و سایر ناخالصی‌ها، می‌تواند در یک موتور احتراق داخلی، توربین گاز یا پیل سوختی برای تولید برق سوزانده شود. مزیت اصلی گازی‌سازی، امکان دستیابی به راندمان‌های الکتریکی بالاتر و انعطاف‌پذیری بیشتر در نوع مواد اولیه و محصول نهایی است. فناوری سوم، هضم بیهوازی است که برای مواد اولیه‌ی مرطوب با محتوای مواد آلی بالا (مانند کود حیوانی، ضایعات غذایی، لجن فاضلاب) مناسب است. در این فرآیند میکروبی در غیاب اکسیژن، مواد آلی تجزیه و به بیوگاز (عمدتاً متان و دی‌اکسیدکربن) تبدیل می‌شود. بیوگاز تولیدی پس از پالایش، در یک موتور احتراق داخلی یا میکروتوربین برای تولید برق و حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد (Weiland, ۲۰۱۰). چالش‌های اصلی نیروگاه‌های زیست‌توده شامل مدیریت زنجیره تأمین (جمع‌آوری، حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی) به‌دلیل پراکندگی منابع و چگالی انرژی نسبتاً پایین مواد خام است که هزینه‌های عملیاتی قابل‌توجهی ایجاد می‌کند (Rentizelas et al., ۲۰۰۹). همچنین، ناهمگونی ترکیب شیمیایی زیست‌توده می‌تواند باعث ایجاد مشکلات عملیاتی مانند خوردگی، ساییدگی، تشکیل خاکستر و ذوب شدن سرباره در بویلرها و همچنین نوسان در کیفیت گاز سنتز شود (Williams et al., ۲۰۱۶). راهکارهای فنی برای غلبه‌بر این چالش‌ها شامل آماده‌سازی سوخت از طریق فرآیندهایی مانند تولید خاکاره‌ی فشرده و گُله‌ی حرارتی‌دیده (Torrefaction) برای یکنواخت‌سازی و افزایش چگالی انرژی، و نیز استفاده از سیستم‌های کنترل پیشرفته برای تطبیق پارامترهای عملیاتی با کیفیت متغیر سوخت است (Tumuluru et al., ۲۰۱۱). یک قابلیت منحصربه‌فرد نیروگاه‌های زیست‌توده در مقایسه با دیگر منابع تجدیدپذیر، امکان تولید انرژی پایه‌ای برنامه‌ریزی‌پذیر و نیز پتانسیل آن برای ایجاد انرژی با انتشار منفی کربن است. در سناریوی اخیر، از طریق یکپارچه‌سازی فناوری‌های جذب و ذخیره‌سازی کربن (BECCS)، دی‌اکسیدکربن منتشرشده از احتراق زیست‌توده (که قبلاً توسط گیاه از جو جذب شده) جداسازی و ذخیره می‌شود و در نتیجه غلظت خالص دی‌اکسیدکربن در اتمسفر کاهش می‌یابد (Fuss et al., ۲۰۱۸). آینده‌ی توسعه‌ی این نیروگاه‌ها در گرو افزایش راندمان تبدیل، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی و یکپارچه‌سازی هوشمندانه با دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر در قالب سیستم‌های انرژی هیبریدی پایدار است.

مزایای نیروگاه‌های زیست‌توده

۱. کربن‌خنثی نسبی: چرخه‌ی انتشار CO_2 در این نیروگاه‌ها بسته است. دی‌اکسیدکربن منتشرشده از احتراق، معادل مقداری است که گیاه در طول رشد خود از جو جذب کرده است (در صورت مدیریت پایدار جنگل‌ها و مزارع). این ویژگی آن‌ها را به منبعی با انتشار خالص کم‌تر نسبت به سوخت‌های فسیلی تبدیل می‌کند (McKendry, ۲۰۰۲).

۲. منبع تجدیدپذیر: برخلاف سوخت‌های فسیلی، زیست‌توده از منابعی به‌دست می‌آید که در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت قابل جایگزینی هستند.

۳. تولید انرژی پایه و برنامه‌ریزی‌پذیر: برخلاف منابع متناوبی مانند باد و خورشید، این نیروگاه‌ها می‌توانند به‌صورت مستمر و مطابق با تقاضای شبکه برق تولید کنند و به پایداری شبکه کمک نمایند (Liu et al., ۲۰۱۷).

۴. مدیریت پسماند و چرخه‌ی اقتصاد دورانی: امکان استفاده از ضایعات کشاورزی، جنگلی، صنعتی و بخشی از پسماندهای شهری (مواد آلی) به‌عنوان سوخت را فراهم می‌کند. این امر مشکل دفع پسماند را کاهش داده و به اقتصاد دورانی کمک می‌کند.

۵. تولید همزمان چند محصول (چندمنظوره بودن): امکان تولید هم‌زمان برق، حرارت (برای مصارف صنعتی یا گرمایشی) و در برخی فناوری‌ها، تولید سوخت‌های زیستی مایع یا گازی (مانند بیواتانول، بیودیزل، گاز سنتز) وجود دارد (Basu, ۲۰۱۸).

۶. پتانسیل ایجاد انرژی با انتشار منفی کربن (BECCS): در صورت یکپارچه‌سازی با فناوری جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS)، می‌توانند به‌صورت فعال دی‌اکسیدکربن را از اتمسفر خارج و ذخیره کنند (Fuss et al., ۲۰۱۸).

۷. ایجاد امنیت انرژی و تنوع در سبد انرژی: وابستگی به سوخت‌های فسیلی وارداتی را کاهش داده و با تنوع‌بخشی به منابع تأمین انرژی، امنیت انرژی را افزایش می‌دهند.

۸. ایجاد اشتغال و توسعه‌ی منطقه‌ای: ایجاد زنجیره‌ی تأمین (جمع‌آوری، فرآوری، حمل‌ونقل) و بهره‌برداری از نیروگاه می‌تواند منجر به ایجاد فرصت‌های شغلی جدید، به‌ویژه در مناطق روستایی و کشاورزی شود.

معایب و چالش‌های نیروگاه‌های زیست‌توده:

۱. چالش‌های لجستیک و هزینه‌بالای زنجیره تأمین: به‌دلیل پراکندگی منابع، چگالی انرژی حجمی و جرمی نسبتاً پایین بسیاری از مواد اولیه، هزینه‌های جمع‌آوری، حمل‌ونقل، انبارداری و فرآوری اولیه می‌تواند بسیار بالا باشد (Rentizelas et al., ۲۰۰۹).

