

## مقایسه ویژگی‌های پسماندهای غیرچوبی برای تولید انرژی

### چکیده

برای محاسبات طراحی یا شبیه‌سازی مبدل‌های حرارتی تولید انرژی از زیست‌توده، محاسبه ارزش حرارتی یکی از مهمترین خواص سوخت‌های زیست‌توده است. در هر فرآیند تبدیل انرژی از زیست‌توده به علت نیازهای انرژی تمامی فرآیندها از نظر کارایی و بازده، سوخت‌هایی با ارزش گرمایی خالص زیاد معمولاً مطلوب هستند. ۸ پسماند غیرچوبی سلولزی در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. ویژگی‌های مهم مورد نیاز این پسماندها برای ارزیابی شامل درصد رطوبت، خاکستر، مواد فرار، عناصر (کربن، هیدروژن، نیتروژن، گوگرد و اکسیژن)، ارزش گرمایی ناخالص و خالص بودند. ارزش گرمایی بر اساس دو روش محاسبه‌ای و اندازه‌گیری مستقیم (با بمب کالری‌متری) تعیین شد. نتایج نشان داد مقدار گوگرد پسماندها به عنوان یک عامل محدودکننده و آلاینده محیط زیست بیش از سایر گزارش‌ها می‌باشد. به دلیل مقدار زیاد خاکستر در پیت باگاس، توصیه می‌شود به صورت مخلوط با باگاس برای افزایش کارایی مبدل‌های حرارتی استفاده شود. استفاده از سیستم گازی‌سازی برای باگاس و نی به دلیل دارا بودن مواد فرار زیاد نسبت به سایر پسماندها ارجحیت دارد. بیشترین ارزش حرارتی به ترتیب برای ساقه ذرت و باگاس و کمترین ارزش حرارتی برای پیت باگاس و ساقه برنج تعیین شد. بین دو روش مورد استفاده برای تعیین ارزش حرارتی همبستگی خوبی وجود دارد که نشان دهنده استفاده از مدل محاسباتی مناسب است.

**واژگان کلیدی:** زیست‌توده، مقدار رطوبت، خاکستر، مواد فرار، کربن ثابت، ارزش حرارتی.

سعید مهدوی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، بخش تحقیقات علوم چوب و فرآورده‌های آن، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

مسئول مکاتبات:

[smahdavi@rifr-ac.ir](mailto:smahdavi@rifr-ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۵

### مقدمه

گیاهان به عنوان منابع ذخیره کربن هستند و دی اکسید کربن را از هوا جذب کرده و به صورت کربن ذخیره می‌نمایند. امروزه به دلیل نیاز به کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، توجه بازار جهانی به مصرف سوخت‌های پاک به ویژه زیست توده معطوف گردیده است [۱].

به کلیه موادی در طبیعت که در گذشته نزدیک جاندار بوده، از موجودات زنده به عمل آمده و یا زائدات،

ضایعات و یا فضولات آنها باشد، زیست توده گفته می‌شود. اساس زیست توده بر پایه عنصر کربن است که از مخلوط مولکول‌های آلی، شامل هیدروژن، معمولاً اکسیژن و اغلب نیتروژن و نیز مقدار کمی از سایر اتم‌ها مانند، فلزات قلیایی، فلزات قلیایی خاکی و فلزات سنگین تشکیل شده است.

استفاده از زیست توده به عنوان یک منبع انرژی نه تنها به دلایل اقتصادی بلکه به دلیل توسعه اقتصادی و

انواع زیست‌توده به دلیل تنوع زیستی<sup>۴</sup>، در خواص خود به طور قابل توجهی متفاوت هستند. لذا ارزیابی کیفیت زیست‌توده برای تصمیم‌گیری در مورد امکان‌پذیر بودن آن برای تبدیل، مناسب‌ترین نوع تبدیل و نیاز به پردازش بیشتر، ضروری است [۵]. فن‌آوری‌های استفاده از پسماندهای کشاورزی نسبت به چوب پیچیده‌تر بوده و هنوز به خوبی توسعه نیافته است. انتظار می‌رود که این نوع پسماندها حدود ۵ تا ۱۰ درصد مصرف انرژی جهان را تأمین کنند. تولید انرژی از زیست‌توده به عوامل مختلفی از جمله اندازه ذرات و جرم مخصوص، مقدار خاکستر، مقدار رطوبت، مقدار مواد استخراجی، مواد فرار، مقدار عناصر (کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن) و مقدار ترکیب‌های شیمیایی (سلولز، همی‌سلولزها و لیگنین) بستگی دارد [۶].

از آنجایی که اندازه زیست‌توده بسیار متفاوت است، برای استفاده از آن در دستگاه‌های گازی‌سازی با بستر ثابت<sup>۵</sup> به خصوص نوع سیال بستر<sup>۶</sup>، لازم است ابتدا ذرات کوچکی با کمک انواع آسیاب یا خردکن<sup>۷</sup> تهیه شود [۵]. انتخاب نوع آسیاب و یا خردکن، به مقدار رطوبت زیست‌توده بستگی دارد [۷]. و در این خصوص حداکثر رطوبت مجاز ۱۰ تا ۲۰ درصد است [۸]. به‌منظور یکسان‌سازی اندازه و دانسیته زیست‌توده، فشرده‌سازی آن به‌شکل حبه<sup>۸</sup> (با قطر ۵ تا ۱۰ میلی‌متر و طول ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر) یا قالبی<sup>۹</sup> (با قطر ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر) با کمک حرارت توسط پرس صورت می‌گیرد. بدین وسیله، هزینه‌های حمل و نقل و ذخیره‌سازی با افزایش دانسیته کاهش می‌یابند. ارزش حرارتی با افزایش دانسیته زیست‌توده به‌صورت خطی افزایش می‌یابد و برای فرآیندهای احتراق و گازی‌سازی افزایش دانسیته زیست‌توده تا حد ممکن مطلوب است [۹]. لیگنین یک چسب طبیعی است که با اعمال حرارت نرم شده و پس از بیرون آمدن ذرات از پرس و سرد شدن، ذرات را سخت کرده و شکل ثابتی به آنها می‌دهد [۵].

زیست‌محیطی نیز جذاب است و از طرفی آن را عامل تسریع در رسیدن به توسعه پایدار می‌دانند [۲].

