

نیروگاه برق با سوخت جامد زیست‌توده و تعیین کیفیت نمونه ساقه پنبه

معصومه امیری^۱، آرش نجفی^۲

تاریخ دریافت مقاله:

۹۴/۸/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۵/۱/۲۱

چکیده:

باتوجه به مشکلات پایان‌پذیری و اثرات زیست‌محیطی استفاده از سوخت‌های فسیلی در تولید برق، بسیاری از کشورهای جهان به دنبال یافتن روش‌های جایگزین در این صنعت هستند، از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر که یکی از منابع عمده آن زیست‌توده است. با وجود موفقیت و ترویج استفاده از زیست‌توده در تولید برق در اکثر نقاط جهان، سهم استفاده از آن در صنعت برق کشور ایران بسیار جزئی است. یکی از منابع عمده آن زائدات کشاورزی است که محققان با تغییرات فیزیکی و شیمیایی آنها توانستند ویژگی‌های احتراقی آن را هم‌تراز سوخت‌های فسیلی کنند. به عنوان مثال، با پردازش سوخت‌های زیست‌توده به شکل پلت، چگالی توده‌ای آن به ۴۵۰-۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ارزش حرارتی آن حدود ۱۰۰۸۰-۶۴۸۰ مگاژول بر مترمکعب می‌رسد که تقریباً مشابه زغال سنگ است. در این مقاله با بررسی کارمحققان به معرفی روش‌های تعیین کیفیت سوخت‌زیست‌توده از جمله آنالیزهای دستگاهی توزین حرارتی، عنصری و استفاده از نرم‌افزار فایرکد برای نمونه ساقه پنبه که براساس تحقیق انجام شده در رابطه با پسماندهای کشاورزی تولیدی استان اردبیل سوخت مناسب‌تری گزارش شده است. مقدار گازهای احتراقی حاصل از سوختن ساقه پنبه شامل مقدار بسیار جزئی دی‌اکسید گوگرد و ۱۲/۶۰۲ درصد حجمی دی‌اکسید کربن است و مقدار بالاترین ارزش حرارتی آن ۱۹۴۹۴ کیلوژول بر کیلوگرم است که با استفاده از رابطه تجربی روبرتو گارسیا (۲۰۱۴) و داده‌های حاصل از آنالیزهای ذکر شده، به دست آمده است. هدف از این مقاله، احداث نیروگاه‌های با سوخت زیست‌توده به شکل محلی در نقاطی از کشور است (همانند روستاها) که امکان دسترسی سوخت زیست‌توده بالاست و انتقال سوخت‌های فسیلی در آن مناطق سخت و یا غیر ممکن است بخصوص در فصل سرما که می‌تواند باعث تنوع بخشی سوخت و سهولت تولید برق باشد.

کلمات کلیدی:

بحران انرژی، اثرات زیست‌محیطی، تولید برق، آنالیزهای زیست‌توده جامد، ساقه پنبه

مقدمه

با افزایش جمعیت جهان و رشد کشورهای در حال توسعه، تقاضای برق همچنان رو به افزایش است، بنابراین، در دنیای مدرن امنیت انرژی و نیاز به منابع انرژی با عرضه ثابت و هزینه پایین یک موضوع مهم جهانی است [۲۴]. امروزه تولید برق از سوخت‌های فسیلی به عنوان یک فناوری با آلودگی بالا شناخته شده است [۳]. علاوه بر آن، ذخایر سوخت‌های فسیلی محدود می‌باشد، عمر ذخایر زغال سنگ جهان ۱۰۹ سال و ذخایر تثبیت شده نفت و گاز با همین آهنگ سرعت تولید فعلی به ترتیب ۵۲/۹ و ۵۵/۷ سال تخمین زده شده است [۱]. گرچه کشور ایران دارنده اولین ذخایر گازی و چهارمین ذخایر نفتی در جهان است، اما همین عامل باعث شده گاز طبیعی عمده‌ترین سهم را در سوخت مصرفی نیروگاه‌های کشور به خود اختصاص دهد در حالی که در فصل سرما اساسی‌ترین مساله در تولید برق، تأمین سوخت این نیروگاه‌ها می‌باشد. بنابراین، سیاست‌های انرژی کشور، متولیان بخش برق را بر آن داشته تا در سال‌های اخیر، به بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر توجه ویژه‌ای داشته باشند. سوخت‌های تجدیدپذیر می‌تواند افزایش امنیت انرژی را به همراه داشته باشند. در بین این منابع، زیست توده یک ماده آلی است که براحتی در هر محیطی تولید و قابلیت تبدیل به هر سه حالت ماده را دارد و بسرعت احیا می‌شود و تنها سوخت تجدیدپذیر است که به صورت احتراق مستقیم در نیروگاه‌های برق می‌توان از آن استفاده کرد و قابلیت ایجاد نیروگاه‌های محلی آن در مناطقی که دسترسی به آن زیاد است، وجود دارد. در حال حاضر، ۶۲ کشور از سوخت زیست توده در تولید برق استفاده می‌کنند که آمریکا با بیشترین سهم ۲۶ درصد و آلمان ۱۵ درصد و برزیل و ژاپن ۷ درصد است [۲۹، ۱]. در بین فرایندهای تبدیل زیست توده که شامل احتراق مستقیم، پیرولیز و گازی‌سازی است، احتراق مستقیم ساده‌تر و سابقه طولانی‌تر دارد [۱۴، ۱۷، ۳۰]. در این مطالعه برای تعیین کیفیت سوخت زیست توده جامد با بررسی مقالات بسیاری از محققان از جمله Jenkins و همکارانش (۱۹۹۸) [۲۱] و Khan و همکارانش (۲۰۰۹) [۱۴]، Munir و همکارانش (۲۰۰۹) [۲۲]، M.V.Gil و همکارانش (۲۰۰۶) [۳۱] و کارهای Vamvuka و همکارانش طی سال‌های (۲۰۱۱-۲۰۰۹) [۲۶، ۸]، تحلیل عنصری و کلی مهم شناخته شدند. در این مقاله، نتایج حاصل از این تحلیل برای نمونه ساقه پنبه به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های آنالیزی TG، CHNS به دست آمده است و با استفاده از داده‌های حاصل از آنها و معادلات تجربی و نرم‌افزار فایرکد ارزش حرارتی و گازهای احتراقی حاصل از احتراق سوخت زیست توده به دست آمده است که از این نتایج می‌توان جهت طراحی سیستم‌های احتراقی، پیش‌بینی رفتار احتراقی سوخت در محفظه‌های احتراقی استفاده کرد.

