

## بررسی و مقایسه انواع فرایندهای ترموشیمیایی زیست توده برای تولید انرژی زیستی (بیوانرژی)

اشکان بهبود<sup>۱</sup>، فاطمه محمدی<sup>۲</sup>، محمدرضا صبور<sup>۳</sup>، مجید احتشامی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش محیط زیست، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دکترای مهندسی عمران گرایش محیط زیست، دانشگاه تهران

۳- دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۴- دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

Email: bhdashkan@gmail.com

### چکیده

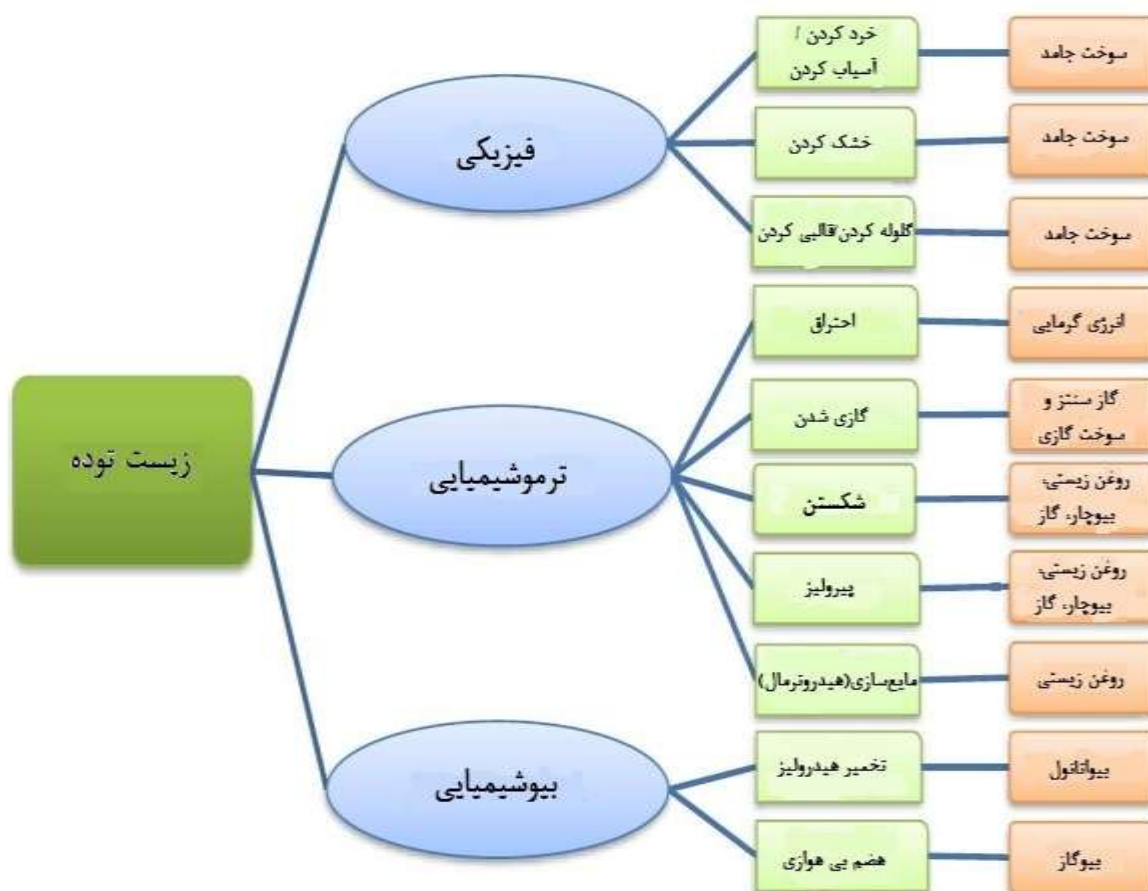
نیاز به سوخت‌های پاک و سازگار با محیط‌زیست، جهان را به سمت تولید سوخت‌های زیستی و جایگزینی سوخت‌های معمولی با آنها سوق داده است. زیست توده را می‌توان برای تولید سوخت‌های زیستی، یک منبع انرژی جایگزین امیدوارکننده برای نفت خام محدود، استفاده کرد. فرایندهای ترموشیمیایی می‌توانند زیست توده را مستقیماً برای تولید گرما و الکتریسیته تبدیل کند و به سوخت‌های زیستی به شکل جامد (مانند زغال)، مایع (مانند روغن‌های زیستی، متانول و اتانول) و گاز (به عنوان مثال، متان و هیدروژن) تبدیل کرد که می‌تواند برای تولید گرما و الکتریسیته استفاده شود. فرایندهای ترموشیمیایی از طریق یکی از شش مسیر تبدیل مختلف رخ می‌دهد: تجزیه در اثر حرارت (پیرولیز)، گازی شدن، احتراق مستقیم، هم‌سوختن، مایع‌سازی (تبدیل به مایع) هیدروترمال و کربن‌سازی (پیرولیز آهسته). در این مقاله به معرفی و مقایسه انواع فرایندهای ترموشیمیایی برای تولید انرژی زیستی می‌پردازیم.

**کلید واژه‌ها:** زیست توده، ترموشیمیایی، انرژی زیستی (بیوانرژی)

### ۱\_ مقدمه

مصرف انرژی در قرن گذشته به طور پیوسته افزایش یافته است زیرا جمعیت جهان رشد کرده و کشورهای بیشتری صنعتی شده‌اند. نفت خام منبع اصلی برای پاسخگویی به افزایش تقاضای انرژی بوده است [۱]. در حال حاضر سوخت‌های زیستی به عنوان یک ایده جایگزین برای فرار از استفاده عمده از سوخت‌های فسیلی و نفت برای تولید انرژی، گرما و سوخت‌های حمل و نقل ظهور کرده‌اند [۲]. انرژی زیستی یک منبع انرژی تجدید پذیر و پاک است که از زیست توده به دست می‌آید. زیست توده به تمام مواد آلی اطلاق می‌شود که قابل احتراق هستند و در نتیجه فتوسنتز از گیاهان سبز سرچشمه می‌گیرند [۳]. [۴]. زیست توده انرژی خورشیدی را به شکل شیمیایی ذخیره می‌کند و با ارزش‌ترین و تطبیق پذیرترین منبع روی زمین است. ضایعات کشاورزی حاوی مقادیر بالایی از ترکیبات آلی (سلولز، همی سلولز، لیگنین و مقادیر جزئی دیگر مواد آلی) بوده و دارای محتوای انرژی بالایی هستند [۴]. با توجه به تعدادی از چالش‌ها از جمله منابع انرژی ناکافی، نوسانات اخیر در قیمت نفت، آلودگی هوا که اثر گازهای گلخانه‌ای اتمسفر را بدتر می‌کند، و همچنین گرمایش جهانی، تحقیق و توسعه تکنیک‌های تبدیل ترموشیمیایی یک راه‌حل انرژی عملی و پایدار است [۲]، [۵]. سوخت‌های زیستی نسل دوم و سوم که از مواد اولیه لیگنوسلولزی به دست می‌آیند، با اشکالاتی که به اصطلاح نسل اول در مورد در دسترس بودن مواد اولیه و رقابت با صنایع غذایی ایجاد می‌کنند، مقابله می‌کند. سوخت زیستی نسل دوم با استفاده از محصولات جانبی صنایع کشاورزی تولید می‌شود.

سوخت زیستی تولید شده توسط زیست توده جلبکی به عنوان سوخت زیستی نسل سوم شناخته می‌شود و زیست توده جلبکی می‌تواند به سرعت رشد کند تا ظرفیت بالایی از لیبیدها برای سنتز سوخت تولید کند [۲]، [۵].  
تبدیل ترموشیمیایی زیست توده به سوخت زیستی یک مسیر جایگزین امیدوارکننده است. شکل ۱ مسیرهای تبدیل زیست توده را از طریق فرآیندهای مختلف نشان می‌دهد. فناوری‌های تبدیل ترموشیمیایی زیست توده برای تولید انرژی در گذشته به دلیل قیمت‌های پایین سوخت‌های فسیلی نادیده گرفته شده بود. با این وجود، این فناوری‌ها به دلیل افزایش تقاضای انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی مورد بازنگری قرار گرفته‌اند [۵].