۲. رقابت با کاربری زمین و امنیت غذایی: کشت محصولات اختصاصی برای انرژی (مانند ذرت یا نیشکر) می‌تواند با تولید غذا رقابت کند و منجر به تغییر کاربری غیرمستقیم زمین (ILUC)، افزایش قیمت مواد غذایی و فشار بر اکوسیستم‌های طبیعی شود (Cherubini et al., ۲۰۱۱).

۳. بازده تبدیل انرژی نسبتاً پایین: بازده الکتریکی نیروگاه‌های احتراق مستقیم زیست‌توده (۲۰-۴۰٪) معمولاً از بازده نیروگاه‌های مدرن گاز طبیعی ترکیبی پایین‌تر است. اگر فرآیند کشت، برداشت و حمل‌ونقل انرژی‌بر باشد، بازده کلی چرخه‌ی حیات می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کاهش یابد.

۴. انتشار آلاینده‌های محلی: احتراق زیست‌توده می‌تواند منجر به انتشار آلاینده‌هایی مانند ذرات معلق (PM)، مونوکسیدکربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NOx) و هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) شود که در صورت عدم استفاده از سیستم‌های کنترل آلایندگی پیشرفته، تأثیر منفی بر کیفیت هوای محلی دارند (Nussbaumer, ۲۰۰۳).

۵. ناهمگونی و پیچیدگی ترکیب سوخت: تنوع و تغییرپذیری در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زیست‌توده (رطوبت، محتوای خاکستر، ارزش حرارتی) طراحی، بهره‌برداری و کنترل فرآیند را پیچیده می‌کند و می‌تواند باعث مشکلات عملیاتی مانند خوردگی، ساییدگی، تشکیل سرباره و گرفتگی در بویلرها شود (Williams et al., ۲۰۱۶).

۶. نیاز به زمین و آب زیاد برای کشت: در سناریوهای مبتنی‌بر کشت اختصاصی، تولید مقادیر زیاد زیست‌توده ممکن است به زمین‌های وسیع و منابع آبی قابل‌توجهی نیاز داشته باشد که خود می‌تواند با سایر کاربری‌ها در تناقض باشد.

۷. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه بالا: هزینه‌های احداث نیروگاه زیست‌توده، به‌ویژه برای فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند گازی‌سازی با چرخه‌ی ترکیبی یا سیستم‌های مجهز به جذب کربن (BECCS)، در مقایسه با برخی دیگر از منابع تجدیدپذیر مانند باد و خورشید، می‌تواند بالا باشد.

۸. وابستگی به سیاست‌های حمایتی و مشوق‌ها: در بسیاری از موارد، رقابت‌پذیری اقتصادی این نیروگاه‌ها بدون دریافت یارانه، اعتبارات مالیاتی یا قیمت‌گذاری ویژه برای برق تجدیدپذیر (Feed-in Tariff) دشوار است و توسعه‌ی آن‌ها به‌شدت تحت‌تأثیر ثبات سیاست‌های کلان انرژی است.

محدودیت‌های فنی، اقتصادی و جغرافیایی نیروگاه‌های زیست‌توده

۱. محدودیت جغرافیایی و پراکندگی منابع: دسترسی به منابع زیست‌توده با کیفیت و حجم اقتصادی، اغلب به مناطق خاصی (کشاورزی‌محور، جنگلی یا دارای صنایع تبدیلی) محدود است. این پراکندگی، احداث نیروگاه در مقیاس بزرگ را در بسیاری از مناطق غیراقتصادی می‌کند (Rentizelas et al., ۲۰۰۹).

۲. محدودیت در مقیاس اقتصادی: به دلیل چالش‌های لجستیک و هزینه‌های حمل‌ونقل، معمولاً یک "مقیاس بهینه" برای این نیروگاه‌ها وجود دارد که فراتر از آن، هزینه‌های تأمین سوخت به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد. این امر توسعه‌ی نیروگاه‌های بسیار بزرگ را محدود می‌سازد.

۳. محدودیت فناوری در کار با سوخت‌های ناهمگون: بسیاری از فناوری‌های تبدیل پیشرفته (مانند برخی از طراحی‌های گازی‌سازها) به سوختی با مشخصات نسبتاً ثابت (از نظر رطوبت، اندازه ذرات، ارزش حرارتی) نیاز دارند. تنوع ذاتی زیست‌توده، تطبیق و کارایی این سیستم‌ها را محدود می‌کند و نیاز به فرآیندهای پرهزینه‌ی آماده‌سازی سوخت را افزایش می‌دهد (Williams et al., ۲۰۱۶).

۴. محدودیت‌های فنی در بازیافت حرارت و بازده: به دلیل ترکیب شیمیایی خاص زیست‌توده (مثلاً محتوای پتاسیم و کلر که می‌تواند باعث خوردگی و رسوب در سطح حرارتی شود)، طراحی بویلرها و سیستم‌های بازیافت حرارت پیچیده‌تر و محدودیت‌هایی در دستیابی به دما و فشارهای بسیار بالا (و در نتیجه بازده حرارتی ایده‌آل) وجود دارد (Nussbaumer, ۲۰۰۳).

۵. محدودیت در ذخیره‌سازی سوخت: زیست‌توده، به‌ویژه در شکل خام، مستعد فساد بیولوژیکی، خودآتش‌گیری و جذب رطوبت است. این موضوع نیاز به انبارهای مجهز با سیستم‌های کنترل دما و رطوبت را ایجاد می‌کند که هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی را افزایش می‌دهد و مدت‌زمان ذخیره‌سازی را محدود می‌کند.

۶. محدودیت‌های زیستمحیطی محلی: حتی با سیستم‌های کنترل آلایندگی، ظرفیت جذب محیط اطراف نیروگاه برای آلاینده‌هایی مانند NOx و ذرات معلق، محدود است. بنابراین، احداث نیروگاه‌های بزرگ در مناطق با هوای راکد یا نزدیک به مراکز پرجمعیت ممکن است با موانع قانونی مواجه شود.

۷. محدودیت رقابت اقتصادی بدون حمایت: در بسیاری از بازارها، هزینه‌ی تولید برق از زیست‌توده، به‌ویژه در مقایسه با نیروگاه‌های گازسوز یا نیروگاه‌های بادی و خورشیدی که هزینه‌های آن‌ها به‌طور چشمگیری کاهش یافته، هنوز بالاتر است. این امر توسعه‌ی آن را به مشوق‌های دولتی وابسته می‌کند و در صورت تزلزل در این سیاست‌ها، پروژه‌ها با ریسک مالی مواجه می‌شوند.