انتشار آلاینده‌ها و هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشارات حاصل از سوخت‌های فسیلی

میزان انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌های وزارت نیرو به تفکیک نوع نیروگاه در سال ۱۳۹۱ با توجه به جدول (۱) ارایه شده است. دی‌اکسید کربن از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته از سوخت‌های فسیلی است و برای نیروگاه بخاری

بیشترین مقدار و دیزلی کمترین مقدار را دارد که بر اساس آمار شرکت توانیر، سهم تولید برق تولیدی توسط نیروگاه برق دیزلی کمتر است (تعداد این نیروگاه ها کمتر است) [۱].

جدول ۱) میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای بخش نیروگاهی وزارت نیرو

بر اساس نوع نیروگاه در سال ۱۳۹۱ (تن) [۱].

نوع نیروگاه	NO _x	SO ₂	SO ₃	CO	SPM	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
بخاری	۲۲۰۵۳۵	۷۵۵۰۶۲	۳۴۸۱	۱۴۷۵۲۸	۱۶۵۸۷	۷۶۴۸۳۲۶۱	۲۱۴۷	۳۹۷
گازی	۹۵۱۰۳	۲۵۳۹۶	۶۰۱	۳۴۲۳	۴۶۴۲	۲۹۱۰۴۵۱۱	۶۳۱	۹۲
سیکل ترکیبی	۲۳۱۷۷۳	۲۲۶۲۶	۸۱۲	۵۹۰۵	۶۷۱۵	۳۸۴۹۷۲۸۸	۹۲۳	۱۳۱
دیزلی	۱۲۴	۳۷۵	۶	۰/۱	۲۴	۶۳۱۹۷	۳	۱

به مجموع پولی که بتواند صدمات ناشی از انتشار مواد آلاینده و گازهای گلخانه‌ای را جبران نماید، هزینه تخریب یا هزینه‌های اجتماعی گفته می‌شود. هزینه‌های اجتماعی تخریب محیط‌زیست در اثر مصرف حامل‌های انرژی فسیلی در کشور براساس مطالعات بانک جهانی و سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران در سال ۱۳۹۱ حدود ۱۰۲/۶ هزار میلیارد ریال بر اساس قیمت‌های ثابت سال ۱۳۸۱ می‌باشد که معادل ۱۹.۶ درصد از تولید ناخالص داخلی کشور در آن سال بوده است، جزئیات در جدول (۲) ارایه شده است [۱].

جدول ۲) هزینه‌های اجتماعی انتشار گازهای آلاینده

و گلخانه‌ای به قیمت سال ۱۳۸۱ (هزار ریال بر تن) [۱].

نوع گاز	مقدار هزینه ^۱	نوع گاز	مقدار هزینه ^۱
NO _x	۴۸۰۰	SPM	۳۴۴۰۰
SO ₂	۱۴۶۰۰	CO ₂	۸۰
SO ₃	*	CH ₄	۱۶۸۰
CO	۱۵۰۰	N ₂ O	*

(۱) بر اساس مطالعه بانک جهانی و سازمان حفاظت محیط‌زیست. *مقادیر در دسترس نمی‌باشد.

منابع زیست‌توده

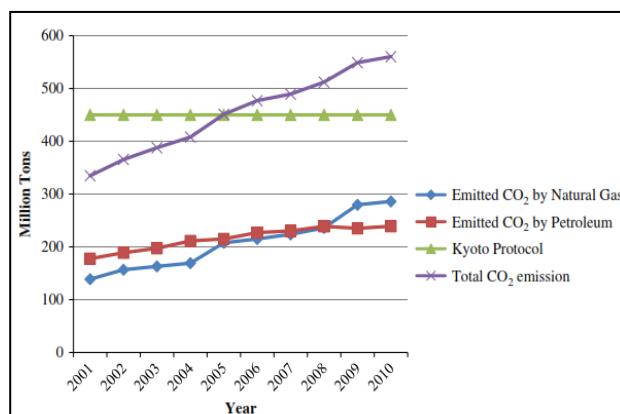
تعریف اتحادیه اروپا از زیست توده که در راهنمای EC/۲۰۰۱/۷۷ به تاریخ ۲۷ سپتامبر ۲۰۰۱ میلادی عنوان شده، عبارت است از: " زیست توده اجزا قابل تجزیه زیستی از محصول‌ها، پسماندها و زائدات کشاورزی (شامل مواد گیاهی و دامی)، جنگل‌ها و صنایع وابسته و همچنین زائدات صنعتی و شهری قابل تجزیه". بر اساس تعریف علمی ارائه شده برای

زیست توده در این آیین نامه، زیست توده به سوخت‌هایی اطلاق می‌گردد که از جرم توده فیتوپلانکتون‌ها و جرم توده زئوپلانکتون‌ها ساخته می‌شوند [۱۴، ۱۷، ۳۵، ۳۰]. اما فقط تعداد اندکی از آنها برای استفاده در نیروگاه‌های برق و حرارت مناسب‌اند و زیست‌توده‌هایی که از زائادات جنگلی و کشاورزی حاصل می‌شوند، متداول‌ترند. برخی منابع دیگر زیست‌توده مانند جلبک دریایی، خز و فضولات حیوانی در تولید انرژی به کار می‌روند، اما محدودند [۲، ۱۸]. دسته بندی‌های مختلفی وجود دارد که دسته بندی بر اساس ویژگی و مشخصات زیست‌توده عبارتند از [۶، ۱۴، ۱۱]: سوخت‌های چوبی (چوب‌های تخریب شده ...)، سوخت‌های حاصل از گیاهان علفی (کاه، چمن، ساقه گیاهان)، ضایعات (لجن فاضلاب‌ها، RDF، ...)، ضایعات حاصل از صنایع همانند صنایع کاغذ [۷] و غذایی و...، گیاهان آبی (جلبک [۲۷] و...)، منابع اختصاصی زیست-توده (فقط به هدف تولید انرژی کشت می‌شوند در واقع، حداکثر بازده و کاربرد انرژی را دارند) با دوره عمر کوتاه و در مقیاس زیاد و بازده انرژی بالا، گیاهان تجاری‌اند که برای واحدهای بزرگ احتراقی مناسب‌اند [۹، ۱۸].

