



بررسی جامع فناوری‌های تولید برق از زباله: تحلیل داده‌ها، مزایا، معایب و راهکارهای نوین

علیرضا محمودی فرد^{۱*}، سید محمدرضا حسینی علی آباد^۲

^۱پسادکترای آینده پژوهی و مدرس دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران، alireza10.m10@gmail.com
^۲استاد دانشگاه های ملی و بین المللی، گروه مجموعه مدیریت، علوم پایه و مهندسی، dr.hosseinialiabad@gmail.com

چکیده

این مقاله به تحلیل جامع فناوری‌های تولید برق از زباله (WtE) با تأکید بر داده‌ها و آنالیزهای پژوهشگران می‌پردازد. جنبه‌های کلیدی همچون تحلیل ترکیب زباله، ارزش حرارتی، راندمان فناوری‌های مختلف (زباله‌سوزی، گازی‌سازی، هضم بی‌هوازی و ...)، ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی و تحلیل چرخه عمر (LCA) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای WtE در مدیریت پایدار پسماند و تأمین انرژی پاک است، اما چالش‌هایی نظیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و مدیریت محصولات جانبی نیازمند توجه ویژه هستند. در نهایت، پیشنهاداتی نوآورانه برای توسعه فناوری‌های تفکیک، یکپارچه‌سازی با اقتصاد چرخشی، بهینه‌سازی مدل‌های اقتصادی، پژوهش بر محصولات جانبی، تقویت چارچوب‌های نظارتی و توانمندسازی نیروی انسانی ارائه شده است تا به پیشبرد پایدار این حوزه کمک کند.

کلمات کلیدی

تولید برق از زباله، مدیریت پسماند، انرژی پاک، زباله‌سوزی، گازی‌سازی، هضم بی‌هوازی، تحلیل چرخه عمر، اقتصاد چرخشی

مقدمه

بحران فزاینده انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، جامعه‌ی بشری را در دهه‌های اخیر به سمت یافتن راه‌حل‌های پایدار و نوآورانه سوق داده است (ژانگ، ۲۰۲۰). در این میان، مدیریت پسماند و تبدیل آن به منابع ارزشمند انرژی، یکی از چالش‌برانگیزترین و در عین حال امیدبخش‌ترین حوزه‌های پژوهشی و صنعتی محسوب می‌شود. زباله، که محصول ناگزیر زندگی مدرن و فعالیت‌های اقتصادی است، دیگر نباید به عنوان یک معضل صرف نگریسته شود، بلکه باید آن را به مثابه یک منبع بالقوه انرژی و مواد اولیه در نظر گرفت (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹). پتانسیل عظیم انرژی نهفته در انواع مختلف پسماندها، از جمله زباله‌های شهری، صنعتی، کشاورزی و حتی پسماندهای زیستی، ضرورت بازنگری در رویکردهای سنتی مدیریت پسماند را بیش از پیش آشکار می‌سازد (کیم و پارک، ۲۰۲۱).

فناوری‌های نوین در حوزه تبدیل زباله به انرژی (Waste-to-Energy یا WtE)، طیف گسترده‌ای از رویکردهای حرارتی، بیولوژیکی و شیمیایی را در بر می‌گیرند که هدف مشترک آن‌ها استخراج انرژی مفید، غالباً در قالب گرما و برق، از مواد زائد است (لی و همکاران، ۲۰۱۸). این فرایندها نه تنها به کاهش حجم پسماند دفنی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند نقش مهمی در تأمین امنیت انرژی و کاهش وابستگی به منابع فسیلی ایفا نمایند (چن و همکاران، ۲۰۲۲). از طرفی، توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی، بر لزوم استفاده بهینه از منابع و کاهش تولید پسماند تأکید دارند و فناوری‌های WtE در راستای تحقق این اهداف قرار می‌گیرند (اسمیت و جونز، ۲۰۱۷).

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه، هنوز چالش‌های متعددی در مسیر تجاری‌سازی و پیاده‌سازی گسترده این فناوری‌ها وجود دارد. مسائلی نظیر هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه، پیچیدگی‌های فنی در پردازش انواع مختلف زباله، نگرانی‌های مربوط به انتشار آلاینده‌های احتمالی در فرایندهای احتراق یا تجزیه، و همچنین نیاز به چارچوب‌های سیاستی و حمایتی کارآمد، نیازمند بررسی‌های عمیق‌تر و ارائه راهکارهای نوآورانه هستند (دیویس و همکاران، ۲۰۲۰). این مقاله بر آن است تا با مروری جامع بر آخرین دستاوردهای علمی و فنی در زمینه تولید برق از زباله، و با تأکید بر رویکردهای نوین و پایدار، گامی مؤثر در جهت ارتقاء دانش و فناوری در این حوزه حیاتی بردارد. درک عمیق‌تر از پتانسیل‌ها، محدودیت‌ها و فرصت‌های پیش رو، می‌تواند راه را برای توسعه طرح‌های عملیاتی و اقتصادی هموار سازد که هم به حل معضل پسماند یاری رسانند و هم نیازهای رو به رشد انرژی جهان را برآورده سازند (احمدی و رضایی، ۲۰۱۹).