در سال ۲۰۱۶ حدود ۷۸٪ انرژی مصرفی جهان از سوخت‌های فسیلی تأمین شده و فقط حدود ۱٪ مربوط به انرژی به‌دست آمده از زیست‌توده می‌باشد. این در حالی است که منبع ۵۰٪ از انرژی‌های تجدیدپذیر که حدود ۱۹٪ انرژی مصرفی جهان را تأمین کرده‌اند مربوط به زیست‌توده است [۳].

منابع زیست‌توده با فناوری‌های مختلف تولید انرژی، به صورت‌های مختلف انرژی مثل برق، حرارت و سوخت (به کمک سوخت‌های زیستی مایع<sup>۱</sup> و گازی) استفاده می‌شود. انتخاب و طراحی هر سیستمی که از زیست‌توده به عنوان سوخت استفاده می‌کند به ویژگی‌های زیست‌توده، محدودیت‌های زیست‌محیطی، هزینه تجهیزات و ظرفیت کارخانه بستگی دارد. کاهش آلودگی‌ها و افزایش بهره‌وری از جمله اهداف اصلی در تولید انرژی هستند. استفاده از زیست‌توده، تولید دی‌اکسید گوگرد ( $SO_2$ )، اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ ) و سایر آلاینده‌های هوا را نسبت به سوخت‌های فسیلی کاهش می‌دهد [۳].

در نیروگاه‌هایی که فقط از زیست‌توده استفاده می‌کنند، بازده تولید انرژی حدود ۲۰ درصد است. برای افزایش بازده، با کمک دستگاه‌های مبدل از طریق گرم کردن زیست‌توده جامد و تجزیه آن، گاز قابل اشتعال تولید می‌کند. تولید انرژی به این طریق نسبت به روش سوزاندن مستقیم زیست‌توده برتری دارد. برای تولید برق در سیکل ترکیبی، از توربین‌های گازی و بخارآبه صورت ترکیبی استفاده می‌شود که بازده این سیستم را می‌توان تا ۶۰ درصد افزایش داد. در سیستم‌های ماژول<sup>۳</sup>، بعضی از فناوری‌های مذکور در مقیاس کوچک‌تری که غالباً در دهکده‌ها، مزارع و صنایع کوچک قابل اجراست، به کار برده می‌شود. این سیستم‌ها اکنون در مرحله توسعه هستند و در مناطق دوردست، جایی که زیست‌توده به مقدار فراوان وجود دارد، نیروی برق و سوخت‌های فسیلی کم است، می‌توانند مفید باشند [۴].

<sup>4</sup> biological variation

<sup>5</sup> fixed bed gasifiers

<sup>6</sup> fluidized bed gasifiers

<sup>7</sup> chipper

<sup>8</sup> pellet

<sup>9</sup> briquettes.

<sup>1</sup> biofuel

<sup>2</sup> combined Heat and Power (CHP)

<sup>۳</sup> در سیستم‌هایی ماژول به وسیله ابزارهایی، ورودی (زیست‌توده) و خروجی

(انرژی گرمایی، گاز یا برق) کنترل و تنظیم می‌شود

متفاوتند. به همین دلیل است که چوب سوزنی‌برگان در مقایسه با پهن‌برگان ارزش حرارتی بیشتری دارند [۱۴]. زیاد بودن درصد خاکستر زیست توده به عنوان یک پارامتر منفی در تولید انرژی حرارتی مطرح است. برخلاف چوب، گیاهان غیرچوبی به دلیل استفاده از کودهای شیمیایی برای رشد بهتر گیاه، حاوی خاکستر و اتم‌های بیشتری به غیر از کربن و هیدروژن (هترواتم) به خصوص پتاسیم و کلر هستند. بعد از احتراق زیست توده در دمای زیاد، عناصر سیلیس، پتاسیم، کلسیم، گوگرد، کلر باقی‌مانده و از ۰/۲ تا ۲۰ درصد وزنی زیست توده را تشکیل می‌دهند. مقدار خاکستر چوب بدون پوست کمتر از ۱٪ است در حالی که در پسماندهای کشاورزی مثل ساقه برنج تا ۲۰٪ هم ممکن است برسد. مقدار پتاسیم بالا در این پسماندها، باعث کاهش دمای ذوب خاکستر تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد می‌شود. این موضوع موجب چسبیدن خاکستر ذوب شده و افزایش خطر مسدود شدن رآکتور می‌شود [۶].

چهار عنصر اصلی کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن در همه زیست‌توده‌ها وجود دارند. مقدار زیاد کربن در زیست توده به‌عنوان یک مزیت به دلیل ارزش حرارتی بیشتر در احتراق و گازی‌سازی مطرح می‌باشد. فرمول (۱) برای محاسبه درصد اکسیژن زیست‌توده با استفاده از ۴ عنصر دیگر پیشنهاد شده است [۱۵].

$$(1) \quad (\text{درصد کربن} + \text{درصد نیتروژن} + \text{درصد گوگرد} + \text{درصد هیدروژن} + \text{درصد خاکستر}) - 100 = \text{درصد اکسیژن}$$

یا محاسباتی<sup>۲</sup> که صرفاً برای زیست‌توده ارایه شده است طبق رابطه (۲) استفاده می‌شود [۱۵].

$$(2) \quad (\text{درصد خاکستر}) - 0/02 - (\text{درصد ازت}) - 0/02 - (\text{درصد اکسیژن}) - 0/1 - (\text{درصد گوگرد}) - 0/1 + (\text{درصد هیدروژن}) - 1/18 + (\text{درصد کربن}) - 0/35 = \text{HHV}$$

قیمت حبه‌های سوختی تهیه شده از پسماندهای کشاورزی مثل باگاس در سال ۲۰۱۸ میلادی به ازای هر تن حدود ۱۲۰ دلار بوده یعنی برای تولید هر گیگاژول انرژی حدود ۷/۵ دلار هزینه برده است [۱۰].

اتلاف انرژی لازم برای تبخیر آب موجود در زیست توده موجب کاهش ارزش حرارتی آن شده که براساس سن، منطقه و فصل رویش مقدار این رطوبت متغیر است. مقدار رطوبت زیست‌توده بر زنجیره تأمین و نیز هزینه‌هایی مثل حمل و نقل، ذخیره‌سازی، مقدار انرژی، روش تبدیل و کاربرد نهایی اثر قابل‌توجهی دارد. با کمک هواخشک کردن و یا کوره خشک‌کنی می‌توان رطوبت زیست توده را تا کمتر از ۲۰٪ کاهش داد [۱۱].