بررسی نیروگاه‌ها با سوخت جامد در ایران

یکی از مهمترین و دسترس‌پذیرترین منابع تجدیدپذیر، زیست‌توده است که از انواع متداول سوخت جامد آن، زباله و زائادات کشاورزی هستند. گرچه نیروگاه‌های زباله‌سوز در برخی نقاط کشور احداث شده و مطالعات گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته، اما در زمینه استفاده از زائادات کشاورزی که بخش وسیعی از منابع زیست‌توده را در کشور ایران تشکیل می‌دهند، مطالعات گسترده‌ای انجام نشده است در صورتی که می‌توان از این سوخت برای تولید برق در نیروگاه‌های محلی در روستاها و مناطق دور افتاده که امکان دسترسی به سوخت‌های فسیلی وجود ندارد و یا دشوار است، استفاده کرد.

استفاده از گاز طبیعی و نفت در بخش حمل‌ونقل و صنعت به علت قیمت پایین در ایران توسعه یافته است. در نتیجه، افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای بخصوص دی‌اکسیدکربن تولید شده در طول دهه گذشته در ایران روند رو به بالا داشته است. شکل (۱) روند تولید دی‌اکسیدکربن در کشور ایران را تا سال ۲۰۱۰ نشان می‌دهد که در آن ایران رتبه دهم در تولید دی‌اکسید کربن را داشته است و در سال ۲۰۱۵، به عنوان هفتمین کشور تولیدکننده دی‌اکسیدکربن در سراسر جهان معرفی شده است. از این رو، کشور ایران به تنوع بخشی به منابع انرژی خود به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله زیست‌توده روی آورده است، در صورتی که هم اکنون سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران کمتر از ۱ درصد است [۲۰، ۲۹، ۳۴].



شکل ۱) روند تولید دی‌اکسید کربن در کشور ایران [۳۴].

زائدات یا پسماندهای کشاورزی منابع بزرگ انرژی بدون ارزش غذایی برای انسان تلقی می‌شود. همه ساله مقدار زیادی از زائدات کشاورزی در مراحل مختلف کشاورزی تولید می‌شوند. با توجه به شرایط خاص اقلیمی و جغرافیایی، وجود جنگل‌ها در بخش‌هایی از شمال، غرب و مرکز ایران، خوشبختانه پتانسیل مناسبی وجود دارد. طبق مطالعات انجام شده، زائدات کشاورزی با سهم حدود ۴۰ درصد زائدات زیست‌توده تولیدی در کشور ایران بعد از فضولات حیوانی با سهم ۴۵ درصد این منابع بالاترین درصد منابع زائدات زیست‌توده را تشکیل می‌دهد. با توجه به درصد بالای تولید زائدات کشاورزی در کشور ایران که حدود ۱۹/۶ میلیون تن در سال است، مقادیر عمده آن در مزارع سوزانده می‌شود. همچنین با توجه به بالابودن درصد کشاورزی در استان اردبیل، به بررسی محصولات زیر کشت استان اردبیل، میزان زائدات حاصل از خرمن آنها، همچنین خوراک دام و استفاده از آنها در ساخت کمپوست و در نتیجه، انتخاب زیست‌توده‌ای مناسب با توجه به مطالب ذکر شده پرداختیم [۲۹، ۳۴].

احتراق توأم

احتراق توأم به روش مخلوط کردن زیست‌توده با یک سوخت فسیلی یا یک زیست‌توده دیگر اتلاق می‌شود. زغال سنگ سوخت فسیلی جامد است که قابلیت احتراق توأم با زیست‌توده را دارد و در بسیاری از کشورها به عنوان سوخت جایگزین در صنایع و نیروگاه‌ها استفاده می‌شود. مقایسه رشد تولید زغال سنگ در سال ۲۰۱۲ با متوسط نرخ رشد سالانه ده ساله اخیر بیانگر روند نزولی در رشد تولید این حامل انرژی می‌باشد که بیانگر کاهش مصرف زغال سنگ در بسیاری از کشورهای اروپایی و امریکایی است. بسیاری از کشورهای جهان جهت تأمین سوخت نیروگاه‌ها و واحدهای صنعتی از احتراق توأم زیست‌توده با زغال سنگ استفاده می‌کنند که علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، در مصرف سوخت‌های فسیلی صرفه‌جویی می‌کنند [۱۷]، جدول (۳) نمونه‌ای از کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در نتیجه استفاده از احتراق توأم زغال سنگ با چوب را نشان می‌دهد.

جدول ۳) مقایسه انتشار آلاینده‌های حاصل از نیروگاه برق با سوخت زغال‌سنگ،

در همان شرایط احتراق توأم سوخت ۱۰ درصد زیست‌توده با زغال‌سنگ [۹].

نشر آلاینده‌ها سیستم مرجع (۱۰۰٪ زغال سنگ سخت)	سیستم ۱ (۹۰٪ زغال سنگ؛ ۱۰٪ کاه)	سیستم ۲ (۹۰٪ زغال سنگ با ۱۰٪ ضایعات چوب)
دی اکسید کربن	۲۲/۳	۲۰/۵
دی نیتروژن اکسید	۴۴/۶	۴۲/۹
متان	۵۹/۷	۴۱/۸
دی اکسید گوگرد	۱۵۰/۵	۳۷/۲
اکسیدهای نیتروژن	۴۷۲/۴	۳۰۰/۸
اسید کلریدریک	۲۰۱/۷	۵

واحد انتشار آلاینده‌ها برای دی‌اکسید کربن t/GWh و سایر موارد kg/GWh است.