شکل ۱\_ روش‌های تبدیل زیست توده [۵]

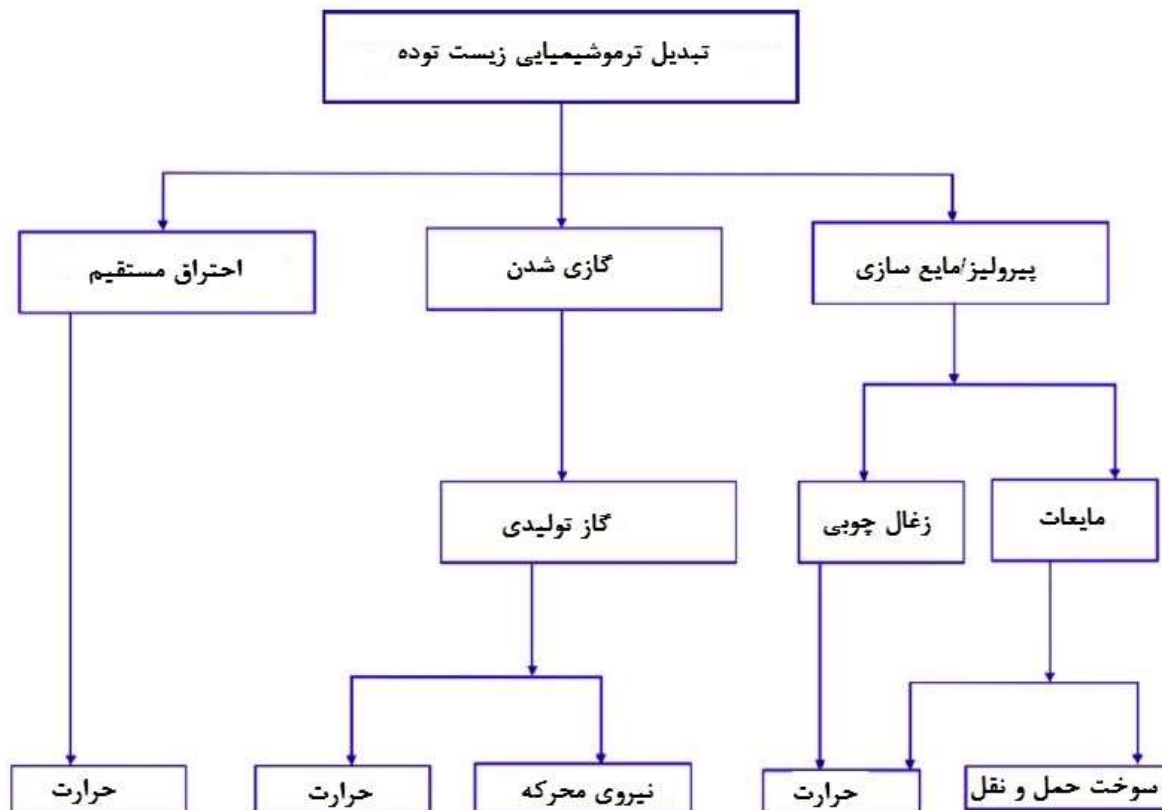
## ۲\_ فرایندهای ترموشیمیایی

فرآیندهای ترموشیمیایی برای تبدیل زیست توده به سوخت‌های با ارزش گرمایی بالاتر استفاده می‌شوند [۴]. فرآیندهای تبدیل ترموشیمیایی عمدتاً شامل احتراق مستقیم<sup>۱</sup>، تجزیه در اثر حرارت (پیرولیز)، گازی سازی<sup>۲</sup> و مایع سازی<sup>۳</sup> است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، انرژی ذخیره شده در زیست توده می‌تواند مستقیماً به عنوان گرما از طریق احتراق / هم

<sup>1</sup> combustion  
<sup>2</sup> gasification  
<sup>3</sup> Liquefaction

## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

سوختن آزاد شود یا می‌تواند به جامد (مثلاً زغال چوب)، مایع (مانند روغن‌های زیستی) یا گاز (مثل گاز ترکیبی و کوتاه برای گاز سنتز) از طریق تجزیه در اثر حرارت (پیرولیز)، مایع سازی، یا گازی سازی با اهداف مختلف تبدیل شود [۳]. اساس تبدیل ترموشیمیایی در اکثر موارد فرآیند پیرولیز است. محصولات تبدیل شامل آب، زغال چوب (جامد کربنی)، نفت خام زیستی، قطران و گازهای دائمی شامل متان، هیدروژن، مونوکسید کربن و دی اکسید کربن می‌باشد بسته به پارامترهای واکنش مانند محیط، راکتورهای مورد استفاده، دمای نهایی، سرعت گرمایش، و منبع گرما [۶].



شکل ۲\_ مسیر تبدیل ترموشیمیایی زیست توده [۴]

دو فرآیند تولید اتانول وجود دارد که در حال حاضر از واکنش‌های ترموشیمیایی در فرآیندهای خود استفاده می‌کنند. سیستم اول در واقع یک سیستم ترکیبی ترموشیمیایی و بیولوژیکی است. یک مثال فرآیندی است که توسط مهندسان محیط زیست در فایت ویل، آرکانزاس در حال توسعه است. مواد زیست توده ابتدا به صورت حرارتی تبدیل به گاز می‌شوند<sup>۱</sup> و گاز سنتز (مخلوطی از هیدروژن و اکسید کربن) از طریق تخمیرهای مخصوص طراحی شده حباب می‌شود<sup>۲</sup>. میکروارگانیزمی که قادر به تبدیل گاز سنتز است، در شرایط فرآیندی خاص به تخمیرها وارد می‌شود<sup>۳</sup> تا تخمیر به اتانول تبدیل شود [۷]. در فرآیند دوم تولید اتانول ترموشیمیایی از هیچ میکروارگانیزمی استفاده نمی‌شود<sup>۴</sup>. در این فرآیند، مواد زیست توده ابتدا به صورت حرارتی تبدیل به گاز می‌شوند<sup>۵</sup> و گاز سنتز از یک راکتور حاوی کاتالیزور عبور می‌کند<sup>۶</sup> که باعث می‌شود<sup>۷</sup> گاز به اتانول تبدیل شود. آلمان در جنگ جهانی دوم تلاش زیادی برای توسعه این

<sup>1</sup> co-firing

## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

فرآیندها برای سوخت انجام داد. از آن زمان تاکنون، تلاش‌های زیادی برای توسعه فرآیندهای ترموشیمیایی به اتانول با دوام تجاری صورت گرفته است [۷]. متأسفانه، مانند سایر فرآیندها، یافتن یک فرآیند تمام ترموشیمیایی مقرون به صرفه دشوار بوده است [۷].

### ۲\_۱\_ تجزیه در اثر حرارت (پیرولیز)

پیرولیز زیست توده به طور کلی تحت فرآیند تبدیل حرارتی طبقه بندی می‌شود. پیرولیز می‌تواند زیست توده را در غیاب اکسیژن مستقیماً با تجزیه حرارتی (معمولاً در محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد) و به طور معمول در فشار اتمسفر به محصولات جامد (زغال سنگ، بیوجار)، مایع (روغن زیستی) و گاز (گاز سوختی، گاز سنتز) تبدیل کند [۵]، [۴]. فرآیند پیرولیز یک واکنش گرماگیر خفیف است. گرمای تبخیر آب خالص 2/26 کیلوژول بر گرم در ۱۰۰ درجه سانتیگراد است، در حالی که محتوای انرژی شیمیایی چوب تنها حدود 18/6 کیلوژول بر گرم است. بیشتر انرژی حاصل از زیست توده صرف حذف رطوبت می‌شود. این نشان می‌دهد که هر چه میزان رطوبت کمتر باشد، انرژی به دست آمده بیشتر است [۶]. پیرولیز شامل تولید سه فاز مختلف از محصولات با واکنش‌های واکنش‌های شیمیایی مختلف مواد اولیه در غیاب هوا است [۸].