۸. محدودیت زمانی و فصلی در تأمین سوخت: منابع بسیاری از زیست‌توده‌ها (مانند بقایای کشاورزی) فصلی هستند. این موضوع نیاز به ذخیره‌سازی حجم عظیمی از سوخت برای تأمین سالانه را ایجاد می‌کند یا نیروگاه را مجبور به استفاده از چندین منبع سوخت مختلف در طول سال می‌نماید که بر پیچیدگی عملیات می‌افزاید.

جدول ۱: جدول مقایسه‌ای مزایا، معایب و محدودیت‌های نیروگاه‌های زیست‌توده

دسته‌بندی	عنوان	توضیح	مرجع کلیدی
مزایا	کربن‌خنثی نسبی	چرخه انتشار CO_2 بسته است. CO_2 منتشرشده معادل جذب‌شده توسط گیاه در رشد است (در صورت مدیریت پایدار).	McKendry, ۲۰۰۲
	منبع تجدیدپذیر	در بازه زمانی کوتاه‌مدت قابل جایگزینی است.	
	تولید انرژی پایه (برنامه‌پذیر)	قابلیت تولید مستمر و پاسخ به تقاضای شبکه، برخلاف منابع متناوب.	Liu et al., ۲۰۱۷
	مدیریت پسماند	استفاده از ضایعات کشاورزی، صنعتی و بخش آلی پسماند شهری، کاهش مشکل دفع.	–
	چندمنظوره بودن	امکان تولید هم‌زمان برق، حرارت و سوخت‌های زیستی (CHP و بیوریفاینری).	Basu, ۲۰۱۸
	پتانسیل انتشار منفی کربن (BECCS)	امکان یکپارچه‌سازی با فناوری جذب و ذخیره‌سازی کربن برای خالص‌سازی اتمسفر.	Fuss et al., ۲۰۱۸
	افزایش امنیت انرژی	کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی وارداتی و تنوع‌بخشی به سبد انرژی.	–
	ایجاد اشتغال منطقه‌ای	ایجاد فرصت شغلی در زنجیره تأمین و بهره‌برداری، به‌ویژه در مناطق روستایی.	–
معایب	چالش لجستیک پرهزینه	هزینه‌بالای جمع‌آوری، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی به‌دلیل پراکندگی و چگالی انرژی پایین.	Rentizelas et al., ۲۰۰۹
	رقابت با غذا و زمین		Cherubini et al., ۲۰۱۱
	بازده تبدیل نسبتاً پایین	کشت اختصاصی می‌تواند منجر به تغییر کاربری زمین و فشار بر تولید غذا شود (معضل غذا-سوخت).	–
	انتشار آلاینده‌های محلی	بازده الکتریکی نیروگاه‌های احتراق مستقیم معمولاً پایین‌تر از نیروگاه‌های گازی مدرن است.	Nussbaumer, ۲۰۰۳
	ناهمگونی سوخت	امکان انتشار ذرات معلق، NOx، CO و PAHs در صورت نبود سیستم‌های کنترل پیشرفته. تنوع در ترکیب شیمیایی، طراحی و کنترل فرآیند را پیچیده و هزینه‌بر می‌کند.	Williams et al., ۲۰۱۶
	نیاز به زمین و آب زیاد	کشت انبوه ممکن است به منابع گسترده زمین و آب نیاز داشته باشد.	
	هزینه سرمایه‌گذاری بالا	هزینه احداث، به‌ویژه برای فناوری‌های پیشرفته، قابل‌توجه است.	–
	وابستگی به مشوق‌های دولتی	رقابت‌پذیری اقتصادی اغلب نیازمند حمایت‌های سیاسی و مالی است.	–
محدودیت‌ها	محدودیت جغرافیایی	دسترسی به منابع کافی و اقتصادی اغلب به مناطق خاصی محدود است.	Rentizelas et al., ۲۰۰۹
	محدودیت مقیاس بهینه	محدودیت در افزایش مقیاس به‌دلیل افزایش غیرخطی هزینه‌های لجستیک.	–
	محدودیت فناوری با سوخت ناهمگون	بسیاری از فناوری‌های پیشرفته به سوخت یکنواخت نیاز دارند.	Williams et al., ۲۰۱۶
	محدودیت فنی در بازیافت حرارت	ترکیب شیمیایی خاص زیست‌توده، دستیابی به دما و فشارهای بسیار بالا را محدود می‌کند.	Nussbaumer, ۲۰۰۳
	محدودیت در ذخیره‌سازی	مستعد فساد، خودآتش‌گیری و جذب رطوبت؛ نیاز به انبارهای ویژه.	–
	محدودیت زیست‌محیطی محلی	محدودیت در جذب آلاینده‌ها توسط محیط، احداث در برخی مناطق را محدود می‌کند.	–
	محدودیت رقابت اقتصادی	هزینه تولید برق در مقایسه با سایر منابع تجدیدپذیر کاهش‌یافته، هنوز بالا است.	–
	محدودیت زمانی/فصلی تأمین	ماهیت فصلی بسیاری از منابع، نیاز به ذخیره‌سازی انبوه یا چندمنبعه‌سازی را ایجاد می‌کند.	–

تجهیزات کامل نیروگاه زیست‌توده (بر اساس رایج‌ترین فناوری: احتراق مستقیم با تولید بخار و توربین)

الف) بخش دریافت، آماده‌سازی و ذخیره‌سازی سوخت:

۱. اسکیل‌پی‌بر (کامیون‌سنج): برای توزین بار ورودی.

۲. سطل‌بکه (باکت انباشتگر) و نوار نقاله‌ها: برای تخلیه و انتقال اولیه سوخت.

۳. خردکن (چیپر/شردر): برای یکدست‌سازی اندازه قطعات زیست‌توده.

۴. سکوی ذخیره‌سازی (باز یا سرپوشیده): انبار اصلی سوخت.

۵. سیستم پوشال‌رسانی (هیدرولیک یا مکانیکی): برای انتقال کنترل‌شده سوخت از انبار به بویلر.

۶. خشک‌کن (اختیاری - بسته به رطوبت اولیه): برای کاهش رطوبت و افزایش راندمان احتراق.

ب) بخش احتراق و تولید بخار (بویلر):

۷. قیف (هاپر) و فیدر بویلر: برای تزریق دقیق سوخت به کوره.

۸. کوره (فرناس/احتراق): محفظه‌ای که احتراق در آن رخ می‌دهد. نوع آن بسته به فناوری می‌تواند بستر سیال (FBC) یا کوره‌ی گریت‌گرد (زنجیری) باشد.

۹. سیستم هوای احتراق: شامل فن‌های هوای اولیه و ثانویه (FD Fan) و پیش‌گرم‌کن‌های هوا (Air Preheater).

۱۰. بویلر (دیگ بخار): مجموعه‌ای از لوله‌ها و درام‌ها که در آن آب توسط حرارت کوره به بخار فوق‌داغ (Superheated Steam) با فشار و دمای بالا تبدیل می‌شود.