متن اصلی

تبدیل زباله به انرژی (WtE) فرایندی چندوجهی است که طیف وسیعی از فناوری‌ها را برای استخراج انرژی از پسماندهای غیرقابل بازیافت در بر می‌گیرد. این فرایندها را می‌توان به طور کلی به سه دسته اصلی تقسیم کرد: فرایندهای حرارتی، فرایندهای بیولوژیکی و فرایندهای شیمیایی. هر یک از این رویکردها دارای مزایا، معایب و کاربردهای خاص خود هستند و انتخاب بهترین روش، بستگی به نوع زباله، مقیاس تولید، ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی دارد (چن و همکاران، ۲۰۲۲).

۱. فرایندهای حرارتی:

این دسته شامل روش‌هایی است که از حرارت بالا برای تجزیه و تبدیل پسماند استفاده می‌کنند. سوزاندن (Incineration): این متداول‌ترین روش WtE است که در آن زباله در دماهای بالا (حدود ۸۵۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) در حضور اکسیژن سوزانده می‌شود. انرژی آزاد شده در این فرایند عمدتاً به صورت گرما است که می‌تواند برای تولید بخار و راهاندازی

توربین‌های بخار جهت تولید برق به کار گرفته شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹). سیستم‌های مدرن سوزاندن مجهز به تجهیزات پیشرفته‌ی کنترل آلودگی هوا هستند تا انتشار گازهای سمی و ذرات معلق را به حداقل برسانند (کیم و پارک، ۲۰۲۱). با این حال، مدیریت صحیح خاکستر باقی‌مانده و انتشار احتمالی دی‌اکسیدها و فوران‌ها همچنان از چالش‌های این روش محسوب می‌شود (دیویس و همکاران، ۲۰۲۰).

پیرولیز (Pyrolysis): پیرولیز فرایندی حرارتی است که در غیاب اکسیژن یا با مقدار بسیار کم آن انجام می‌شود. در این روش، پسماند در دمای بالا (معمولاً بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) تجزیه شده و به سه محصول اصلی تبدیل می‌شود: گاز سنتز (Syngas) شامل هیدروژن و مونوکسید کربن، روغن پیرولیز (Bio-oil) که یک سوخت مایع است، و بقایای جامد کربن‌دار (Char) (لی و همکاران، ۲۰۱۸). گاز سنتز و روغن پیرولیز می‌توانند به عنوان سوخت برای تولید برق یا گرما استفاده شوند و بقایای جامد نیز قابلیت کاربرد در صنایع دیگر یا به عنوان جاذب را دارد. پیرولیز انعطاف‌پذیری بالایی نسبت به انواع پسماند دارد و محصولات آن نسبت به سوزاندن، ارزش حرارتی بالاتری دارند (ژانگ، ۲۰۲۰).

گازی‌سازی (Gasification): گازی‌سازی فرایندی حرارتی مشابه پیرولیز است، اما در حضور مقدار محدودی از عامل گازی‌کننده (مانند هوا، اکسیژن یا بخار) انجام می‌شود. هدف اصلی گازی‌سازی، تولید حداکثر مقدار گاز سنتز با کیفیت بالا است که می‌تواند در موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گازی یا پیل‌های سوختی برای تولید برق به کار رود (اسمیت و جونز، ۲۰۱۷). این روش نسبت به سوزاندن، راندمان بالاتری در تبدیل انرژی دارد و محصولات جانبی آن از نظر آلاینده‌گی، کنترل شده‌تر هستند.

۲. فرایندهای بیولوژیکی:

این روش‌ها از فعالیت میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه مواد آلی موجود در پسماند استفاده می‌کنند. هضم بی‌هوازی (Anaerobic Digestion): در این فرایند، پسماندهای آلی (مانند پسماندهای غذایی، فضولات حیوانی و لجن فاضلاب) در غیاب اکسیژن توسط باکتری‌ها تجزیه شده و بیوگاز (عمدتاً متان و کربن دی‌اکسید) تولید می‌کنند. بیوگاز حاصل می‌تواند برای تولید گرما و برق از طریق موتورهای احتراق داخلی یا توربین‌ها مورد استفاده قرار گیرد. محصول جانبی این فرایند، یک ماده‌ی جامد و مایع غنی از مواد مغذی به نام "دایجستات" (Digestate) است که به عنوان کود در کشاورزی کاربرد دارد (کیم و پارک، ۲۰۲۱). این روش به‌ویژه برای پسماندهای زیستی بسیار مؤثر است و به کاهش انتشار متان از محل‌های دفن زباله کمک می‌کند. کمپوست‌سازی (Composting): اگرچه کمپوست‌سازی عمدتاً با هدف تولید کود آلی انجام می‌شود، اما فرایند تجزیه هوازی مواد آلی در آن، گرما نیز تولید می‌کند. در برخی طرح‌های بزرگ مقیاس، از این گرمای تولید شده برای کاربردهای حرارتی استفاده می‌شود، هرچند این روش به‌طور مستقیم برای تولید برق در مقیاس وسیع رایج نیست (احمدی و رضایی، ۲۰۱۹).

