

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

معصومه امیری^۱، آرش نجفی^۲

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۵/۱/۲۱

تاریخ دریافت مقاله:

۹۴/۸/۱۶

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 موقبیت 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 انتراقی آن را هم‌تاز سوخت‌های فسیلی کنند. به عنوان مثال، با پردازش سوخت‌های زیست‌توده به شکل پلت، چگالی‌توده‌ای آن به ۴۵۰-۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ارزش حرارتی آن حدود ۱۰۰۸۰-۶۴۸۰ مگاژول بر مترمکعب می‌رسد که تقریباً مشابه زغال‌سنگ است. در این مقاله با بررسی کارمحققان به معرفی روش‌های تعیین کیفیت سوخت زیست‌توده از جمله آنالیزهای دستگاهی توزیع 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 دی‌اکسید‌گوگرد 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 روپرت‌و‌گارسیا(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 روستاهای) 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:

بحran 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 آلوگی بالا شناخته شده است [۳]. علاوه بر آن، ذخایر سوختهای فسیلی محدود می‌باشد، عمر ذخایر زغال‌سنگ 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 گازطیعی 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، زیست‌توده 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 زیست‌توده در تولید برق استفاده می‌کنند که آمریکا با بیشترین سهم ۲۶ درصد و آلمان ۱۵ درصد و برباد و ژاپن ۷ درصد است [۲۹،۱]. در بین فرایندهای تبدیل زیست‌توده که شامل احتراق مستقیم، پیرولیزوگازی‌سازی است، احتراق مستقیم ساده‌تر و سابقه طولانی‌تر دارد [۱۴،۱۷،۳۰]. در این مطالعه برای تعیین کیفیت سوخت زیست‌توده جامد با بررسی مقالات بسیاری از محققان از جمله Jenkins و همکارانش (۱۹۹۸) [۲۱]، 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) [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 و TG 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 زیست‌توده 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 نیروگاه‌ها کمتر است) [۱].

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

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

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

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 ۱۹۶ 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].

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

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

منابع زیست‌توده

تعريف اتحاديه اروپا از زیست توده که در راهنمای ۷۷/۱/۲۰۰۱ EC/۲۰۰۱ 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 وایسته و همچنین زائدات صنعتی و شهری قابل تجزیه ". بر اساس تعريف علمی ارائه شده برای

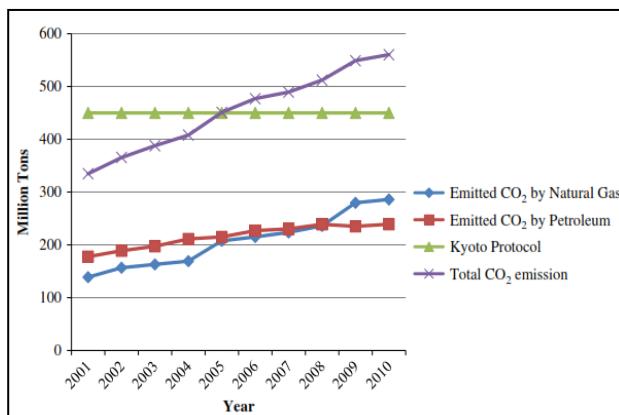
زیست توده در این آیین نامه، زیست توده به سوخت‌هایی اطلاق می‌گردد که از جرم توده فیتوپلانکتون‌ها و جرم توده زئوپلانکتون‌ها ساخته می‌شوند [۱۴، ۱۷، ۳۵، ۳۰]. اما فقط تعداد اندکی از آنها برای استفاده در نیروگاه‌های برق و حرارت مناسب‌اند و زیست‌توده‌هایی که از زائدات جنگلی و کشاورزی حاصل می‌شوند، متداول‌ترند. برخی منابع دیگر زیست‌توده مانند جلبک‌دریایی، خزه 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 آبزی (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 اختراقی مناسب‌اند [۱۸، ۹].

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 زائدات کشاورزی هستند. گرچه نیروگاه‌های زباله‌سوز در برخی نقاط کشور احداث شده و مطالعات گسترشده‌ای در این زمینه صورت گرفته، اما در زمینه استفاده از زائدات کشاورزی که بخش وسیعی از منابع زیست‌توده را در کشور ایران تشکیل می‌دهند، مطالعات گسترشده‌ای انجام نشده است در صورتی که می‌توان از این سوخت برای تولید برق در نیروگاه‌های محلی در روستاهای 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 حمل و نقل و صنعت به علت قیمت پایین در ایران توسعه یافته است. در نتیجه، افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای بخصوص دی‌اکسید کربن تولید شده در طول دهه گذشته در ایران روند رو به بالا داشته است. شکل (۱) روند تولید دی‌اکسید کربن 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 دی‌اکسید کربن 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 [۲۹، ۲۰].