مرحله اول، پیش تجزیه، بین ۱۲۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد با کاهش وزن جزئی رخ می‌دهد، زمانی که برخی از بازآرایی‌های داخلی، مانند شکستن پیوند، ظهور رادیکال‌های آزاد و تشکیل گروه‌های کربونیل همراه با انتشار مقدار کمی آب (H<sub>2</sub>O)، مونوکسید کربن (CO) و CO<sub>2</sub> اتفاق می‌افتد. مرحله دوم فرآیند اصلی تجزیه در اثر حرارت است که در طی آن تجزیه مواد جامد رخ می‌دهد و با کاهش وزن قابل توجهی از زیست توده اولیه انتقال داده شده همراه است. آخرین مرحله، تخلیه مداوم ذغال سنگ است که در اثر شکست بیشتر پیوندهای C-H و C-O ایجاد می‌شود [۳].

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود فرآیندهای پیرولیز بر اساس شرایط آزمایشی (دما، زمان ماند، سرعت گرمایش و اندازه ذرات) به سه نوع، یعنی فرآیندهای پیرولیز آهسته، سریع و فلش طبقه‌بندی می‌شوند [۵]. کیفیت و کمیت محصولات حاصل از تجزیه در اثر حرارت زیست توده عمدتاً به ترکیب شیمیایی ماده اولیه و دمای عملیاتی و به شرایط پیرولیز بستگی دارد [۴]، [۵]. به عنوان مثال، زمانی که دمای واکنش کمتر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد است، بیوجار محصول اصلی است، در حالی که روغن زیستی محصول اولیه در محدوده ۴۵۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد است. دمای بالای ۸۰۰ درجه سانتیگراد منجر به تشکیل گازها می‌شود [۵]. جدول ۱ شرایط واکنش و بازده محصول فرآیندهای مختلف پیرولیز را در مقایسه با فرآیند گازی شدن معرفی می‌کند.



شکل ۳\_ فرآیندهای پیرولیز [۵]

جدول ۱\_ بازده محصول پیرولیز در مقایسه با گازی شدن [۳]

حالت	شرایط	مایع (%)	زغال (%)	گاز (%)
پیرولیز سریع	دمای متوسط (حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد)، زمان ماند بخار داغ کوتاه (۱ ثانیه)	۷۵	۱۲	۱۳

## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

۳۰	۲۰	۵۰	دمای متوسط (حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد)، زمان ماند بخار داغ متوسط (۱۰-۲۰ ثانیه)	پیرولیز میانی
۳۵	۳۵	۳۰	دمای پایین (حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد)، زمان ماند بخار داغ بسیار طولانی	پیرولیز آهسته (کربن سازی)
۸۵	۱۰	۵	دمای بالا (حدود ۸۰۰ درجه سانتیگراد)، مدت زمان ماند جامدات و بخار طولانی	گازی شدن

### ۲-۱-۱ پیرولیز سریع

پیرولیز سریع زمان ماندگاری بسیار کوتاهی دارد (۱ ثانیه) [۳]. در این فرآیند، زیست توده در دمای بالا (۵۷۷-۹۷۷ °C) در شرایط جوی اتمسفر حرارت می‌بیند. بازده فرآیندهای پیرولیز سریع ۶۰ تا ۷۵ درصد وزنی روغن زیستی مایع، ۱۵ تا ۲۵ درصد وزنی زغال سنگ جامد و ۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی گازهای غیر قابل تراکم بسته به ماده اولیه می‌باشد [۴]. دمای واکنش تقریباً ۱۰۰ درجه سانتیگراد بالاتر از دمای پیرولیز آهسته است (۵۰۰ درجه سانتیگراد در مقابل ۴۰۰ درجه سانتیگراد). زمان‌های واکنش کوتاه همراه با دمای بالا معمولاً منجر به بازده بالاتر محصول مایع می‌شود [۳].

### ۲-۱-۲ پیرولیز آهسته

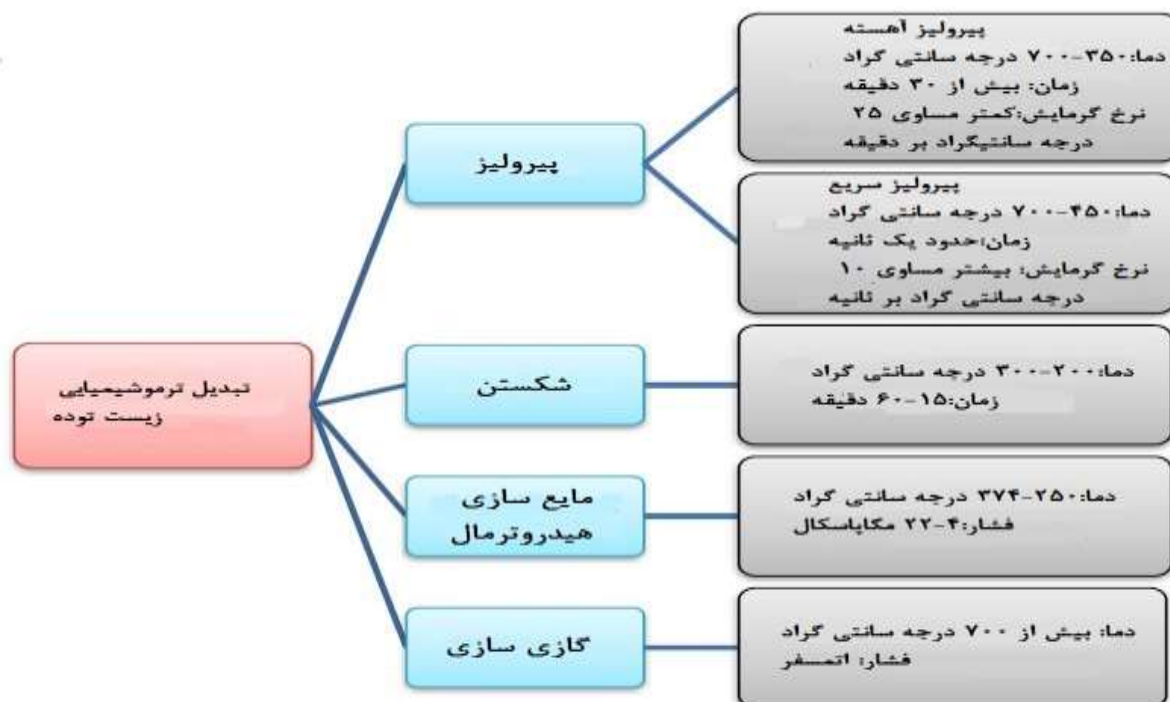
پیرولیز آهسته با دمای واکنش نسبتاً پایین‌تر (معمولاً در محدوده ۵۵۰-۹۵۰ کلوین است) و زمان‌های ماندگاری طولانی‌تر (بیش از ۳۰ دقیقه) به طور گسترده برای تولید بیوجار با بازده بالا استفاده شده است که معمولاً در کوره‌های زغال سنگ سنتی انجام می‌شود مقادیر مشابهی از زغال، مایع و محصولات گاز تولید می‌کند ولی زغال بیشتری تولید می‌کند [۵]، [۳]. [۴]. محصولات مفید به طور مؤثر در طی پیرولیز کاتالیزوری به حداکثر می‌رسند اثرات کاتالیزوری با افزایش دما مشخص می‌شود [۵]. با ترکیب تمام عوامل ذکر شده در بالا، به طور کلی نتیجه گیری شود که برای به حداکثر رساندن مقدار زغال، دمای پایین و نرخ گرمایش پایین، پیرولیز آهسته ضروری است. اگر محصول مایع مورد نظر باشد، ترکیبی از دمای متوسط، زمان ماند گاز کوتاه و نرخ گرمایش بالا ضروری است [۳].