دسترسی

دسترسی منابع در یک کشور بستگی به موقعیت جغرافیایی، آب و هوایی، تراکم جمعیت و درجه صنعتی بودن کشور دارد [۵]. در واقع، زیست‌توده‌هایی که دسترسی بالای فصلی دارند، توصیه می‌شوند زیرا در این صورت، نیاز به ذخیره‌سازی کاهش می‌یابد [۲۶]. از طرف دیگر، استفاده از منابع زیست‌توده نباید به گونه‌ای باشد که رقابتی در زمین قابل کشت برای منابع اختصاصی انرژی و غذا پیش آید و موجب جنگل‌زدایی و از بین رفتن پوشش گیاهی و بیابان‌زایی شود [۵]. تولید زیست‌توده اختصاصی تنها معیار برای سوخت‌های تجدیدپذیر در آینده شناخته شده است. به طور کلی، تولید زیست‌توده اختصاصی گران قیمت‌تر از انرژی تولید شده از زائدات کشاورزی است و ممکن است هزینه‌های نهایی برق با هزینه برق تولیدی از سوخت‌های فسیلی قابل رقابت باشد [۲].

نمونه‌هایی از جایگزینی موفق زیست‌توده با سوخت‌های فسیلی در جهان

نیروگاه‌های زیست‌توده در بریتانیا

بسیاری از واحدهای صنعتی و نیروگاه‌ها سوخت مصرفی خود را تغییر دادند از جمله نیروگاه Tilbury که یک واحد تولید برق با سوخت زغال‌سنگ است که از سال ۱۹۶۷ شروع به کار کرده و در سال ۲۰۱۱ با موفقیت به یکی از بزرگترین نیروگاه‌های زیست‌توده در جهان تبدیل شده و بیشتر از تراشه‌های چوب، پلت‌های کاه، سبوس دانه جو و آفتابگردان استفاده می‌کند. با توجه به محتوای گرمایی پایین و تراکم توده‌ای زیست‌توده در مقایسه با زغال سنگ، ظرفیت تولید Tilbury در حدود ۳۰ درصد کاهش یافته و به ۷۴۲MW رسیده است به طوری که راندمان حرارتی نیروگاه را از ۳۷ درصد به ۳۵/۳ درصد کاهش داده است. بیشترین تغییرات فیزیکی در سیستم احتراق و تغییرات جزئی در سیستم پردازش و

آسیاب، سیستم تغذیه سوخت اعمال شده است. براساس نتایج آزمایش زیست توده که در سپتامبر ۲۰۱۰ در این واحد به انجام رسید، انتشار اکسیدهای نیتروژن از ۴۸۰ به ۲۲۰، اکسیدهای گوگرد از ۸۰۰ به ۲۰۰ و حجم خاکستر تولید شده از ۴۰.۰۰۰ به ۴۰۰۰ و چرخه انتشار دی اکسید کربن از ۰/۸۱ به ۰/۱۸ - ۰/۱۱ کاهش یافت که یک کاهش ۸۷ - ۷۸ درصدی است [۱۰، ۲۶].

احتراق توأم زیست توده چوب در فنلاند

واحد صنعتی CHP, Alholmens Kraft در Pietarsaari در فنلاند نمونه منحصر بفردی از امکان تولید انرژی مبنی بر بیوفیول در سال ۲۰۰۱ احداث شده است. این نیروگاه بخار آب مورد نیاز برای کارخانه کاغذسازی UPM Kymmene مجاورش را تأمین می کند. برق خروجی آن ۲۴۰ مگاوات و بخار آب خروجی ۱۰۰ مگا هرتز در ساعت و گرمای حاصل ۶۰ مگا هرتز در ساعت است. با استفاده از سیستم های خلاقانه جمع آوری و دسته بندی، پسماندهای باقیمانده در جنگل ها سوخت مورد نیاز این نیروگاه را تأمین می کنند. در کل، سوخت مصرفی آن شامل چوب های صنعتی و پوست آن ها ۳۵ درصد پسماندهای جنگلی ۱۰ درصد، زغال سنگ نارس ۴۵ درصد، نفت سنگین و زغال سنگ ۱۰ درصد است و در مواقع اضطراری که نیاز به سوخت جایگزین دارند (کم بودن زائدات جنگلی و ...) از سوخت های فسیلی استفاده می کنند [۱۰].

مشخصات سوخت جامد

محققان جهت تعیین کیفیت سوخت، مشخصات فیزیکی، شیمیایی آن را با استفاده از تحلیل های ساختاری [۱۹]، کلی، عنصری، خاکستر، پتروگرافی، کانی شناسی برای تعیین خصوصیات سوخت های جامد استفاده می کنند [۲۸]. در واقع، خواص سوخت اغلب برای انتخاب فناوری های احتراق است که بسته به این خواص، یک سوخت زیست توده می تواند برای شرایط احتراقی خاص به دلایل فنی و تا حدی به دلایل زیست محیطی مناسب نباشد. تحلیل کلی تعیین کننده درصد مواد فرار، رطوبت و خاکستر و تحلیل عنصری مقدار عناصر کربن، اکسیژن، گوگرد، کلر، نیتروژن و هیدروژن در زیست توده است [۲]. پس از آن، تحلیل خاکستر جهت تعیین امکان بهره برداری از خاکستر و پیش بینی ایجاد مشکلات فنی در سیستم های احتراقی همانند خوردگی، رسوب خاکستر، انباشتگی و رفع این مشکلات، تحلیل توزین حرارتی برای بررسی رفتار احتراقی زیست توده به کار می رود. تعیین ویژگی های فیزیکی همانند ارزش حرارتی، چگالی توده ای نیز از دیگر تحلیل های مهم سوخت زیست توده هستند.

مشخصات فیزیکی

چگالی توده ای از مهمترین ویژگی فیزیکی سوخت های زیست توده است. معمولاً سوخت های زیست توده جامد چگالی توده ای پایینی دارند. چگالی توده ای سوخت به دلایل فنی و اقتصادی نسبت به ارزش حرارتی از اهمیت زیادی برخوردار است. برخی از معایب مربوط به پایین بودن چگالی توده ای شامل ارزش حرارتی نسبتاً پایین به ازای واحد حجم، مشکلات

کنترل فرایند و خوراک‌دهی، نیاز به فضای انبار بزرگتر، حمل و نقل گران و محدودیت‌های کاربرد فناوری (همانند انسداد و گرفتگی در بسترهای سیالی شده) است. متراکم‌سازی (Densification) فرایندی جهت غلبه بر معایب ذکر شده است که فضاهای خالی بین و درون ذرات را حذف می‌کند [۱۷، ۳۰]. سه روش متداول جهت متراکم‌سازی شامل متعادل‌سازی (Bituminous)، بریکت‌سازی و پلت‌کردن است که باعث افزایش هزینه، انرژی مصرفی و پیچیدگی تجهیزات می‌شوند. جدول (۴) تفاوت چگالی توده‌ای و ارزش حرارتی کاه را به دو روش متعادل‌سازی و پلت‌شدن نشان می‌دهد و در حالت پلت کاه نتایج حاصل تقریباً مشابه زغال‌سنگ (چگالی توده‌ای زغال‌سنگ معمولی ۹۰۰ - ۸۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب) است. از مهمترین مزایای پلت‌کردن، قابلیت استفاده برای طیف وسیعی از مواد با درصد رطوبت مختلف است [۲].