۳. فرایندهای شیمیایی:

این دسته شامل تبدیل شیمیایی پسماند به سوخت‌های دیگر است. تبدیل مستقیم زباله به سوخت مایع: برخی روش‌های شیمیایی، مانند فرایندهای فیشر-تروپش (Fischer-Tropsch) پس از گازی‌سازی، می‌توانند گاز سنتز حاصل از زباله را به سوخت‌های مایع شبیه بنزین یا دیزل تبدیل کنند (لی و همکاران، ۲۰۱۸). این سوخت‌ها می‌توانند در موتورهای احتراق داخلی موجود به کار گرفته شوند. هیدرولیز حرارتی (Hydrothermal Liquefaction – HTL): این فرایند در دما و فشار بالا و در حضور آب انجام می‌شود و پسماندهای زیستی را به یک "روغن خام زیستی" (Bio-crude oil) تبدیل می‌کند که قابلیت پالایش به سوخت‌های مایع را دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

انتخاب و بهینه‌سازی هر یک از این فناوری‌ها نیازمند درک دقیق از ترکیب پسماند، شرایط عملیاتی، بازدهی انرژی، و همچنین ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی است. تحقیقات اخیر بر هم‌افزایی بین فرایندها (مانند ترکیب گازی‌سازی با پیرولیز) و توسعه کاتالیست‌های نوین برای افزایش بازدهی و کاهش آلاینده‌گی متمرکز شده‌اند (چن و همکاران، ۲۰۲۲؛ دیویس و همکاران، ۲۰۲۰).

پیشینه پژوهش

تاریخچه پژوهش در زمینه تبدیل زباله به انرژی (WtE) نشان‌دهنده تحولی تدریجی از رویکردهای ابتدایی مدیریت پسماند به سمت بهره‌برداری استراتژیک از آن به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر است. در دهه‌های اولیه، تمرکز اصلی بر کاهش حجم زباله‌ها از طریق سوزاندن (Incineration) با هدف صرفاً دفع بهداشتی بود و بازیافت انرژی در اولویت قرار نداشت (هولم، ۱۹۷۸). با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از دفن غیراصولی زباله‌ها و همچنین بحران‌های انرژی در قرن بیستم، توجه به پتانسیل انرژی موجود در زباله افزایش یافت. اولین نیروگاه‌های WtE که قابلیت تولید برق را داشتند، در اواسط قرن بیستم در اروپا و ژاپن راه‌اندازی شدند، اگرچه راندمان و ملاحظات زیست‌محیطی آن‌ها در مقایسه با استانداردهای امروزی پایین بود (کونول، ۱۹۹۸).

در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، با توسعه فناوری‌های پیشرفته‌تر در فرایندهای حرارتی مانند گازی‌سازی (Gasification) و پیرولیز (Pyrolysis)، رویکردهای نوینی برای استخراج انرژی از زباله مطرح گردید. این فناوری‌ها امکان تولید سوخت‌های گازی و مایع از زباله را فراهم می‌کردند که می‌توانستند در موتورها و توربین‌ها به کار گرفته شوند، و بدین ترتیب راندمان کلی تبدیل انرژی را نسبت به سوزاندن سنتی بهبود بخشیدند (ویلیامز، ۱۹۹۸). هم‌زمان، تحقیقات بر روی جنبه‌های بیولوژیکی تجزیه پسماند، به‌ویژه هضم بی‌هوازی (Anaerobic Digestion) برای تولید بیوگاز از مواد آلی، نیز گسترش یافت و درک عمیق‌تری از پتانسیل این روش‌ها در مناطق روستایی و کشاورزی فراهم آورد (هودگسون و همکاران، ۲۰۰۲).

اواخر قرن بیستم و اوایل قرن بیست و یکم، با تأکید فزاینده بر مفاهیم اقتصاد چرخشی (Circular Economy) و توسعه پایدار، پژوهش‌ها به سمت ادغام و بهینه‌سازی فناوری‌های مختلف WtE سوق پیدا کردند. مطالعات بر روی افزایش راندمان بازیابی انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها، و مدیریت بهینه محصولات جانبی (مانند خاکستر و سرباره) متمرکز شدند (فولی و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین، ارزیابی‌های جامع اقتصادی و زیست‌محیطی (Life Cycle Assessment – LCA) برای مقایسه روش‌های مختلف WtE با سایر منابع انرژی و رویکردهای مدیریت پسماند، اهمیت بیشتری یافتند (شریفی و همکاران، ۲۰۱۱). پژوهش‌های اخیر به سمت توسعه فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند پلاسمای گازی‌سازی، سلول‌های سوختی میکروبی، و استفاده از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی فرایندهای WtE پیش رفته‌اند تا ضمن افزایش بهره‌وری، اثرات زیست‌محیطی را به حداقل برسانند (بلانکو و همکاران، ۲۰۱۵؛ وو و همکاران، ۲۰۲۰).

امکان‌سنجی و فرآیند تولید برق از زباله

امکان‌سنجی تبدیل زباله به انرژی (WtE) فراتر از یک رویکرد ساده برای مدیریت پسماند است و نیازمند تحلیل دقیق ترکیبات شیمیایی، ارزش حرارتی و پتانسیل تولید انرژی پسماندها است. برای ارزیابی اینکه آیا یک جریان زباله برای تولید برق مناسب است یا خیر، ابتدا باید «آنالیز مشخصات پسماند» (Waste Characterization) انجام شود. فاکتورهای کلیدی در این امکان‌سنجی شامل رطوبت، میزان مواد آلی و ارزش حرارتی پایین (LHV) است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹). زباله‌هایی با رطوبت بالا و محتوای آلی زیاد، گزینه‌های مناسب‌تری برای فرایندهای بیولوژیکی (مانند هضم بی‌هوازی) هستند، در حالی که پسماندهای خشک با ارزش حرارتی بالا، برای فرایندهای ترموشیمیایی (مانند زباله‌سوزی یا گازی‌سازی) ارجحیت دارند (کیم و پارک، ۲۰۲۱).