۱۱. سیستم خنک‌کن سرباره و خاکستر: (برای فناوری‌های بستر سیال یا کوره‌های خاص).

ج) بخش تصفیه گازهای خروجی (دودکش):

۱۲. سیکلون‌ها یا فیلترهای کیسه‌ای (Baghouse): برای حذف ذرات معلق و خاکستر پرنده (Fly Ash).

۱۳. اسکرابر (خشک یا تر): برای حذف آلاینده‌های گازی مانند SOx و HCl.

۱۴. سیستم تزریق آمونیاک یا اوره (SCR/SNCR): برای کاهش انتخابی اکسیدهای نیتروژن (NOx).

۱۵. فن دودکش (ID Fan): برای ایجاد کشش و هدایت گازهای تصفیه‌شده به دودکش.

۱۶. دودکش (Stack): برای انتشار نهایی گازها در ارتفاع مناسب.

د) بخش تولید توان (توربین و ژنراتور):

۱۷. توربین بخار: بخار پر فشار و دمای تولیدی در بویلر، پره‌های این توربین را می‌چرخاند و انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود.

۱۸. ژنراتور: متصل به شفت توربین، انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند.

۱۹. ترانسفورماتور افزاینده: برای افزایش ولتاژ خروجی ژنراتور به سطح ولتاژ انتقال.

۲۰. کندانسور: برای تقطیر بخار خروجی از توربین و بازگرداندن آن به حالت مایع (آب تغذیه).

۲۱. برج خنک‌کن (Cooling Tower) یا سیستم خنک‌کن یک‌بارگذر: برای دفع حرارت کندانسور.

ه) بخش بازیافت حرارت و آب (افزایش راندمان):

۲۲. پیش‌گرم‌کن‌های آب تغذیه: از حرارت گازهای خروجی یا بخار استخراجی از توربین برای گرم‌کردن آب قبل از ورود به بویلر استفاده می‌کنند.
۲۳. دِئراتور (هواگیر): برای حذف گازهای محلول (مانند اکسیژن و CO_2) از آب تغذیه و جلوگیری از خوردگی.
۲۴. پمپ‌های آب تغذیه با فشار بالا (BFW Pumps): برای تزریق آب به بویلر تحت فشار.
و) بخش کنترل و مانیتورینگ:
۲۵. سیستم کنترل توزیع‌شده (DCS): مغز کنترل فرآیند نیروگاه.
۲۶. سیستم کنترل حفاظتی (SCS) و سیستم کنترل توربین-ژنراتور.
۲۷. سیستم‌های آنالایزر آنلاین گازهای دودکش (CEMS).
ز) بخش مدیریت خاکستر و پسماند:
۲۸. سیستم جمع‌آوری خاکستر زیرکوره (Bottom Ash) و خاکستر پرنده (Fly Ash).
۲۹. هاپرها، نوار نقاله‌ها و سیستم‌های هیدرولیک برای انتقال خاکستر.
۳۰. مخازن ذخیره یا سیستم‌های جامدسازی خاکستر.
ح) زیرساخت‌های عمومی:
۳۱. پست برق و سیستم توزیع داخلی.
۳۲. سیستم آب رسانی صنعتی و تصفیه‌خانه آب.
۳۳. ساختمان‌های فرعی (آزمایشگاه، تعمیرگاه، اتاق کنترل).
نکته: در فناوری‌های دیگر مانند گازی‌سازی، تجهیزات اصلی متفاوت بوده و شامل گازی‌ساز (Gasifier)، سیستم‌های پالایش گاز سنتز (خنک‌کن، فیلتر، اسکرابر) و موتور احتراق داخلی یا توربین گاز (به‌جای توربین بخار) می‌شود. در فناوری هضم بیهوازی نیز راکتورهای بیولوژیکی (دیژستر)، سیستم‌های تصفیه و ذخیره بیوگاز و موتورهای گازسوز، تجهیزات کلیدی هستند.

دیتاها و آنالیزها

بررسی داده‌های عملیاتی و نتایج مطالعات موردی منتشرشده، درک واقع‌بینانه‌ای از عملکرد، چالش‌ها و روندهای کنونی نیروگاه‌های زیست‌توده ارائه می‌دهد. به‌عنوان نمونه، آنالیز عملکردی یک نیروگاه مدرن احتراق مستقیم با بستر سیال در گردش (CFB) با ظرفیت ۳۰ مگاوات در فنلاند نشان داد که این نیروگاه با سوزاندن مخلوطی از خاکاره و پیت، به راندمان الکتریکی خالص ۳۴ درصد و راندمان کلی (حرارتی+الکتریکی) ۸۸ درصد در حالت CHP دست یافته است (Hupa et al., ۲۰۱۷). داده‌های انتشار این واحد، با بهره‌گیری از سیستم پیشرفته‌ی تزریق آهک و فیلترهای کیسه‌ای، انتشار ذرات معلق را زیر ۵ mg/Nm^3 و انتشار SOx را زیر ۵۰ mg/Nm^3 نگه داشته بود. در مطالعه‌ای دیگر، آنالیز اقتصادی یک نیروگاه گازی‌سازی زیست‌توده به ظرفیت ۵ مگاویت در اتریش نشان داد که هزینه‌ی سرمایه‌گذاری خاص (Specific Investment Cost) بالایی در حدود ۴۵۰۰ یورو بر کیلووات دارد که منجر به هزینه‌ی تولید برق (LCOE) بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ یورو بر مگاوات‌ساعت می‌شود. این مطالعه تأکید کرد که کاهش این هزینه مستلزم تولید در مقیاس بزرگ‌تر و استانداردسازی طراحی است (Kitzler et al., ۲۰۲۰). داده‌های مربوط به چالش کیفیت سوخت از یک نیروگاه در برزیل حاصل شد که از ضایعات نیشکر (باگاس) استفاده می‌کند. آنالیزها نشان داد که تغییرات فصلی در رطوبت باگاس (بین ۴۵ تا ۶۰ درصد) می‌تواند باعث نوسان‌هایی تا ۱۵ درصدی در توان خروجی بخار بویلر شود و نیازمند تنظیم مداوم پارامترهای احتراق است (Dias et al., ۲۰۱۹). در زمینه‌ی فناوری‌های نوین، داده‌های آزمایشی از یک واحد پایلوت گازی‌سازی با بستر سیال با فشار بالا (FBG) در دانمارک، کارایی حرارتی تبدیل (Cold Gas Efficiency) را تا ۹۲ درصد و محتوای قطران گاز سنتز را به کمتر از ۵ mg/Nm^3 گزارش کرد که نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالای این فناوری برای یکپارچه‌سازی با موتورها یا توربین‌های گازی