ترکیب شیمیایی زیست‌توده با توجه به گونه زراعی و زادگاه آن تفاوت‌های زیادی دارد [۱۲]. مقدار سلولز و همی‌سلولزها

قسمت‌های مختلف گیاه و در راستای طول و قطر آن متفاوت می‌باشد [۱۳]. در صورتی که مقدار و نوع لیگنین با توجه به ارتفاع یا قطر گیاه تغییر معنی‌داری ندارد. ۶۷٪ ساختار لیگنین را کربن تشکیل داده و ارزش حرارتی آن (۲۳ MJ/Kg) نسبت به سلولز و همی‌سلولز بیشتر است. مواد استخراجی شامل طیف وسیعی از مواد شیمیایی آلی هستند که در بین آنها رزین‌ها بیشترین ارزش حرارتی (۳۰ MJ/Kg) را دارا هستند و در قسمت‌های مختلف گیاه

برای محاسبه ارزش حرارتی ناخالص (HHV) با استفاده از ۵ عنصر و مقدار خاکستر، از روش غیرمستقیم

<sup>2</sup> estimated high heating value

<sup>1</sup> high heating value

چوب بین ۱۷ تا ۱۹ مگاژول بر کیلوگرم و برای پسماندهای کشاورزی بین ۱۵ تا ۱۷ مگاژول بر کیلوگرم گزارش شده است. مقدار تفاوت بین ارزش حرارتی محاسباتی و اندازه‌گیری شده تا ۱۰٪ گزارش شده است. ارتباط بین مقدار لیگنین و ارزش حرارتی زیست توده را می‌توان به صورت زیر بیان نمود. لازم به یادآوری است که این محاسبه برای زیست‌توده عاری از مواد استخراجی و خاکستر است [۱۶].

$$\text{HHV} = 16/8218 + 0/0889 \text{ (درصد لیگنین)} \quad (۴)$$

پیش‌تیمار زیست‌توده شامل کلیه عملیات مکانیکی و یا شیمیایی مثل غربال، شستشو، استخراج با حلال یا واکنش با اسید تأثیر به‌سزایی بر بازده و کیفیت تولید انرژی دارند [۱۷].

هدف از این بررسی، تعیین و مقایسه عوامل مؤثر در تولید انرژی از ۸ پسماند غیرچوبی و مقایسه دو روش تعیین ارزش حرارتی برای به کارگیری در مبدل‌های حرارتی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### مواد

۸ پسماند غیرچوبی شامل: ساقه پنبه، ساقه ذرت، مخلوط ساقه و برگ ذرت، ساقه برنج، کاه گندم، نی، باکاس و پیت آن از نقاط مختلف کشور تهیه و جمع‌آوری شدند. پس از اندازه‌گیری رطوبت اولیه، ابتدا عملیات خردکردن نمونه‌ها توسط یک خردکن از نوع پالمن<sup>۴</sup> و سپس تراشه‌کردن آنها توسط یک دستگاه تراشه‌ساز از نوع پالمن<sup>۵</sup> انجام شد. تراشه‌های تهیه‌شده توسط یک آسیاب چکشی آزمایشگاهی<sup>۶</sup> به آرد تبدیل شدند و سپس ذرات عبور یافته از الک ۴۰ مش و باقیمانده روی الک مش ۶۰ (مش ۴۰/۶۰) به‌عنوان نمونه‌های آزمونی<sup>۷</sup> تهیه شدند. برای کاهش رطوبت، نمونه‌های آزمونی در دمای محیط قرار گرفته تا هواخشک شده و به رطوبت تعادل با محیط برسند و سپس رطوبت نهایی اندازه‌گیری شد.

Stahl و همکاران (۲۰۰۴) رابطه ارزش حرارتی با خاکستر را به صورت زیر گزارش نموده‌اند [۶].

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 20/49 - \text{مقدار خاکستر} \quad (۳)$$

با دانستن مقدار رطوبت پسماند سلولزی می‌توان با استفاده از فرمول (۴)، مقدار ارزش حرارتی خالص (HHV) را محاسبه کرد.

$$\text{LHV} = \text{HHV} (1 - M) - 2/44VM \quad (۴)$$

باقیمانده جامد قابل سوختن یک ماده پس از خارج شدن مواد فرار آن کربن ثابت نامیده می‌شود. این ویژگی با کسر مجموع درصد‌های رطوبت، مواد فرار و خاکستر از صد طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۶].

$$\text{(درصد رطوبت + درصد خاکستر + درصد مواد فرار)} - 100 = \text{کربن ثابت}$$

مواد فرار شامل گازهای CO، CO<sub>2</sub> و CH<sub>4</sub> هستند که با اندازه‌گیری میزان افت جرم زیست توده (به جز رطوبت) در اثر تخریب حرارتی، می‌توان مقدار آنها را اندازه‌گیری نمود. گازهای آزادشده حاصل از این تخریب شامل CO، CO<sub>2</sub> و NO<sub>x</sub> و غیره هستند. هر چه نسبت کربن به هیدروژن (C/H) کمتر باشد (در چوب بین ۷۰ تا ۹۰ درصد) مقدار مواد فرار در زیست توده بیشتر است. گونه‌هایی که دارای مواد فرار بالا هستند در فرایند گازی‌سازی مطلوب‌تر می‌باشند. میانگین مقدار مواد فرار در چوب نسبت به پسماندهای کشاورزی حدود ۸٪ بیشتر است [۶]. با آزاد شدن انرژی حرارتی، عناصر کربن، هیدروژن، اکسیژن به صورت CO<sub>2</sub> و آب از زیست توده آزاد می‌شوند. مقدار انرژی آزادشده به نسبت وزنی این عناصر و رطوبت زیست توده بستگی دارد و بخشی از آن صرف تبدیل آب موجود در زیست توده به بخار آب می‌شود. ارزش حرارتی بیشتر یا ناخالص عبارت است از مقدار انرژی که توسط زیست توده بدون رطوبت تولید می‌شود و ارزش حرارتی خالص<sup>۳</sup> عبارت است از مقدار انرژی حرارتی تولیدشده توسط زیست‌توده مرطوب. تفاوت در این دو ارزش، گرمای نهان آب در محصول است. مقدار ارزش حرارتی ناخالص برای

<sup>۴</sup> Pallmann chipper

<sup>۵</sup> Pallmann flaker

<sup>۶</sup> Laboratory hammer mill

<sup>۷</sup> Test piece

<sup>۱</sup> Fixed carbon

<sup>۲</sup> Gasification

<sup>۳</sup> Low heating value (LHV)

## روش‌ها

برای اندازه‌گیری پارامترهای مؤثر پسماندها در تولید انرژی حرارتی، از روش‌های آزمون زیر با ۳ تکرار استفاده شد.