### ۲-۱-۳ پیرولیز فلش

این فرآیند برای تولید نفت خام زیست توده معادل نفت با راندمان بالا تا ۷۰ درصد استفاده می‌شود [۴] که به سرمایه گذاری کم نیاز دارد و ممکن است در مقیاس نسبتاً کوچک اقتصادی باشد [۹]. در سال‌های اخیر، فرآیندهای مختلف پیرولیز فلاش برای به حداکثر رساندن تشکیل محصولات مایع برای استفاده به عنوان سوخت یا مواد اولیه شیمیایی توسعه یافته است [۱۰]. از نفت خام تصفیه شده می‌توان برای تولید گرما یا تولید نیروی محرکه استفاده کرد. دمای عملیاتی پیرولیز فلاش در محدوده ۷۷۷-۱۰۲۷ °C است [۴]. زمانی که هزینه برداشت ضایعات زیست توده بالا است، به عنوان مثال برای بقایای چوب، اهمیت زیادی دارد که واحد پردازش تا حد امکان نزدیک به منبع زیست توده بالا است، به عنوان مثال برای بقایای چوب، اهمیت پیرولیتیک (تجزیه حرارتی مواد آلی در دمای بالا) است که یکی از معایب عمده روغن زیستی تولید شده است [۴]. همچنین، یک گاز با ارزش حرارتی متوسط تولید می‌شود و مقادیر جزئی ذغال فعال تولید می‌شود که هر دو به عنوان سوخت با کیفیت خوب در دسترس هستند [۹].

## ۲-۱-۴\_ پیرولیز شکستن

پیرولیز شکستن<sup>۱</sup> که پیرولیز ملایم نیز نامیده می‌شود، زیرا در دماهای نسبتاً پایین ۲۰۰-۳۰۰ درجه سانتیگراد و زمان واکنش ۱۵-۶۰ دقیقه عمل می‌کند، یک تکنیک پیش تصفیه امیدوارکننده برای حذف رطوبت و اجزای فرار آلی کم وزن در زیست توده است و در نتیجه سوخت جامد یا بیوچار آگریز با ارزش کالری بالا و قابلیت آسیاب شدن بیشتر که می‌تواند بدون محافظت در برابر آب و هوا مانند زغال سنگ قابل حمل و نگهداری در فضای باز باشد، تولید می‌کند [۵]، [۱۱]. مشابه پیرولیز، پیرولیز شکستن می‌تواند بیوچار، روغن زیستی و بیوگاز تولید کند. در میان آنها، بیوچار محصول اصلی تولید شده در حین شکستن است. روغن زیستی عمدتاً حاوی اسیدها، فنل‌ها، کتون‌ها، الکل‌ها، استرها، آلدئیدها، آب و سایر مواد است که در آنها آب فراوان‌ترین محصول است. مقدار کمی از بیوگاز شامل  $H_2$ ،  $CH_4$ ،  $CO$ ،  $CO_2$  و  $C_2H_4$  در طی شکستن تولید می‌شود که عمدتاً  $CO_2$  می‌باشد. بیوگاز تولید شده از پیرولیز شکستن می‌تواند برای احتراق به عنوان گرما برای شکستن مورد استفاده قرار گیرد، اما به دلیل ارزش گرمایشی کم، قادر به استفاده در کاربردهای مهندسی نیست. پیرولیز شکستن به این دلیل اجرا می‌شود که برخی از زیست توده‌ها دارای محتوای اکسیژن و رطوبت بالایی هستند که فرآیندهای گازی شدن، احتراق، پیرولیز، مایع سازی و ساخت آهن را محدود می‌کند. بنابراین، این فناوری پیش تصفیه می‌تواند همگنی، ارزش حرارتی، آسیاب‌پذیری و مقاومت در برابر تجزیه زیستی را بهبود بخشد و همچنین محتوای اکسیژن و رطوبت و ماهیت آبدوست زیست توده را کاهش دهد [۵]. شکل ۴ نیز مقایسه دما و فشار و زمان ماند انواع روش‌های ترموشیمیایی (پیرولیز آهسته، پیرولیز سریع، شکستن، مایع سازی هیدروترمال، گازی سازی) می‌پردازد.



شکل ۴\_ مقایسه دما و فشار و زمان ماند انواع روش‌های ترموشیمیایی [۵]

<sup>1</sup> Torrefaction

## ۲-۲\_ گازى شدن

گازى شدن نوع ديگرى از فرآيند تبديل ترموشیمیایی است [۸]. گازى شدن زيست توده روشى کارآمد و سازگار با محيط زيست براى توليد انرژى است [۴]. تبديل زيست توده به گازهاى کربن دار قابل احتراق (مانند  $CO_2$ ،  $CO$ ،  $C_2H_4$ ،  $H_2$ ) و ساير ناخالصیها مانند نيتروژن، گوگرد، ترکیبات قليایی و دوده، با مقادير گرمایشى خاص در حضور اکسيژن جزئى ( $CH_4$ ) (معمولاً ۳۵٪ از  $O_2$  براى احتراق کامل) يا اکسیدان هاى مناسب مانند بخار و  $CO_2$  [2]، [3]. گازى شدن هوا منجر به محصولى با مقدار حرارت کم تا متوسط 4-7 MJ/Nm می شود، در حالى که گازى شدن با اکسيژن يا بخار منجر به محصولى با مقدار حرارت متوسط (10-14 MJ/Nm) می شود [۲]. هنگامى که از بخار استفاده می شود، هيدروژن بيشتري از واکنش تبديل متان توليد می شود که منجر به محصولى با ارزش گرمایی بالاتر می شود. با اين حال، گازى شدن با بخار به دمای عملیاتی بالاترى براى تبخير آب نیاز دارد و آن را جایگزین گران تری می کند. بنابراین، استفاده از مخلوط هوا/بخار با نسبت ورودى متغیر به منظور بهره بردارى بهتر، از مزایای هر گاز سیال کننده ديگرى است [۲]. کل اين فرآيند در محدوده دمایی  $800-1300\text{ }^\circ\text{C}$  با يك سرى واکنشهاى شیمیایی تکمیل می شود، به همین دلیل است که تحت تبديل ترموشیمیایی قرار می گیرد. زيست توده به عنوان يك ماده اوليه به دليل محتوای گوگرد کم و ویژگی واکنش پذيری کمتری نسبت به زغال سنگ براى گازى شدن امیدوارکننده تر است [۴]. هنگامى که از هوا يا اکسيژن استفاده می شود، گازى شدن مشابه احتراق است، اما يك فرآيند احتراق جزئى در نظر گرفته می شود. مقایسه دقیقى بين گازى شدن زيست توده و احتراق ارائه شده است. به طور کلی، احتراق بر توليد گرما تمرکز می کند، در حالى که هدف از گازى شدن ايجاد محصولات گازى با ارزش است که می تواند براى احتراق يا براى کاربردهای ديگر ذخيره شود يا به طور مستقیم مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر اين، به دليل انتشار کمتر گازهاى سمى در اتمسفر و استفاده متنوع تر از محصولات جانبى جامد، گازى شدن دوستدار محيط زيست است [۳]. نرخ گرمایش، طراحی راکتور و پس پردازش گازها عوامل اصلی کنترل کننده براى توليد محصولات گازى تمیز و باکیفیت از گازى شدن هستند [۸]. گازى شدن را می توان به عنوان شکل خاصى از پيرولیز نیز در نظر گرفت که در دماهای بالاتر براى دستیابی به بازده گاز بيشتري انجام می شود که در جدول ۱ مقایسه کامل انواع پيرولیز و گازى شدن مورد بررسی قرار گرفت. گازى سازی زيست توده چندین مزيت از جمله کاهش انتشار  $CO_2$ ، نیاز به تجهیزات جمع و جور با جای گیری نسبتاً کم، کنترل دقیق احتراق و راندمان حرارتى بالا را ارائه می دهد [۳].