جدول ۴) مقایسه ارزش حرارتی و دانسیته توده‌ای در روش‌های مختلف متراکم‌سازی کاه [۲].

روش	چگالی توده‌ای (Kg/m ³)	ارزش حرارتی (Mj/m ³)
متعادل‌سازی	۷۰ - ۹۰	۹۷۰ - ۱۳۰۰
بریکت و پلت	۴۵۰ - ۶۵۰	۶۴۸۰ - ۱۰۰۸۰

تخمین بالاترین ارزش حرارتی

برای تخمین بالاترین ارزش حرارتی سوخت‌های زیست‌توده براساس داده‌های حاصل از تحلیل‌های عنصری، کلی، شیمیایی معادلات تجربی زیادی ارائه شده است [۱۵، ۳۳]. در بین روابط ارائه شده روابطی که در آنها از داده‌های تحلیل عنصری و کلی به طور همزمان استفاده می‌شود، اعتبار بیشتر و درصد خطا کمتری دارند. در این مقاله از رابطه (۱) استفاده شده که توسط Roberto García و همکارانش در سال ۲۰۱۴ ارائه شده است [۲۵]:

$$HHV = 1/0.8 \times 10^4 - 9.8/4.4 A + 11.3/2.8 FC - 1.65/2.8 M + 12.7/7.2 C + 1.9/5.6 O \quad (1)$$

که در اینجا، A, FC, M, C, O به ترتیب درصد جرمی خاکستر، کربن تثبیت شده، رطوبت، کربن، اکسیژن بر مبنای خشک است و HHV بالاترین ارزش حرارتی براساس kJ/kg است.

تجهیزات مورد استفاده در نیروگاه‌های زیست توده

بازدهی احتراق و قابلیت بکارگیری انرژی وابسته به نوع زیست توده، روش‌های احتراقی و مقیاس کاربرد است. سه روش احتراقی زیست توده در واحدهای حرارتی و تولید برق به کار می‌رود که در واقع، همان روش‌های احتراق زغال سنگ هستند [۲، ۳۰]:

۱. دیگ بخار استوکر (Grate Firing)

در این روش، زیست توده بر روی یک صفحه مشبک (Grate) قرار داده می‌شود، هوا از قسمت زیرین صفحه مشبک

(Grate) وارد محفظه احتراق می‌شود و سوخت با توجه به نوع صفحه مشبک (از نوع گردشی، وایره و ...) وارد محفظه احتراق می‌شود و در این سیستم‌ها از هوای ثانویه جهت احتراق بهتر استفاده می‌کنند. این روش مناسب سوخت‌هایی با اندازه ناهمگون و زمخت است. دیگ‌های بخار استوکر متداولترین فناوری هستند که برای احتراق زیست‌توده استفاده می‌شوند و انعطاف پذیری بالایی در انتخاب سوخت و پیکربندی نسبتاً ساده ای دارد [۳۰،۲].

۲. دیگ بخار بایستر سیالی شده (Fluidized Bed)

سیستم‌های احتراقی بسترسیالی‌شده از سال ۱۹۶۰ برای احتراق ضایعات صنعتی و شهری به کار برده شدند. از آن پس، بیش از سیصد واحد تجاری در سراسر جهان ساخته شد. در خصوص کاربردهای صنعتی، دیگ‌های بخار با بسترهای سیالی شده حبابی و بسترهای سیالی شده سیار (Circulating Fluidized Bed) از رایج‌ترین و مهم‌ترین انواع بسترهای سیالی شده‌اند. یک دیگ بخار با بستر سیالی‌شده شامل یک ظرف استوانه‌ای با بستر سوراخ شده با یک صفحه پر شده با مواد گرانولی، خنثی و داغ (همانند سلیس، شن، ماسه و...) که به شکل سوسپانسیون است. هوای اولیه احتراق از طریق صفحه توزیع هوا و از قسمت پایینی وارد محفظه احتراق می‌شود و زیست‌توده با ماده واسط مخلوط شده و به صورت سوسپانسیون با هوای وارد شده مخلوط می‌شود. انتقال حرارت زیاد و اختلاط خوب هوا و سوخت، شرایط خوبی برای احتراق کامل با نیاز به هوای اضافی کم را فراهم می‌کند. دیگ‌های بخار بایستر سیالی‌شده یک روش احتراقی جدیدتر است که نسبت به دیگ‌های بخار استوکر کارایی بالاتر، پیکربندی نسبتاً پیچیده و آلاینده تولیدی کمتری دارد و کار کردن با آن سخت است که این عوامل موجب شده این روش کمتر متداول شود [۳۰،۲].

۳. دیگ بخار با سوخت نرم شده (Pulverise Fuel)

در سیستم‌های احتراقی سوخت نرم شده، سوخت‌هایی همانند خاک اره و تراشه‌های ریز شده داخل کوره تزریق می‌شود و هوای انتقال یافته توسط سوخت به عنوان هوای اولیه است. راه اندازی کوره به کمک یک مشعل کمکی صورت می‌گیرد. زمانی که دمای احتراق به مقدار معینی می‌رسد، تزریق زیست‌توده شروع می‌شود و مشعل کمکی خاموش می‌شود. در این سیستم، ابتدا ذرات کوچک سوخت همراه هوا وارد یک محفظه پیچشی می‌شوند و به صورت چرخشی وارد کوره شده و جریان گردشی داخل کوره ایجاد می‌کنند. به دلیل کوچک بودن اندازه ذرات زیست‌توده، تبدیل به گاز شدن و احتراق زغال به طور هم‌زمان صورت می‌گیرد و در این سیستم‌ها هوای ثانویه جهت احتراق کامل به سیستم تزریق می‌شود. در نتیجه می‌توان به بالاترین کارایی در احتراق دست یافت که می‌تواند در مقیاس‌های بزرگ مورد استفاده واقع شود (بالای ۶۰۰۰ مگاوات) اما پردازش سوخت نیاز به مصرف انرژی بالایی دارد [۳۰].