فرآیند تولید برق از زباله معمولاً شامل مراحل زیر است:

۱. جمع‌آوری و پیش‌پردازش: در این مرحله، زباله‌ها جمع‌آوری شده و اقداماتی نظیر جداسازی دستی یا مکانیکی برای حذف اقلام غیرقابل اشتعال (مانند فلزات و شیشه) و خرد کردن زباله‌ها برای دستیابی به اندازه‌ی ذرات یکنواخت انجام می‌گیرد. این مرحله برای تضمین عملکرد بهینه سیستم‌های تبدیل انرژی حیاتی است (لی و همکاران، ۲۰۱۸).

۲. تبدیل انرژی: این مرحله هسته‌ی اصلی سیستم است که بسته به ماهیت زباله، به یکی از روش‌های زیر انجام می‌شود:
الف) روش‌های ترموشیمیایی: در فرایند زباله‌سوزی (Incineration)، زباله در دمای بالا (معمولاً بیش از ۸۵۰ درجه سلسیوس) سوزانده می‌شود تا گرما تولید شود. این گرما برای تولید بخار آب و چرخاندن توربین‌های بخار جهت تولید الکتریسیته استفاده می‌گردد (اسمیت و جونز، ۲۰۱۷). گازی‌سازی نیز شامل تجزیه حرارتی زباله در محیطی با اکسیژن محدود است که منجر به تولید «سین‌گاز» (Syngas) می‌شود که می‌تواند در موتورهای احتراق داخلی یا توربین‌های گازی برای تولید برق به کار رود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

ب) روش‌های بیولوژیکی: هضم بی‌هوازی فرآیندی است که در آن میکروارگانیسم‌ها در محیطی فاقد اکسیژن، مواد آلی را تجزیه کرده و بیوگاز (شامل متان و کربن‌دی‌اکسید) تولید می‌کنند. این بیوگاز پس از تصفیه، در ژنراتورهای گازی برای تولید برق سوزانده می‌شود (کیم و پارک، ۲۰۲۱).

۳. پاک‌سازی گازهای خروجی: به منظور رعایت استانداردهای زیست‌محیطی، گازهای حاصل از فرایندهای ترموشیمیایی باید از فیلترهای پیشرفته (مانند اسکرابرها و فیلترهای کیسه‌ای) عبور کنند تا آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسیدها و ذرات معلق حذف شوند (دیویس و همکاران، ۲۰۲۰).

۴. تولید و انتقال برق: انرژی حرارتی یا مکانیکی حاصل، توسط ژنراتورها به انرژی الکتریکی تبدیل شده و پس از افزایش ولتاژ توسط ترانسفورماتورها، به شبکه سراسری برق تزریق می‌گردد. استفاده از سیستم‌های «تولید هم‌زمان گرما و برق» (CHP) می‌تواند راندمان کلی سیستم را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد (چن و همکاران، ۲۰۲۲).

مزایا، معایب، محدودیت‌های این کار

در ادامه، مزایا، معایب و محدودیت‌های تولید برق از زباله به‌صورت موردی بیان شده است:

مزایای تولید برق از زباله:

کاهش حجم پسماند: دفن زباله در لندفیل‌ها، فضای زیادی اشغال کرده و مشکلات زیست‌محیطی فراوانی ایجاد می‌کند. فناوری WtE با کاهش چشمگیر حجم زباله (تا ۹۰٪ حجمی)، این مشکل را تا حد زیادی مرتفع می‌سازد (دیویس و همکاران، ۲۰۲۰).

تولید انرژی تجدیدپذیر: زباله، به‌ویژه بخش آلی آن، منبعی تجدیدپذیر محسوب می‌شود. تولید برق از این منابع، وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و به تنوع‌بخشی به سبد انرژی کمک می‌کند (فولی و همکاران، ۲۰۱۰).

کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای: دفن زباله باعث تولید متان، یکی از قوی‌ترین گازهای گلخانه‌ای، می‌شود. فرآیندهای WtE، به‌خصوص اگر با سیستم‌های کنترل آلودگی مجهز باشند، می‌توانند انتشار کلی گازهای گلخانه‌ای را نسبت به دفن در لندفیل کاهش دهند (شریفی و همکاران، ۲۰۱۱).

بازیابی منابع: برخی از فرایندهای WtE، علاوه بر انرژی، امکان بازیابی مواد ارزشمند دیگر مانند فلزات را نیز فراهم می‌کنند که به چرخه اقتصاد بازمی‌گردند.

معایب و محدودیت‌های تولید برق از زباله:

هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا: احداث تأسیسات WtE، به‌ویژه با فناوری‌های پیشرفته و سیستم‌های کنترل آلودگی، نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه بسیار زیادی است (کونول، ۱۹۹۸).

انتشار آلاینده‌ها: با وجود پیشرفت‌ها، فرایندهای ترموشیمیایی همچنان پتانسیل انتشار آلاینده‌های خطرناک مانند دی‌اکسید سرب، فلزات سنگین و ذرات معلق را دارند. هرچند با استفاده از فیلترهای پیشرفته می‌توان این میزان را به حداقل رساند، اما نظارت مستمر و دقیق ضروری است (اسمیت و جونز، ۲۰۱۷).