[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 عده 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 خوارکدام و استفاده از آنها در ساخت کمپوست و در نتیجه، انتخاب زیست‌توده‌ای مناسب با توجه به مطالب ذکر شده پرداختیم [۳۴، ۲۹].

احتراق توأم

احتراق توأم به روش مخلوط کردن زیست‌توده با یک سوخت‌فسلیلی یا یک زیست‌توده دیگر اطلاق می‌شود. زغال‌سنگ سوخت‌فسلیلی 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 زغال‌سنگ 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 زغال‌سنگ در بسیاری از کشورهای اروپایی و امریکایی است. بسیاری از کشورهای جهان جهت تأمین سوخت نیروگاه‌ها و واحدهای صنعتی از احتراق توأم زیست‌توده با زغال‌سنگ استفاده می‌کنند که علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، در مصرف سوخت‌های فسلیلی صرفه‌جویی می‌کنند [۱۷]. جدول (۳) نمونه‌ای از کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در نتیجه استفاده از احتراق توأم زغال‌سنگ با چوب را نشان می‌دهد.

جدول ۳) مقایسه انتشار آلاینده‌های حاصل از نیروگاه برق با سوخت زغالسنگ، در همان شرایط احتراق تواأم سوخت ۱۰ درصد زیستتوده با زغالسنگ [۹].

نشر آلاینده‌ها سیستم مرجع (۱۰۰٪ زغالسنگ سخت) سیستم ۱ (۹۰٪ زغالسنگ؛ ۱۰٪ کاه) سیستم ۲ (۹۰٪ زغالسنگ با ۱۰٪ خضایعات چوب)				
۲۰/۵	۷۲/۳	۸۴۷/۹	دی اکسید کربن	
۴۲/۹	۴۴/۶	۴۴/۵	دی نیتروزن اکسید	
۴۱/۸	۵۹/۷	۴۲۴۷	متان	
۳۷/۲	۱۵۰/۵	۸۰۶/۸	دی اکسید گوگرد	
۳۰۰/۸	۴۷۲/۴	۸۸۶/۶	اکسیدهای نیتروزن	
۵	۲۰۱/۷	۶۱/۳	اسید کلریدریک	

واحد انتشار آلاینده‌ها برای دی اکسید 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 می‌باید [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 پوشش‌گیاهی 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 زیستتوده 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 ۴۰۰۰۰ به ۴۰۰۰ و چرخه انتشار دی اکسیدکربن از ۰/۸۱ به ۰/۱۸ - ۰/۱۱ کاهش یافت که یک کاهش ۷۸ - ۸۷ درصدی است [۲۶].

احتراق توأم زیستتوده چوب در فنلاند

واحد صنعتی CHP, Alholmens Kraft در فنلاند نمونه منحصر بفردی از امکان تولید انرژی مبنی بر بیوفیول در سال ۲۰۰۱ احداث شده است. این نیروگاه بخارآب مورد نیاز برای کارخانه کاغذسازی UPMKymmenе مجاورش را تأمین می‌کند. 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 سیستم‌های خلاقالنه جمع‌آوری و دسته‌بندی، پسماندهای باقیمانده در جنگل‌ها سوخت مورد نیاز این نیروگاه را تأمین می‌کنند. در کل، سوخت مصرفی آن شامل چوب‌های صنعتی و پوست آن‌ها ۳۵ درصد پسماندهای جنگلی ۱۰ درصد، زغال‌سنگ نارس ۴۵ درصد، نفت‌سنگین و زغال‌سنگ ۱۰ درصد است و در موقع اضطراری که نیاز به سوخت جایگزین دارند (کم بودن زائدات جنگلی و ...) از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند [۱۰].

مشخصات سوخت جامد

محققان جهت تعیین کیفیت سوخت، مشخصات فیزیکی، شیمیایی آن را با استفاده از تحلیل‌های ساختاری [۱۹]، کلی، عنصری، خاکستر، پتروگرافی، کانی‌شناسی برای تعیین خصوصیات سوخت‌های جامد استفاده می‌کنند [۲۸]. در واقع، خواص سوخت اغلب برای انتخاب فناوری‌های احتراق است که بسته به این خواص، یک سوخت زیستتوده می‌تواند 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 زیستتوده است [۲]. پس از آن، تحلیل خاکستر جهت تعیین امکان بهره‌برداری از خاکستر و پیش‌بینی ایجاد مشکلات فنی در سیستم‌های احتراقی همانند خوردگی، رسوب خاکستر، انباشتگی و رفع این مشکلات، تحلیل توزین حرارتی برای بررسی رفتار احتراقی زیستتوده به کار می‌رود. تعیین ویژگی‌های فیزیکی همانند ارزش حرارتی، چگالی توده‌ای نیز از دیگر تحلیل‌های مهم سوخت زیستتوده هستند.