هریک از روش‌های نامبرده شده خود شامل انواع مختلفی می‌باشند که با توجه به نوع سوخت و مقدار مطالبه بخار مورد نظر عملکرد متفاوتی خواهند داشت. برای پردازش مناسب سوخت‌های زیست‌توده (به صورت پلت، بریکت و...) با توجه به نوع منابع زیست‌توده و دیگ بخار مورد نظر و همچنین انتقال و نگهداری آنها از تجهیزات مختلفی استفاده می‌کنند (جزئیات بیشتر در کتاب biomass Combustion & Co_Firing موجود است). با توجه به اینکه در کشور ایران شرکت‌های موفق در زمینه ساخت انواع دیگ‌های بخار و تجهیزات مکانیکی وجود دارد، امکان ساخت نمونه‌های تجهیزات

لازم وجود دارد. در این صورت، احداث نیروگاه‌هایی کوچک با سوخت زیست‌توده در مناطقی از کشور (همانند روستاها) که دسترسی بالایی به منابع زیست‌توده دارند و انتقال سوخت‌های فسیلی بخصوص در فصل سرما دشوار و یا غیرممکن است، می‌تواند باعث سهولت تولید برق و تنوع بخشی سوخت شود.

مواد و روش‌ها

طی تحقیقی در دانشگاه محقق اردبیلی در رابطه با پسماندهای کشاورزی، در بین نمونه‌های انتخابی، ساقه پنبه از لحاظ ایجاد مشکلات فنی در محفظه احتراقی و تولید آلاینده‌ها سوخت مناسب‌تری بوده است که در این مقاله به بررسی ویژگی‌های احتراقی آن خواهیم پرداخت. ذرات درشت خاک و سنگ از نمونه‌ها جدا شده و با استفاده از آسیاب ساخت شرکت ایران خودساز، آسیاب و سپس از الک آزمایشگاهی ساخت شرکت دماوند با استاندارد ASTM E:11 و مش شصت عبور داده شدند و در محیطی کاملاً خشک و بدون رطوبت نگهداری شدند. برای تحلیل عنصری نمونه‌ها از سیستم احتراق عنصری Costech 4010 ساخت کشور ایتالیا و برای تحلیل حرارتی از دستگاه TG ساخت کشور آلمان مدل IRIS 209 FI NETZSCH استفاده شده نمونه‌ها از دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد با گام حرارتی ۱۰ درجه کلون بر دقیقه در جو هوا قرار داده شدند. داده‌های بدست آمده از تحلیل‌های دستگاهی ذکر شده هم دارای خطای انسانی و هم دستگاهی می‌باشند.

تحقیقات کیفیت سوخت بر اساس آنالیزهای دستگاهی

مشخصات شیمیایی زیست‌توده ساقه پنبه شامل نتایج حاصل از تحلیل عنصری، کلی و توزین حرارتی و همچنین بالاترین ارزش حرارتی (ارزش حرارتی ناخالص) در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵) تحلیل عنصری و کلی و ارزش حرارتی ساقه پنبه

زیست توده	تحلیل کلی (درصد وزنی)					تحلیل عنصری (درصدوزنی)				
	رطوبت	مواد فرار	خاکستر	کربن تثبیت شده	O ₂ **	S	N	H	C	
ساقه پنبه	۴/۸۸۹	۶۰/۷۵۷	۳/۸۵۲	۳۰/۵۰۱	۵۱/۵۷	*	۰/۳۱	۵/۶۹	۴۲/۴۳	

*مقدار آن گزارش نشده است. ** به کمک روش انفصال به دست آمده است [۵].

شبیه‌سازی نرم‌افزاری فرایند احتراق

شبیه‌سازی محفظه احتراقی بویلر با استفاده از نرم‌افزار آنالین شرکت فایرکد انجام شده است که در آن شبیه‌سازی بویلرها با استفاده از مشخصات سوخت ورودی و بویلر مورد نظر صورت می‌گیرد. نرم‌افزار فایرکد توسط تولیدکنندگان بویلرهای بخار آب و مهندسان مشاور در بیش از ۳۰ کشور جهان از جمله شرکت SRS در آمریکا استفاده می‌شود. برخی

محققان نیز در شبیه‌سازی‌های خود از این نرم افزار استفاده کردند [۴].

با توجه به مطالعات انجام شده، دو بویلر استوکر و سیالی شده انتخاب شدند که از متداولترین بویلرهای احتراق سوخت زیست‌توده جامد هستند و با استفاده از نرم‌افزار فایرکد و داده‌های جدول (۶) که شامل مشخصات احتراقی بویلر سیالی شده و استوکر است [۱۶] محاسبات انجام گرفت. ملاحظه می‌شود که تنها تفاوت حاصل از محاسبات برای هر دو بویلر استوکر و سیالی شده با توجه به محدودیت داده‌های ورودی فقط در اتلافات ناشی از نسوختن سوخت است که در محاسبات فقط در بازده و اتلاف حرارتی بویلر تأثیر دارد. در جدول (۷) نتایج محاسبات نرم افزار فایر کد (اتلاف حرارتی کلی، بازده) برای دو بویلر استوکر و سیالی شده برای ساقه پنبه آورده شده است.

جدول ۶) مشخصات احتراقی دو بویلر استوکر و سیالی شده [۱۶].