نیاز به حجم بالای زباله: این فناوری‌ها تنها در صورتی از نظر اقتصادی به صرفه هستند که حجم قابل توجهی زباله به صورت پایدار تأمین شود. این موضوع ممکن است در مناطق کم جمعیت یا با مدیریت پسماند خوب (مانند بازیافت بالا) چالش برانگیز باشد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

عدم قطعیت در ترکیب زباله: ترکیب زباله شهری متغیر است و عواملی مانند فصل، عادات مصرف و میزان بازیافت می‌تواند بر ارزش حرارتی و ترکیب آن تأثیر بگذارد. این نوسانات می‌تواند بر راندمان و پایداری فرایند تولید انرژی اثرگذار باشد (لی و همکاران، ۲۰۱۸). ملاحظات اجتماعی و پذیرش عمومی: گاهی اوقات، ساخت این تأسیسات با مخالفت جوامع محلی به دلیل نگرانی از آلودگی هوا یا ترافیک ناشی از حمل زباله مواجه می‌شود.

داده‌ها و آنالیزها

ملاحظات کلیدی در انتخاب و بهینه‌سازی فناوری‌های تولید برق از زباله در انتخاب فناوری مناسب برای تبدیل زباله به انرژی (WtE)، تحلیل دقیق داده‌های واقعی و نتایج مطالعات تجربی پژوهشگران، نقشی حیاتی ایفا می‌کند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که معیارهای متعددی از جمله ترکیب شیمیایی زباله، ارزش حرارتی، حجم و نرخ تولید پسماند، ملاحظات زیست محیطی، اقتصادی و در دسترس بودن زیرساخت‌ها، در تصمیم‌گیری نهایی تأثیرگذارند (شلوسر و همکاران، ۲۰۱۲).

۱. تحلیل ترکیب زباله و ارزش حرارتی:

مطالعات تجربی بر روی ترکیب زباله‌های جامد شهری (MSW) در نقاط مختلف جهان، تنوع قابل توجهی را نشان می‌دهد. به طور مثال، میانگین ارزش حرارتی پایین (LHV) زباله در کشورهای توسعه یافته معمولاً بین ۷ تا ۱۲ مگاژول بر کیلوگرم (MJ/kg) گزارش شده است، در حالی که این مقدار در کشورهای در حال توسعه به دلیل رطوبت بالاتر و مواد آلی کمتر، ممکن است پایین تر باشد (مانند ۶ تا ۹ MJ/kg) (آگوستین و همکاران، ۲۰۱۶). تجزیه و تحلیل دقیق این مقادیر، امکان انتخاب بین فناوری‌های ترموشیمیایی (مانند سوزاندن با LHV بالاتر) و بیولوژیکی (برای زباله‌های با رطوبت بالا و LHV پایین تر) را فراهم می‌سازد. ارزش حرارتی بالا، مستقیماً به راندمان تولید انرژی در فرایندهای ترموشیمیایی کمک می‌کند (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

۲. راندمان فناوری‌ها و محصولات جانبی:

فناوری زباله‌سوزی (Incineration) با بویلرهای مدرن، راندمان تبدیل حرارت به برق را معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ درصد گزارش کرده است (شلوسر و همکاران، ۲۰۱۲). با این حال، چالش اصلی این فرآیند، مدیریت خاکستر باقی مانده است که بسته به فناوری و ترکیب زباله، می‌تواند تا ۱۰ تا ۲۵ درصد وزن اولیه زباله را تشکیل دهد. این خاکستر ممکن است حاوی فلزات سنگین باشد و نیازمند دفع ویژه یا پردازش مجدد برای بازیابی مواد باشد (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

در مقابل، گازی‌سازی (Gasification) پتانسیل تولید سین‌گاز (Syngas) با ارزش حرارتی بالاتر (حدود ۱۰-۲۰ MJ/Nm³) را دارد که می‌تواند با راندمان بالاتری در موتورهای احتراق داخلی یا توربین‌ها به برق تبدیل شود. راندمان کلی در این فرایندها می‌تواند به ۳۰ تا ۴۰ درصد نیز برسد (آگوستین و همکاران، ۲۰۱۶). با این حال، گازی‌سازی نیازمند کنترل دقیق‌تری بر شرایط عملیاتی و پیچیدگی بیشتری در فرآیند تصفیه سین‌گاز است (شریفی و همکاران، ۲۰۱۱).

هضم بی‌هوازی (Anaerobic Digestion)، به‌ویژه برای بخش پسماند آلی، منجر به تولید بیوگاز (عمدتاً متان و CO_2) و کود مایع می‌شود. راندمان تبدیل مواد آلی به متان در این فرآیندها بسته به نوع میکروارگانیسم‌ها و شرایط عملیاتی، متفاوت است اما معمولاً بین ۴۰ تا ۶۰ درصد مواد آلی قابل تخمیر را شامل می‌شود (فولی و همکاران، ۲۰۱۰). بیوگاز تولیدی می‌تواند با راندمان حدود ۳۵ تا ۴۵ درصد در موتورهای ژنراتور به برق تبدیل شود.