- اندازه‌گیری رطوبت: طبق استاندارد ASTM E871-82 (۲۰۰۶) و توزین نمونه قبل و بعد از قرار گرفتن در آن تعیین شد.

- اندازه‌گیری خاکستر: طبق استاندارد ASTM E1755-01 (۲۰۰۷) نمونه در کوره الکتریکی با دمای  $580 \pm 20$  درجه سلسیوس قرار گرفته و با روش وزن‌سنجی قبل و بعد از خاکستر شدن محاسبه شد.

- اندازه‌گیری مواد فرار<sup>۱</sup>: طبق استاندارد ASTM E872-82 (۲۰۱۳) نمونه در کوره الکتریکی با دمای  $950 \pm 20$  درجه سلسیوس قرار گرفته و مقدار کاهش نسبی وزن نمونه به عنوان مواد فرار گزارش شد.

- اندازه‌گیری عناصر شامل کربن، هیدروژن و نیتروژن: طبق استاندارد ASTM D-5291 (۲۰۰۷) نمونه‌ها در دستگاه CHN مدل ECS4010 ساخت کشور ایتالیا قرار گرفت و تجزیه ماده سلولزی برای تعیین ۳ عنصر انجام شد.

- اندازه‌گیری گوگرد: طبق روش دوم استاندارد ASTM E775-15 (۲۰۱۵) پس از شستشوی دستگاه بمب کالری‌متری مدل PARR 1261 و سپس تیتراسیون مایع شستشو اندازه‌گیری شد.

- اندازه‌گیری اکسیژن: طبق فرمول (۱) ارایه شده توسط Boundy و همکاران (۲۰۱۱) محاسبه شد [۱۵].

- اندازه‌گیری ارزش حرارتی ناخالص: طبق استاندارد ASTM-E711-87 (۲۰۰۴)، توسط بمب کالری-متری مدل PARR 1261 نمونه‌ها سوزانده شد و براساس کالری آزاد شده از هر نمونه، ارزش حرارتی اندازه‌گیری شد.

به‌منظور تجزیه و تحلیل آماری ویژگی‌های مورد بررسی، از آزمون تجزیه واریانس استفاده شد که در صورت معنی‌دار بودن اختلاف بین میانگین‌ها، گروه‌بندی میانگین‌ها با روش آزمون دانکن انجام شد. برای تعیین اختلاف داده‌ها و نیز میزان همبستگی بین دو روش مورد استفاده

برای ارزش حرارتی پسماندها به ترتیب از آزمون t و رگرسیون استفاده شد.

## نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی استفاده بالقوه از زائدات سلولزی به عنوان منابع تجدیدپذیر که مقادیر قابل‌توجهی از آنها سالانه بدون استفاده دفن یا سوزانده می‌شود، بررسی ویژگی‌های مؤثر آنها برای تولید انرژی ضروری است. طراحی، بهره‌برداری و کارایی مبدل‌های حرارتی و تبدیل شیمیایی، بستگی به ویژگی‌های اساسی شامل رطوبت، خاکستر، عناصر متشکله، اندازه ذرات و تخلخل، مواد فرار، کربن ثابت و ارزش حرارتی دارد که در این مطالعه برای ۱۰ پسماند غیرچوبی مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که بین میانگین همه ویژگی‌های مورد بررسی برای ۸ پسماند غیرچوبی، اختلاف معنی‌دار آماری (در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪) وجود دارد.

### رطوبت و اندازه ذرات

رطوبت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل، به طور مستقیم مقدار کلی انرژی قابل استحصال سوخت را کاهش می‌دهد و بنابراین بازده تولید انرژی نیز کاهش می‌یابد [۱۸]. مقدار رطوبت پسماند در مناطق مختلف و مدت زمان پس از برداشت محصول، متفاوت است. نتایج مربوط به اندازه‌گیری رطوبت اولیه و رطوبت پس از هواخشک کردن پسماندهای غیرچوبی در جدول ۱ آورده شده است.

<sup>1</sup> Volatile components

جدول ۱- محل نمونه برداری و درصد رطوبت پسماندهای غیرچوبی

نوع پسماند	محل نمونه برداری	رطوبت اولیه (%)	رطوبت هواخشک (%)
کاه گندم ( <i>Wheat straw</i> )	گرگان	۱۴/۲۰	۶/۱۱
نی ( <i>Phragmites australis</i> )	گرگان	۵۰/۴۲	۵/۳۷
باگاس ( <i>Saccharum officinarum</i> )	نئوپان شوستر	۲۵	۶/۳۰
پیت باگاس ( <i>Saccharum officinarum-Pith</i> )	نئوپان شوستر	۲۵/۵	۶/۴۰
ساقه برنج ( <i>Oryza sativa</i> )	گرگان	۱۵/۰۲	۶/۶۸
ساقه پنبه ( <i>Gossypium sp.</i> )	گرگان	۲۵/۵۵	۶/۱۳
ساقه ذرت ( <i>Zea maize</i> )	کرج	۲۴/۵۸	۶/۶۵
برگ و ساقه ذرت ( <i>Zea maize-Leaf &amp; Stalk</i> )	کرج	۲۵/۸۴	۶/۰۴