## ۲-۲\_۱\_ گازيفایرها

گازيفایرها (راکتورهای گازى شدن) راکتورهایی هستند که در آنها واکنشهاى گازى شدن در دماهای بالا (۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد يا حتى بالاتر) انجام می شود [۲]. بر اساس انواع واکنشها، يك گازيفایر معمولی با هوا را می توان به چهار منطقه فرآيندى تقسیم کرد - منطقه خشک کردن يا آبگیری، جایی که آب موجود در زيست توده در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد تبخير می شود. منطقه پيرولیز، که در آن زيست توده با انرژى متوسط به گازهاى فرآر، مایع و زغال سنگ در محدوده دمایی ۱۵۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد تبديل می شود. منطقه احتراق، منطقه ای که در آن واکنشهاى احتراق با مقادير محدودى هوا يا اکسيژن، اجزای سوخت را اکسید می کند و واکنشهاى گرمازا ايجاد می شود و در محدوده دمایی ۷۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد انجام می شود و منطقه کاهش(احیا)، که در آن  $CO$  و  $H_2$  در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد توليد می شود [۵]، [۳].

## ۲-۲\_۲\_ گازى شدن پلاسما

گازى شدن پلاسما يك فرآيند تبديل به گاز است که زيست توده را به اجزای اساسی مانند  $CO_2$  و  $CO$  در يك محيط بدون اکسيژن در دمای بسيار بالا تجزيه می کند [۳]. از طريق فرآيند گازى شدن پلاسما، بخش آلی مواد اوليه جامد به گاز سنتز با ارزش کالری بالا که به عنوان سوخت يا مواد شیمیایی در سیستمهاى احتراق، براى توليد برق و براى توليد هيدروژن

## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

استفاده می‌شود، تبدیل کرد [۱۲]، [۱۳]. بخش معدنی به یک تفرقه غیرقابل شستشو تبدیل می‌شود که می‌تواند به طور ایمن دفع شود یا حتی به عنوان مصالح ساختمانی مجدداً مورد استفاده قرار گیرد [۱۲]. یک مشعل پلاسما می‌تواند ماده اولیه زیست توده را تا دمای ۳۰۰۰ درجه سانتیگراد یا بالاتر (تا ۱۵۰۰۰ درجه سانتیگراد) گرم کند. تحت چنین دماهای بسیار بالایی، جریان زیست توده تزیق شده را می‌توان در عرض چند میلی ثانیه بدون هیچ واکنش میانی تبدیل به گاز کرد. روش پلاسما پتانسیل کاربرد زیادی برای تصفیه طیف وسیعی از زباله‌های خطرناک دارد. در طی فرآیند گازی شدن پلاسما، سمیت ضایعات را می‌توان به میزان قابل توجهی کاهش داد [۱۲]، [۳].

### ۲-۲-۳\_ گازی شدن آب فوق بحرانی

نوع دیگری از تبدیل به گاز در محیط آبی فوق بحرانی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. زیست توده تحت شرایط فوق بحرانی و غیر اکسیداتیو به گاز سنتز و متان تبدیل می‌شود [۱۴]. آب در شرایط عادی در سه حالت جامد، مایع و گاز وجود دارد. هنگامی که فشار و دمای آب بالاتر از نقاط بحرانی (۱، ۲۲، ۱ مگاپاسکال و ۳۷۴ درجه سانتیگراد) افزایش می‌یابد، آب به حالت فوق بحرانی می‌رود، جایی که فازهای گاز و مایع قابل حل شدن و اختلاط هستند. با کاهش چگالی، مولکول‌های آب بیشتر از یکدیگر جدا می‌شوند، پیوندهای هیدروژنی شکسته می‌شوند و آب به دلیل از دست دادن نظم بین مولکول‌های مختلف، خواص متمایز خود را به عنوان مایع از دست می‌دهد [۳]. گازی شدن غیرآبی معمولاً در محدوده دمایی بین ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد اتفاق می‌افتد که بالاتر از دمای تجزیه در اثر حرارت است اما کمتر از دمای احتراق مستقیم است. هنگامی که تبدیل به گاز در هوا انجام می‌شود، محصولات گازی ارزش گرمایی کمتری دارند. محصولات گازی با ارزش حرارتی متوسط در اکسیژن خالص به دست می‌آیند. محصولات با ارزش گرمایی بالا معمولاً به افزودن یک فرآیند ارتقاء کاتالیزوری (محیط آبی) برای ارتقای غلظت گاز سنتز و متان در محصولات اولیه نیاز دارند [۱۴].

آب فوق بحرانی عمدتاً به دلیل حلالیت قوی برای ترکیبات آلی و همچنین واکنش پذیری بالا به عنوان یک محیط تبدیل به گاز ایده آل برای زیست توده مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که آب به سمت منطقه فوق بحرانی حرکت می‌کند و اگر فشار در مقدار نسبتاً پایینی حفظ شود (در حالی که هنوز بالاتر از فشار بحرانی آن، یعنی ۲۲، ۱ مگاپاسکال است)، مکانیسم‌های رادیکال آزاد جایگزین مکانیسم‌های یونی در سیستم می‌شوند و بنابراین تشکیل دوده می‌تواند به حداقل برسد. علاوه بر این، توسط فنگ و همکاران گزارش شده است که آب در دمای بیش از ۶۰۰ درجه سانتیگراد یک اکسید کننده قوی است. به همین دلیل، اتم‌های اکسیژن موجود در آب می‌توانند به اتم‌های کربن موجود در زیست توده برای تشکیل CO<sub>2</sub> و CO منتقل شوند، در حالی که اتم‌های هیدروژن در آب و زیست توده آزاد می‌شوند تا H<sub>2</sub> تشکیل دهند. به این ترتیب، بخشی از گاز هیدروژن تولید شده می‌تواند به جای زیست توده، از آب سرچشمه بگیرد. در مقایسه با فرآیندهای متعارف تبدیل به گاز، تبدیل به گاز آب فوق بحرانی بازده گازی شدن و بازده هیدروژن بالاتری را نشان می‌دهد، با تشکیل دوده کمتر. علاوه بر این، از آنجایی که زیست توده مرطوب می‌تواند مستقیماً به گاز تبدیل شود، فرآیند خشک کردن پرهزینه و پر انرژی می‌تواند حذف شود [۳].

### ۲-۲-۳\_ هم سوختن (احتراق هم زمان)

ثابت شده است که احتراق همزمان زیست توده و زغال سنگ (مستقیماً با سوزاندن زیست توده و زغال سنگ یا به طور غیرمستقیم با گازی کردن زیست توده در ابتدا برای تولید گاز سوخت پاک، سپس با زغال سنگ در دیگ‌های تولید سوخته می‌شود) یک فناوری مقرون به صرفه برای دستیابی به هدف افزایش استفاده از فرآیندهای زیست توده به انرژی برای تولید برق و در نتیجه کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در مقایسه با سایر فرآیندهای حرارتی-شیمیایی برای استفاده

<sup>1</sup> HTG



## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

از زیست توده و تولید بیوانرژی (شامل احتراق تنها بر پایه زیست توده)، احتراق همزمان به دلیل تغییرات اندکی که برای ارتقای نیروگاه‌های اصلی مبتنی بر زغال سنگ مورد نیاز است، مقرون به صرفه‌ترین است [۳]. بسته به ظرفیت و راندمان دیگ بخار، همسوختگی زیست توده بین ۵ تا ۲۰ درصد وزنی متغیر است **می‌کند** [۸]. به منظور ارائه بحثی در مورد احتراق ترکیبی زیست توده و زغال سنگ، سه دسته از همسوختن تعریف شده است. کلاس همسوختن به روش تغذیه مورد استفاده برای سوخت زغال سنگ و زیست توده بستگی دارد [۱۵].