مشخصات فیزیکی

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

کنترل فرایند و خوراک دهی، 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 [۳۰، ۱۷]. سه روش متداول جهت متراکم‌سازی شامل متعادل‌سازی (Bituminous)، بریکت‌سازی و پلت کردن است که باعث افزایش هزینه، انرژی مصرفی و پیچیدگی تجهیزات می‌شوند. جدول (۴) تفاوت چگالی‌توده‌ای 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 پلت کردن، 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	۴۵ – ۶۵	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 خطای کمتری دارند. در این مقاله از رابطه (۱) استفاده شده که توسط Roberto García و همکارانش در سال ۲۰۱۴ ارائه شده است [۲۵]:

$$\text{HHV} = 1/0.8 \times 10^4 - 98/44 A + 113/28 FC - 165/28 M + 127/72 C 19/56 + O \quad (1)$$

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

تجهیزات مورد استفاده در نیروگاه‌های زیست‌توده

بازدهی احتراق و قابلیت بکار گیری انرژی وابسته به نوع زیست‌توده، روش‌های احتراقی و مقیاس کاربرد است. سه روش احتراقی زیست‌توده در واحدهای حرارتی و تولید برق به کار می‌رود که در واقع، همان روش‌های احتراق زغال‌سنگ هستند [۳۰، ۲]:

۱. دیگ بخار استوکر (Grate Firing)

در این روش، زیست‌توده 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، ویبره و ...) وارد محفظه احتراق می‌شود و در این سیستم‌ها از هوای ثانویه جهت احتراق بهتر استفاده می‌کنند. این روش مناسب سوخت‌های با اندازه ناهمگون و زمخت است. دیگ‌های بخار استوکر متداول‌ترین فناوری هستند که برای احتراق زیست‌توده استفاده می‌شوند و انعطاف‌پذیری بالایی در انتخاب سوخت و پیکربندی نسبتاً ساده‌ای دارد [۳۰، ۲].

۲. دیگ بخار باسترسیالی شده (Fluidized Bed)

سیستم‌های احتراقی باسترسیالی شده 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 بسترهاي سیالی شده حبابی و بسترهاي سیالی شده سیار (Circulating Fluidized Bed) از رایج‌ترین و مهم‌ترین انواع بسترهاي سیالی شده‌اند. یک دیگ بخار با بستر سیالی شده شامل یک ظرف استوانه‌ای با بستر سوراخ شده با یک صفحه پر شده با مواد گرانولی، خنثی و داغ (همانند سلیس، شن، ماسه...) 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 باسترسیالی شده یک روش احتراقی جدیدتر است که نسبت به دیگ‌های بخار استوکر کارایی بالاتر، پیکربندی نسبتاً پیچیده و آلینده 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 هم زمان 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 بالای 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، پریکت...) 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 از 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 نیروگاه‌های کوچک با سوخت زیست‌توده در مناطقی از کشور (همانند روسیه) 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 IRIS 209 FI NETZSCH استفاده شده نمونه‌ها از دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد با گام حرارتی ۱۰ درجه کلوین 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 توزیع حرارتی و همچنین بالاترین ارزش حرارتی (ارزش حرارتی ناخالص) در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵) تحلیل عنصری و کلی و ارزش حرارتی ساقه‌پنبه

بالاترین ارزش حرارتی (Kj/Kg)	تحلیل کلی (درصد وزنی)				تحلیل عنصری (درصد وزنی)					زیست‌توده
	رطوبت	مواد فرار	خاکستر	کربن تشییت شده	O ₂ **	S	N	H	C	
۱۹۴۹۴	۴/۸۸۹	۶۰/۷۵۷	۳/۸۵۲	۳۰/۵۰۱	۵۱/۵۷	*	۰/۳۱	۵/۶۹	۴۲/۴۳	ساقه پنبه

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

شبیه‌سازی نرم‌افزاری فرایند احتراق

شبیه‌سازی محفظه احتراقی بویلر با استفاده از نرم‌افزار آنلاین شرکت فایرکد انجام شده است که در آن شبیه‌سازی بویلرهای با استفاده از مشخصات سوخت ورودی و بویلر مورد نظر صورت می‌گیرد. نرم‌افزار فایرکد توسط تولیدکنندگان بویلرهای بخارآب 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 هستندو با استفاده از نرم افزار 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 اتفاقات 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	نتایج حاصل از نرم افزار فایر کد
ساقه پنبه	بازده (%)	اتلاف حرارتی کلی (%)	بازده (%)
۸۸/۴۲۹	۱۹/۰۳۸	۸۴/۸۷۹	۲۲/۲۸۸