باشند. انحراف از معیار مربوط به ۵ تکرار اندازه‌گیری خاکستر، به شکل نوار خطا بر روی هر ستون مشخص شده است. در مقایسه انجام شده بین خاکستر نمونه‌ها، درصد خاکستر پیت باگاس و ساقه برنج زیاد می‌باشد و برعکس برای باگاس و ساقه ذرت درصد خاکستر کمترین مقدار است. Llorente Fernandez و همکاران (۲۰۰۶) تأثیر منفی خاکستر به جای مانده از پسماندها پس از سوختن را برای تولید انرژی به دلیل تجمع در سطوح انتقال حرارت دیگ بخار، مشکلات تمیز کردن و حتی از کار افتادن قسمت‌های مکانیکی مبدل‌های حرارتی بسیار با اهمیت می‌دانند [۲۰]. آگاهی از درصد خاکستر زیست-توده این امکان را می‌دهد که واکنش‌های خاکستر در سیستم چند سوختی<sup>۳</sup> قابل پیش‌بینی شود، زیرا سوزاندن زیست‌توده معمولاً به صورت تلفیقی با سایر سوخت‌ها پیشنهاد می‌شود. کیفیت خاک، کوددهی و شرایط آب و هوایی بر مقادیر کلسیم، پتاسیم، سدیم، کلر و فسفر خاکستر پسماندهای کشاورزی تأثیر قابل توجهی دارند. خاکستر کاه غلات دارای پتاسیم و کلر نسبتاً زیاد بوده، ساقه برنج (بیش از ۱۰٪) و باگاس نیز دارای سیلیس خیلی زیاد هستند. پتاسیم و سیلیس در پسماندهای کشاورزی در دمای بین ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس موجب ایجاد لایه‌ای سخت در بستر دیگ خواهد شد که از یک طرف باعث کاهش ظرفیت انتقال حرارت و از یک طرف موجب خوردگی قطعات فلزی خواهد شد [۲۱].

براساس گروه‌بندی انجام شده توسط Toscano و Corinaldesi (۲۰۱۰) پسماندهای نی، باگاس، ساقه پنبه،

همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، دامنه رطوبت اولیه در پسماندهای مورد بررسی حدوداً بین ۱۴ تا ۵۰ درصد است. میزان رطوبت اولیه در برخی از پسماندها مثل نی به دلیل تازگی بالاست، اما پس از هواخشک شدن طی مدت زمان دو هفته، تا حد نسبتاً زیادی کاهش می‌یابد. بدیهی است که به منظور افزایش بازده تولید انرژی، رطوبت و قابلیت نگهداری این پسماندها با استفاده از روش‌های مختلفی مثل هواخشک کردن و سپس فشرده‌سازی و عدلبندی بهبود خواهد یافت. افزایش رطوبت پسماند موجب اختلاف بیشتر بین ارزش حرارتی خالص و ناخالص می‌شود [۸]. دانسیته حجمی کم در پسماندهای کشاورزی یکی از مشکلات مهم برای عملیات حمل و ذخیره می‌باشد که با افزایش دانسیته حجمی آنها تا ۱/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب با روش فشرده‌سازی، می‌توان بر این مشکل غلبه کرد. تبدیل ذرات پسماند به شکل حبه<sup>۱</sup> یا بریکت<sup>۲</sup> نیز می‌تواند کارایی مبدل‌های حرارتی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد [۱۹].

### خاکستر

شکل ۱ میانگین خاکستر ۸ نمونه مورد بررسی را پس از قرار گرفتن در دمای ۵۸۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، به‌ترتیب پیت باگاس (گروه a) و ساقه برنج (گروه b)، دارای خاکستر قابل توجهی نسبت به سایر پسماندها می-

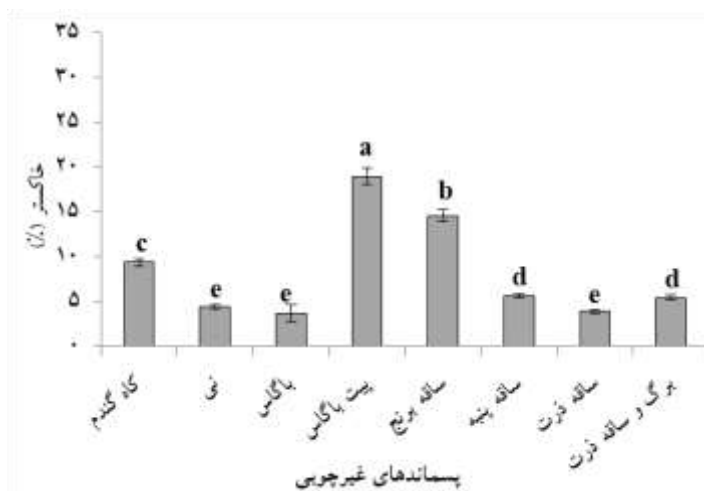
<sup>۱</sup> Pellet

<sup>۲</sup> Briquette

<sup>۳</sup> Multi fuel

پیت باگاس و ساقه برنج در گروه آخر ( $A_{10}$ ) قرار می-گیرند [۲۲].

ساقه ذرت و برگ و ساقه ذرت در گروه دوم ( $A_6$ ) یعنی مقدار خاکستر بین ۳ تا ۶ درصد قرار گرفته و کاه گندم در گروه سوم ( $A_{10}$ ) یعنی مقدار خاکستر بین ۶ تا ۱۰ درصد،

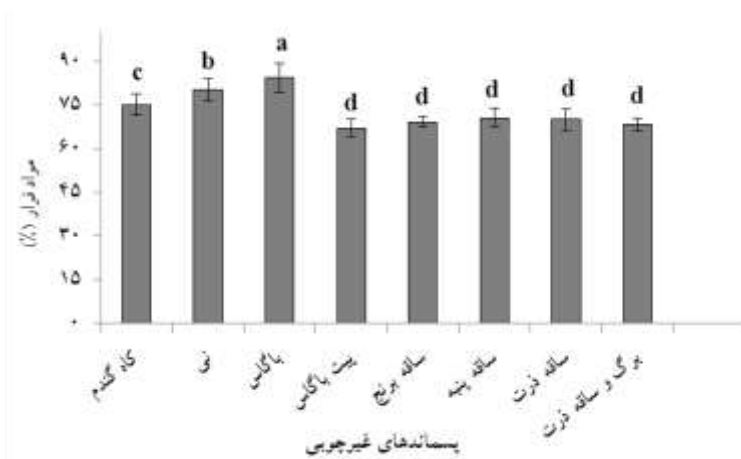


شکل ۱- مقایسه میانگین خاکستر پسماندهای غیرچوبی و گروه بندی آماری

فرار حاصل از ۵ تکرار در باگاس دارای بیشترین مقدار (گروه a) و نی در رتبه بعدی (گروه b) قرار دارد.