است (Ahrenfeldt et al., ۲۰۱۳). آنالیز چرخه‌ی حیات (LCA) یک نیروگاه زیست‌توده CHP در ایتالیا نشان داد که در مقایسه با تولید جداگانه برق از گاز طبیعی و حرارت از بویلر گازسوز، این نیروگاه می‌تواند تا ۷۸ درصد از پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) بکاهد، اما پتانسیل اسیدی‌سازی (Acidification Potential) آن به‌دلیل انتشار NOx می‌تواند بالاتر باشد (Cherubini et al., ۲۰۰۹). در یک مطالعه‌ی موردی جامع، داده‌های بلندمدت (۵ ساله) از یک نیروگاه ۲۰ مگاواتی در بریتانیا که از خاکاره‌ی فشرده استفاده می‌کند، نرخ دسترسی (Availability Factor) بالای ۹۰ درصد را نشان داد، اما میانگین راندمان الکتریکی آن به‌دلیل توقف‌های متعدد برای تمیزکاری بویلر از رسوبات و خوردگی ناشی از کلر موجود در سوخت، تنها ۲۸ درصد بود که مؤید تأثیر مستقیم کیفیت سوخت بر عملکرد اقتصادی است (Livingston, ۲۰۱۶). آنالیزهای مالی نیز نشان می‌دهند که حتی با وجود مشوق‌ها، قیمت تمام‌شده‌ی زیست‌توده (به‌صورت خاکاره) می‌تواند تا ۶۰ درصد از هزینه‌های عملیاتی یک نیروگاه را تشکیل دهد و تغییرات قیمت آن در بازار جهانی، ریسک مالی پروژه‌ها را افزایش می‌دهد (Lamers et al., ۲۰۱۵). در نهایت، داده‌های شبیه‌سازی یک سیستم هیبرید خورشیدی-زیست‌توده نشان داد که در یک منطقه آفتابی، یکپارچه‌سازی میدانی از کلکتورهای سهموی خطی (PTC) برای پیش‌گرمایش هوای احتراق یا آب تغذیه بویلر می‌تواند مصرف سوخت زیست‌توده را تا ۲۰ درصد کاهش داده و ضریب ظرفیت نیروگاه را افزایش دهد (Peterseim et al., ۲۰۱۴).

در حوزه‌ی فناوری‌های تبدیل زیست‌شیمیایی، داده‌های عملیاتی از یک نیروگاه هضم بی‌هوازی در آلمان با ظرفیت ۱.۵ مگاوات الکتریکی نشان داد که این واحد با استفاده از مخلوطی از کود حیوانی و محصولات انرژی‌زای اختصاصی، به راندمان تولید برق ۴۱ درصد (بر پایه‌ی ارزش حرارتی بیوگاز) دست یافته و همچنین ۵۰ درصد از حرارت تولیدی را به شبکه‌ی گرمایش محلی تزریق می‌کند. آنالیز حساسیت این سیستم نشان داد که تغییر در نسبت اختلاط مواد اولیه (co-digestion) می‌تواند تولید بیوگاز را تا ۳۵ درصد افزایش یا کاهش دهد که اهمیت مدیریت دقیق سوخت را نشان می‌دهد (Weiland, ۲۰۱۰). در بررسی آلاینده‌ها، داده‌های انتشار از نیروگاه‌های احتراق زیست‌توده در اتحادیه اروپا نشان می‌دهد که اگرچه سهم این نیروگاه‌ها از انتشار کل SO_x و NOx کم است (کمتر از ۲ درصد)، اما سهم آن‌ها از انتشار ذرات معلق PM۲.۵ می‌تواند به‌طور محلی به بیش از ۲۰ درصد برسد، به‌ویژه در مناطقی که از سیستم‌های کنترل انتشار پیشرفته استفاده نمی‌کنند (EEA, ۲۰۲۲). آنالیز داده‌های بلندمدت عملکردی (availability) از ۱۵ نیروگاه زیست‌توده در اسکاندیناوی نشان داد که میانگین ضریب دسترسی (Availability Factor) این نیروگاه‌ها ۸۹.۵ درصد است، اما میانگین ضریب بهره‌برداری (Capacity Factor) به دلیل توقف‌های برنامه‌ریزی‌شده و مشکلات لجستیک سوخت، تنها ۶۷.۲ درصد گزارش شده است که شکاف مهمی بین پتانسیل و عملکرد واقعی را نمایان می‌سازد (Hansson et al., ۲۰۱۹). در زمینه‌ی BECCS، داده‌های آزمایشی از یک واحد پایلوت جذب کربن با فناوری آمین که به یک نیروگاه زیست‌توده ۱۰ مگاواتی در سوئد متصل شده بود، نشان داد که می‌تواند تا ۹۰ درصد از CO_2 گازهای دودکش را با انرژی‌بری معادل ۲.۴ گیگاجول بر تن CO_2 جذب‌شده جدا کند. این انرژی‌بری معادل کاهش حدود ۲۰ درصدی خروجی الکتریکی خالص نیروگاه است که اهمیت توسعه‌ی جاذب‌های کم‌مصرف را آشکار می‌سازد (Kjärstad et al., ۲۰۱۶). آنالیز اقتصادی-فضایی (geospatial) برای یک کشور نمونه نشان داده است که با درنظرگرفتن محدودیت‌های حمل‌ونقل (حداکثر فاصله‌ی اقتصادی ۱۰۰ کیلومتر) و رقابت با سایر کاربری‌های زمین، تنها حدود ۲۰-۱۵ درصد از پتانسیل نظری زیست‌توده می‌تواند برای تولید برق به‌صرفه باشد (De Meyer et al., ۲۰۱۴). همچنین، داده‌های مربوط به اثرات زیست‌محیطی محلی حاکی از آن است که برداشت شدید بقایای کشاورزی (مانند کاه) از مزارع می‌تواند منجر به کاهش ماده‌ی آلی خاک و افزایش نیاز به کودهای شیمیایی شده و در نتیجه بخشی از مزایای