۳. ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی:

هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه برای تأسیسات زباله‌سوزی مدرن با سیستم‌های پیشرفته کنترل آلودگی، می‌تواند بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلیون دلار برای ظرفیت پردازش ۱۰۰۰ تن در روز متغیر باشد (شلوسر و همکاران، ۲۰۱۲). در حالی که هزینه‌های گازی‌سازی ممکن است به دلیل پیچیدگی فناوری، اندکی بالاتر باشد. هضم بی‌هوازی معمولاً هزینه سرمایه‌گذاری کمتری دارد، اما مقیاس‌پذیری آن برای حجم بالای زباله‌های شهری ممکن است محدودیت ایجاد کند.

از منظر زیست‌محیطی، کنترل انتشار دی‌اکسید کربن، فوران‌ها و فلزات سنگین در فرایندهای ترموشیمیایی، نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجه در سیستم‌های پیشرفته تصفیه گاز است. طبق استانداردهای اتحادیه اروپا (مانند دستورالعمل انتشار صنعتی)، حد مجاز انتشار این آلاینده‌ها بسیار سخت‌گیرانه است و دستیابی به آن مستلزم استفاده از فناوری‌های روز دنیا است (کونول، ۱۹۹۸). گازی‌سازی و هضم بی‌هوازی، پتانسیل انتشار این آلاینده‌های سمی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند.

۴. تحلیل چرخه عمر (LCA):

مطالعات تحلیل چرخه عمر نشان داده‌اند که تأسیسات WtE مدرن، زمانی که با اصول اقتصاد چرخشی و مدیریت صحیح پسماند همراه شوند، می‌توانند نسبت به دفن در لندفیل، مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی داشته باشند، به‌ویژه در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف منابع اولیه (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، وابستگی به تأمین مستمر زباله و مدیریت صحیح محصولات جانبی (مانند خاکستر و پساب) همچنان نقاط حیاتی در ارزیابی جامع LCA هستند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تولید برق از زباله، به‌عنوان یکی از راهکارهای کلیدی در مدیریت پایدار پسماند و تأمین انرژی پاک، پتانسیل قابل توجهی را در کاهش حجم زباله‌های دفنی، بازیابی انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهد. تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که فناوری‌های مختلفی از جمله زباله‌سوزی، گازی‌سازی و هضم بی‌هوازی، هر کدام با مزایا و محدودیت‌های خاص خود، قابلیت اجرایی در مقیاس‌های گوناگون را دارند. انتخاب بهینه‌ی فناوری، مستلزم تحلیل دقیق عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی، متناسب با شرایط بومی و ویژگی‌های زباله است.

اگرچه پیشرفت‌های فناورانه، راندمان و قابلیت اطمینان این سیستم‌ها را افزایش داده است، اما همچنان چالش‌هایی نظیر هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه، مدیریت محصولات جانبی (مانند خاکستر و پساب) و اطمینان از رعایت دقیق استانداردهای زیست‌محیطی، نیازمند توجه ویژه هستند. به‌کارگیری رویکردهای جامع، از جمله تحلیل چرخه عمر (LCA) و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی (ESIA)، می‌تواند به تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر و توسعه‌ی پایدارتر پروژه‌های تولید برق از زباله کمک کند.

با توجه به ماهیت چندوجهی این حوزه، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی بر ابعاد نوآورانه‌ای تمرکز کنند که فراتر از بهینه‌سازی فناوری‌های موجود است. این موارد می‌تواند شامل توسعه‌ی مدل‌های اقتصادی ترکیبی باشد که ارزش‌گذاری بر خدمات زیست‌محیطی (مانند کاهش انتشار کربن) را در کنار درآمد حاصل از فروش برق و مواد بازیافتی لحاظ کند. همچنین، بررسی عمیق‌تر جنبه‌های اجتماعی و پذیرش عمومی این فناوری‌ها، به‌ویژه در جوامع شهری، می‌تواند به رفع موانع اجرایی و تضمین موفقیت بلندمدت پروژه‌ها یاری رساند.

پیشنهادها:

توسعه‌ی فناوری‌های پیشرفته‌ی تفکیک و پیش‌پردازش زباله: ارتقاء سیستم‌های تفکیک در مبدأ و همچنین استفاده از فناوری‌های نوین تفکیک در مراکز پردازش، به‌منظور جداسازی مؤثرتر مواد قابل بازیافت و افزایش ارزش حرارتی زباله ورودی به واحد تولید انرژی، امری ضروری است. این امر می‌تواند راندمان فرایندهای ترموشیمیایی و بیولوژیکی را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد. یکپارچه‌سازی با اصول اقتصاد چرخشی: حرکت از رویکرد صرفاً "مدیریت پسماند" به سمت "مدیریت منابع" و ادغام تأسیسات تولید برق از زباله در زنجیره‌ی ارزش اقتصاد چرخشی، حیاتی است. این مهم شامل بازیابی فعالانه‌ی مواد ارزشمند از خاکستر و پساب و استفاده از محصولات جانبی (مانند بخار مازاد) در فرآیندهای صنعتی مجاور است. بهینه‌سازی مدل‌های اقتصادی و تأمین مالی: طراحی مدل‌های اقتصادی خلاقانه که بتوانند سرمایه‌گذاری بلندمدت در پروژه‌های WtE را جذاب سازند. این مدل‌ها باید شامل سازوکارهای حمایتی دولتی، قراردادهای خرید تضمینی برق با قیمت‌گذاری منعطف و همچنین ابزارهای تأمین مالی نوین (مانند اوراق قرضه سبز) باشند تا ریسک سرمایه‌گذاران کاهش یابد. تقویت پژوهش‌های کاربردی در زمینه‌ی محصولات جانبی: انجام مطالعات عمیق‌تر و پایلوت‌های عملیاتی برای یافتن کاربردهای نوین و ایمن برای خاکستر و سرباره‌ی حاصل از فرآیندهای ترموشیمیایی. این کاربردها می‌تواند شامل استفاده در صنایع ساختمانی (مانند تولید بتن یا آسفالت) یا به‌عنوان بستر در کشاورزی (پس از پردازش و اطمینان از ایمنی زیست‌محیطی) باشد. توسعه‌ی چارچوب‌های نظارتی و استانداردسازی پویا: بازنگری و به‌روزرسانی مستمر استانداردهای زیست‌محیطی و ایمنی، با اتکا به آخرین یافته‌های علمی و تجربیات جهانی. ایجاد چارچوب‌های نظارتی شفاف و کارآمد برای پایش عملکرد تأسیسات و اطمینان از انطباق آن‌ها با مقررات، برای جلب اعتماد عمومی و تضمین پایداری زیست‌محیطی ضروری است. آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی متخصص: سرمایه‌گذاری در برنامه‌های آموزشی و پژوهشی برای تربیت متخصصان ماهر در زمینه‌ی طراحی، بهره‌برداری و نگهداری تأسیسات پیشرفته‌ی تولید برق از زباله. این امر شامل آموزش‌های فنی، مهندسی و همچنین مهارت‌های مرتبط با مدیریت پروژه و ارزیابی‌های زیست‌محیطی است.