#### مواد فرار و کربن ثابت

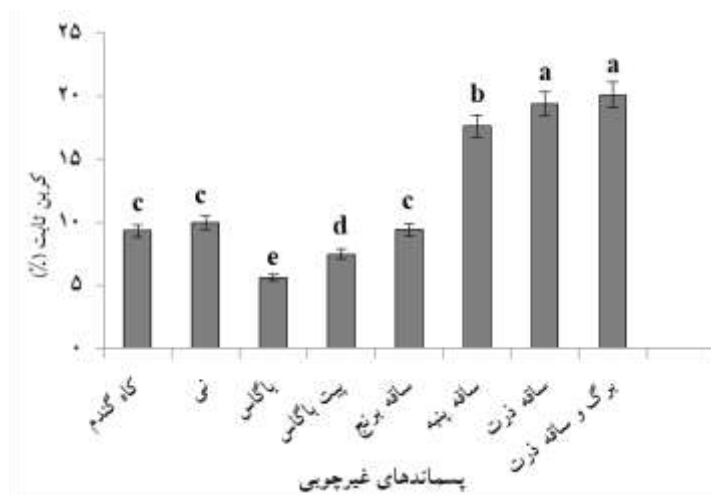
مقایسه میانگین مواد فرار پسماندها و گروه بندی آماری آنها در شکل ۲ قابل مشاهده است. میانگین مواد



شکل ۲- مقایسه میانگین مواد فرار پسماندهای غیرچوبی و گروه بندی آماری

خاکستر و مواد فرار پسماندها محاسبه شد. شکل ۳ مقایسه آماری مقدار این ویژگی را برای ۸ پسماند غیرچوبی نشان می-دهد.

برای تعیین مقدار کربن ثابت ۸ پسماند غیرچوبی با استفاده از مقدار رطوبت، خاکستر و مواد فرار از فرمول (۵) استفاده شد. مقدار کربن ثابت با استفاده از مقدار رطوبت،



شکل ۳- مقایسه میانگین کربن ثابت پسماندهای غیرچوبی و گروه‌بندی آماری

ساقه برنج [۲۴] و ذرت و نی [۲۳] می‌باشد. همچنین مقدار مواد فرار اندازه‌گیری شده باگاس نیز با سایر سوابق هماهنگی دارد، اما مقدار کربن ثابت به دست آمده نسبت به همین گزارش ۶ درصد بیشتر است [۳].

### عناصر

تجزیه و تحلیل آماری نتایج اندازه‌گیری عناصر نشان داد که بین میانگین ۵ عنصر مربوط به ۸ پسماند غیرچوبی اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد وجود دارد. میانگین این عناصر در جدول ۲ آورده شده است. ارزش حرارتی ناخالص محاسباتی با استفاده از میانگین درصد عناصر تعیین شده در جدول ۲ طبق رابطه ۱ محاسبه شد. سپس ارزش حرارتی خالص محاسباتی نیز با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

مقدار انرژی حاصل از سوخت‌های جامد به مقدار مواد فرار و کربن ثابت آنها بستگی دارد. مقدار کربن ثابت شامل باقیمانده پسماند سوزانده شده (به جز خاکستر و رطوبت) در دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس در غیاب هوا به مدت چند دقیقه می‌باشد. پسماندهای ذرت و پنبه دارای درصد کربن ثابت بیشتری هستند، یعنی آنها در طی فرآیند گازی‌سازی و سوختن ذغال بیشتری تولید می‌کنند. نسبت کربن ثابت به مواد فرار در پسماندها می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای پسماندهایی که سوزانده شده و سپس فرآیند گازی‌سازی یا اکسید شدن را سپری می‌کنند، مطرح باشد [۲۳]. بر این اساس، مخلوط ساقه و برگ ذرت، ساقه ذرت و ساقه پنبه به ترتیب بیشترین شاخص را دارا هستند، درحالی که باگاس دارای کمترین شاخص نسبت به بقیه پسماندها بوده و برای فرآیند گازی‌سازی مناسب‌تر است. مقایسه نتایج با سایرین، نشان‌دهنده مشابهت برای کاه گندم و

جدول ۲- میانگین درصد عناصر ۸ پسماند غیرچوبی

عناصر پسماند	کربن (%)	هیدروژن (%)	نیتروژن (%)	اکسیژن (%)	گوگرد (%)
کاه گندم	۴۲/۲۳	۶/۰۷	۰/۵۶	۴۰/۱۰	۱/۶۶
نی	۴۳/۷۳	۶/۳۸	۱/۱۳	۴۲/۸۹	۱/۴۷
باگاس	۴۴/۲۱	۶/۴۶	۰/۳۶	۴۳/۶۶	۱/۶۰
پیت باگاس	۲۹/۲۰	۴	۰/۶۰	۳۵/۷۰	۰/۳۰
ساقه برنج	۳۷/۶۰	۵/۶۶	۰/۸۲	۳۹/۴۰	۱/۹۲
ساقه پنبه	۴۳/۶۴	۶/۳۹	۱/۲۷	۴۱/۸۵	۱/۲۲
ساقه ذرت	۴۳/۵۰	۶/۶۰	۱	۴۳/۲۴	۱/۵۳
برگ و ساقه ذرت	۴۳/۲۱	۶/۴۸	۱/۲۳	۴۳/۹۷	۱/۶۵