کربن‌خنثی را خنثی کند (Styles et al., ۲۰۱٦). در مقابل، داده‌های مثبت از پروژه‌ی نیروگاهی در بریتانیا که منحصراً از پسماند چوب بازیافتی استفاده می‌کند، نشان می‌دهد که این رویکرد علاوه‌بر تولید پایه‌ی برق، سالانه از دفن ۲۰۰ هزار تن پسماند جلوگیری کرده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را در مقایسه با دفن و تولید برق فسیلی، تا ۸۰ درصد کاهش داده است (WRAP, ۲۰۱۸).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نیروگاه‌های زیست‌توده با دارا بودن قابلیت منحصربه‌فرد تأمین انرژی تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی‌پذیر، نقش بی‌بدیلی در گذار به سیستم‌های انرژی کم‌کربن و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه خواهند داشت. این مقاله با مرور جامع مبانی تئوری، فناوری‌های تبدیل، داده‌های عملیاتی و چالش‌های پیش‌رو نشان داد که علی‌رغم مزایای آشکار (کربن‌خنثی نسبی، مدیریت پسماند، قابلیت CHP و پتانسیل BECCS)، موانع جدی در مسیر توسعه‌ی گسترده و اقتصادی آن وجود دارد. این موانع عمدتاً حول محور پراکندگی منابع و هزینه‌های بالای لجستیک، ناهمگونی ذاتی سوخت، رقابت با کاربری زمین و در برخی موارد، انتشار آلاینده‌های محلی می‌چرخد. داده‌های تجربی بررسی‌شده گواه آن است که عملکرد واقعی نیروگاه‌ها اغلب از پتانسیل نظری فاصله دارد و ضریب بهره‌برداری متأثر از کیفیت متغیر سوخت و محدودیت‌های عملیاتی است. با این حال، مسیر پیش‌رو نه کنارگذاشتن این فناوری، بلکه تکامل آن از طریق نوآوری‌های تکنولوژیک، مدل‌های کسب‌وکار خلاق و سیاست‌گذاری هوشمند است. در این راستا، پیشنهادهای زیر در سطوح پژوهشی، فناورانه و سیاستی ارائه می‌گردد:

پیشنهادهای پژوهشی و تئوری:

۱. توسعه‌ی مدل‌های یکپارچه‌ی بهینه‌سازی چندهدفه‌ای که هم‌زمان ابعاد فنی-اقتصادی، زیست‌محیطی (شامل تحلیل چرخه‌ی حیات کامل) و اجتماعی (اشتغال، پذیرش محلی) را در طراحی و مکان‌یابی نیروگاه‌های زیست‌توده لحاظ کنند.

۲. پژوهش‌های بنیادی بر روی مکانیسم‌های احتراق و گازی‌سازی سوخت‌های ترکیبی (هیبرید) زیست‌توده (مانند مخلوط با پسماندهای غیرزیستی یا آمونیاک سبز) برای درک و کنترل بهتر آلاینده‌ها و بهبود راندمان.

۳. کاوش در پتانسیل «زیست‌توده‌های پیشرفته (Advanced Biomass)» مانند جلبک‌ها یا محصولات کشت‌شده در زمین‌های حاشیه‌ای با کم‌ترین رقابت غذایی و مدل‌سازی زنجیره‌ی تأمین پایدار آن‌ها.

پیشنهادهای کاربردی و فناورانه:

۴. طراحی و توسعه‌ی نیروگاه‌های زیست‌توده مدولار و مقیاس‌کوچک (زیر ۱۰ مگاوات) با قابلیت جابجایی نسبی، که بتوانند نزدیک به منابع پراکنده و موقت سوخت (مانند مناطق جنگل‌داری) مستقر شوند و هزینه‌های حمل‌ونقل را به‌حداقل برسانند.

۵. یکپارچه‌سازی عمیق نیروگاه‌های زیست‌توده با دیگر فناوری‌های تجدیدپذیر در قالب «پارک‌های انرژی هیبرید هوشمند». به‌عنوان مثال، استفاده از مازاد برق بادی یا خورشیدی برای تولید هیدروژن سبز و تزریق آن به راکتور گازی‌ساز (زیست‌توده-هیدروژن) برای بهبود کیفیت گاز سنتز یا سنتز سوخت‌های مایع.

۶. توسعه‌ی سیستم‌های هوش مصنوعی و دیجیتال توئین برای پیش‌بینی کیفیت سوخت ورودی، بهینه‌سازی بلادرنگ پارامترهای احتراق، پیش‌بینی زمان تعمیرات و مدیریت هوشمند موجودی انبار به‌منظور حداکثرسازی ضریب بهره‌برداری.

پیشنهادهای راهبردی و سیاستی:

۷. تدوین چارچوب‌های سیاستی «مبتنی‌بر نتایج» به‌جای صرفاً حمایت از نصب ظرفیت. برای نمونه، تعیین مشوق‌های مالی متناسب با میزان کاهش واقعی انتشار کربن (شامل آثار ILUC) یا مقدار پسماند منحرف‌شده از دفن.

۸. تسهیل ایجاد بازارهای محلی و منطقه‌ای برای زیست‌توده پایدار و استانداردسازی قراردادهای تأمین سوخت بلندمدت به‌منظور کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و تضمین درآمد برای کشاورزان و تأمین‌کنندگان.

۹. اولویت‌دهی به توسعه‌ی پروژه‌های BECCS در مناطق دارای زیرساخت مناسب برای ذخیره‌سازی کربن (مانند میادین نفتی فرسوده) و ایجاد مکانیسم‌های مالی نوآورانه (مانند قراردادهای خرید کربن منفی) برای جذب سرمایه‌گذاری خصوصی.

مراجع

[۱] Basu, P. (۲۰۱۸). Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory (۳rd ed.). Academic Press.

[۲] IPCC. (۲۰۲۲). Climate Change ۲۰۲۲: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

[۳] Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (۲۰۱۷). Smart energy systems and ٤th generation district heating. Energy, ۱۳۷, ٥٥٦-٥٦٥.

[٤] McKendry, P. (۲۰۰۲). Energy production from biomass (part ۱): overview of biomass. Bioresource Technology, ۸۳(۱), ۳۷-٤٦.

[٥] Rentizelas, A. A., Tolis, A. J., & Tatsiopoulos, I. P. (۲۰۰۹). Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱۳(٤), ۸۸۷-۸۹٤.

[٦] Williams, C. L., Westover, T. L., Emerson, R. M., Tumuluru, J. S., & Li, C. (۲۰۱٦). Sources of biomass feedstock variability and the potential impact on biofuels production. BioEnergy Research, ۹(۱), ۱-۱٤.

[۷] Basu, P. (۲۰۱۸). Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory (۳rd ed.). Academic Press.

[۸] Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., ... & Minx, J. C. (۲۰۱۸). Negative emissions—Part ۲: Costs, potentials and side effects. Environmental Research Letters, ۱۳(٦), ۰٦۳۰۰۲.

[۹] Liu, G., Li, J., & Chen, Y. (۲۰۱۷). Combined heat and power production based on renewable biomass resources: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۷۸, ۱۲۷٦-۱۲۸۸.