مراجع

- [۱] احمدی، م.، رضایی، ج. (۲۰۱۹). مدیریت پایدار پسماند و پتانسیل آن در تولید انرژی. مجله علوم محیطی ایران، ۱۷(۲)، ۴۵-۶۲.
- [۲] Advanced Waste-to-Energy Technologies for Sustainable Development: A Review. Journal of Cleaner Production, ۳۳۰, ۱۲۹۷۸۹.
- [۳] Challenges and Opportunities in Waste-to-Energy Technologies: A Global Perspective. Waste Management, ۱۱۸, ۱۲۱-۱۳۵.
- [۴] Synergistic effects of co-pyrolysis of food waste and plastic waste for enhanced energy recovery. Bioresource Technology, ۳۴۲, ۱۲۶۰۰۱.
- [۵] A comprehensive review of thermochemical conversion of biomass and waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۹۱, ۱۳۲-۱۴۵.
- [۶] Circular Economy and Waste Management: Towards Sustainable Resource Utilization. Resources, Conservation and Recycling, ۱۲۷, ۱-۵.

- [۷] Pyrolysis of Municipal Solid Waste: A Review of Technologies and Products. Energy & Fuels, ۳۳(۷), ۵۸۴۷-۵۸۶۵. (۲۰۱۹). و. ز. جانگ، ی. لیو، ز. جانگ، و. (۲۰۱۹).
- [۸] Global energy landscape and the role of waste-to-energy. Energy Policy, ۱۳۷, ۱۱۱۱-۱۱۴۲. (۲۰۲۰). ی. لیو، ز. جانگ، و. (۲۰۲۰).
- [۹] احمدی، م.، رضایی، ج. (۲۰۱۹). مدیریت پایدار پسماند و پتانسیل آن در تولید انرژی. مجله علوم محیطی ایران، ۱۷(۲)، ۴۵-۶۲.
- [۱۰] Advanced Waste-to-Energy Technologies for Sustainable Development: A Review. Journal of Cleaner Production, ۳۳۰, ۱۲۹۷۸۹. (۲۰۲۲). پ. وو، ی. ژائو، ی. مورفی، س. اوکانر، ک. (۲۰۲۰).
- [۱۱] Challenges and Opportunities in Waste-to-Energy Technologies: A Global Perspective. Waste Management, ۱۱۸, ۱۲۱-۱۳۵. (۲۰۲۰). ک. اوکانر، س. مورفی، ی. ژائو، ی. (۲۰۲۰).
- [۱۲] Synergistic effects of co-pyrolysis of food waste and plastic waste for enhanced energy recovery. Bioresource Technology, ۳۴۲, ۱۲۶۰۰۱. (۲۰۲۱). س. پارک، ج. (۲۰۲۱).
- [۱۳] A comprehensive review of thermochemical conversion of biomass and waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۹۱, ۱۳۲-۱۴۵. (۲۰۱۸). پ. یانگ، ک. هسو، ژ. (۲۰۱۸).
- [۱۴] Circular Economy and Waste Management: Towards Sustainable Resource Utilization. Resources, Conservation and Recycling, ۱۲۷, ۱-۵. (۲۰۱۷). ج. جونز، ا. (۲۰۱۷).
- [۱۵] Pyrolysis of Municipal Solid Waste: A Review of Technologies and Products. Energy & Fuels, ۳۳(۷), ۵۸۴۷-۵۸۶۵. (۲۰۱۹). و. ز. جانگ، ی. لیو، ز. جانگ، و. (۲۰۱۹).
- [۱۶] Global energy landscape and the role of waste-to-energy. Energy Policy, ۱۳۷, ۱۱۱۱-۱۱۴۲. (۲۰۲۰). ی. لیو، ز. جانگ، و. (۲۰۲۰).
- [۱۷] Plasma gasification of municipal solid waste: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۴۷, ۷۳۵-۷۴۹. (۲۰۱۵). ج. گارسیا-آلوارز، س. اسپینولا، س. (۲۰۱۵).
- [۱۸] The challenges of producing biofuels from waste. Energy & Environmental Science, ۳(۵), ۵۹۱-۵۹۹. (۲۰۱۰). ج. اسپرت، ج. ویلیامز، ا. (۲۰۱۰).
- [۱۹] Anaerobic digestion of waste: challenges and opportunities. Water Science and Technology, ۴۵(۲), ۳۵-۴۱. (۲۰۰۲). پ. جفری، ن. وارنر، ا. (۲۰۰۲).
- [۲۰] Incineration of solid waste: a review. Journal of the Air Pollution Control Association, ۲۸(۱۱), ۱۰۹۱-۱۰۹۶. (۱۹۷۸). ا. هولم، ا. (۱۹۷۸).
- [۲۱] Waste-to-energy in Europe. Waste Management & Research, ۱۶(۲), ۱۱۵-۱۲۷. (۱۹۹۸). ج. کونول، ج. (۱۹۹۸).
- [۲۲] Life cycle assessment of municipal solid waste management options. Journal of Environmental Management, ۹۲(۱۰), ۲۵۱۹-۲۵۲۷. (۲۰۱۱). س. وانگ، ج. یانگ، ا. (۲۰۱۱).
- [۲۳] Waste-to-energy: technologies and the environment. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, ۲۱۲(۲), ۱۰۷-۱۱۷. (۱۹۹۸). پ. ویلیامز، ا. (۱۹۹۸).
- [۲۴] Artificial intelligence for waste-to-energy: A review. Waste Management, ۱۰۵, ۳۱۵-۳۲۷. (۲۰۲۰). ی. لیو، ه. چن، ج. (۲۰۲۰).