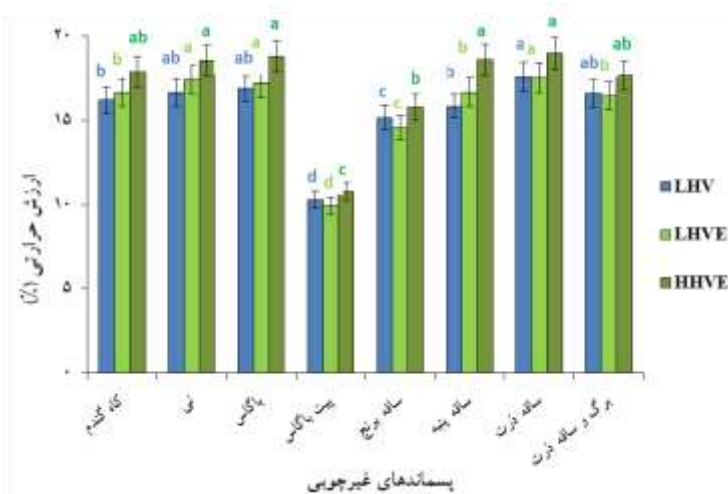


مطلوب‌ترند. در شکل ۴ مقایسه میانگین نتایج به‌دست آمده به روش محاسباتی و نیز مستقیم که با بمب کالریمتری اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. مقایسه آماری نتایج به‌دست آمده مربوط به ارزش حرارتی نشان داد که بین میانگین ارزش حرارتی ناخالص و خالص محاسباتی ۸ پسماند مورد بررسی اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد وجود دارد. همچنین مقایسه میانگین ارزش حرارتی خالص به‌دست آمده با دو روش محاسباتی و مستقیم با آزمون t نشان داد که بین دو روش اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. همبستگی بین دو روش مستقیم و محاسباتی ارزش حرارتی خالص ۸ پسماند نشان داد که ضریب همبستگی بین این دو روش زیاد بوده ( $R^2=0.96$ ) و مقادیر تفاوت داده‌ها در دو روش مورد استفاده در سطح کاملاً قابل قبولی است ( $p<0.01$ ). بیشترین میانگین ارزش حرارتی خالص و ناخالص به‌ترتیب مربوط به ساقه ذرت و باگاس (گروه a) و کمترین ارزش حرارتی به ترتیب به پیت باگاس و ساقه برنج (گروه c و d) تعلق دارد. ارزش ناخالص حرارتی ساقه ذرت و باگاس در محدوده ارزش حرارتی چوب می‌باشد [۲۷]. در مجموع، برخی از نتایج به‌دست آمده با نتایج Jenkins و همکاران (۱۹۹۸) و نیز Singh همکاران (۲۰۱۳) مشابهت دارد [۳]، [۲۴]. Jones و همکاران (۲۰۱۴) علل اختلاف بین نتایج بررسی پارامترهای پسماندهای مختلف را شامل زمان برداشت، منطقه جغرافیایی، میزان کوددهی و مدت زمان نگهداری می‌دانند [۲۸].

برای تولید انرژی از زیست‌توده، مقدار زیادتر کربن و هیدروژن ارجح‌تر و برعکس مقدار کمتر نیتروژن و گوگرد مناسب‌تر است. پسماند گیاهان زراعی به دلیل کوددهی معمولاً دارای درصد نیتروژن و گوگرد زیادی می‌باشند. از نظر آلاینده‌گی، مقدار گوگرد و نیتروژن پسماندها که معمولاً به صورت گازهای  $NO_x$  و  $SO_2$  از محل گازهای خروجی مولدهای انرژی خارج می‌شود، اهمیت دارد که البته با استفاده از فیلترهای جاذب این نوع گازها، می‌توان مقدار این آلاینده‌ها را کاهش داد [۲۵]. بیشترین درصد گوگرد مربوط به ساقه برنج می‌باشد که علت آن می‌تواند استفاده از کودهای حاوی گوگرد و اوره باشد و در مقایسه با سایر زیست‌توده‌های گزارش شده توسط محققین [۱۶] بیشتر است. مقدار گوگرد تعیین شده برای ۸ پسماند نسبت به سایر منابع [۳، ۲۶] بیشتر است که نشان‌دهنده استفاده بیش از حد استاندارد کودها برای کشاورزی می‌باشد. بیشترین مقدار گوگرد مربوط به ساقه برنج می‌باشد که به‌عنوان یک عامل منفی در افزایش آلاینده‌گی حاصل از سوزاندن آن مطرح است. Paasen و همکاران (۲۰۰۶) معتقدند که به‌دلیل کم‌بودن هزینه هر تن پسماندهای غیرچوبی نسبت به چوب (۱۹ یورو در برابر ۵۰ یورو) حتی با به کارگیری سیستم‌های تصفیه هوا، هزینه‌های تولید انرژی باز هم معقول است [۴].

### ارزش حرارتی

به‌علت لزوم بالا بودن کارایی و بازده انرژی در همه مبدل‌های حرارتی، سوخت‌های با ارزش حرارتی بیشتر



شکل ۴- مقایسه میانگین ارزش حرارتی مستقیم و محاسباتی پسماندهای غیرچوبی

## نتیجه‌گیری

- مقدار گوگرد تعیین شده و بعضاً نیتروژن برای ۸ پسماند مورد بررسی نسبت به سایر منابع بیشتر است که نشان‌دهنده استفاده بیش از حد استاندارد کودهای شیمیایی برای کشاورزی می‌باشد و عاملی محدودکننده از نظر آلودگی محیط زیست و خوردگی مبدل‌های حرارتی (درمورد گوگرد) است. بنابراین اصلاح عملیات کشاورزی و نیز شستشوی پسماندها در راستای تولید انرژی از آنها توصیه می‌شود.

- مقایسه آماری بین دو روش محاسباتی و مستقیم برای تعیین ارزش حرارتی خالص پسماندهای مورد بررسی نشان داد که روش محاسباتی با استفاده از مدل ارایه شده توسط Boundy و همکاران (۲۰۱۱) دارای دقت لازم برای مطالعات بعدی می‌باشد.

- به دلیل افزایش کارایی مبدل‌های حرارتی، استفاده از پسماندهای کشاورزی بدون کاربری برای تولید انرژی، با انجام عملیات فشرده‌سازی (به شکل حبه یا بریکت) و به صورت تلفیقی در مناطق روستایی و نیز صنایع محلی توصیه می‌شود.

- درصد زیاد خاکستر و ارزش حرارتی کم در پیت باگاس، لزوم استفاده از آن را به صورت اختلاط با باگاس به منظور افزایش بهره‌وری مبدل حرارتی ایجاب می‌کند.

- باتوجه به درصد مواد فرار، باگاس و نی به منظور تولید انرژی به روش گازی‌سازی نسبت به بقیه پسماندها در اولویت هستند.