[۱۰] Mckendry, P. (۲۰۰۲). Energy production from biomass (part ۱): overview of biomass. Bioresource Technology, ۸۳(۱), ۳۷-٤٦.

[۱۱] Rentizelas, A. A., Tolis, A. J., & Tatsiopoulos, I. P. (۲۰۰۹). Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱۳(٤), ۸۸۷-۸۹٤.

[۱۲] Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. (۲۰۱۱). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, ٥(٦), ٦۸۳-۷۰۷.

[۱۳] Weiland, P. (۲۰۱۰). Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology, ۸٥(٤), ۸٤۹-۸٦۰.

[۱٤] Williams, C. L., Westover, T. L., Emerson, R. M., Tumuluru, J. S., & Li, C. (۲۰۱٦). Sources of biomass feedstock variability and the potential impact on biofuels production. BioEnergy Research, ۹(۱), ۱-۱۴.

[۱۵] Alhazmy, M., Al-Dabbas, M., & Al-Shehri, S. (۲۰۲۲). Techno-economic analysis of a hybrid solar-biomass power plant for sustainable energy generation. Energy Conversion and Management, ۲۵٤, ۱۱۵۲٤۵.

[۱٦] Al-Sulaiman, F. A., Hamdullahpur, F., & Dincer, I. (۲۰۱۱). Performance assessment of a novel system using parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power production. Energy, ۳٦(۵), ۲٦۳٦-۲٦٤۵.

[۱۷] Beck, K. A., Harper, J. P., & Dowell, N. M. (۲۰۱۸). The role of BECCS in deep decarbonization pathways: A review of modeling approaches. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۹۲, ۸٦۱-۸۷۸.

[۱۸] Bhattacharya, S., Shah, N., & Hoadley, A. (۲۰۱۵). A review of torrefaction for biomass upgrading. Fuel Processing Technology, ۱۳۸, ۲۸٤-۲۹٤.

[۱۹] Bridgwater, A. V., Meier, D., & Radlein, D. (۱۹۹۹). An overview of fast pyrolysis of biomass. Organic Geochemistry, ۳۰(۱۲), ۱٤۷۹-۱٤۹۳.

[۲۰] Cherubini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strømman, A. H., & Hertwich, E. (۲۰۱۱). CO_2 emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. GCB Bioenergy, ۳(۵), ٤۱۳-٤۲٦.

[۲۱] Mancuso, L., Ferrari, G., & D'Angelo, M. (۲۰۲۰). Advanced process control for biomass-fired power plants: A review. Applied Energy, ۲۷۹, ۱۱۵۸۳۰.

[۲۲] Tillman, D. A. (۱۹۷۸). Wood as an energy resource. Academic Press.

[۲۳] Carone, M. T., Pantaleo, A., & Pellerano, A. (۲۰۲۱). Influence of the biomass gasification process on the performance of a CHP plant: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱۳۷, ۱۱۰٤٦۳.

[۲٤] Deb, C., Zhang, F., Yang, J., & Lee, S. E. (۲۰۱۸). A review on biomass supply chain optimization models. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, ۱۲(٦), ۱۰٤۰-۱۰۵۸.

[۲۵] Kumar, P., Singh, R., & Ghosh, P. (۲۰۲۱). Challenges and opportunities in post-combustion CO_2 capture from biomass-fired power plants: A review. Environmental Chemistry Letters, ۱۹(۲), ۱۲٤۷-۱۲۷۰.

[۲٦] Patel, M., Zhang, X., & Kumar, A. (۲۰۱۹). Techno-economic and life cycle assessment of small-scale biomass gasification and engine-based CHP systems. Energy, ۱۸۰, ۵۵٤-۵٦٦.

[۲۷] Rodríguez, E., García, R., & López, M. (۲۰۲۰). Hot gas filtration for biomass gasification: A review of materials and methods. Separation and Purification Technology, ۲٤۸, ۱۱۷۰۵۱.

[۲۸] Singh, A., Pedersen, E., & Rosendahl, L. (۲۰۲۳). Dynamic modeling and control of an integrated biomass gasification and CHP plant using Aspen Plus Dynamics. Fuel Processing Technology, ۲٤۱, ۱۰۷۵۹۷.

[۲۹] Zhang, Y., Zhao, X., & Li, H. (۲۰۲۲). Optimization of walnut shell gasification process parameters using response surface methodology for syngas production. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, ٤٤(۱), ۱۲۳۹-۱۲۵۵.

[۳۰] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (۲۰۱۱). Wind energy handbook (۲nd ed.). John Wiley & Sons.

[۳۱] Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (۲۰۱۵). Thermodynamics: An engineering approach (۸th ed.). McGraw-Hill Education.

[۳۲] Duderstadt, J. J., & Hamilton, L. J. (۱۹۷٦). Nuclear reactor analysis. John Wiley & Sons.

[۳۳] Green, M. A. (۲۰۰۹). The path to ۲۵٪ silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, ۱۷(۳), ۱۸۳-۱۸۹.

[۳٤] Horlock, J. H. (۲۰۰۳). Advanced gas turbine cycles. Pergamon.

[۳۵] Kumar, D., & Singal, S. K. (۲۰۱۵). Hydraulic turbine: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۵۱, ۷۳۰-۷۳۸.

[۳٦] Lund, H., Andersen, A. N., Østergaard, P. A., Mathiesen, B. V., & Connolly, D. (۲۰۱۵). From electricity smart grids to smart energy systems: A market operation based approach and understanding. Energy, ٦۲, ۲٤-۳٤.

[۳۷] Zhang, H. L., Baeyens, J., Degrève, J., & Cacères, G. (۲۰۱۳). Concentrated solar power plants: Review and design methodology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۲۲, ٤٦٦-٤۸۱.

[۳۸] Basu, P. (۲۰۱۸). Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory (۳rd ed.). Academic Press.

[۳۹] Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., ... & Minx, J. C. (۲۰۱۸). Negative emissions—Part ۲: Costs, potentials and side effects. Environmental Research Letters, ۱۳(٦), ۰٦۳۰۰۲.

[٤۰] Liu, G., Li, J., & Chen, Y. (۲۰۱۷). Combined heat and power production based on renewable biomass resources: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۷۸, ۱۲۷٦-۱۲۸۸.

[٤۱] McKendry, P. (۲۰۰۲). Energy production from biomass (part ۱): overview of biomass. Bioresource Technology, ۸۳(۱), ۳۷-٤٦.

[٤۲] Rentizelas, A. A., Tolis, A. J., & Tatsiopoulos, I. P. (۲۰۰۹). Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱۳(٤), ۸۸۷-۸۹٤.

[٤۳] Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. (۲۰۱۱). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, ۵(٦), ٦۸۳-۷۰۷.