I. خطوط تغذیه و مشعل‌های جداگانه برای زغال سنگ و سوخت‌های زیست توده.

II. خطوط تغذیه جداگانه و یک مشعل مشترک:

(۱) دو ورودی - زغال سنگ در هوای اولیه و زیست توده در هوای ثانویه در حال چرخش (یا برعکس).

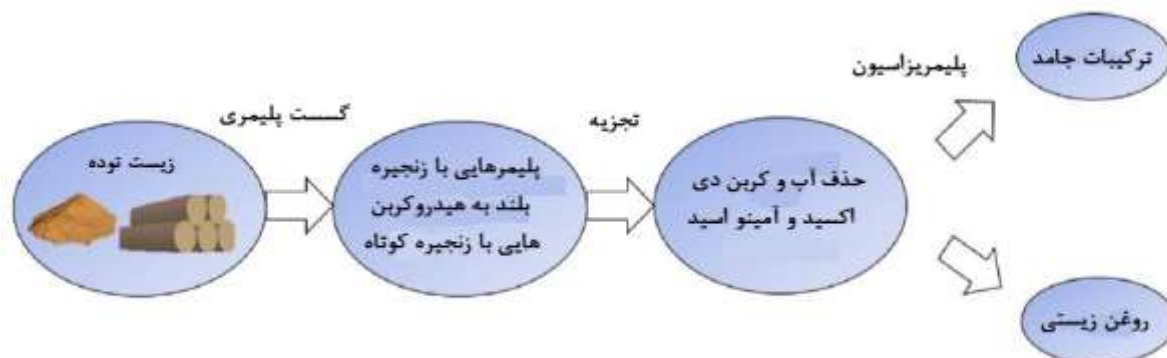
(۲) سه ورودی - دو ورودی برای هوای اولیه (مرکزی و حلقوی)، یکی برای هوای ثانویه چرخشی

III. خطوط تغذیه مشترک و یک مشعل مشترک با مخلوط‌های زیست توده زغال سنگ از پیش مخلوط شده [۱۵].

۲\_۴\_ تبدیل به مایع<sup>۱</sup> (مایع سازی)

مایع سازی که (هیدروترمال) نیز نامیده می‌شود، زیرا آب نقش مهمی در این تبدیل ترموشیمیایی دارد [۸]. **می‌کند** تبدیل ترموشیمیایی زیست توده به سوخت مایع توسط یک محیط تحت فشار با دمای بالا برای کمتر از ۶۰ دقیقه است که ساختار پلیمر را به اجزای مایع تجزیه می‌کند. آب در دماهای بالا به عنوان یک واکنش دهنده و به عنوان یک کاتالیزور عمل **می‌کند** تا واکنش را شبیه به تجزیه در اثر حرارت (پیرولیز) کند [۸]، [۵]. با این حال، آن‌ها از نظر شرایط عملیاتی متفاوت هستند. به طور خاص، مایع سازی مستقیم به دمای واکنش کمتر (بین ۲۵۰ تا ۳۷۴ درجه سانتیگراد) اما فشار بیشتری نسبت به تجزیه در اثر حرارت (پیرولیز) نیاز دارد (۵-۲۰ مگاپاسکال برای مایع سازی در مقابل ۰/۱-۰/۵ مگاپاسکال برای تجزیه در اثر حرارت) و همچنین به زمان ماندگاری طولانی‌تری (۵-۳۰ دقیقه) نیاز دارد. علاوه بر این، خشک کردن ماده اولیه یک مرحله ضروری برای مایع سازی مستقیم نیست، اما برای پیرولیز بسیار مهم است. علاوه بر این، کاتالیزورها همیشه برای مایع سازی ضروری هستند، در حالی که برای تجزیه در اثر حرارت حیاتی نیستند. در مقایسه با پیرولیز، فناوری مایع سازی چالش‌برانگیزتر است زیرا به راکتورهای پیچیده‌تر و گران‌تر و سیستم‌های تغذیه سوخت نیاز دارد [۶]، [۵]، [۳]. راندمان انرژی بالاتر، دمای عملیاتی کمتر و بازده قطران، نیاز به اکسیژن کمتر (۱۲-۱۴٪) از مزایای اصلی فرآیند مایع سازی در مقایسه با پیرولیز هستند [۶]، [۵]. شکل ۵ مسیر واکنش مایع سازی زیست توده را نشان می‌دهد. مایع سازی به سه مرحله عمده شامل گسست پلیمری، تجزیه و تقسیم می‌شود. به طور کلی، زیست توده پلیمریزه شده و به مونومرهای کوچک تجزیه می‌شود. این مونومرها بسیار واکنش پذیر و ناپایدار هستند. بنابراین روغن زیستی و ترکیبات جامد از طریق پلیمریزاسیون تشکیل می‌شوند [۵].

<sup>1</sup> HTL



شکل ۵\_ مسیر واکنش مایع سازی هیدروترمال [۵]

## ۲\_۵\_ کربن سازی

فرآیندهای کربنیزاسیون برای زیست توده یکی از چندین فناوری مربوط به تولید منابع انرژی تجدیدپذیر و کاهش مؤثر تولید گازهای گلخانه‌ای است [۶]. کربنیزاسیون فرآیند پیرولیز آهسته است که در آن پسماند جامد غنی از کربن به عنوان یک محصول عمده با ثمره مایع و گاز کمتر است. تشکیل بیوجار **جامد (جامد زغال تهیه شده از زیست توده های گیاهی و ضایعات کشاورزی)** به دمای عملیاتی فرآیند بستگی دارد [۸].

احتراق مستقیم زیست توده، اگرچه در مقایسه با سوزاندن زغال چوب کارآمد است، اما به دلیل تشکیل دود زیاد، نسبتاً ناخوشایند و آلوده کننده است. زغال چوب معمولاً به دلیل حمل و نقل راحت تر و تولید دود کمتر به عنوان سوخت انتخاب می‌شود. زغال چوب معمولاً از مواد آلی (زیست توده) با فرآیند کربن سازی به دست می‌آید که در آن مواد معمولاً در کوره‌های زغال چوب با سوزاندن زیست توده در دمای بالای ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در غیاب اکسیژن، پیرولیز می‌شوند. زغال چوب تولید شده جامد بدون سمیت، پایدار است و در طبیعت به راحتی تجزیه نمی‌شود [۴]. زغال چوب، یک جامد متخلخل سیاه که عمدتاً از کربن عنصری تشکیل شده است. زغال چوب را می‌توان از بسیاری از اشکال زیست توده، از جمله بقایای کشاورزی و ضایعات الوار به دست آورد [۴]. بازده زغال چوب در دماهای بالا و فشار اتمسفر از ۳۶٪ تا ۴۰٪ می‌باشد. زغال چوب با کیفیت به شرح زیر می‌باشد: دانه‌های چوب را حفظ می‌کند. رنگ آن سیاه با براقی درخشان در مقطع عرضی تازه باشد. با یک طوقه فلزی بلند که له نمی‌شود و انگشتان را کثیف نمی‌کند. در آب شناور است، رسانای بد گرما و الکتریسیته است و بدون شعله می‌سوزد [۴]. شرکت‌های متوسط و کوچک از فناوری کربن سازی برای زیست توده استفاده می‌کنند، اما این روش در عملیات‌های مقیاس بزرگ استفاده نمی‌شود، زیرا تولید بقایای کربن سازی با فناوری معمولی ناکارآمد و غیراقتصادی است [۶].