## منابع

- [1] Kazemi, M., 2014. The environment and renewable energy of biomass and the application of Co-Firing technology in producing energy. The Iranian National Conference on Environment and Energy, 5 p.
- [2] SATBA, 2016. Energy Efficiency Organization of Iran, 4th report. Biomass energy, 33 p.
- [3] Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles, Jr., T.R., C. and Miles, T.R., 1998. Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology 54: 17-46.
- [4] Paasen, V., Cieplik, M.K. and Phokawat, N.P., 2006. Gasification of non-woody biomass, Economic and technical perspectives of chlorine and sulphur removal from product gas. Energy research center of the Netherland, ECN-E-06-032, 54 p.
- [5] Seifert, T., 2013. Bioenergy from Wood, Sustainable Production in the Tropics, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 269p.
- [6] Stahl, R., Henrich, E., Gehrman, H.J., S. Vodegel, M. Koch, 2004. Definition of a standard biomass, Integrated Project Sustainable energy systems, 14 p.
- [7] Kratky L. and Jirout T., 2011. Biomass size reduction machines for enhancing biogas production. Chemical Engineering & Technology, 34(3): 391-399.
- [8] Schuck, S., 2006. Biomass as an energy source, International Journal of Environmental Studies 63:823-835.
- [9] Munalula F. and Meincken M., 2009. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. Biomass Bioenergy, 33:415-420.
- [10] Strauss, W. and Walker, S., 2018. Forecasting Industrial Wood Pellet Prices – A new model for calculating future prices, FutureMetrics, Intelligent Analysis, Operations Guidance, and Strategic Leadership for the Pellet Sector, 13 p.
- [11] Wondifraw, D., 2010. Air drying of wood chips and logs under shelter and outside in Western cape. Honours report, Department of Forest and Wood Science, Stellenbosch University, Stellenbosch.

- [12] Bioenergy Association of New Zealand (BANZ), 2010. Wood Fuel Classification Guidelines, Version 5, New Zealand, 31p.
- [13] Haygreen, J.G. and Bowyer, J.L., 2007. Forest products and wood science: an introduction. Iowa State Press, Ames.
- [14] Novaes, E, Kirst, M, Chiang, V, Winter-Sederoff H. and Sederoff R., 2010. Lignin and biomass: a negative correlation for wood formation and lignin content in trees. *Plant Physiology*, 154: 555–561.
- [15] Boundy, B., Diegel, S. W., Wright, L. and Davis, S. C., 2011. Biomass Energy Data Book, Office of the biomass program energy efficiency and renewable energy U.S. department of energy, Roltek, Inc., USA, 254 p., <http://cta.ornl.gov/bedb>.
- [16] Demirbas, A., 2010. Biorefineries for biomass upgrading facility. Springer-verlag., Germany.
- [17] Hughes, S.R., Gibbons, W. and Kohl, S., 2010. Biomass to biofuels: strategies for global industries, Chapter 4, advanced biorefineries for the production of fuel ethanol, 559 p.
- [18] Adekugbe, A., 2012. Determination of heating value of five economic tree residues as fuel for biomass heating system, *Nature and Science*, 10(10): 26-29.
- [19] Sugumaran, P. and Seshadri, S., 2009. Evaluation of selected biomass for charcoal production. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 68: 719-723.
- [20] Llorente Fernandez, M.J., Laplaza Murillo, J.M., Cuadrado Escalda, R. and Garcia Garrasco, J.E., 2006. Ash behaviour of lignocellulosic biomass in bubbling fluidised bed combustion, *Fuel*, 85: 1157-1165.
- [21] Hiltunen, M., Barisic, V. and Coda Zabetta, E., 2008. Combustion of different types of biomass in CFB boilers, 16th European conference, Valencia, Spain, 6p.
- [22] Toscano, G. and Corinaldesi, F., 2010. Ash fusibility characteristics of some biomass feedstocks and examination of the effects of inorganic additives. *Journal of Agricultural Engineering*, 41(2):13-19.
- [23] Karlen, D. L., 2014. Cellulosic energy cropping systems, John Wiley & Sons, Ltd, 400p.
- [24] Singh, H., Kumar Sapra, P. and Singh Sidhu, B., 2013. Evaluation and characterization of different biomass residues through proximate and ultimate analysis and heating value. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, 2(2): 6-10.
- [25] Rafaj, P. and Amann, M., 2018. Decomposing Air Pollutant Emissions in Asia: Determinants and Projections. *Energies journal*, 11(5):1299-1313.
- [26] Parikha, J., Channiwala, S.A. and Ghosal, G.K., 2005. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels, *Fuel*, 84(5):487-494.
- [27] Rosendahl, L., 2013. Biomass Combustion Science, Technology, Woodhead Publishing Limited, 315 p.
- [28] Jones, J.M., Lea-Langton, A.R., Ma, L., Pourkashanian, M. and Williams, A., 2014. Pollutants Generated by the Combustion of Solid Biomass Fuels, 109 p.

## Comparison of non-woody biomass properties for energy generation

### Abstract

The determination of heating value is one of the most important properties of biomass fuels to calculate the design or simulation of thermal conversion systems for energy production from biomass. Biomass with higher thermal energy value and optimal composition is more desirable for the systems. In present investigation, properties of eight types of non-woody biomass relevant to combustion were evaluated. Important characteristics requiring analysis were moisture and ash content, volatile matter, elemental composition (C, H, N, S, and O), high and low heating values (HHV and LHV) of these residues. The heating value has been evaluated based on experimental (by calorimeter bomb) and computational methods. The content of sulfur is a limiting factor for environmental pollution and was higher than other reports. The high percentage of ash in bagasse Pith requires the use of it as mixing with bagasse in order to increase the efficiency of the energy production system. It is recommended to mix bagasse pith with bagasse due to the high amount of ash in order to increase the efficiency of energy conversion systems. Regarding to the volatile matter, bagasse and reed are superior to the rest of biomass to produce energy by gasification system. The highest heating values were obtained for corn straw and bagasse and the lowest heating values were for bagasse pith and rice straw, respectively. There is good correlation between the methods of heating value determination, so it shows that the proper computational model has been used.

**Keywords:** biomass, moisture content, ash, volatile matter, fixed carbon, heating value.

**S. Mahdavi<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Associate prof., Wood and Forest Products Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO). Tehran, Iran

Corresponding author:  
[smahdavi@rifr-ac.ir](mailto:smahdavi@rifr-ac.ir)

Received: 2019/07/11  
Accepted: 2019/08/27