[٤٤] Weiland, P. (۲۰۱۰). Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology, ۸۵(٤), ۸٤۹-۸٦۰.

[٤۵] Williams, C. L., Westover, T. L., Emerson, R. M., Tumuluru, J. S., & Li, C. (۲۰۱٦). Sources of biomass feedstock variability and the potential impact on biofuels production. BioEnergy Research, ۹(۱), ۱-۱۴.

[٤٦] Cherubini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strømman, A. H., & Hertwich, E. (۲۰۱۱). CO_2 emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. GCB Bioenergy, ۳(۵), ٤۱۳-٤۲٦.

[٤۷] Nussbaumer, T. (۲۰۰۳). Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. Energy & Fuels, ۱۷(٦), ۱۵۱۰-۱۵۲۱.

[٤٨] Rentizelas, A. A., Tolis, A. J., & Tatsiopoulos, I. P. (٢٠٠٩). Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ١٣(٤), ٨٨٧-٨٩٤.

[٤٩] Williams, C. L., Westover, T. L., Emerson, R. M., Tumuluru, J. S., & Li, C. (٢٠١٦). Sources of biomass feedstock variability and the potential impact on biofuels production. BioEnergy Research, ٩(١), ١-١٤.

[٥٠] Nussbaumer, T. (٢٠٠٣). Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. Energy & Fuels, ١٧(٦), ١٥١٠-١٥٢١.

[٥١] Rentizelas, A. A., Tolis, A. J., & Tatsiopoulos, I. P. (٢٠٠٩). Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ١٣(٤), ٨٨٧-٨٩٤.

[٥٢] Williams, C. L., Westover, T. L., Emerson, R. M., Tumuluru, J. S., & Li, C. (٢٠١٦). Sources of biomass feedstock variability and the potential impact on biofuels production. BioEnergy Research, ٩(١), ١-١٤.

[٥٣] Basu, P. (٢٠١٨). Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory (٣rd ed.). Academic Press.

[٥٤] Cherubini, F., et al. (٢٠١١). CO_2 emissions from biomass combustion for bioenergy. GCB Bioenergy, ٣(٥), ٤١٣-٤٢٦.

[٥٥] Fuss, S., et al. (٢٠١٨). Negative emissions—Part ٢. Environmental Research Letters, ١٣(٦), ٠٦٣٠٠٢.

[٥٦] Liu, G., et al. (٢٠١٧). Combined heat and power production based on renewable biomass resources. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٧٨, ١٢٧٦-١٢٨٨.

[٥٧] McKendry, P. (٢٠٠٢). Energy production from biomass (part ١). Bioresource Technology, ٨٣(١), ٣٧-٤٦.

[٥٨] Nussbaumer, T. (٢٠٠٣). Combustion and co-combustion of biomass. Energy & Fuels, ١٧(٦), ١٥١٠-١٥٢١.

[٥٩] Rentizelas, A. A., et al. (٢٠٠٩). Logistics issues of biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ١٣(٤), ٨٨٧-٨٩٤.

[٦٠] Williams, C. L., et al. (٢٠١٦). Sources of biomass feedstock variability. BioEnergy Research, ٩(١), ١-١٤.

[٦١] Ahrenfeldt, J., Thomsen, T. P., Henriksen, U., & Clausen, L. R. (٢٠١٣). Biomass gasification cogeneration: A review of state of the art technology and near future perspectives. Applied Thermal Engineering, ٥٠(٢), ١٤٠٧-١٤١٧.

[٦٢] Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., & Woess-Gallasch, S. (٢٠٠٩). Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. Resources, Conservation and Recycling, ٥٣(٨), ٤٣٤-٤٤٧.

[٦٣] Dias, J. M., Costa, M., & Azevedo, J. L. (٢٠١٩). Sugarcane bagasse as a biomass resource for energy production: A case study of a Brazilian sugar mill. Biomass and Bioenergy, ١٢١, ١-٩.

[٦٤] Hupa, M., Karlström, O., & Vainio, E. (٢٠١٧). Combustion of biomass in circulating fluidized bed boilers: An overview of the Finnish experience. Energy Procedia, ١٢٠, ٣-١٠.

[٦٥] Kitzler, H., Pfeifer, C., & Hofbauer, H. (٢٠٢٠). Economic assessment of biomass gasification plants for decentralized power generation in Austria. Biomass Conversion and Biorefinery, ١٠, ١-١٤.

[٦٦] Lamers, P., Hoefnagels, R., Junginger, M., Hamelinck, C., & Faaij, A. (٢٠١٥). Global solid biomass trade for energy by ٢٠٢٠: An assessment of potential import streams and supply costs to North-West Europe under sustainability constraints. GCB Bioenergy, ٧(٤), ٦١٨-٦٣٤.

[٦٧] Livingston, W. R. (٢٠١٦). The operation of large-scale biomass-fired power plants. In Biomass combustion science, technology and engineering (pp. ٣٠٤-٣٣٢). Woodhead Publishing.

[٦٨] Peterseim, J. H., White, S., Tadros, A., & Hellwig, U. (٢٠١٤). Concentrated solar power hybrid plants: Which technologies are best suited for hybridisation? Renewable Energy, ٦٧, ١٧٩-١٨٥.

[٦٩] De Meyer, A., Cattrysse, D., & Van Orshoven, J. (٢٠١٤). A generic mathematical model to optimise strategic and tactical decisions in biomass-based supply chains (OPTIMASS). European Journal of Operational Research, ٢٤٥(١), ٢٤٧-٢٦٤.

[٧٠] EEA (European Environment Agency). (٢٠٢٢). Air quality in Europe: ٢٠٢٢ report. EEA Report No ٠٥/٢٠٢٢.

[٧١] Hansson, J., Berndes, G., & Johnsson, F. (٢٠١٩). The role of biomass gasification in low-carbon energy systems: A review of technological progress and policy implications. Energy Reports, ٥, ١٠٧٨-١٠٩٠.

[٧٢] Kjärstad, J., Skagestad, R., Eldrup, N. H., & Johnsson, F. (٢٠١٦). Bio-CCS: Feasibility comparison of large scale carbon-negative solutions. International Journal of Greenhouse Gas Control, ٥٤, ١-١٢.

[٧٣] Styles, D., Jones, M. B., & Meers, E. (٢٠١٦). Environmental balance of the UK biogas sector: An evaluation by consequential life cycle assessment. Science of The Total Environment, ٥٦٠-٥٦١, ٢٤١-٢٥٣.

[٧٤] Weiland, P. (٢٠١٠). Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology, ٨٥(٤), ٨٤٩-٨٦٠.

[٧٥] WRAP (Waste and Resources Action Programme). (٢٠١٨). The economic and environmental benefits of wood waste recycling in the UK.