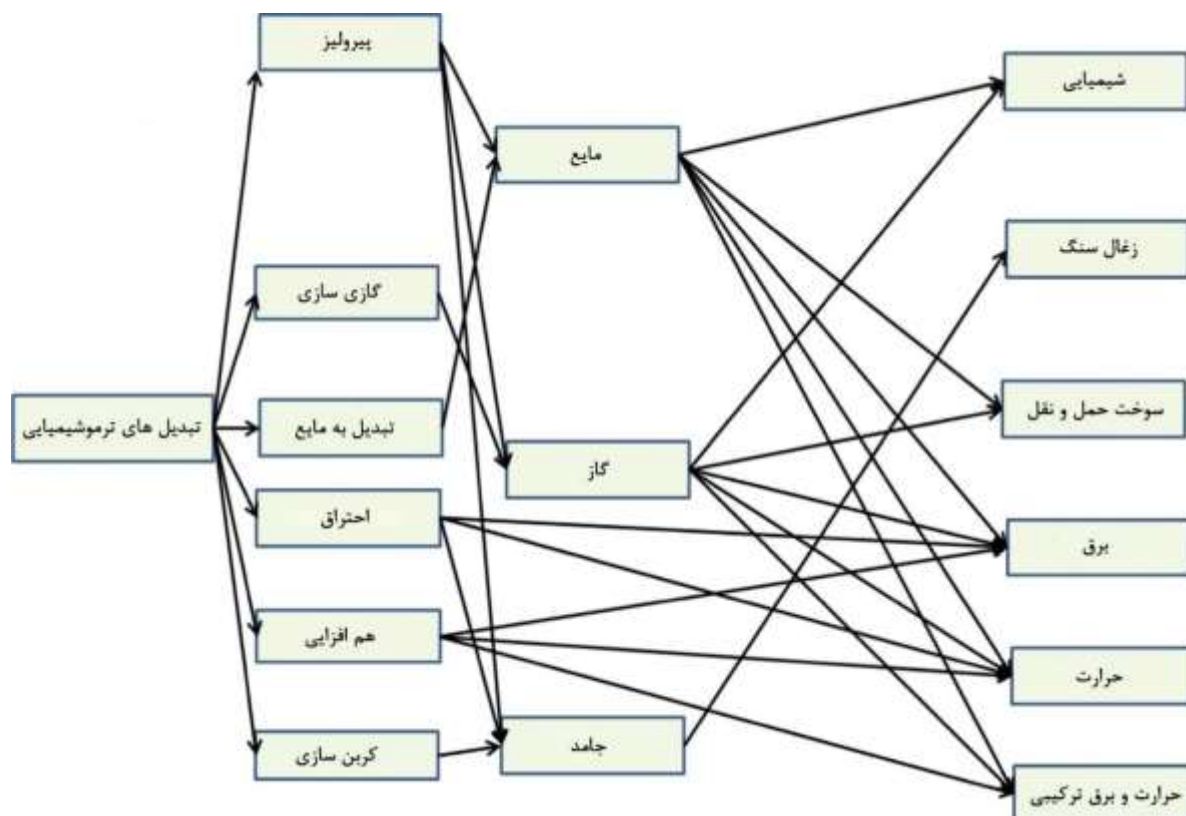
## ۲\_۶\_ احتراق مستقیم

احتراق مستقیم پرکاربردترین فرآیند برای تبدیل زیست توده است. سه مرحله اصلی در طی احتراق زیست توده رخ می‌دهد: خشک کردن، تجزیه در اثر حرارت و کاهش حجم، احتراق گازهای فرار و زغال سنگ. احتراق گازهای فرار بیش از ۷۰ درصد از کل گرما را تولید می‌کند [۳].

احتراق زیست توده **ساده ترین پایه ترین** فناوری تبدیل ترموشیمیایی است که در حضور هوا انجام می‌شود [۸]. **می‌شود** در طی احتراق زیست توده لیگنوسلولزی، به دلیل یک واکنش اکسیداسیون، گرما ایجاد می‌شود، جایی که کربن، هیدروژن، اکسیژن، گوگرد و نیتروژن قابل احتراق موجود در زیست توده با هوا یا اکسیژن واکنش می‌دهند [۶]. گرما، نیرو یا حرارت و یا ترکیبی از

آن‌ها، محصولات اصلی احتراق مستقیم زیست توده لیگنوسلولزی هستند. این فرآیند از واکنش‌های واکنش‌های متوالی ناهمگن و همگن تشکیل شده است [۸].

تاکنون رایج‌ترین روش تبدیل زیست توده به انرژی گرمایی قابل استفاده از طریق احتراق مستقیم است و این حدود ۹۰ درصد از کل انرژی به دست آمده از زیست توده را تشکیل می‌دهد. بیش از ۹۷ درصد از تولید انرژی زیستی در جهان را تأمین می‌کند. احتراق به عنوان یک فرآیند کم هزینه، فناوری بسیار قابل اعتماد، به خوبی شناخته شده و به صورت تجاری در دسترس است. به طور معمول، زیست توده حاوی رطوبت بالا و محتوای اکسیژن بالا است. رطوبت بالا یکی از بزرگترین معایب است. اگرچه واکنش‌های احتراق گرمازا هستند اما تبخیر آب گرماگیر است و باعث صرف انرژی زیادی برای احتراق زیست توده می‌باشد [۶]. احتراق زیست توده اساساً به اندازه ذرات و خواص مواد اولیه، دما و جو احتراق بستگی دارد. انتشار بالای CO، NOx، و ذرات معلق و همچنین جابجایی خاکستر، این فرآیند را از دیدگاه زیست محیطی بسیار چالش برانگیز می‌کند [۸]. شکل ۶ محصولات اولیه (جامد، مایع و گاز) و محصولات نهایی شش فناوری اصلی تبدیل حرارتی را نشان می‌دهد. روغن زیستی تولید شده از پیرولیز را می‌توانی توان به طور مستقیم به جای نفت کوره یا گازوئیل در عملیات استاتیکی مانند دیگ بخار، توربین یا موتور برای تولید برق استفاده کرد. همچنین می‌توان آن را از طریق پردازش هیدروژنی در حضور هیدروژن و کاتالیزور به سوخت حمل و نقل ارتقا داد. طیف وسیعی از مواد شیمیایی مانند رزین، کود و غیره را می‌توانی توان از روغن زیستی استخراج کرد. گاز را می‌توانی توان مستقیماً در دیگ بخار، توربین گاز، موتور یا پیل سوختی برای تولید برق، گرما یا حرارت و یا ترکیبی از آن‌ها استفاده کرد. طیف وسیعی از مواد شیمیایی را نیز می‌توانی توان از این گاز به دست آورد. گاز با ارزش گرمایی بالا، که از گازی شدن با استفاده از اکسیژن به عنوان عامل گازدار تولید می‌شود، می‌تواند به سوخت حمل و نقل تبدیل شود. زغال چوب (سنگ)، خروجی اصلی فرآیند کربنیزاسیون و پیرولیز آهسته است. پسماند جامد که به عنوان بیوجار شناخته می‌شود، می‌تواند به عنوان تهویه کننده خاک، عایق یا کاتالیزور (به عنوان کربن فعال) استفاده شود و می‌تواند گرمایش جهانی را کاهش دهد [۸].