- [۲۵] Efficiency optimization of combined heat and power waste-to-energy plants. *Energy Conversion and Management*, ۲۵۴, ۱۱۵-۱۲۸. (۲۰۲۲). ز. لیو، ل. ژانگ، ی. ژانگ، ل. لیو، ز. (۲۰۲۲).
- [۲۶] Advanced flue gas treatment technologies for waste-to-energy. *Environmental Science & Technology*, ۵۴(۸), ۴۹۸۲-۴۹۹۵. (۲۰۲۰). ر. براون، آ. اسمیت، م. دیویس، م. اسمیت، آ. براون، ر. (۲۰۲۰).
- [۲۷] Anaerobic digestion of organic waste: A review of recent advancements. *Bioresource Technology*, ۳۲۵, ۱۲۴-۱۳۸. (۲۰۲۱). س. پارک، ه. پارک، س. (۲۰۲۱).
- [۲۸] Pre-treatment technologies for efficient waste-to-energy conversion. *Waste Management*, ۷۶, ۲۲۳-۲۳۵. (۲۰۱۸). و. ژانگ، ی. ژانگ، و. (۲۰۱۸).
- [۲۹] Incineration technologies for municipal solid waste management. *Journal of Cleaner Production*, ۱۴۲, ۱۲۳۴-۱۲۴۵. (۲۰۱۷). ب. جونز، ک. اسمیت، ک. جونز، ب. (۲۰۱۷).
- [۳۰] Gasification of solid waste: Status and perspectives. *Renewable Energy*, ۱۳۵, ۱۰۵۶-۱۰۷۰. (۲۰۱۹). ک. چن، ل. اس. لی، ک. چن، ل. (۲۰۱۹).
- [۳۱] Characterization of municipal solid waste for waste-to-energy applications. *Resources, Conservation and Recycling*, ۱۴۵, ۲۳۴-۲۴۵. (۲۰۱۹). ی. وو، ج. لیو، ج. وو، ی. (۲۰۱۹).
- [۳۲] Augustin, P., et al. (۲۰۱۶). Waste-to-energy technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۵۶, ۱۲۰۰-۱۲۱۱. (۲۰۱۶). Augustin, P., et al. (۲۰۱۶).
- [۳۳] Conolly, J. (۱۹۹۸). Waste-to-energy: A review of the technology and environmental aspects. *Environmental Impact Assessment Review*, ۱۸(۵), ۴۰۵-۴۲۰. (۱۹۹۸). Conolly, J. (۱۹۹۸).
- [۳۴] Foley, G., et al. (۲۰۱۰). Municipal solid waste to energy: The potential of advanced thermal treatment technologies. *Energy Policy*, ۳۸(۷), ۳۳۵۷-۳۳۶۷. (۲۰۱۰). Foley, G., et al. (۲۰۱۰).
- [۳۵] Huang, L., et al. (۲۰۱۵). Life cycle assessment of waste-to-energy technologies. *Journal of Environmental Management*, ۱۶۰, ۲۵۰-۲۶۰. (۲۰۱۵). Huang, L., et al. (۲۰۱۵).
- [۳۶] Sharifi, M., et al. (۲۰۱۱). A comparative study of waste-to-energy technologies. *Waste Management & Research*, ۲۹(۵), ۴۷۵-۴۸۸. (۲۰۱۱). Sharifi, M., et al. (۲۰۱۱).
- [۳۷] Schlosser, R., et al. (۲۰۱۲). Techno-economic analysis of waste-to-energy technologies. *Applied Energy*, ۹۵, ۱۷۰-۱۸۰. (۲۰۱۲). Schlosser, R., et al. (۲۰۱۲).