مشخصات	بویلر سیالی شده	بویلر استوکر
هوای اضافی (%)	۵۰	۵۰
دمای گاز خروجی (درجه سانتیگراد)	۱۷۶/۷	۱۷۶/۷
اتلاف نسوختن سوخت (%)	۰/۲۵	۳/۵
اتلاف ناشی از تابش حرارتی (%)	۲/۰۳	۲/۳۰

جدول ۷) مقایسه نتایج نرم افزار فایر کد برای دو بویلر سیالی شده و استوکر با سوخت ساقه پنبه

نتایج حاصل از نرم افزار فایر کد		بویلر سیالی شده		بویلر استوکر
بازده (%)	اتلاف حرارتی کلی (%)	بازده (%)	اتلاف حرارتی کلی (%)	اتلاف حرارتی کلی (%)
۸۸/۴۲۹	۱۹/۰۲۸	۸۴/۸۷۹	۲۲/۲۸۸	ساقه پنبه

در بویلر سیالی شده، به علت پایین بودن درصد نسوختن سوخت که دلیل اصلی آن تماس مستقیم ذرات سوخت زیست‌توده با اکسیژن و طراحی خاص سیستم تغذیه هواس، بازده کلی این بویلر برای سوخت ساقه پنبه بالاتر و اتلاف حرارتی کلی آن که شامل اتلافات حرارتی مربوط به نسوختن سوخت، رطوبت سوخت، رطوبت هوا، خشک کردن گاز احتراقی و تابش حرارتی است که میزان تابش حرارتی در هر دو بویلر یک میزان ثابتی است. با توجه به نتایج حاصل، تفاوت بازده و اتلاف حرارتی کلی برای دو بویلر زیاد نیست و ممکن است در دراز مدت تأثیر خود را نشان دهد [۱۲، ۱۳، ۱۷، ۳۰].

نتایج حاصل از انتشار گازهای احتراقی

گازهای احتراقی حاصل از احتراق ساقه پنبه با استفاده از نرم‌افزار فایرکد محاسبه و در جدول (۸) آورده شده است.

جدول ۸) گازهای احتراقی حاصل از سوختن ساقه پنبه بر اساس درصد حجمی با استفاده از نرم افزار فایرکد

نوع زیست توده	دی اکسید گوگرد	اکسیژن	نیترژن	دی اکسید کربن	آب
ساقه پنبه	۰	۵/۹۶۴	۶۸/۴۹۹	۱۲/۶۰۲	۱۲/۹۳۴

مقایسه ساقه پنبه

Zhi-AoSun و همکارانش (۲۰۰۸) در کشور سوئد به مطالعه آزمایشگاهی احتراق ساقه پنبه در بستر بویلر سیالی شده پرداختند و بدین منظور تحلیل کلی، عنصری و خاکستر را برای نمونه مورد مطالعه خود انجام دادند [۳۵] که نتایج آن با نتایج حاصل برای نمونه زیست توده ساقه پنبه مقایسه و مشاهده شد که نتایج حاصل از این پژوهش برای ساقه پنبه متفاوت از نمونه ساقه پنبه در کشور سوئد است. در واقع، مشخصات نمونه سوخت زیست توده جامد با دیگر نمونه‌های مشابه در شهرها یا مناطق دیگر متفاوت است، زیرا عوامل محیطی و شرایط جغرافیایی و بسیاری عوامل دیگر در مشخصات فیزیکی و شیمیایی و در نتیجه بر رفتار احتراقی سوخت زیست توده تأثیر دارد. بنابراین، مطالعه مشخصات سوخت‌های زیست توده مشابه در منطقه دیگر الزامی است.

نتیجه گیری

امروزه با توجه به بحث پایان پذیری سوخت‌های فسیلی و آلودگی محیط زیست در کشور ایران نباید از سوخت جامد به علت ارزانی گاز طبیعی صرف نظر کرد و بهتر است به ضایعات قابل تبدیل به نیرو با دلایل ذکر شده توجه شود. از نتایج حاصل از تحلیل‌های ساقه پنبه می‌توان در طراحی فرایند احتراق استفاده کرد، همچنین رفتار احتراقی و مشکلات فنی حاصل از احتراق آن با استفاده از داده‌های حاصل از تحلیل‌ها امکان پذیر است. پردازش مناسب سوخت به شکل پلت یکی از راه‌های مناسب استفاده از سوخت‌های زیست توده با ارزش حرارتی بالاست، اما به دلیل گران قیمت بودن شاید از لحاظ اقتصادی امکان پذیر نباشد. کوفایرینگ زیست توده با زغال سنگ یکی از عوامل مؤثر بر هزینه و اجرای آسان فناوری انرژی زیست توده است. در کشور ایران به دلیل وجود ذخایر زغال سنگ حرارتی در منطقه طبس، استفاده از این حامل انرژی در بخش نیروگاهی امکان پذیر می‌باشد. طرح احداث نیروگاه زغال سوز طبس در دستور کار وزارت نیرو قرار گرفته که سوخت مورد نیاز آن از معدن مزبور تأمین می‌گردد که می‌تواند از احتراق توأم در آن استفاده کرد. ایران یک کشور خشک و نیمه خشک است که بخش قابل توجهی از آن را بیابان تشکیل داده است، بنابراین کشت گیاهانی با بافت چوبی و دوره عمر کوتاه که نیاز به آبیاری و رسیدگی کمی دارند می‌تواند گزینه خوبی برای جلوگیری از بیابان‌زایی و ایجاد پوشش گیاهی و تولید سوخت مناسب باشد. احداث نیروگاه‌های بخاری با احتراق مستقیم زیست توده به شکل محلی در نقاطی از کشور (همانند روستاها) که امکان دسترسی سوخت زیست توده بالاست و انتقال سوخت‌های فسیلی در آن مناطق سخت و یا غیر ممکن است بخصوص در فصل سرما می‌تواند باعث تنوع بخشی سوخت و سهولت تولید برق باشد. بنابراین لازم است امکان احداث نیروگاه‌های زیست توده از لحاظ اقتصادی و فنی در کشور ایران مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- [۱] معاونت امور برق و انرژی ، دفتر برنامه‌ریزی‌های کلان برق و انرژی. (۱۳۹۴)، ترازنامه انرژی ایران سال ۱۳۹۱، تهران، وزارت نیرو معاونت امور برق و انرژی.
- [2] A.A. Khana. W.d.J. P.J. Jansens. 2009. "Spliethoff Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies". *Fule Processing Technology*, 90: p. 21-50.
- [3] Annette Evans, V.S. Tim J. Evans. 2010. "Sustainability considerations for electricity generation from biomass", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: p. 1419 - 1427.
- [4] Ari Darmawan Pasek, K.W.G.A.S.. 2013. "Feasibility of Recovering Energy from Municipal Solid Waste to Generate Electricity", *J. Eng. Technol.Sci*, 45: p. 241-256.
- [5] A. Williams, J.M.J., L. Ma, M. Pourkashanian. 2012. "Pollutants from the combustion of solid biomass fuels", *Progress in Energy and Combustion Science*, 38: p. 113-137.
- [6] Christersson, L. 2008. "Poplar plantations for paper and energy in the south of Sweden". *Biomass and Bioenergy*, 32: p. 997 – 1000.
- [7] Demirbas. A. 2010. "Use of algae as biofuel sources". *Energy Conversion and Management*. 51: p. 2738–2749.
- [8] Despina Vamvuka. S.S. 2011. "Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite", *Thermochimica Acta*, 526: p. 192- 199.
- [9] D. Hartmann, M.K. 1999. "Electricity generation from solid biomass via co-combustion with coal Energy and emission balances from a German case study", *Biomass and Bioenergy*, 16: p. 397-406.
- [10] EUBIONET, T.E.B.N. 2012. "BIOMASS Co-FIRING– AN EFFICIENT WAY TO REDUCE GREENHOUSE GAS EMISSIONS".
- [11] Helena H.L. Chum. R.P. Overend. 2001. " Biomass and renewable fuels", *Fuel Processing Technology*, 71: p. 187–195.
- [12] E.J. Anthony. 1995. "FLUIDIZED BED COMBUSTION OF ALTERNATIVE SOLID FUELS; STATUS, SUCCESSES AND PROBLEMS OF THE TECHNOLOGY", *Prog. Energy Combust*, 21: p. 239-268.
- [13] Jaani Silvennoinen. 2013. "Co-firing of agricultural fuels in a full-scale fluidized bed boiler. *Fuel Processing Technology*", 105: p. 11-19.
- [14] Jenkins B.M. T.R. Miles Jr. T.R. Miles. 1998. "Combustion properties of biomass", *Fuel Processing Technology*, 54 :p. 17–46.
- [15] Igisha Parikh. S.A.C. G.K. Ghosal. 2005. "A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels", *fuel*, 84: p. 487–494.
- [16] Ken Darrow. James Wang. Anne Hampson. 2014. "Catalog of CHP Technologies", U.S. Environmental Protection Agency: ICF International.
- [17] Khana. P.J. Jansens. H. Spliethoff. 2009. "Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies". *Fuel Processing Technology*, 90: p. 21-50
- [18] Klass. D.L. 1998. "Biomass for Renewable Energy Fuels and Chemicals", 1 ed, San Diego London Boston New York Sydney Tokyo Toronto: Academic Press. 669.