## ۲\_ مسائل رایج برای تحلیل چرخه حیات

- استفاده از سوخت‌های فسیلی و مواد خام برای تولید سوخت‌های زیستی: کل چرخه حیات تولید سوخت‌های زیستی تا حدودی شامل استفاده از سوخت‌های فسیلی و مواد خام می‌شود. این که آیا تراز خالص سود حاصل از ورودی سوخت‌های فسیلی به دست آمده از نظر انتشار کم، مثبت است یا خیر، همچنان مورد بحث است.
- در دسترس بودن زمین برای سوخت (موضوع غذا در مقابل سوخت): تولیدکنندگان فعلی سوخت زیستی همیشه دسترسی مطمئنی به مواد خام ندارند به دلیل ذخایر محدود غلات و این واقعیت که هزینه‌های جاری روغن نباتی خام حاصل از «محصولات غذایی» متغیر است. به منظور سودآوری و پایداری بیشتر تولید سوخت زیستی، اجتناب از رقابت تا حد ممکن با بازار مواد غذایی، شرکت‌ها باید بر سوخت‌های زیستی نسل دوم ساخته شده از مواد اولیه ارزان قیمت مانند زباله، زیست توده، روغن‌های زائد و چربی‌ها، باقیمانده‌ها و غیره تمرکز کنند. اتانول سلولزی و بیودیزل حاصل از روغن‌های زائد، محصولات غیر غذایی یا جلبک‌ها به عنوان جایگزین‌های واقعی برای مقابله با این مشکل ظاهر می‌شوند.
- اثرات زیست محیطی: علیرغم این واقعیت که برخی از مطالعات انجام شده تا به امروز نشان می‌دهد که سوخت‌های زیستی نسل اول ممکن است میزان کربن، مصرف سوخت فسیلی و میزان گازهای گلخانه‌ای کمتری را ارائه دهند، خروجی‌های بیشتر و شاخص‌های زیست محیطی باید مورد توجه قرار گیرند. مصرف آب (در رشد محصولات زراعی)، تغذیه گرای (ریزش کودهای علفزار به آبهای طبیعی) و فرسایش خاک برخی از آنها هستند. سوخت‌های زیستی نسل دوم و بالقوه سوم از نظر اقتصادی جذاب‌تر هستند.
- تأثیر اجتماعی-اقتصادی: اجرای سوخت‌های زیستی نیز به شدت وابسته به امکان‌سنجی فناوری‌های به کار رفته برای تولید آن‌ها خواهد بود و اقتصاد فرآیندها نقش اساسی در این زمینه دارند [۶].

## ۴\_ نتیجه گیری

اخیراً به دلیل افزایش هزینه‌های انرژی و مشکلات زیست محیطی، علاقه به سوخت‌های زیستی افزایش یافته است. بیوانرژی یک منبع انرژی فراوان، پاک و تجدیدپذیر است که از زیست توده به دست می‌آید. تبدیل ترموشیمیایی زیست توده یک مسیر امیدوارکننده برای تولید منابع سوخت جایگزین برای تولید انرژی است. تبدیل ترموشیمیایی می‌تواند از طریق احتراق مستقیم یا احتراق همزمان با زغال سنگ یا گاز طبیعی برای تولید گرما و الکتریسیته آزاد شود، یا می‌تواند از طریق سایر فرآیندهای ترموشیمیایی به سوخت‌های زیستی (مانند گاز سنتز، روغن‌های زیستی و زغال سنگ) با پیرولیز، گازی شدن و مایع سازی مستقیم، تبدیل شود. احتراق همزمان زیست توده و زغال سنگ ساده‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین رویکرد برای تولید انرژی زیستی در مقیاس بزرگ است، زیرا تغییرات کمی برای ارتقای نیروگاه‌های اصلی مبتنی بر زغال سنگ مورد نیاز است. پیرولیز سریع توجه زیادی را به خود جلب کرده است زیرا تا به امروز تنها فناوری شناخته شده صنعتی برای تولید روغن‌های زیستی است. گازی شدن پلاسما عمدتاً برای تصفیه زباله‌های خطرناک به دلیل راندمان تخریب و کاهش بالا استفاده می‌شود. با این حال، به دلیل تولید بالای  $H_2$  و  $CO$ ، اما تولید بسیار کم دوده، پتانسیل زیادی برای تولید گاز سنتز دارد. گازسازی آب فوق بحرانی یک رویکرد امیدوارکننده برای تولید هیدروژن از مواد اولیه زیست توده، به ویژه آنهایی که رطوبت بالایی دارند، مانند لجن فاضلاب است. از آنجایی که آب را می‌توان یک حلال مؤثر و "سبز" در نظر گرفت، مایع سازی مستقیم همچنین می‌تواند مواد اولیه زیست توده مرطوب را به طور مستقیم پردازش کند. بر خلاف گازی شدن آب فوق بحرانی، مایع سازی مستقیم بیشتر بر تولید محصولات مایع با ارزش در دماهای نسبتاً پایین‌تر متمرکز است. همچنین ایده‌های بزرگ برای بخش حمل‌ونقل، سوخت‌های زیستی نسل دوم و سوم، از جمله بیودیزل از روغن میکروبی، تولید بیوبتانول (از مواد اولیه غیرخوراکی) به عنوان سوختی شبیه بنزین و تهیه سوخت‌های زیستی از مواد اولیه غیرخوراکی سلولزی و زیست‌توده است. با نگاهی به سناریوی انرژی جهان و از این بررسی جامع. این مقاله را با نکات زیر به پایان می‌بریم:



- پیرولیز سریع برای تبدیل زیست توده به سوخت مایع مناسب‌ترین است و به طور همزمان محصولات گازی تولید می‌کند.
- روغن زیستی تولید شده از طریق فرآیند پیرولیز دارای خواص شیمیایی مشابه نفت خام است. روغن زیستی تصفیه شده را می‌توان به عنوان سوخت حمل و نقل استفاده کرد.
- کربنیزه شدن زیست توده، تبدیل زیست توده با عیار پایین به سوخت زغال چوب با عیار بالا است. زغال چوب سوخت با کیفیتی برای گازیفایرهای با جریان بالا و متقاطع است.
- تبدیل زیست توده از طریق مسیر تبدیل حرارتی شیمیایی به حفاظت از محیط زیست و اکولوژی نیز کمک می‌کند.

#### ۵\_ منابع:

- [1] Y. Sun and J. Cheng, "Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production : a review q," vol. 83, pp. 1–11, 2002.
- [2] T. Damartzis and A. Zabaniotou, "Thermochemical conversion of biomass to second generation biofuels through integrated process design — A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 366–378, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.08.003.
- [3] L. Zhang, C. Charles, and P. Champagne, "Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass," *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 5, pp. 969–982, 2010, doi: 10.1016/j.enconman.2009.11.038.
- [4] N. L. Panwar, R. Kothari, and V. V Tyagi, "Thermo chemical conversion of biomass – Eco friendly energy routes," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 1801–1816, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.024.
- [5] H. Chyuan, W. Chen, A. Farooq, Y. Yang, and K. Teong, "Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production : A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 113, no. August 2018, p. 109266, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109266.
- [6] T. Bhaskar, B. Bhavya, R. Singh, D. V. Naik, and A. Kumar, "Thermochemical Conversion of Biomass to Biofuels," pp. 51–77, 2011, doi: 10.1016/B978-0-12-385099-7.00003-6.
- [7] P. C. Badger, "Ethanol From Cellulose : A General Review," pp. 17–21, 2002.
- [8] M. Patel, X. Zhang, and A. Kumar, "Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies : A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1486–1499, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.070.
- [9] I. Congress and W. Berlin, "Liquid Products from the Continuous Flash Pyrolysis of Biomass," pp. 581–588, 1988.
- [10] A. Horne and P. T. Williams, "Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass," vol. 75, no. 9, pp. 1051–1059, 1996.
- [11] H. Chyuan, W. Chen, Y. Singh, Y. Yang, and C. Chen, "A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production : A TG-FTIR approach," *Energy Convers. Manag.*, vol. 209, no. December 2019, p. 112634, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112634.
- [12] I. Janajreh, S. S. Raza, and A. S. Valmundsson, "Plasma gasification process : Modeling, simulation and comparison with conventional air gasification," *Energy Convers. Manag.*, vol. 65, pp. 801–809, 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2012.03.010.
- [13] A. Sanlisoy and M. O. Carpinlioglu, "ScienceDirect A review on plasma gasification for solid waste disposal," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 6–10, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.008.
- [14] J. Zhang and X. Zhang, *15. The thermochemical conversion of biomass into biofuels*. Elsevier Ltd, 2019.
- [15] M. Sami, K. Annamalai, and M. Wooldridge, "Co-firing of coal and biomass fuel blends," vol. 27, pp. 171–214, 2001.
- [16] M. Balat, "Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway : A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 2, pp. 858–875, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.08.013.