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 تعذیه هواست، بازده کلی این بویلر برای سوخت ساقه پنبه بالاتر و اتلاف حرارتی کلی آن که شامل اتفاقات 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 نرم افزار فایر کد 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 زیست‌توده	دی اکسید‌گوگرد	اکسیژن	نیتروژن	دی اکسید کربن	آب
ساقه پنبه	.	۵/۹۶۴	۶۸/۴۹۹	۱۲/۶۰۲	۱۲/۹۳۴

مقایسه ساقه پنبه

Zhi-AoSun و همکارانش (۲۰۰۸) در کشور سوئد به مطالعه آزمایشگاهی احتراق ساقه‌پنبه 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 زیست‌توده 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 زیست‌توده 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 درنتیجه بر رفتار احتراقی سوخت زیست‌توده تأثیر دارد. بنابراین، مطالعه مشخصات سوخت‌های زیست‌توده مشابه در منطقه دیگر الزاماً است.

نتیجه گیری

امروزه با توجه به بحث پایان‌پذیری 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 امکان‌پذیر است. پردازش مناسب سوخت به شکل پلت یکی از راه‌های مناسب استفاده از سوخت‌های زیست‌توده با ارزش حرارتی بالاست، اما به دلیل گران قیمت بودن شاید از لحاظ اقتصادی امکان‌پذیر نباشد. کوفایرینگ زیست‌توده با زغال سنگ یکی از عوامل مؤثر بر هزینه و اجرای آسان فناوری انرژی زیست‌توده است. در کشور ایران به دلیل وجود ذخایر زغال‌سنگ حرارتی در منطقه طبس، استفاده از این حامل انرژی در بخش نیروگاهی امکان‌پذیر می‌باشد. طرح احداث نیروگاه زغال‌سوز طبس در دستور کار وزارت نیرو قرار گرفته که سوخت مورد نیاز آن از معدن مزبور تأمین می‌گردد که می‌توان از احتراق توان 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 بافت‌چوبی 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 زیست‌توده به شکل محلی در نقاطی از کشور (همانند روستاهای) که امکان دسترسی سوخت زیست‌توده 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 زیست‌توده 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.
- [۲] A.A. Khana. W.d.J. P.J. Jansens. 2009. "Spliethoff Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies". Fuel Processing Technology, 90: p. 21-50.
- [۳] Annette Evans, V.S. Tim J. Evans. 2010."Sustainability considerations for electricity generation from biomass", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14: p. 1419 - 1427.
- [۴] 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.
- [۵] 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.
- [۶] Christersson, L. 2008."Poplar plantations for paper and energy in the south of Sweden". Biomass and Bioenergy, 32: p. 997 – 1000.
- [۷] Demirbas. A. 2010. "Use of algae as biofuel sources". Energy Conversion and Management. 51: p. 2738–2749.
- [۸] Despina Vamvuka. S.S. 2011."Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite", Thermochimica Acta, 526: p. 192- 199.
- [۹] 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.
- [۱۰]EUBIONET ,T.E.B.N.2012. "BIOMASS Co-FIRING- AN EFFICIENT WAY TO REDUCE GREENHOUSE GAS EMISSIONS".
- [۱۱]Helena H.L. Chum. R.P.Overend. 2001." Biomass and renewable fuels", Fuel Processing Technology, 71: p. 187–195.
- [۱۲]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.
- [۱۳]Jaani Silvennoinen. 2013."Co-firing of agricultural fuels in a full-scale fluidized bed boiler. Fuel Processing Technology", 105: p. 11-19.
- [۱۴] Jenkins B.M. T.R. Miles Jr.T.R. Miles. 1998. "Combustion properties of biomass", Fuel Processing Technology, 54 :p. 17–46.
- [۱۵]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.
- [۱۶]Ken Darrow. James Wang. Anne Hampson. 2014. "Catalog of CHP Technologies", U.S. Environmental Protection Agency: ICF International.
- [۱۷]] Khana. P.J. Jansens. H.Spliethoff. 2009. "Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies". Fuel Processing Technology, 90: p. 21-50
- [۱۸]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. Hossaina, S. Mekhilefc, A review on biomass as a fuel for boilers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. 15(13): p. 2262-2289-.
- [29] SeyedEhsan 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 ,rB.-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.