- [19] Linghong Zhang, Pascale Champagne. 2010. "Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass", *Energy Conversion and Management*, 51: p. 969-982.
- [20] Mehdi Ahmadi, Maedeh Roz Khosh, Nemat Jaafarzadeh. 2016. "EMISSIONS OF CO₂ AND CH₄ IN ASMARI GAS COMPRESSOR STATION IN NATIONAL IRANIAN SOUTH OIL COMPANY USING EMISSION FACTOR", *Journal of Air pollution and Health*, 35-42.
- [21] Munir, S.S.D., W. Nimmo, A.M. Cunliffe, B.M. Gibbs, *Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres*. Bioresource Technology 2009. **100**: p. 1413-1418.
- [22] M.V. Gil, D.C., C. Pevida, J.J. Pis, F. Rubiera, *Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion*. Bioresource Technology, 2010. **101**: p. 5601–5608.
- [23] Paolo Ghetti, L.R., Luciana Angelini, Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. *Fuel*, 1996. 75: p. 565-573.
- [24] Prabir Basu, J.B. Mathias, A. Leon. 2011. "Biomass co-firing options on the emission reduction and electricity generation costs in coal-fired power plants". *Renewable Energy*, 36:p.282- 288.
- [25] Roberto García, C.P. Antonio, G. Lavín, Julio L. Bueno. 2014. "Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data", *Fuel*, 117: p. 1139–1147.
- [26] Rosendahl, L. Biomass combustion science, technology and engineering, ed. W.P.S.i. Energy. Vol.1. 2013, 80 High Street, Sawston, Cambridge CB22 3HJ, UK: Woodhead Publishing 315.
- [27] Sarah Hughes, biomass combustion science, technology and engineering 2013, Woodhead Publishing Limited, Sawston, Cambridge CB22 3HJ, UK: oxford, cambridge, Philadelphia, New Delhi. 315.
- [28] Aidura, E.A.A., A. Demirbas, M.S. Hossain, S. Mekhilef, A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011. 15(13): p. 2262–2269.
- [29] Seyed Ehsan Hosseini, Mazlan Abdul Wahid. 2013. "Ghobad Bagheri A review on green energy potentials in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27: p. 533-545.
- [30] Sjaak van Loo. 2008. "The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing", 1 ed, London: FiSH Books, Enfield.
- [31] Vamvuka, D. Alevizos, E. Repouskou, D. Pentari. 2009. "Ash effects during combustion of lignite/biomass blends in fluidized bed", *Renewable Energy*, 34: p. 2662–2671.
- [32] Vamvuka, D. E.K. 2011. "Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends", *Fuel Processing Technology*, 92 p. 570-581.
- [33] Williams, M.P. J.M. Jones. 2001. "Combustion of pulverised coal and biomass", *Progress in Energy and Combustion Science*, 27: p. 587-610.
- [34] Yahya Hamzeh, Babak Mirzaei, Ali Abdulkhani, Masoumeh Molaei. 2011. "Current and potential capabilities of biomass for green energy in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: p. 4934-4938.
- [35] Zhi-Ao Sun, S.J. Ming-Yao Zhang, Ren-Ping Liu, Yong Zhang. 2008. "Experimental study on cotton stalk combustion in a circulating fluidized bed", *Applied Energy*, 85: p. 1027–1040.
- [36] Zhao Xin-Gang, F.T.-T. Ma Yu, Yang Yi-Sheng, Pan Xue-Fu. 2015. "Analysis on investment strategies in China: the case of biomass direct combustion power generation sector". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42: p. 760 - 772.